



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ERICK MÁRCIO DE OLIVEIRA PEREIRA

**MAPEAMENTO DE ÍNDICES GEOQUÍMICOS PARA DETECÇÃO DE
CONTAMINAÇÕES AMBIENTAIS POR METAIS PESADOS E FÓSFORO NA
REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG**

FORTALEZA

2025

ERICK MÁRCIO DE OLIVEIRA PEREIRA

MAPEAMENTO DE ÍNDICES GEOQUÍMICOS PARA DETECÇÃO DE
CONTAMINAÇÕES AMBIENTAIS POR METAIS PESADOS E FÓSFORO NA
REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós Graduação em
Geologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título Mestre em Geologia:
Área de Concentração Geologia
Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dra Ana Rita
Gonçalves Neves Lopes Salgueiro

Co-orientador: Geol. Dr. Eduardo
Duarte Marques

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P49m Pereira, Erick Márcio de Oliveira.

Mapeamento de índices geoquímicos para detecção de contaminações ambientais por metais pesados e fósforo na região do Quadrilátero Ferrífero - MG / Erick Márcio de Oliveira Pereira. – 2025.

147 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Me. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.

Coorientação: Prof. Dr. Eduardo Duarte Marques.

1. Índices Geoquímicos. 2. Avaliação Ambiental. 3. Quadrilátero Ferrífero. I. Título.

CDD 551

ERICK MÁRCIO DE OLIVEIRA PEREIRA

MAPEAMENTO DE ÍNDICES GEOQUÍMICOS PARA DETECÇÃO DE
CONTAMINAÇÕES AMBIENTAIS POR METAIS PESADOS E FÓSFORO NA
REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós Graduação em
Geologia da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em
Geologia: Área de Concentração
Geologia Ambiental e Recursos
Hídricos

Aprovada em: 20/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Geol. Dr. Eduardo Duarte Marques (Co-orientador)
Serviço Geológico do Brasil - SBGEO

Prof. Dra. Carla Alexandra Figueiredo Patinha (Membro Externo)
Universidade de Aveiro (UA)

Geol. Dr. Gustavo Filemon Costa Lima (Membro Externo)
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Aos nossos eternos amores e aos amores deles, que vivem em tudo que há de bom em nós e nos outros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e as boas pessoas que me guiaram e até aqui.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Geologia que me possibilitaram a obtenção desse título tão importante para minha formação pessoal, acadêmica e profissional. Agradeço também à Coordenação da Pós Graduação em nome da Prof. Cynthia que me prestou imenso auxílio durante toda a realização do Mestrado.

Agradeço à minha querida orientadora, amiga e ídolo Ana Rita Salgueiro (Ritinha) por ter me aberto os braços, igual ao Cristo Redentor, mas que diferentemente dele, me fechou em seus braços, ficando ao meu lado, orientando, aconselhando, cuidando e acolhendo acadêmica e pessoalmente. Eu me sinto honrado em ter você na minha vida e, apesar de já ter tido a chance de expressar minha imensa estima por você, sinto que nada do que fiz, ou falei, é suficientemente capaz de expressar a admiração, gratidão e o carinho imenso que tenho por você. Sou um Geólogo e ser humano infinitamente melhor e mais forte por tê-la ao meu lado, obrigado por não desistir de mim até quando eu mesmo achei que tinha desistido, obrigado por me fazer Geólogo, Mestre e uma pessoa melhor.

Agradeço ao meu Coorientador Eduardo Duarte Marques pela sua ajuda, discussões técnicas, ideias e prestatividade. Obrigado por tamanha empatia, contribuição, gentileza, competência, paciência e orientação.

Agradeço à minha banca por aceitar contribuir com o trabalho e consequentemente com a minha formação. Ao Gustavo Filemon um amigo querido no qual me espelho como profissional, pesquisador e ser humano e que agora tenho o prazer em tê-lo na minha banca. À professora Carla Alexandra de Figueiredo Patinha, da Universidade de Aveiro em Portugal, pela bondade em aceitar contribuir com o meu trabalho, é uma honra e privilégio ter uma pesquisadora do seu porte e com seu conhecimento na construção desse trabalho, por isso e tudo o resto, obrigado!

Agradeço à minha família maravilhosa, minha raiz e base. Em especial aqueles que nunca soltaram a minha mão e estiveram comigo nos piores momentos dessa jornada chamada vida. À minha mãe Eva pelo carinho e parceria, ao meu pai Márcio pela direção e abrigo, aos meus avós Carmelita, Maria e Adão pela sabedoria e cuidado, aos meus irmãos Bruno e Joel pela força e alegria emanada, à

minha cunhada Rafaele, aos meus sobrinhos Iago, Davi, Liz e Adriel pelos sorrisos e carinho doado, eu amo muito vocês todos!

Obrigado também à família que eu escolhi, aos meus amigos queridos que têm todo o meu amor. À Jéssica Faria minha pessoa da vida e terapeuta nas horas vagas, ao Carlos Victor meu parceiro de alegria, tristeza e trabalhos geológicos. À Adriana, Bruna e Marina minha família de outra família, que estão sempre comigo e torcendo por mim. Ao Joel Lima, Narjara, Isaac, Iago amigos especiais que me apoiaram ao longo do curso de mestrado. Además meus amigos, Fábio Garofo, Jérsica Bezerra, Marcelo Mendonça, Marisa, Dácia, Sara, Jéssica Cardoso, Marcus Venicius, Cláudia Estefani, Ian Cerdeira, Marina, Léo e ao Ramon e a Rafaele pela ajuda durante todo esse período da minha vida, seja no viés acadêmico, pessoal e ou profissional.

Aos meus companheiros do trabalho que em diferentes ciclos, continuados ou não, tiveram papel importante no início e ou finalização do meu mestrado. Ao Frank, Freire, Teomar e ao Cleverton da SEMACE, ao Carlos Carvalho, Pâmela e a Lídia da DAPAZ e por fim, a leader Janaína e a toda a equipe da LWUD, desde sócios a colegas de equipe que finalizam esse ciclo comigo.

Agradeço também a mim pela resiliência, foram 3 anos, 3 empregos, 3 cidades, muitas mudanças e adaptações ao longo desse tempo, a saúde física e emocional cobrando seu preço pela carga grande de atividades, mas graças às palavras de pessoas queridas que se importam e acreditam em mim, eu venci, nós vencemos.

A todos os demais que direta ou indiretamente, citados ou não contribuíram com esse trabalho e com a construção de quem eu sou, gratidão de coração a todos vocês!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Artur Schopenhauer, 1851)

RESUMO

Os mapeamentos geoquímicos vêm sendo utilizados em diferentes países e com distintos objetivos, sendo uma ferramenta de extrema importância no que tange à identificação das características geoquímicas do ambiente. Este trabalho está locado especificamente nas folhas: Belo Horizonte (SE-23-Z-C- VI), Igarapé (SF-23-X-A-III) e Ouro Preto (SF-23-A-II) totalizando uma área de 8.700Km². O objetivo geral dessa pesquisa, está na produção de índices ambientais diversos para 7 elementos, com toxicidade ambiental e humana, são eles: Arsênio, Cádmio, Cromo, Chumbo, Níquel, Zinco e Fósforo. Foram utilizadas 589 amostras de sedimentos ativos de corrente coletadas durante projeto “Geoquímica do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno” efetuado pela SBGEO – Serviço Geológico do Brasil. O tratamento dos dados foi feito a partir de técnicas de estatística descritiva univariada e a os dados foram separados, de acordo com suas localizações por unidade geológica. Como resultado foram produzidos, 21 mapas para fatores de enriquecimento com diferentes normalizadores, 7 mapas do fator de contaminação, 3 mapas para índice de risco potencial ecológico e 3 de grau de contaminação modificado, comparando-os com valores de *backgrounds* regionais e globais já conhecidos. Concluiu-se que na região estudada os normalizadores utilizados, possuem eficiências diferentes, alterados por fatores de origem principalmente geogênica. Quando comparado às médias globais e regionais os valores apresentam várias anomalias discutíveis, pois não correspondem à realidade das concentrações geoquímicas do Quadrilátero Ferrífero. Os melhores resultados são apresentados quando analisados com base em seus *backgrounds* locais, calculados a partir de suas unidades geológicas.

Palavras-chave: índices geoquímicos; avaliação ambiental; Quadrilátero Ferrífero

ABSTRACT

Geochemical mapping has been employed in various countries with diverse objectives, serving as a critical tool for identifying the geochemical characteristics of the environment. This study focuses specifically on the following map sheets: Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI), Igarapé (SF-23-X-A-III), and Ouro Preto (SF-23-A-II), encompassing a total area of 8,700 km². The main objective of this research is to generate environmental indices for seven elements with high environmental and human toxicity. A total of 589 active stream sediment samples were analyzed, collected during the "Geochemistry of the Quadrilateral Ferriferous and Its Surroundings" project conducted by SBGEO – Geological Survey of Brazil. The data was processed using univariate descriptive statistical techniques and categorized by their geological unit, based on sample locations. The study produced 21 enrichment factor maps with different normalizers, 7 contamination factor maps 3 maps for ecological potential risk index and 3 maps for modified contamination degree, all compared to known regional and global *background* values. The results indicate that the efficiency of the applied normalizers varies according to used chemical elements, influenced mainly by geogenic factors. When compared to global or regional averages, the values reveal numerous anomalies that are questionable, as they do not reflect the actual geochemical concentrations of the Quadrilateral Ferriferous. Consequently, these comparisons yield unsatisfactory information for the region. Better results were achieved when analyses were based on local *background* values calculated from the geological units of the study area.

Keywords: geochemical indices; environmental assessment; Iron Quadrangle

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Localização da área do Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno Destaque em vermelho para as folhas SE-23-Z-C- VI, SF-23-X-A-III e SF-23-A-II que compõem a área de estudo, tais quais: Belo horizonte, Ouro Preto e Igarapé.....	23
Figura 2 – Mapa das Zonas Climáticas da Área de Estudo.....	25
Figura 3 – Mapa Geomorfológico da Área de Estudo.....	27
Figura 4 – Mapa Pedológico da Área de Estudo.....	29
Figura 5 – Mapa de Bacias Hidrográficas da Área de Estudo.....	31
Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	33
Figura 7 – Mapa Geológico da Área de Estudo.....	34
Figura 8 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo atual - (Ano Base 2022).....	39
Figura 9 – Mapa das Unidades de Conservação na área de estudo.....	44
Figura 10 – Mapa da distribuição das amostras de sedimentos coletadas na área de estudo.....	57
Figura 11 – Esquema Metodológico Geral.....	69
Figura 12 – Mapas de Evolução Uso e Ocupação do Solo - (1990-1995-2000).....	72
Figura 13 – Mapas de Evolução Uso e Ocupação do Solo - (2005-2010).....	73
Figura 14 – Fator de Enriquecimento do Arsênio com diferentes normalizadores.....	77
Figura 15 – Fator de Enriquecimento do Cádmio com diferentes normalizadores.....	80
Figura 16 – Fator de Enriquecimento do Chumbo com diferentes normalizadores.....	83
Figura 17 – Fator de Enriquecimento do Cromo com diferentes normalizadores.....	86
Figura 18 – Fator de Enriquecimento do Níquel com diferentes normalizadores.....	89
Figura 19 – Fator de Enriquecimento do Zinco com diferentes normalizadores.....	92
Figura 20 – Fator de Enriquecimento do Fósforo com diferentes normalizadores.....	95

Figura 21 – Mapa do Fator de Contaminação do Arsênio.....	97
Figura 22 – Mapa do Fator de Contaminação para Cádmiio.....	99
Figura 23 – Mapa do Fator de Contaminação para Cromo.....	101
Figura 24 – Mapa do Fator de Contaminação para Chumbo.....	103
Figura 25 – Mapa do Fator de Contaminação para Níquel.....	105
Figura 26 – Mapa do Fator de Contaminação para Zinco.....	107
Figura 27 – Mapa do Fator de Contaminação para Fósforo.....	109
Figura 28 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Arsênio.....	111
Figura 29 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Cádmiio.....	112
Figura 30 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Cromo.....	114
Figura 31 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Chumbo.....	116
Figura 32 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Níquel.....	118
Figura 33 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Zinco.....	120
Figura 34 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Fósforo.....	121
Figura 35 – Comparação do Grau de Contaminação Modificado com diferentes valores de Base - (Unidade Geológicas x UCC x ATP).....	125
Figura 36 – Comparação do Índice de Risco Ecológico Potencial com diferentes valores de Base - (Unidades Geológicas x UCC x ATP).....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Relação das unidades de conservação na área de estudo.....	43
Tabela 2 –	Comparação do background UCC, ATP e com a litologias do QF.....	48
Tabela 3 –	Elementos analisados e seus limites de detecção.....	55
Tabela 4 –	Sumário Estatístico dos dados Log Transformados.....	59
Tabela 5 –	Categorias para enquadramento do EF.....	64
Tabela 6 –	Classificação do Índice de Geoacumulação.....	65
Tabela 7 –	Classificação do Fator de Contaminação.....	65
Tabela 8 –	Classificação do Grau de Contaminação Modificado.....	66
Tabela 9 –	Classificação de Risco conforme o Índice de Risco Ecológico Potencial.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição de valores do FE para Arsênio nos diferentes normalizadores.....	76
Gráfico 2 – Distribuição de valores do FE para Cádmió nos diferentes normalizadores.....	79
Gráfico 3 – Distribuição de valores do FE para Chumbo nos diferentes normalizadores.....	82
Gráfico 4 – Distribuição de valores do FE para Cromo nos diferentes normalizadores.....	85
Gráfico 5 – Distribuição de valores do FE para Níquel nos diferentes normalizadores.....	88
Gráfico 6 – Distribuição de valores do FE para Zinco nos diferentes normalizadores.....	91
Gráfico 7 – Distribuição de valores do FE para Fósforo nos diferentes normalizadores.....	93
Gráfico 8 – Distribuição dos valores de GCM nos diferentes tipos de background.....	123
Gráfico 9 – Distribuição dos valores de IREP nos diferentes tipos de background.....	127



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEGEO	Departamento de Geologia
DIGEOQ	Divisão de Geoquímica
MG	Minas Gerais
QF	Quadrilátero Ferrífero
PMQF	Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SUREG	Superintendência Regional
UFC	Universidade Federal do Ceará
BA	Complexo Bação
BN	Complexo Bonfim
BH	Complexo Belo Horizonte
SGRV	Supergrupo Rio das Velhas
SGM	Supergrupo Minas
GP	Grupo Piracicaba
UCC	Upper Crust Continental (Concentração Média da Crosta)
ATP	Área Total do Projeto
CSF	Cratón São Francisco
ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado
ICP-OES	Emissão óptica com plasma indutivamente acoplado
MAD	Median Absolute Deviation (Desvio Absoluto da Mediana)
SBGEO	Serviço Geológico do Brasil
UC	Unidade de Conservação
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Apresentação	18
1.2	Enquadramento e justificativa	19
1.3	Objetivos	21
2	CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL	22
2.1	Localização da Área de Estudo	22
2.2	Clima	24
2.3	Geomorfologia	26
2.4	Pedologia	28
2.5	Hidrografia	30
2.6	Geologia	32
2.7	Uso do Solo	39
2.8	Unidades de Conservação	41
3	MAPEAMENTO E INDÍCES GEOQUÍMICOS	44
3.1	Mapeamento Geoquímico e o Projeto Quadrilátero Ferrífero	44
3.2	Sedimentos Ativos de Corrente e Cálculo dos <i>Backgrounds</i>	45
3.3.	Metais Pesados e Fósforo: Fontes e Efeitos	48
3.4	Avaliação Ambiental e <i>Backgrounds</i>	52
4	MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1	Obtenção dos Dados	54
4.2	Seleção e Tratamento dos Dados	57
4.3	Análise Temporal de Uso e Ocupação do Solo	61
4.4	Cálculo dos Índices Geoquímicos	63
4.3.1	<i>Fator de Enriquecimento (EF)</i>	63
4.3.2	<i>Índice de Geoacumulação (Igeo)</i>	64
4.3.3	<i>Fator de Contaminação (Cf)</i>	65
4.3.4	<i>Grau de Contaminação Modificado</i>	65
4.3.5	<i>Índice de Risco Ecológico Potencial (PERI)</i>	67
4.5	Elaboração dos Mapas Temáticos e Geoquímicos	68
4.6	Esquema Metodológico Geral	69
5	RESULTADOS	69
5.1	Evolução Temporal do Uso e Ocupação do Solo (1990 à 2010)	70

5.2	Índices Unielementares	74
5.2.1	<i>Fator de Enriquecimento e Normalizados (Al), (Fe+Mn) e (Ca+ Mg)</i>.....	74
5.2.1.1	<i>Arsênio</i>	75
5.2.1.2	<i>Cádmio.....</i>	78
5.2.1.3	<i>Chumbo.....</i>	81
5.2.1.4	<i>Cromo.....</i>	84
5.2.1.5	<i>Níquel.....</i>	87
5.2.1.6	<i>Zinco.....</i>	90
5.2.1.7	<i>Fósforo</i>	93
5.2.2	<i>Fator de Contaminação.....</i>	96
5.2.2.1	<i>Arsênio</i>	96
5.2.2.2	<i>Cádmio.....</i>	98
5.2.2.3	<i>Cromo.....</i>	99
5.2.2.4	<i>Chumbo.....</i>	101
5.2.2.5	<i>Níquel.....</i>	103
5.2.2.6	<i>Zinco.....</i>	105
5.2.2.7	<i>Fósforo</i>	107
5.2.3	<i>Índice de Geoacumulação</i>	109
5.2.3.1	<i>Arsênio</i>	109
5.2.3.2	<i>Cádmio.....</i>	111
5.2.3.3	<i>Cromo.....</i>	113
5.2.3.4	<i>Chumbo.....</i>	114
5.2.3.5	<i>Níquel.....</i>	116
5.2.3.6	<i>Zinco.....</i>	118
5.2.3.7	<i>Fósforo</i>	120
5.3	Índices Multielementares.....	122
5.3.1	<i>Grau de Contaminação Modificado</i>	122
5.3.2	<i>Índice de Risco Ecológico Potencial</i>	126
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
	REFERÊNCIAS.....	131
	APÊNDICE A – MAPA GEOQUÍMICOS DOS ELEMENTOS.....	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Esta atividade objetiva o cumprimento das normas curriculares do Programa de Pós Graduação em Geologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, visando à obtenção do título de Mestre em Geologia, cuja área de concentração Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

O trabalho foi desenvolvido por Erick Márcio de Oliveira Pereira aluno do Programa de Pós Graduação em Geologia, com orientação da Profa. Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro vinculada ao corpo docente do Departamento de Geologia e do Programa em Pós Graduação em Geologia da UFC e do senhor Dr. Eduardo Duarte Marques, Geólogo pesquisador do quadro funcional da SGB (Serviço Geológico do Brasil) vinculado a Superintendência de Belo Horizonte (SUREG-BH) da divisão de geoquímica (DIGEOQ). Este estudo geológico teve como linha de pesquisa a área de Geoquímica Ambiental.

O trabalho científico que será apresentado foi embasado em dados pré-existentes de mapeamentos geoquímicos realizados na região do Quadrilátero Ferrífero que foram manipulados e tratados a partir da aplicação de técnicas e fórmulas quantitativas para a obtenção de índices ambientais e de enriquecimento elementar, com ressaltado para a avaliação de metais pesados Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr) Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn).

Ademais para este estudo foi analisado também o Fósforo (P) por sua relevância no que tange o rastreamento de possíveis contaminações de origem agrícolas e domésticas. O trabalho foi realizado no município de Belo Horizonte - MG e adjacências, especificamente nas cidades pertencentes as folhas Igarapé, Ouro Preto e Belo Horizonte localizadas na macrorregião do Quadrilátero Ferrífero (QF).

1.2 Enquadramento e justificativa

A superfície terrestre é palco de contínuas, dinâmicas e diversas interações e reações químicas, seja por processos naturais ou antrópicos vinculados ao processo de industrialização ou aos diferentes tipos de uso e ocupação do solo. Com isso em vista, é imprescindível a compreensão das causas, origens e o mapeamento dessas interações químicas que ocorrem nas diversas matrizes ambientais, tais como: solo, água, ar e nos chamados sedimentos ativo de corrente.

Uma das ferramentas mais utilizadas para compreensão da problemática apresentada são os mapeamentos geoquímicos que podem ser realizados através de diversas matrizes ambientais. Para a realização deste trabalho a matriz amostral escolhida foi a de sedimentos ativo de corrente.

De acordo com Vicq (2015), os sedimentos são componentes fundamentais em estudos ambientais, pois além de caracterizarem-se como depósitos geoquímicos de metais, controlam também a disponibilidade e o transporte destas substâncias para a hidrosfera, atmosfera e biota.

Os sedimentos ativos de correntes possibilitam a investigação de variações elementares em diferentes drenagens, que sofrem influência de diferentes unidades geológicas (Bilinski e Sakan, 2021). É muito útil para trabalhos preliminares de pesquisa e exploração, principalmente em áreas extensas e com contextos geológicos pouco estudados ou desconhecidos, mapeando zonas de potencial mineral e econômico.

No que se refere ao contexto ambiental, a tendência de adsorção dos metais pesados e outras substâncias aos sedimentos finos e óxidos de Fe e Mn, caracterizados em resultados de análises geoquímicas, faz, portanto, dos sedimentos uma importante fonte de avaliação de impactos de origem industrial, mineração e urbanização, no ambiente fluvial (Sarmani *et al.*, 1992).

A intensa diversificação do uso e ocupação do solo e a industrialização, que pode promover descargas de diferentes espécies químicas alóctones ao ambiente natural, pode influenciar diretamente na sua concentração e dispersão ocasionando alteração dos teores elementares naturais encontrados em uma área, neste caso o Quadrilátero Ferrífero.

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) foi escolhida para o estudo por diversos fatores, dentre eles em concordância com o que foi citado por Vicq (2015),

que se deve aos aspectos naturais e geológicos, já que é conhecido mundialmente por sua diversidade rica concentração de minérios, tais como, Ouro, Prata, Ferro, Manganês, Grafita, dentre outros. Além disso, trata-se de uma região com um imenso patrimônio Geoambiental e se constitui também como uma das áreas de maior concentração populacional do Estado de Minas Gerais, abrigando um dos maiores e mais importantes pilares econômicos do estado e do Brasil.

A área do trabalho abriga parcialmente a 3ª maior região metropolitana do país, conhecida pela sua grande população e diversidade industrial. Sendo assim, a coexistência dos aglomerados populacionais e as atividades econômicas diversas na região intensifica o conflito entre recursos naturais e o espaço geográfico. O resultado de todas essas interações torna o QF uma região de imensa relevância para a realização destes tipos de pesquisa.

No que concerne a avaliação ambiental, a seleção dos 7 elementos Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Fósforo (P), se deve, entre outros motivos, à continuidade da pesquisa realizada anteriormente para a construção de um Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), o qual havia identificado esses elementos como os mais relevantes para a área com base em seu contexto ambiental (geológico). A aplicação da análise multivariada revelou associações geoquímicas e fatores relevantes referentes a esses elementos (Pereira, 2018). Ademais, também são importantes do ponto de vista urbano industrial, já que podem ser lançados ao ambiente como resultados de diversos processos industriais. Sendo assim, por existir um histórico de informações sobre os elementos em pauta, optou-se pela sua manutenção.

A construção de uma base ambiental em contextos geoquímicos é uma tarefa desafiadora, principalmente quando se busca apresentar informações que evidenciem problemas de contaminação. A variabilidade litológica e geológica das regiões pode resultar em valores anômalos ou atípicos, quando analisados em contextos geoquímicos e antrópicos diversos. Por essas razões, é notável a necessidade de se criarem mecanismos e padronizar as técnicas de avaliação ambiental. Nesse contexto, foram desenvolvidos os índices ambientais e/ou geoquímicos, tais como: índice de contaminação, índices de geoacumulação, fator de enriquecimento, dentre outros, que são, em sua magnitude, ferramentas usadas para facilitar o processo de interpretação dos resultados geoquímicos de um ambiente, quer de fontes naturais ou antrópicas.

Por fim, a proposta desta pesquisa surge em resposta ao cenário apresentado, visando a aplicação e comparação dos índices ambientais, considerando o contexto geológico local e suas peculiaridades geológicas e ocupacionais.

1.3 Objetivos

O objetivo geral dessa pesquisa está na produção de índices geoquímicos em zonas ambientalmente suscetíveis no que concerne os valores de concentração de 7 elementos com potencialidades tóxicas conhecidas, são eles: Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Fósforo (P), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn) e o Fósforo (P) na Região das Folhas Igarapé, Ouro Preto e Belo Horizonte, na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

Destacam-se, a seguir, alguns objetivos específicos:

- i) Calcular os índices ambientais da área de estudo para os elementos tóxicos selecionados.
- ii) Realizar uma análise temporal do uso e ocupação do solo na área de estudo;
- iii) Identificar zonas potencialmente contaminadas com base nos índices geoquímicos.
- iv) Produzir cartografia dos índices geoquímicos e sua distribuição ao longo da região do trabalho.
- v) Comparar o efeito dos diferentes elementos normalizadores na concentração dos elementos alvo.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL

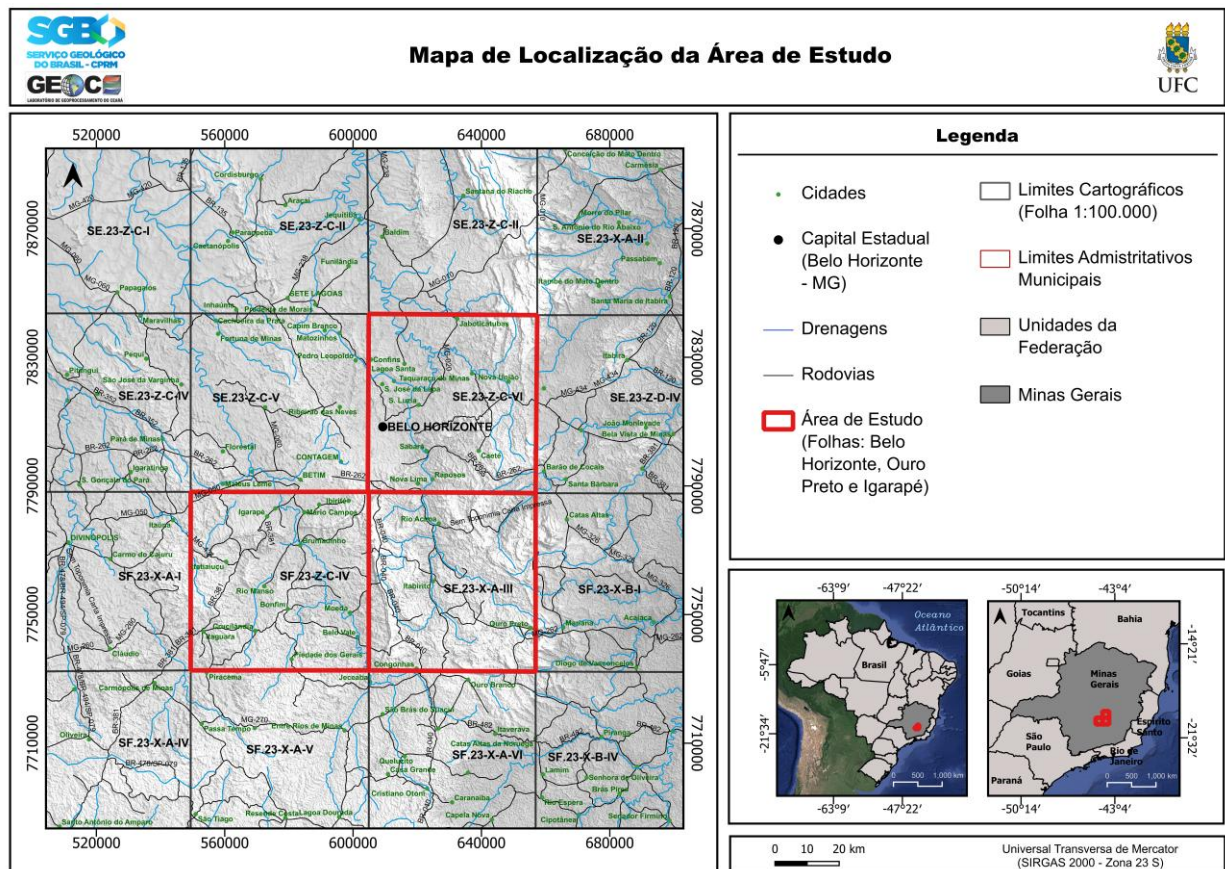
2.1 Localização da Área de Estudo

A região do Quadrilátero Ferrífero está localizada no estado de Minas Gerais, especificamente em sua região centro sul, próximo a capital Belo Horizonte e parte de sua região metropolitana. Geograficamente está limitado entre um conjunto de serras, entre elas: Serras do Espinhaço, Serra da Moeda, Serra de Ouro Preto e Serra do Curral. A região é uma província mineral de fama internacional, devido a sua relevância histórica no que diz respeito à exploração de minério de ferro e ouro. Abarcando também em seu contexto um mosaico ambiental único e vulnerável devido à sua alta especulação, tanto para atividades minerais como para grupamentos urbanos, por se tratar de uma região intensamente habitada e em forte crescimento.

O Quadrilátero Ferrífero é umas das províncias geológicas e geomorfológicas mais importantes do Brasil, tal importância fez com que esta região tenha sido objeto de vários estudos dentre eles um de grande relevância para a região, o Mapeamento Geoquímico realizado pelo Serviço Geológico do Brasil, utilizado como base para a realização deste trabalho. De acordo com Larizzatti *et al.*, (2014), o projeto “Mapeamento Geoquímico Do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno”, cobre uma área de 45.000 km² e está localizado na região centro-sul do estado de Minas Gerais, abrangendo em toda a sua extensão a região metropolitana da grande Belo Horizonte. Os limites da área foram estabelecidos de forma a incluir a Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero (PMQF), bem como regiões adjacentes do Cráton do São Francisco e da Província Geotectônica Mantiqueira.

O foco desta pesquisa está locado especificamente nas folhas: Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI), Igarapé (SF-23-X-A-III) e Ouro Preto (SF-23-A-II), as mesmas encontram-se na escala de 1:100.000, totalizando uma área de 8.700Km². É necessário ressaltar que, as folhas destacadas em vermelho nos mapas apresentados ao longo deste tópico se referem à área alvo deste trabalho, sendo, portanto, o foco das discussões. O mapa de localização regional com destaque para as folhas geológicas da área se encontra na Figura 1.

Figura 1 – Mapa de Localização da área do Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno. Destaque em vermelho para as folhas SE-23-Z-C- VI, SF-23-X-A-III e SF-23-A-II que compõem a área de estudo, tais quais: Belo horizonte, Ouro Preto e Igarapé



Fonte: BDGEX (2024)

De acordo com dados do censo de 2010 do IBGE, a região do Quadrilátero Ferrífero integra total, ou parcialmente, 35 municípios: Barão de Cocais, Belo Horizonte, Belo Vale, Betim, Brumadinho, Caeté, Catas Altas, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Ibirité, Igarapé, Itabira, Itabirito, Itatiaiaçu, Itaúna, Jeceaba, João Monlevade, Mariana, Mário Campos, Mateus Leme, Moeda, Nova Lima, Ouro Branco, Ouro Preto, Raposos, Rio Acima, Rio Manso, Rio Piracicaba, Sabará, Santa Bárbara, Santa Luzia, São Gonçalo do Rio Abaixo, São Joaquim de Bicas e Sarzedo. Realizando-se uma soma das populações desses municípios, de acordo com o Censo 2022 do IBGE, vivem na macrorregião do Quadrilátero Ferrífero aproximadamente 4.419.130 habitantes.

2.2 Clima

O clima desempenha um papel fundamental no que tange os processos geoquímicos e sua variação ao longo de um determinado espaço, atuando como agente transportador de elementos químicos provindos de fonte natural ou antrópica. Porém, somente os episódios climáticos mais novos e intensos ou antigos e muito duradouros, deixam registros geoquímicos significativos, Larizzatti *et al.*, (2014).

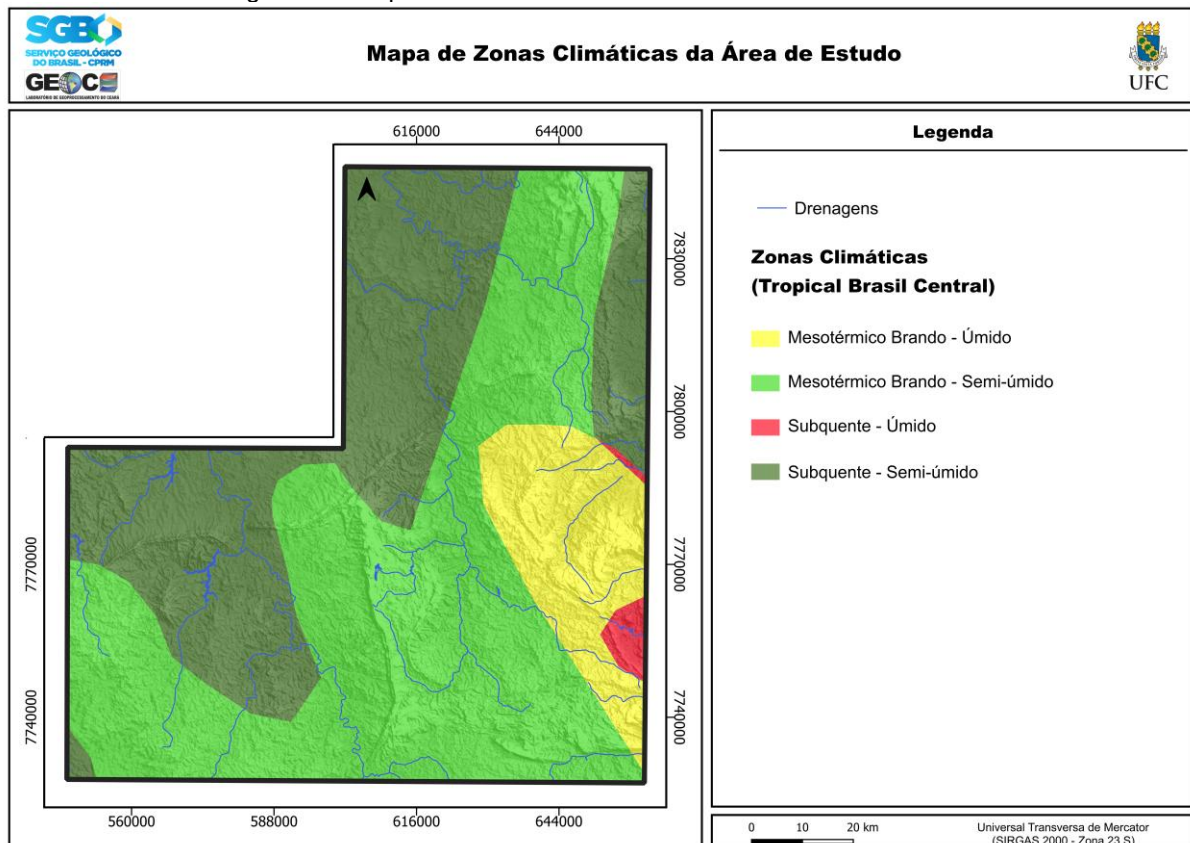
O estado de Minas Gerais, possui diferentes complexos topográficos que têm altitudes entre 76 e 2892 m, esse fator favorece o desenvolvimento de circulações de mesoescala chamadas de brisa de vale e montanha. (REBOITA *et al.*, 2015), que influenciam a direção e a intensidade do vento. As condições úmidas a barlavento das áreas montanhosas, e secas a sota-vento destas, potencializam diferentes tipos climáticos no estado. O fato de o estado não fazer fronteira com o oceano, reduz a umidade atmosférica e contribui diretamente para uma maior amplitude térmica, entre os ciclos diurno e noturno da temperatura do ar, influenciando a direção e a intensidade do vento. Além disso, áreas com maior elevação possuem temperaturas mais baixas que aquelas mais próximas ao nível médio do mar. O uso e ocupação do solo também são fatores que influenciam as temperaturas, tendo em vista que áreas florestadas tendem a usar a energia recebida do sol na evapotranspiração, enquanto áreas de solo descoberto e urbanizadas a utilizam para se aquecer, impactando diretamente a variação diurna da temperatura do ar.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger elaborado para o estado de MG, indica-se uma predominância do clima Aw, isto é, um clima tropical com inverno seco, onde se apresenta uma estação chuvosa no verão, entre os meses de novembro a abril, e um período seco no inverno, de maio a outubro, com o mês de julho sendo o mais seco Reboita *et al.* (2010). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C, e as precipitações são superiores a 750mm anuais. Entretanto, por influência das regiões de altitude elevada, o extremo sul do estado e a região entre 18°S e 43°W possuem climas Cwa que corresponde ao clima subtropical de inverno seco, que apresenta temperaturas inferiores a 18°C e verão quente com temperaturas superiores a 22°C, Reboita *et al.*, (2015).

Saindo do contexto estadual e migrando para o microclima da região do Quadrilátero Ferrífero, sabe-se que ele é afetado diretamente pelas serras que a

compõem, pois atuam como barreiras que impendem a movimentação das massas de ar, gerando pequenos núcleos morfoclimáticos regionais. A seguir será apresentado o mapa de zonas climáticas da área de estudo (Figura 2), com foco nas folhas Belo Horizonte, Ouro Preto e Igarapé.

Figura 2 – Mapa das Zonas Climáticas da Área de Estudo.



Fonte: Machado e Silva (2010)

A área de estudo é definida majoritariamente pelo clima Mesotérmico Brando –Semi Úmido, que apresenta uma distribuição equilibrada de precipitações ao longo do ano e contribui para o equilíbrio da vegetação regional que é conhecidamente de transição entre os Biomas Cerrado e Mata Atlântica, em menor porção o microclima Mesotérmico Brando – Úmido. As diferenças entre os setores Úmidos e Semiúmidos, ocorre principalmente pela intensidade de precipitação nessas porções, que nas localizações de clima semiúmido são menos intensas.

Ademais, a isso encontramos na área os microclimas Subquente Semiúmido e Úmido, sendo o primeiro mais relevante na área, basicamente o que diferencia os dois são as intensidades de chuvas e suas regularidades durante o ano, no caso da região do clima Subquente - Semiúmido temos um período seco maior e

mais definido e chuva menos regulares durante o ano.

2.3 Geomorfologia

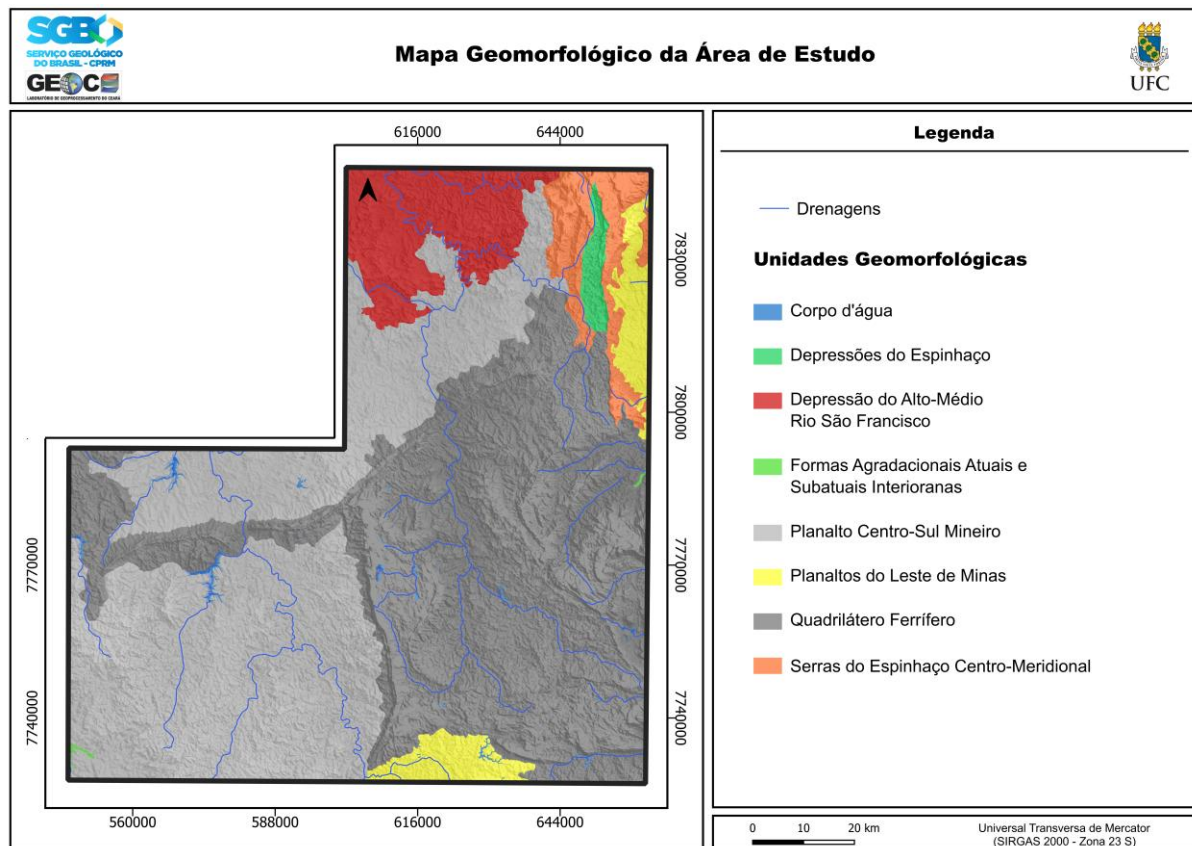
O desenvolvimento da topografia e fisiografia da região foi atribuído à conjugação entre a complexidade composicional, a granulometria, o grau de cisalhamento, o fraturamento e o isotropismo das rochas. Além das questões litoestruturais, a geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero está vinculada a uma sucessão de soerguimentos epirogenético (Door, 1969).

De acordo com Castro *et al.* (2020), as investigações foram agrupadas em: superfícies de aplainamento, erosão diferencial de longo termo, evolução de encostas e evolução de vales fluviais. O autor Varajão (2009) se propôs a elaborar uma linha lógica de construção mais simples para explicar as superfícies de aplainamento na região, de tal forma que seria sugerido para a área a classificação em 3 níveis geomorfológicos, sendo eles:

- 1º Nível: Cotas mais elevadas, geradas pelos afloramentos dos itabiritos e dos quartzitos;
- 2º Nível Cotas intermediárias, compostas por xistos e filitos, normalmente estruturadas em regiões de calhas estruturais;
- 3º Nível: Cotas baixas, compostas por rochas mais suscetíveis a erosão, majoritariamente gnaisses e migmatitos originários do embasamento.

Utilizando os diferentes níveis geomorfológicos presentes na região do Quadrilátero Ferrífero como já apresentado, foi realizada uma divisão das feições geomorfológicas na área de estudo, em unidades que se diferenciam por suas características fisiográficas, composicionais e morfológicas, portanto foi elaborado um mapa (Figura 3) caracterizando cada uma dessas unidades geomorfológicas, de acordo com Machado e Silva (2010) são elas: Depressões do Espinhaço, Depressões do Alto Médio Rio São Francisco, Planalto Centro Sul Mineiro, Planaltos do Leste de Minas, Quadrilátero Ferrífero, Serras do Espinhaço Centro Meridional e Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interioranas.

Figura 3 – Mapa Geomorfológico da Área de Estudo



Fonte: Machado e Silva (2010)

De forma sintética, caracterizaremos essas unidades a seguir:

- *Depressões do Espinhaço*: Regiões de baixa altitude localizadas no sopé das Serra do Espinhaço, sua composição se dá por sedimentos e coberturas mais recentes resultados da erosão diferencial do material geológico de unidades das cotas mais altas (Abreu *et al.*, 2021).
- *Depressões do Alto Médio Rio São Francisco*: Assim como as depressões do Espinhaço, essa unidade também possui relevos de baixa altitude e é resultado da ação fluvial, gerando assim extensas zonas de planícies e regiões de tabuleiro, caracterizada pela sedimentação e transporte, principalmente fluvial (IBGE, 2009).
- *Planalto Centro Sul Mineiro*: Região caracterizada por cotas mais elevadas, e rochas cristalinas do embasamento e um pouco mais resistentes a processos erosivos, podendo apresentar feições de morro e regiões de chapada e planícies fluviais ricas em coberturas principalmente areníticas (Souza, 2013).

- *Planalto do Leste de Minas*: Unidade geomorfológica caracterizada por altitudes mais elevadas e ocorrência de chapadas e regiões de escarpas, composicionalmente é rica em rochas de origem granítica e gnaisses, além de processos erosivos bem-marcados (IBGE, 2009).
- *Quadrilátero Ferrífero*: Trata-se de uma unidade composta por regiões montanhosa com a ação de intensos processos estruturais, que a tornaram fortemente dobrada e ondulada, regiões de alta declividade, também ocorrem escarpas e regiões de colina. É uma unidade geomorfológica internacionalmente reconhecida por seus sítios geológicos e riqueza mineral, em destaque para ouro e ferro (Bezerra, 2014). Seus sedimentos, são resultados de uma grande diversidade geológica de rochas presentes e processos estruturais que atuaram na região, além da contribuição de descarga antrópicas, devido à alta ocupação populacional da região, sendo enriquecidos em diversos elementos e minerais, dentre eles metais pesados, ouro, cobre, fósforo dentre outros. No âmbito do trabalho essa a unidade geomorfológica é mais extensa e relevante.
- *Serras do Espinhaço Centro Meridional*: A serra do espinhaço é uma grande cadeia de montanha de ocorrência interestadual. É caracterizada por possuir altitude elevadas e zonas com alta declividade, sua composição principal são, os quartzitos e os itabiritos, que ocupam grande parte das cristas presente na região de estudo, essa unidade geomorfológica também passou por intensos processos estruturais e tectônicos. (Carvalho *et al.*, 2018).
- *Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interiores*: referem-se a superfícies de relevo suavizado e aplainado, com características de modelagem recente, associadas a processos de intemperismo e erosão em regiões interiores, como áreas de planícies fluviais e tabuleiros sedimentares (Pelech *et al.*, 2019).

2.4 Pedologia

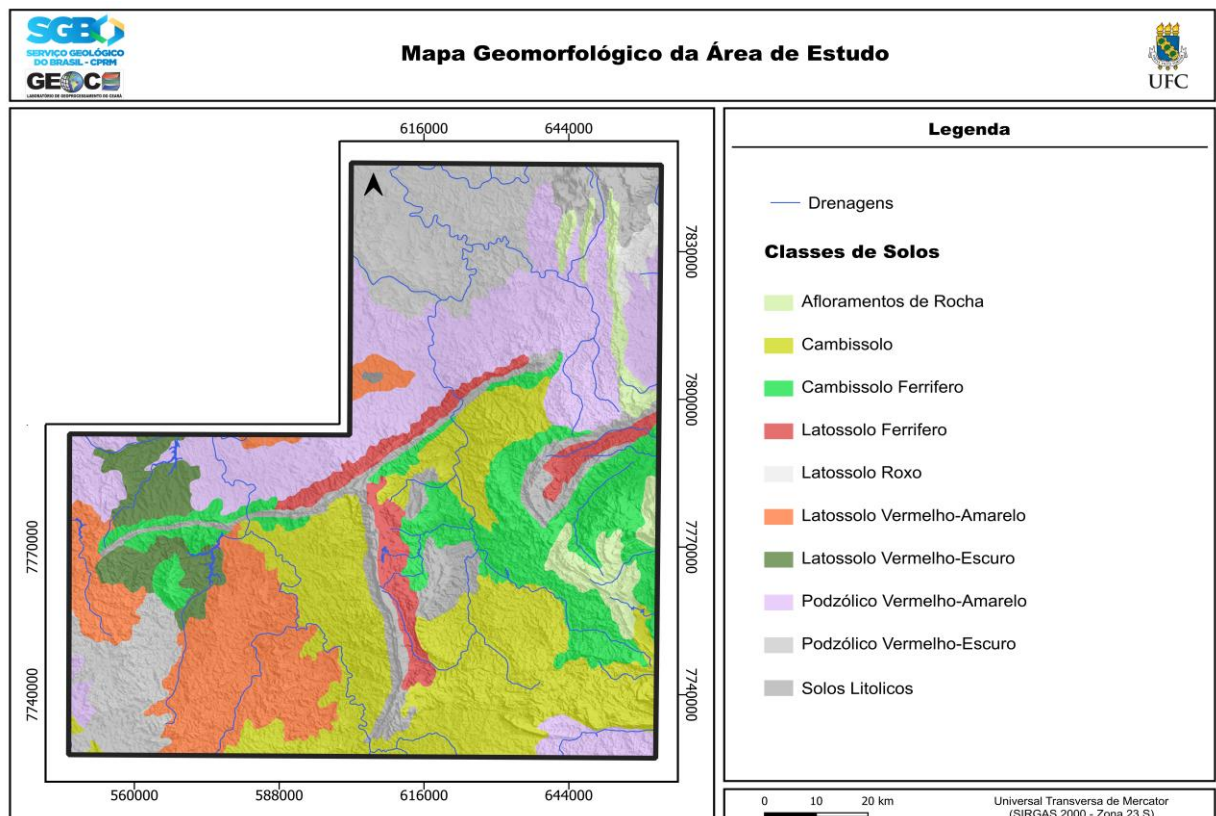
A pedogênese, processo de formação do solo, é um processo lento que tem a sua origem na transformação das rochas gerando material saprolítico. De

acordo com a Embrapa (2018) o caráter dessa transformação é determinado pelo equilíbrio de três processos principais: (1) intemperismo dos minerais, que envolve a decomposição química e física das rochas; (2) transporte de materiais dissolvidos ou em forma sólida, que move os elementos e compostos para outras áreas; e (3) autigênese, que é a formação de minerais secundários estáveis.

Os solos na região do Quadrilátero Ferrífero, são diversos e complexos, fazendo jus à sua rica geologia e processos ambientais atuantes. A formação do solo está diretamente correlacionada à produção de sedimentos dentro de um sistema, seja ele de abrangência local, ou regional, sendo sua composição e características importantes para compreensão dos processos geoquímicos atuantes em determinada região.

Objetivando caracterizar sucintamente os solos encontrados na região do trabalho, será apresentado a seguir (Figura 4), um mapa com as unidades pedológicas presentes, são elas: Cambissolos, Latossolos, Podzólico e Solos Litólicos.

Figura 4 – Mapa Pedológico da Área de Estudo



Fonte: Machado e Silva (2010)

Os solos encontrados na região serão melhor caracterizados a seguir:

- Cambissolos e Cambissolos Ferríferos: De forma geral são solos pouco desenvolvidos e com horizontes poucos delimitados e diferenciados. Possuem uma permeabilidade alta e é comum de regiões serranas. No caso dos Cambissolos Ferríferos a variação ocorre devido ao seu mais alto teor de ferro (Embrapa, 2018).
- Latossolos Vermelho, Roxo e Ferrífero: Os latossolos são conhecidos por serem solos antigos, profundos e conseqüentemente bem desenvolvidos, com horizontes diferenciados e bem-marcados, muito comuns em regiões de climas mais tropicais. Os latossolos vermelhos são ricos em óxidos de ferros e são bastante permeáveis. Os latossolos roxos são solos que se originam de rochas vulcânicas, como por exemplo o basalto, e são conhecidos por sua boa qualidade nutricional. E os latossolos ferríferos, são caracterizados por apresentarem concentrações de ferro altíssimas, maior do que as encontradas em latossolos vermelhos (Embrapa, 2018).
- Podzólicos Vermelho Escuro e Amarelo: São solos que possuem seus horizontes bem definidos e potencial agrícola alto, porém em regiões serranas e declivosas, apresentam pouca estabilidade. O que diferencia os Podzólicos Vermelho Escuro e Amarelo é basicamente o teor de óxido de ferro encontrado nesses tipos de solos (Embrapa, 2018).
- Solos Litólicos: São solos pouco desenvolvidos, ou seja, a sua formação ainda está muito próxima a rocha mãe, que o origina, sendo assim, possuem pouca profundidade, permeabilidade e fertilidade (Embrapa, 2018).

2.5 Hidrografia

A área de estudo se encontra inserida em uma região limítrofe entre duas macrossistemas hidrográficos, conforme mostra o mapa da Figura 5, são elas: a Bacia do Rio São Francisco e a Bacia do Atlântico Leste.

Manso. No território da bacia se desenvolvem atividades voltadas à agricultura e pecuária e à atividade minerária, especialmente a extração de areia nos municípios de Cachoeira da Prata e Esmeraldas, onde IGAM (2024) aponta que essa areia coletada abastece o mercado da construção civil na região metropolitana de Belo Horizonte.

Relativamente à Bacia Hidrográfica do Atlântico Leste, esta apresenta uma extensão aproximada de 388 mil km², ocupando 28% do estado de Minas Gerais, estando inserida em uma região de clima tropical apresentando uma baixa amplitude térmica. Tem como principal sub-bacia a bacia do Rio Pardo, onde a maioria dos habitantes que se usufruem desta bacia se encontram em área urbana, aproximadamente 163.674 habitantes, enquanto 68.769 se encontram em áreas rurais, possuindo importância socioeconômica para a região, mediante o abastecimento urbano, irrigação da agricultura, dessedentação animal e o uso na indústria.

2.6 Geologia

O Quadrilátero Ferrífero (QF) está localizado no extremo sul do Cráton do São Francisco (CSF) e constitui, com o Cinturão Mineiro, exposições do orógeno paleoproterozoico nessa unidade cratônica (Teixeira *et al.*, 2000). No CSF, esses terrenos paleoproterozoicos estão expostos em uma complexa associação com unidades arqueanas e bordejados por cinturões neoproterozóicos (Alkmim e Marshak, 1998).

O QF apresenta uma natureza complexa, trata-se de uma província metalogênica de aproximadamente 7.000 km², é composto por unidades geológicas de idades arqueanas e proterozóicas. De acordo com Bezerra (2014, p.51), “a região é constituída por quatro grandes unidades litoestratográficas” da base para o topo:

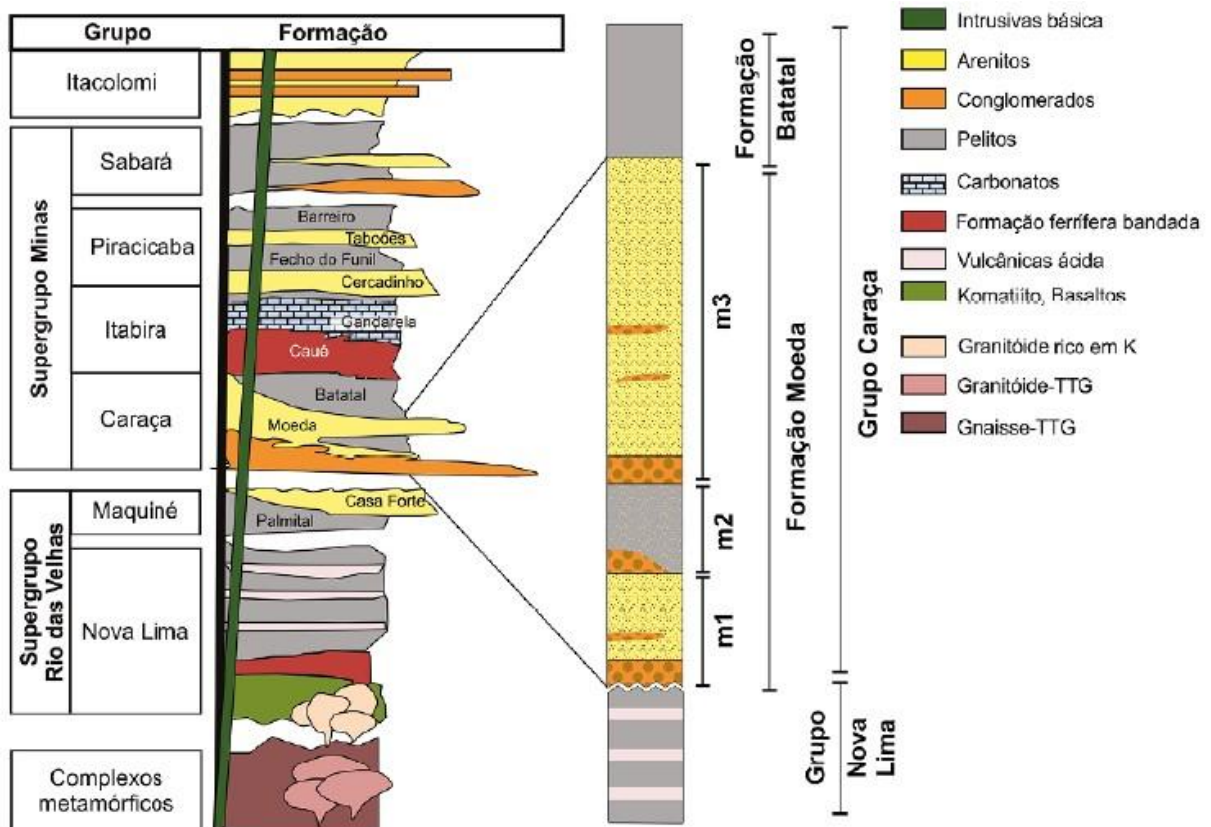
- (1) – terrenos granito-gnáissicos arqueanos;
- (2) – sequências vulcanossedimentares arqueanas;
- (3) – sequências de coberturas sedimentares e vulcanossedimentares proterozóicas;
- (4) – coberturas sedimentares recentes.

Detalhadamente são representadas da base para o topo, pelas rochas

pré-cambrianas representadas pelos complexos granito-gnáissicos metamórficos, compreendidas pelo Embasamento Cristalino, sotoposto as sequências do tipo Greenstone Belt arqueana das rochas metavulcano-sedimentares representada pelo Supergrupo Rio das Velhas, e sobre elas, têm-se espessos pacotes de rochas metassedimentares proterozóicas, que são o Supergrupo Minas e o Supergrupo Espinhaço (Bezerra, 2014), por último como sequência mais recentes, os sedimentos quartenários. De acordo com Gonçalves (2021, p.35), “todas as unidades supracitadas sofreram pelo menos dois eventos tectônico-metamórficos (Orogenias Transamazônica e Brasiliana), que foram responsáveis pela deformação e evolução metamórfica complexas dessas rochas, com exceção dos sedimentos terciários e quartenários.”

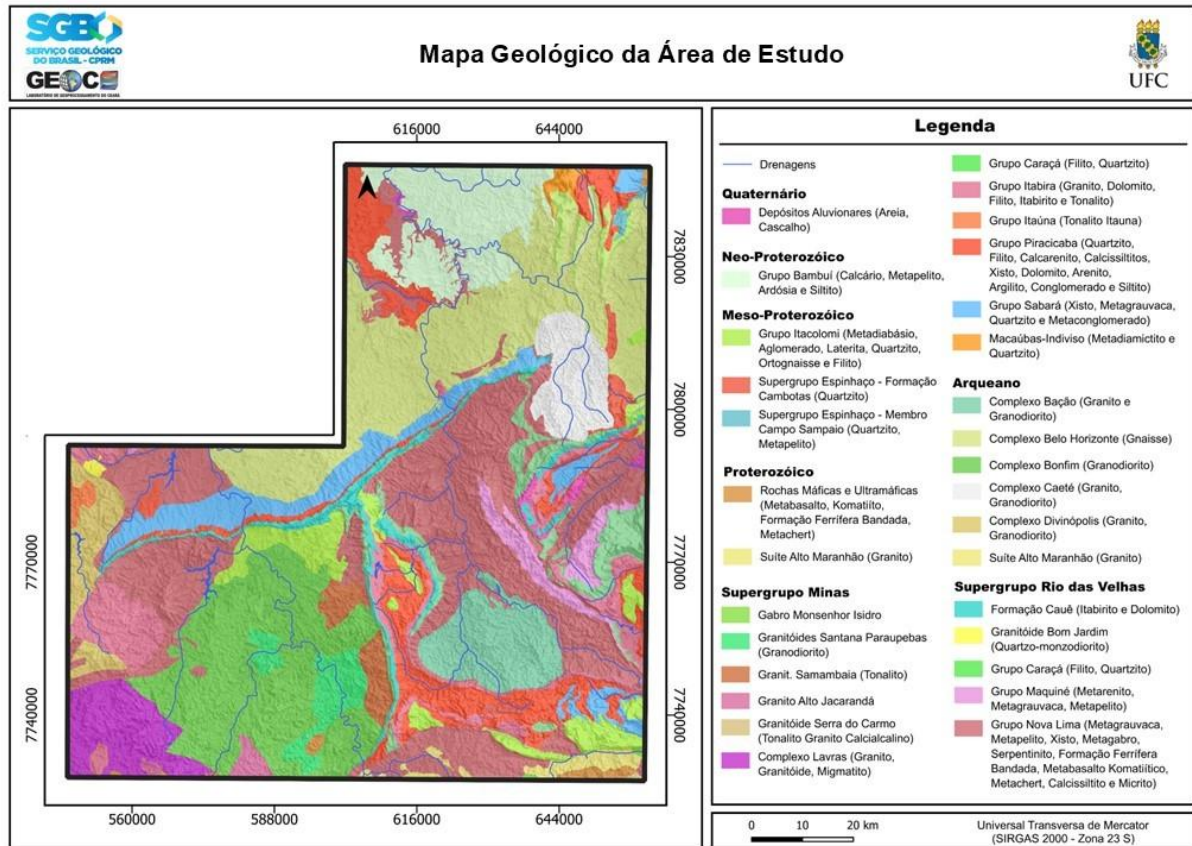
A seguir será apresentada a Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Figura 6) e o Mapa Geológico Detalhado (Figura 7) da área de estudo, posteriormente serão caracterizados melhor os principais grupos e formações geológicas da região.

Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Villaça (1981); Koglin *et al.* (2014) e Madeira *et al.* (2019)

Figura 7 – Mapa Geológico da Área de Estudo



Fonte: Machado e Silva (2010)

O embasamento cristalino que possui idade Arqueana, é o mais extensas no contexto regional do QF, possui na sua formação rochas gnaisses tonalíticas e granodioríticas. Com o advento do vulcanismo na região podem ocorrer intrusões de granitos e diques de origem básica, como diabásios e gabros, presentes em alguns municípios da RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte). Esses terrenos, conforme (Bezerra, 2014), são chamados de complexos ígneo-metamórficos e recebem diferentes nomenclaturas

- *Complexo Belo Horizonte*: Ao norte do QF, abrangendo áreas dos mapas nos municípios de Igarapé, Brumadinho, Belo Horizonte, Caeté e os gnaisses Cocais no mapa em Santa Bárbara.
- *Complexo Bonfim*: Localizado a oeste do QF, nos mapas Brumadinho, Itabirito, Casa de Pedra e Congonhas.
- *Complexo Santa Bárbara*: Situado no limite leste do QF, abrangendo áreas dos mapas Caeté, Santa Bárbara e extremo nordeste do mapa Mariana.
- *Complexo Caeté*: Presente no limite nordeste do QF, conforme o

mapa geológico Caeté.

- *Complexo Guanhões*: Cobre a região de Itabira, incluindo os gnaisses Rio das Velhas e a porção norte-noroeste do mapa João Monlevade.
- *Complexo Mantiqueira*: Ocupa a porção sul-sudeste do mapa João Monlevade e inclui os gnaisses Monlevade.
- *Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapetinga*: Localizado ao sul-sudeste do QF, compreendendo ortognaisses e rochas máfico-ultramáficas em áreas dos mapas Ouro Preto, Mariana e Catas Altas.
- *Complexo Córrego dos Boiadeiros*: Restrito à porção central do mapa geológico Itabirito.
- *Complexo Bação*: Situado na região centro-sul do QF, abrangendo áreas dos mapas Itabirito, Ouro Preto, Casa de Pedra e Gandarela.

Esses complexos revelam a diversidade e complexidade geológica do QF, resultado de processos ígneo-metamórficos e sedimentares ao longo de sua evolução geológica.

O Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) é datado em período Arqueano, (Gonçalves 2021), enquadra o mesmo como um Greenstone Belt Arqueano típico, formado por rochas metassedimentares e metavulcânicas mais antigas composto pelos Grupos Nova Lima e Maquiné (da base para o topo), com espessura variável de 1,4 km a 4 km.

- *Grupo Nova Lima*: É a unidade mais antiga do SGRV e, portanto, tem sobreposta a ela o Grupo Maquiné. O contato entre os dois grupos é discordante e possui composição diversa. Entre as rochas presentes, pode se citar a unidade mais antiga e recoberto pelo Grupo Maquiné, geralmente com contato discordante. Compreende uma ampla diversidade litológica, incluindo xistos ricos em carbonato, ferruginosos e metavulcânicos, filitos, quartzitos, grauvacas e formações ferrífera (Bezerra, 2014)
- *Grupo Maquiné*: é composto por rochas mais recentes em relação ao Grupo Nova Lima ocupando, portanto, o topo do supergrupo e é dividido em duas unidades. A *Formação Palmital*: Unidade inferior, composta por rochas metassedimentares, tais como, quartzito, filitos e xistos

principalmente (Bezerra, 2014). *Formação Congonhas: Conglomerados polimíticos e arenitos grossos, representando depósitos de alta energia em sistemas fluviais (ALMEIDA, 1998)*. E por último a *Formação Dom Bosco: Arenitos finos a médios e folhelhos intercalados, relacionados a ambientes lacustres e fluviais de menor energia (SCHRANK et al., 1981)*.

O Supergrupo Minas (SM) é composto pelos Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (da base para o topo) e registram uma sedimentação de aproximadamente 2580 a 2050 Ma (Renger et al., 1994; Machado et al., 1996; Noce, 2000; Hartmann et al., 2006; Farina et al., 2016, Gonçalves, 2021).

- Grupo Caraça: Composto predominantemente por rochas de origem clástica, é o principal grupo do Supergrupo Minas presente na região do Quadrilátero Ferrífero, localiza-se entre a discordância do Grupo Nova Lima e Itabira. Suas formações são: *Formação Moeda*: composta por quartzitos, filitos e conglomerados, que possuem uma fácies grosseira e outra fina, com espessuras e texturas minerais variáveis. O conglomerado basal, presente em ambas as fácies, contém fragmentos das rochas do Grupo Nova Lima, com seixos bem arredondados de quartzo, sugerindo um ambiente deposicional deltaico (Dorr, 1969). *Formação Batatal*: É composta por rochas sedimentares essencialmente xistos e filitos e localmente formações ferríferas e está subjacente Formação Moeda.

- Grupo Itabira: Denominado e descrito por Dorr et al. (1957), é formado por sedimentos em sua maioria de origem química contraposto a tipo de sedimentos do Grupo Caraça, que é composto por sedimentos clásticos (Dorr, 1969). Suas unidades são: *Formação Cauê*: Composta por itabiritos com variantes ricas em magnésio e bandas dolomíticas, ocorrem, localmente, lentes de metacarbonatos e metassedimentos, tais como, mármore e filitos. Seu contato ocorre com a Formação Batatal do Grupo Caraça e é marcado por o aumento do teor de ferro devido a maior presença da hematita e rochas bandadas, sendo o itabirito formado pelo bandamento entre as hematitas e camadas ricas em sílica proveniente dos quartzos, seu contato com a Formação Gandarela é concordante. *Formação Gandarela*: Composta em sua maioria por materiais metacarbonáticos de composição dolomítica e calcítica, se sobrepõe aos Itabiritos da Formação Cauê e é coberta descontinuamente pelo Grupo Piracicaba, podendo ainda ocorrer filitos dolomíticos e formações

ferríferas dolomíticas e filitos (Dorr, 1969). De acordo com (Dorr, 1969), o Grupo Itabira possui um papel primordial no registro dos processos de sedimentação química na região do Quadrilátero Ferrífero.

Grupo Piracicaba: Sobrepõe o Grupo Itabira e conseqüentemente o Supergrupo Minas, esse grupo é composto por sedimentos distintos de origem clástica, diferentemente dos sedimentos do Grupo Itabira que possuem origem química, foi estruturado e descrito por (Dorr *et al.*, 1957). Nele ocorrem conglomerados e lentes de metacarbonatos, como dolomitos, e também algumas formações ferríferas, seu metamorfismo é baixo, indicado fácies de xisto verde, e tem origem de um processo contração marinha durante o soerguimento estrutural do Grupo Itabira. Suas principais formações e subgrupos são: Formação Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiro, que serão sucintamente descritos a seguir. *Formação Cercadinho* é a base do Grupo Piracicaba, composta por metassedimentos, dentre eles quartzitos, filitos e conglomerados, localmente, ocorrem lentes de metacarbonatos, se diferenciando das demais pela diversidade do quartzito ferruginoso que a compõe. *Formação Fecho do Funil*: é uma formação cuja sua principal ocorrência são metacarbonatos enriquecidos em magnésio (dolomita), quartzo e sericitas, está em contato gradacional com a Formação Cercadinho. *Formação Taboões*: representada pela ocorrência de quartzitos de alta pureza sem marcas de estratificação. *Formação Barreiro*: esta é a formação que está em contato com o Grupo Sabará sobreposto, intensivamente intemperizadas é uma formação composta principalmente por filitos grafitosos, (Pomerene, 1964; Door, 1969 *apud* Bandeira, 2014).

Grupo Sabará: foi definido inicialmente como parte do Grupo Piracicaba, sendo transformado em grupo por Renger *et al.* (1994). Composicionalmente se caracteriza por incluir mica-xistos, clorita-xistos, quartzitos e metaconglomerados, o que define mudança no regime deposicional e origem dos sedimentos.

Grupo Itacolomi: Originalmente identificado como Quartzito Itacolomi, foi elevado a grupo devido a sua discordância angular com o Supergrupo Minas. É composto por quartzitos e uma fácies filítica (Formação Santo Antônio), representando sedimentos de idade próxima ao Grupo Sabará. A presença de zircões detríticos indica idade U-Pb de 2,1 Ga.

O Supergrupo Espinhaço (SE), de acordo com Baltazar *et al.*, (2005), era tratado como Formação Cambotas pertencente ao Grupo Tamanduá, sendo composto essencial pelos quartzitos, essa estruturação inicial havia sido proposta por Simmons e Maxwell (1961), porém com a evolução dos mapeamentos e pesquisas geológicas essas rochas foram atribuídas futuramente por Crocco-Rodrigues *et al.*, (1992) e Freitas *et al.*, (1992) ao Supergrupo Espinhaço, definindo a hierarquia geológica utilizada até hoje.

E por fim, no topo da estratigrafia temos os Sedimentos Terciários e Quaternários, conforme Baltazar (2005, *apud* Bandeira, 2014), eles podem ser divididos em:

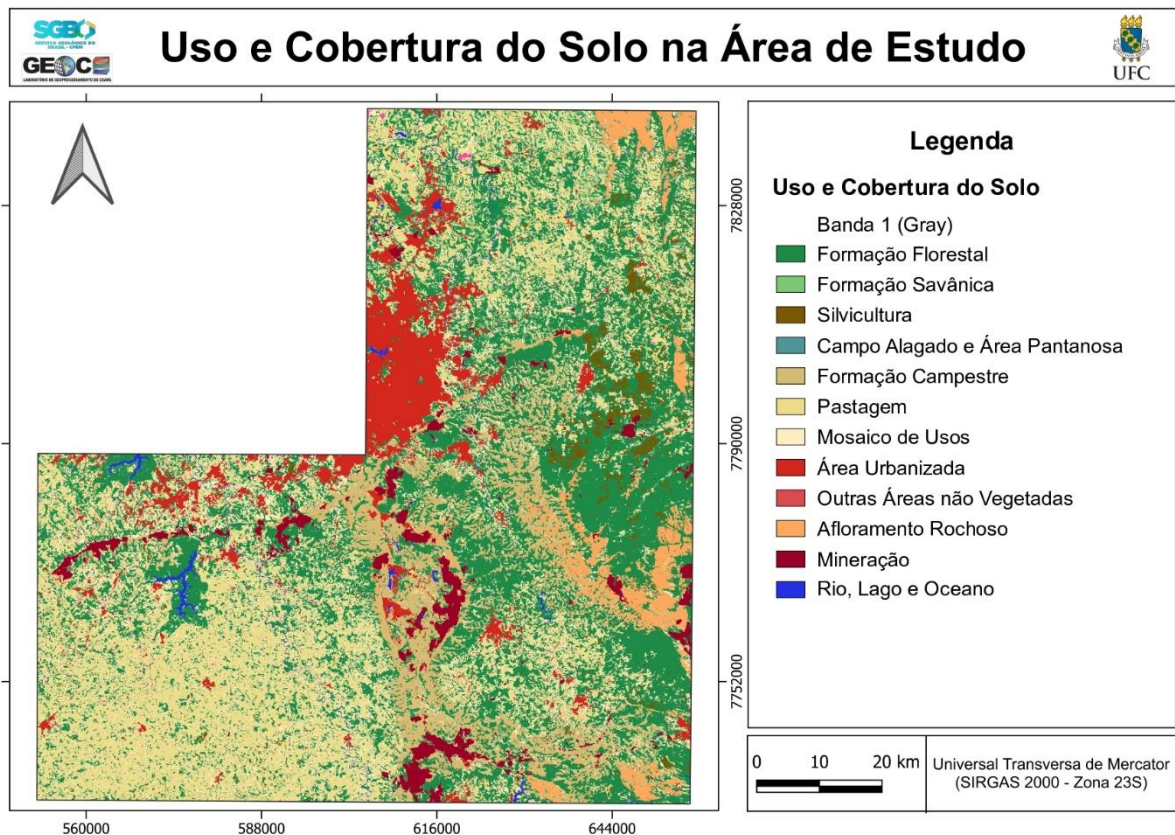
- Mudstone: Trata-se de material argiloso que por intemperismo, passou pelo processo de laterização, acumulando elementos como o Titânio, são encontrados na base dos sedimentos em algumas regiões, tais como Sul da Serra do Curral e do Quadrilátero Ferrífero.
- Chapadas de canga: São sedimentos de origem elúvio-colúviais cenozóicos contendo seixos e fragmentos das rochas originárias da formação ferrífera, enriquecidas em hematita. Ocorrem ao longo de todas as serras do Curral, Moeda, Itabirito, Piacó, Água Limpa, Serra Lagoa Seca e nos arredores de Ouro Preto e Mariana.
- Sedimentos lacustres: Sedimentos de origem lagunar com ocorrência de folhas fósseis, compondo essencialmente rochas sedimentares, tais como, Arenitos e Argilitos, mapeados em locais como Lagoa do Miguelão, Gandarela, Catas Altas, integrando a Formação Fonseca.
- Sedimentos flúvio-lacustres: Depósitos aluviais de argila, cascalhos fluviais e sedimentos lacustres em terraços e vales. Comuns no lado ocidental e, em menor escala, na porção leste do QF. A maior área ocorre na região de Macacos.

O papel da Geologia na composição geoquímica dos sedimentos ativos de corrente é primordial, tendo em vista a derivação deles a partir dos processos intempéricos atuantes nas rochas, gerando assim sedimentos com composição e características similares à rocha de origem. Conjuntamente, podemos citar a atuação ambiental de acumulação e transporte que podem transformar a composição fonte dos sedimentos, gerando assim mosaicos geoquímicos relevantes para a compreensão do ambiente de forma detalhada.

2.7 Uso do Solo

Visando compreender melhor o retrato atual da área de estudo foi realizado um levantamento da cobertura e uso do solo. A seguir será apresentado o mapa elaborado utilizando de base o ano de 2022 e seguindo a classificação da plataforma MapBiomias (Figura 8).

Figura 8 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo atual - (Ano Base 2022)



Fonte: MapBiomias (2022)

De forma geral, a região mantém uma expressiva proporção da vegetação original, isso se deve entre diferentes motivos à estruturação de diversas unidades de conservação, tais como, parques e áreas de preservação ambiental de caráter conservacionista quanto a espécimes da fauna e flora dos diferentes biomas da região, especificamente Cerrado e Mata Atlântica.

A Silvicultura se concentra principalmente na região centro-oeste do mapa próximo aos municípios de Caeté, Barão de Cocais e Raposos. As atividades de pastagem e mosaico de usos diversos, se concentra principalmente no norte do

mapa na região de Lagoa Santa, Confins e na região sudoeste nos municípios de Bonfim, Crucilândia e Piracema. No que tange a Urbanização a maior concentração está localizada na região central do mapa que contempla Belo Horizonte e toda sua região metropolitana que produz uma mancha maior no mapa, entretanto em menores proporções há ocorrência de urbanizações ao longo de todo o mapa. E a mineração também se localiza nas áreas centro sul, leste e oeste do mapa com sua ocorrência bem distribuída no mapa com destaques para cidades de Nova Lima, Ouro Preto, Sabará e Congonhas.

Conforme evidenciado por Reis (2019), a região é reconhecida por sua rica biodiversidade, a formação savânica é descrita como espécimes arbóreos com arbustos espaçados, sem a formação de um dossel contínuo. Existem ainda na região mapeadas áreas de campos alagados e regiões pantanosas, que, segundo o MapBiomias, correspondem a zonas influenciadas por corpos d'água fluviais ou lacustres, que sofrem com alagamento em períodos de pluviosidade mais intensa.

No que diz respeito à vegetação campestre, a mesma está presente em uma parte considerável na região centro sul da área de estudo, representando formações de estrato herbáceo e arbustivo. A classificação "mosaico de usos", que abrange diversas áreas do território, é descrita pelo MapBiomias como regiões de atividades agropecuárias, nas quais não é possível distinguir entre pastagem e agricultura, e, onde podemos incluir a análise de área em processo de regeneração ambiental e vegetação secundárias, além de áreas de expansão periurbana.

Em relação as atividades vinculadas à silvicultura, as mesma se destacam no município de Caeté, onde essa atividade é voltada para o cultivo de espécies arbóreas destinadas ao uso comercial, conforme a classificação do MapBiomias. Já a atividade agropecuária, apresenta uma forte presença na área de estudo.

A exploração mineral possui imensa importância na região, especialmente no Quadrilátero Ferrífero, conforme ressaltado por Coelho *et al.* (2017). Essa atividade remonta ao período colonial e persiste até os dias atuais, sendo responsável por um alto grau de intervenção ambiental. Pode se destacar a extração de ferro, ouro argilas raras e águas minerais como os principais insumos explorados na região.

A região também se caracteriza pela intensa urbanização, concentrando a maior malha urbana de todo o estado de Minas Gerais, sendo lar de aproximadamente 3,15 milhões de habitantes, como aponta Ruchkys (2012) em sua

proposta para a criação do Geoparque Quadrilátero Ferrífero. A análise do mapa nos indica também, além de uma presença significativa de áreas urbanizadas, pequenas porções classificadas como "outras áreas não vegetadas", que se referem a superfícies relacionadas à infraestrutura, expansão urbana ou mineração, que não puderam ser alocadas nas classes de uso específicas.

2.8 Unidades de Conservação

As unidades de conservação no Brasil são definidas e reguladas conforme estabelece a Lei nº 9.985/2000, "as unidades de conservação dividem-se em dois grupos: de proteção integral e de uso sustentável" (BRASIL, 2000). Ainda conforme a mesma lei, em seu Art.8, é definido o grupo das Unidades de Proteção Integral que é caracterizado pela manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana, admitido apenas o uso indireto dos seus atributos naturais, que é composto pelas seguintes categorias de unidade de conservação:

- I - Estação Ecológica;
- II - Reserva Biológica;
- III - Parque Nacional;
- IV - Monumento Natural;
- V - Refúgio de Vida Silvestre.

A lei nº 9.985/2000, em seu Art. 14, define também o Grupo das Unidades de Uso Sustentável onde é permitida a exploração do ambiente de maneira a garantir a perenidade dos recursos ambientais renováveis e dos processos ecológicos, mantendo a biodiversidade e os demais atributos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável, e é composta pelas seguintes categorias de unidade de conservação (BRASIL, 2000):

- I - Área de Proteção Ambiental;
- II - Área de Relevante Interesse Ecológico;
- III - Floresta Nacional;
- IV - Reserva Extrativista;
- V - Reserva de Fauna;
- VI – Reserva de Desenvolvimento Sustentável; e

- VII - Reserva Particular do Patrimônio Natural.

Na área do estudo existem ao todo 38 unidades de conservações divididas entre unidades federais e estaduais e as de uso sustentável e de proteção integral, a seguir será apresentada (Tabela 1) contendo todas as unidades localizadas na área de estudo.

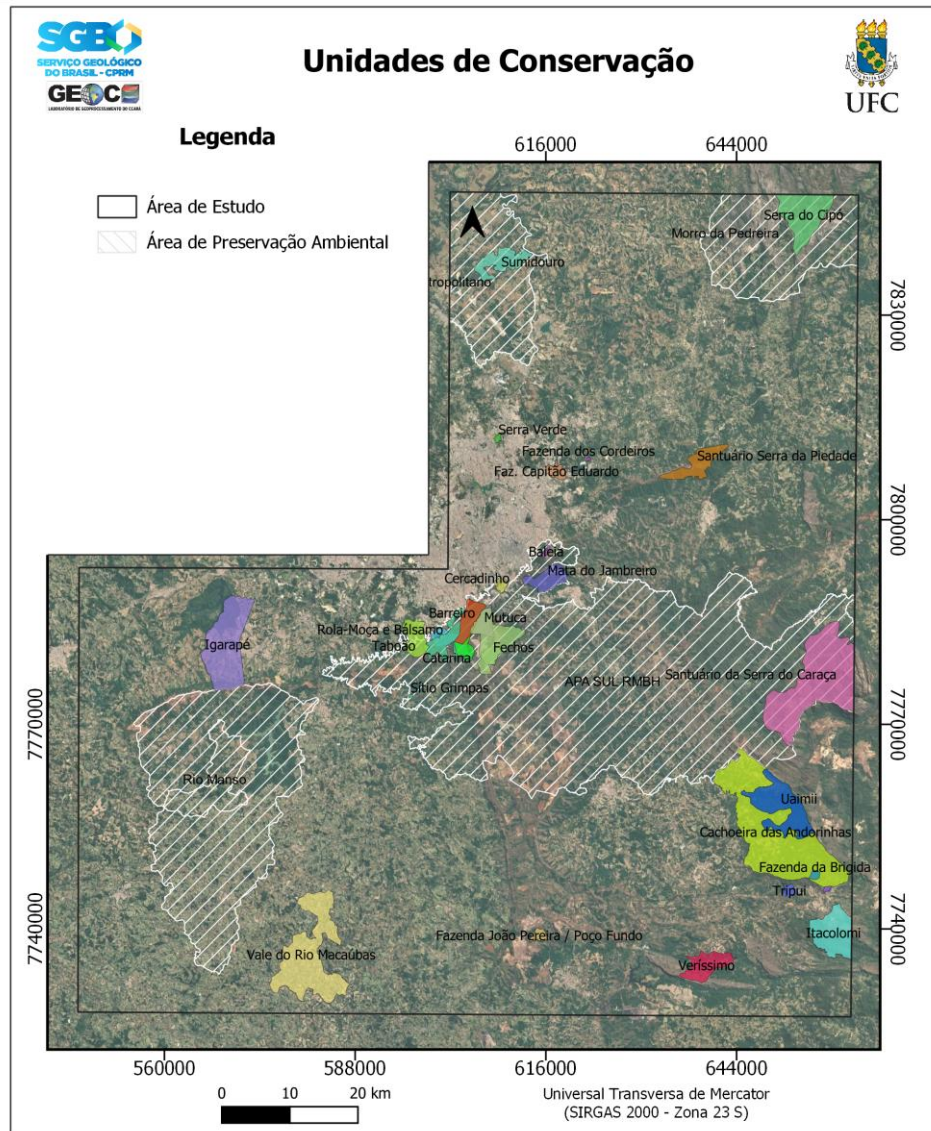
Tabela 1 – Relação das unidades de conservação na área do estudo

TIPO DE UNIDADE DE CONSERVAÇÃO	NOME	LEGISLAÇÃO	CIDADE	USO	HEC
Área de Proteção Especial Estadual	Rola-Moça e Bálsamo	Dec. 22 110 de 14.06.82	Ibirité	OUTROS	760
Reserva Particular do Patrimônio Natural Federal	Santuário da Serra do Caraça	Port IBAMA 32/94-N de 30/03/94	Santa Bárbara / Catas Altas	USO SUSTENTÁVEL	12788
Parque Estadual	Serra do Rola-Moça	Dec. 36 071 de 27.09.94	Belo Horizonte / Brumadinho / Ibirité / Nova Lima	PROTEÇÃO INTEGRAL	4029
Área de Proteção Ambiental Estadual	Faz. Capitão Eduardo	Lei 13.958 de 26/07/01	Belo Horizonte	USO SUSTENTÁVEL	515
Estação Ecológica Estadual	Fechos	Dec. 36 073 de 27.09.94	Nova Lima	PROTEÇÃO INTEGRAL	549
Área de Proteção Especial Estadual	Mutuca	Dec. 21 372 de 01.07.81	Nova Lima	OUTROS	958
Área de Proteção Especial Estadual	Cercadinho	Dec. 22 108 de 14.06.82	Belo Horizonte	OUTROS	234
Área de Proteção Especial Estadual	Barreiro	Dec. 22 091 de 08.06.82	Belo Horizonte	OUTROS	1407
Área de Proteção Especial Estadual	Catarina	Dec. 22 092 de 08.06.82	Belo Horizonte / Nova Lima	OUTROS	579
Área de Proteção Especial Estadual	Taboão	Dec. 22 109 de 14.06.82	Ibirité / Sarzedo	OUTROS	1462
Parque Federal	Serra do Cipó	Dec. nº 19.278 de 03/07/77 e Dec. nº 9	Itambé do Mato Dentro / Jabuticatubas / Nova Lima	PROTEÇÃO INTEGRAL	31632
Área de Proteção Ambiental Federal	Morro da Pedreira	Dec. nº 98.891 de 26/01/90	Itabira / Itambé do Mato Dentro / Jabuticatubas / Nova Lima	USO SUSTENTÁVEL	131739
Reserva Particular do Patrimônio Natural Federal	Sítio Grimpas	Portaria IBAMA nº 108/95-N de 27/12/9	Brumadinho	USO SUSTENTÁVEL	20
Reserva Particular do Patrimônio Natural Estadual	Mata do Jambreiro	Portaria nº 070, 11/09/98, Averbada 20	Nova Lima	USO SUSTENTÁVEL	1487
Reserva Particular do Patrimônio Natural Estadual	Fazenda dos Cordeiros	Portaria 0083 IEF - 09/10/98	Santa Luzia	USO SUSTENTÁVEL	25
Parque Estadual	Baleia	Lei 8022 de 23/07/81 e Decreto nº 26.1	Belo Horizonte		
Área de Proteção Especial Estadual	Rio Manso	Decreto nº 27.928, 15/03/88	Bonfim, Brumadinho, Crucilândia, Itatiaia	OUTROS	67749
Área de Proteção Especial Estadual	Fechos	Decreto nº 22.327, 03/09/82	Nova Lima	OUTROS	3480
Área de Proteção Ambiental Municipal	Igarapé	Lei nº 1036 de 16/05/03	Igarapé	USO SUSTENTÁVEL	6556
Área de Proteção Especial Estadual	Veríssimo	Decreto nº 22.055, 05/05/82	Ouro Branco	OUTROS	1979
Área de Proteção Ambiental Municipal	Vale do Rio Macaúbas	Lei nº 564, 15/04/02	Piedade dos Gerais	USO SUSTENTÁVEL	8736
Área de Proteção Ambiental Municipal	Rio Manso	Lei nº 523, 15/12/98			
Estação Ecológica Estadual	Cercadinho	Lei nº 15.979 de 13/01/06	Belo Horizonte	PROTEÇÃO INTEGRAL	225
Reserva Particular do Patrimônio Natural Federal	Fazenda João Pereira / Poço F	Portaria IBAMA nº 36/95 N, de 02/06/95	Congonhas	USO SUSTENTÁVEL	337
Área de Proteção Ambiental Estadual	Cachoeira das Andorinhas	Dec. 20 264 de 16.10.89	Ouro Preto	USO SUSTENTÁVEL	14266
Floresta Estadual	Uaimii	Dec. S/Nº de 21/10/03	Ouro Preto	USO SUSTENTÁVEL	4292
Parque Estadual	Itacolomi	Lei 4 495 de 14.06.67	Mariana / Ouro Preto	PROTEÇÃO INTEGRAL	6142
Área de Preservação	Morro da Queimada		Ouro Preto		69
Área de Preservação	Fazenda da Brigida		Ouro Preto		154
Estação Ecológica Estadual	Tripui	Dec. 9 157 de 24.04.78 e Dec. 21 340	Ouro Preto	PROTEÇÃO INTEGRAL	299
Área de Proteção Ambiental Estadual	Aeroporto Metropolitano			USO SUSTENTÁVEL	37934
Parque Estadual	Serra Verde	Dec. S/N 12/12/2007	Belo Horizonte	PROTEÇÃO INTEGRAL	105
Parque Municipal	Bosque São Bento II		Belo Horizonte	PROTEÇÃO INTEGRAL	5
Parque Municipal	Área das Nascentes da Barrag	Lei Municipal 9422 18/01/97	Belo Horizonte	PROTEÇÃO INTEGRAL	0
Parque Municipal	Área Verde do Vertedouro da f		Belo Horizonte	PROTEÇÃO INTEGRAL	1
Área de Proteção Ambiental Estadual	APA SUL RMBH	Dec. 35624 de 08/06/94 e Dec. 37812	Belo Horizonte/Brumadinho/Caete/Ibirité/	USO SUSTENTÁVEL	163251
Parque Estadual	Sumidouro	Decreto nº 44.935, de 03/11/2008	Lagoa Santa / Pedro Leopoldo	PROTEÇÃO INTEGRAL	2002
Área Tombadal	Santuário Serra da Piedade	Lei nº 16.133 de 26/05/2006	Caeté e Sabará	OUTROS	1947

Fonte: Autor

Na Figura 9 pode observar-se o mapa das unidades de conservação contidas dentro da área de estudo.

Figura 9 – Mapa das Unidades de Conservação na área de estudo



Fonte: Autor

3 MAPEAMENTO E INDÍCES GEOQUÍMICOS

3.1 Mapeamento Geoquímico e o Projeto Quadrilátero Ferrífero

Os mapeamentos geoquímicos vêm sendo utilizados há muito tempo e em diferentes países e com distintos objetivos, se configura com uma ferramenta de extrema importância no que se refere à identificação da geoquímica do ambiente, seja ela para fins prospectivos e minerários e ou ambientais e de saúde pública. O

mapeamento geoquímico objetiva entender e avaliar a dispersão e acumulação ambiental dos elementos químicos, o que pode ocorrer em diferentes matrizes ambientais, permitindo compreender os processos geoquímicos atuantes (Salomão, 2020 *apud* Amarante 2021).

Caritat *et al.* (2007) descreve que o conhecimento dos padrões das concentrações naturais dos elementos químicos contribui para o desenvolvimento de um país, tendo em vista que essas informações referentes a um território nacional, permite identificar zonas com potencial mineral, e áreas com vulnerabilidade ambiental. Em concordância com Pereira (2018), a partir desse conhecimento podem ser descobertas novas áreas para exploração mineral e podem ser estabelecidos valores de *background* seguros para que a população não fique exposta a riscos, bem como direcionar políticas ambientais reguladoras e eficientes que considerem as características do ambiente e suas interações como um todo.

Nesse sentido foi estruturado o Projeto de Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero executado pelo Serviço Geológico do Brasil. De acordo com Larizzatti *et al.* (2014), ao todo foram coletadas 3662 amostras de sedimento ativo de corrente. A área total do projeto abrange 15 folhas na escala de 1:100.000 - perfazendo uma área de 45.000 km², além dos sedimentos foram realizadas algumas análises em solo, porém não serão tratadas nesse trabalho.

3.2 Sedimentos Ativos de Corrente e Cálculo dos *Backgrounds* Regionais

Segundo Amarante (2021), os materiais da superfície terrestre como solos e sedimentos de corrente sofrem com o enriquecimento cumulativo a partir do material da crosta superior, os quais contribuem para a geração do sedimento em bacias hidrográficas e conseqüente são balizadores importantes no que concerne suas características geoquímicas.

A geoquímica de um determinado local de drenagem é função de um complexo relacionamento entre uma gama de fatores incluindo a Geologia, tamanho da captação, dinâmica do fluxo, processos de intemperismo e geoquímica redox, esses fatores têm um impacto espacial e temporal e variam significativamente entre diferentes amostras (Pereira, 2018). Em concordância com isso, Lima (2020) cita que os sedimentos de fundo são integrantes da litosfera/pedósfera, portanto

possuem grande heterogeneidade composicional. Esta gama de componentes na massa de sedimento estabelece específicas interações com os elementos químicos disponíveis no sistema.

A utilização dos sedimentos, como a base de muitos mapeamentos geoquímicos, pode ser explicada por Abreu *et al.*, (2015), que relata o seguinte: os sedimentos de corrente são uma matriz amostral muito usual para elaboração de cartografia geoquímica, pois permitem a investigação de áreas extensas a um baixo custo.

Segundo Marques (2023), a análise dos sedimentos de corrente permite a detecção de variações na concentração de elementos traços, como metais pesados, que são importantes para a avaliação de contaminação e a monitorização de áreas afetadas por atividades industriais ou mineração. Esses sedimentos atuam como um registro das condições geoquímicas de uma área, permitindo a identificação de variações nos níveis de elementos devido a processos naturais e contaminantes, o que traz a nossa discussão o termo *background* local.

Segundo Cavalcante *et al.* (2017), os sedimentos ativos de corrente realizam um papel importante no que se refere à definição dos chamados *backgrounds* locais, pois são capazes de espelhar informações geoquímicas, tanto de fontes geogênicas (naturais do ambiente), como antropogênicas (resultante de atividades humanas), propiciando assim, uma linha de base essencial para análise a respeito a objetivos econômicos, com a identificação de áreas geologicamente enriquecidas em bens minerais, ou interesses ambientais, mapeando zonas de vulnerabilidade ambiental, ou contaminadas por poluentes químicos oriundos do meio antrópico.

De posse dessa informação cabe ressaltar que na literatura há várias metodologias de cálculo do *background* a partir dos dados geoquímicos obtidos em um mapeamento, dentre eles pode-se citar: métodos oriundos da estatística descritiva, percentis, geoestatística, dentre outros. A definição dos métodos de cálculo dos *backgrounds* irá variar, conforme as características da área e os objetivos do trabalho.

Considerando que a área do Quadrilátero Ferrífero apresenta valores elementares anômalos para diversos elementos, por se tratar de uma província geoquímica e metalogênica, a metodologia escolhida para cálculo de *backgrounds* locais na região do trabalho, foi a chamada MAD (Median Absolut Deviation - Desvio

Absoluto da Mediana), que é baseada no uso da mediana como uma medida central e no desvio absoluto em relação à mediana para identificar valores anômalos (Reimann *et al.*, 2005). E ainda de acordo com os autores, se trata de uma ferramenta adequada para delimitar *backgrounds* geoquímicos em conjuntos de dados com forte influência de outliers (valores anômalos), conseqüentemente sendo mais apropriada para regiões de forte variabilidade geoquímica, como é o caso da nossa área de estudo no contexto do Quadrilátero Ferrífero.

Nas discussões do trabalho de Pereira (2018), referente aos aspectos geoquímicos da área, de maneira generalizada, os elementos, principalmente os metais no Quadrilátero Ferrífero, encontram-se enriquecidos em relação à média global (UCC) Upper Crust Continental, em razão da área estudada ser classificada como uma província geoquímica e/ou metalogênica para muitos deles, o que em termos práticos, significa que a região já está naturalmente enriquecida em diversos desses elementos

Existe a discussão da utilização de sedimento de correntes para obtenção de *backgrounds* por unidades geológicas, o que foi aplicado no trabalho de Pereira (2018) e que também será continuado neste. É convencional a utilização dos sedimentos somente nas áreas de bacias hidrográficas, porém para a área em questão, foi perceptível a eficiência da mesma em simular melhor a realidade geológica local, quando calculada por litologia, pois a influência externa nos resultados é mínima quando comparado com a interpretação do comportamento dos valores em relação aos valores regionais (área total do projeto e ou bacias).

Esta lacuna comparativa pode ser explicada, de acordo com Pereira (2018), com base na diversidade litológica e tamanho da área de estudo que, se analisada de maneira coletiva, ou seja, abarcando diferentes litologias dentro da área de uma bacia, teremos como resultados dados abrangentes que irão sombrear e desconsiderar as tendências e distribuições elementares locais de suma importância, tendo em vista o enriquecimento em metais pesados em litologias específicas no quadrilátero.

A seguir na Tabela 2, serão apresentadas as concentrações dos *backgrounds* globais (UCC- Upper Crust Continental) e locais com base na área total do projeto (ATP), além dos locais com base nas litologias (por unidade geológica) para os elementos selecionados. Cabe ressaltar que esses *backgrounds* foram calculados anteriormente no trabalho de Pereira (2018), utilizando-se a metodologia

MAD para cálculo de *backgrounds*, calculado sobre o montante de 731 amostras de sedimento de corrente, sendo portanto, os resultados apresentados provenientes desse método estatístico.

Tabela 2 – Comparação do *background* UCC, ATP e com as Litologias do QF

INDICADORES		ELEMENTOS (ppm)						
Global		As	Cd	Cr	Ni	P	Pb	Zn
UCC		2	0,1	35	18,6	700	17	52
Regional		–	–	–	–	–	–	–
Geral	ATP	5	0,03	43,2	16,8	260	15,96	29,7
	SGRV	21,35	0,06	128,75	50,3	300	12,645	37,7
Litologias	SGM	7	0,06	42,4	21,1	260	9,71	22,4
	BA	6,05	0,02	35,9	8,4	170	19,45	20,65
	BH	1	0,02	14,75	6,05	180	15,485	23,15
	BN	1,6	0,03	33,6	11,95	280	20,275	31,45

Fonte: Pereira (2018) adaptado.

É primordial entender que a variabilidade de elementos traços presentes na natureza é algo comum, contudo, a sua concentração em teores elevados é que, de fato, se configura um risco ambiental (Lima, 2020 p.22). Complementar ao que foi citado, devemos também ressaltar, que além da importância de se identificar o que é risco ambiental, é necessário a análise crítica, sobre a área estudada e suas peculiaridades, que podem em muitos casos gerar sinais de alertas para contaminações. Sendo na verdade o reflexo de uma área geoquimicamente enriquecida, como caso do Quadrilátero Ferrífero para alguns elementos, em algumas regiões.

3.3. Metais Pesados e Fósforo: Fontes e Efeitos

Estima-se que mais de 90% dos elementos potencialmente tóxicos contidos em um ambiente aquático se encontram associados aos materiais particulados, seja na carga em suspensão, seja na camada sedimentar de fundo (CALMANO *et al.*, 1993 apud LIMA, 2020).

Os elementos Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Chumbo (Pb), Zinco (Zn) e Níquel (Ni) são metais pesados, associadas naturalmente a formações minerais como sulfetos e óxidos e antrópicamente a descargas industriais, beneficiamentos minerais e resíduos. Já no caso do Fósforo (P) está vinculado ao

ambiente geológico a minerais tais como: a Apatita e rochas graníticas, artificialmente sua fonte está muito a utilização de fertilizantes.

Os metais pesados ocorrem naturalmente nos solos, sua composição depende, principalmente, do material de origem em seu processo de formação, composição e proporção dos componentes de sua mineralogia, eles são elementos químicos com densidade superior a 5 g/cm^3 . Segundo Alloway (1990), diversos estudos de metais pesados, tais como, Chumbo, Cádmio, Níquel, Zinco dentre outros em ecossistemas indicaram que grandes áreas próximas a complexos urbanos, minero-metalúrgicos e rodoviários, como é o caso do Quadrilátero Ferrífero, apresentam valores elevados nesses componentes.

A seguir será apresentada uma síntese sobre esses metais pesados e o fósforo destacando suas possíveis fontes na natureza e efeitos a saúde humana e meio ambiente.

- Arsênio (As): O arsênio é um elemento químico que ocorre principalmente em minerais como arseniato de ferro e arsenopirita, sua fonte é principalmente de rochas ígneas e ou metassedimentares, se torna disponível ao ambiente por processos naturais, como intemperismo de rochas fontes, ou por atividades humanas, como a mineração, beneficiamento de elementos tais como o ouro e o uso de pesticidas à base de arsênio. Ambientalmente, o arsênio é frequentemente encontrado em águas contaminadas e sedimentos de regiões afetadas por atividades industriais. No que diz respeito a seus efeitos a saúde humana, sabe-se que é um elemento tóxico, carcinogênico, com efeitos intensos no sistema nervoso e no fígado (Hughes, 2011).
- Cádmio (Cd): Conforme citado por Reimann e Caritat (1998), as associações naturais do Cádmio são com o Zinco, em todo o tipo de ocorrências e em depósitos do tipo Mississippi Valley (Zn-Cd-Pb-Ba-F). O cádmio é encontrado principalmente em minerais como a calcopirita e a esfarelita. Artificialmente, fontes de Cádmio podem ser liberadas ao ambiente por resíduos de baterias e industriais de forma geral, atividades de mineração e fundição. O cádmio assim como o arsênio também tem efeitos carcinogênicos a saúde humana, agindo intensivamente também nos pulmões. (Löw *et al.*, 2018).

- Cromo (Cr): As associações naturais do cromo são os Platinum Group Elements (Cr-Cu- Ni-Co-PGEs). Naturalmente estão vinculados, principalmente, à ocorrência de cromita, ou em sedimentos de origem clásticas resultados do intemperismo físico de rochas fontes ricas em minerais de Cromo. De acordo com Reimann e Caritat (1998) o cromo tem dois tipos de ocorrência a forma trivalente (Cr^{3+}), que é encontrado e o cromo hexavalente (Cr^{6+}). O cromo hexavalente é o mais tóxico e geralmente é despejado no ambiente como resultado de atividades industriais. O contato e ou absorção à exposição ao cromo hexavalente, pode causar efeitos graves ao pulmão, rins fígado e sistemas respiratórios além da imunidade. (Lima *et al.*, 2019).
- Chumbo (Pb): A ocorrência de Chumbo na natureza está relacionada aos seus minerais, sendo o principal a galena. A aplicação humana no do chumbo em seus processos, vem diminuindo, devido ao aumento de informações acerca de sua toxicidade, porém é conhecida a sua utilização em tintas, combustíveis, ligas metálicas, equipamentos médicos e hospitalares. Segundo Alloway (1995), o chumbo encontra-se em solos não contaminados, normalmente, em concentrações inferiores a 20 ppm e muitas das concentrações elevadas, citadas em determinadas áreas, são consequências das emissões antropogênicas acumuladas ao longo dos anos. O chumbo é altamente tóxico, provoca danos ao sistema nervoso central, prejudicando o desenvolvimento cognitivo e motor, é também um potente elemento carcinogênico (Zhao *et al.*, 2016).
- Níquel (Ni): Conforme Reimann e Caritat (1998), as associações naturais do níquel são os depósitos de sulfuretos maciços (Ni-Co-Fe-Cu-Ag-PGE-Se-Te-As-S), os filões lenticulares de sulfuretos (Ni-Co-Fe-Cu-S), os depósitos de urânio (U-Cu-Ag-Co-Ni-As-V-Se-Au-Mo), os depósitos lateríticos residuais (Ni-Co-Fe-Mn-Cr) e os nódulos de manganês do fundo marinho (Mn-Ni-Cu-Co), seus principais minerais de ocorrência são pentlandita e garnierita, é comum concentrações altas em alguns tipos de rochas ígneas intemperizadas. Sua disponibilização por atividades humanas está relacionada principalmente a atividade de mineração. O Níquel pode causar

irritações de pele e doenças no sistema respiratório, em exposições mais graves câncer. Além disso, seus efeitos negativos em sistemas e microrganismos aquático é bastante conhecido (Harrison *et al.*, 2021).

- Zinco (Zn): O zinco apresenta um padrão de dispersão muito útil nas águas subterrâneas, águas superficiais, sedimentos de corrente e sedimentos de lago. Os teores naturais mais elevados de zinco são essencialmente apresentados por alguns tipos de rochas, como os argilitos e os xistos, Reimann e Caritat (1998). É considerado um elemento essencial para todos os organismos, é usado como aditivo nutricional na suinicultura e na avicultura, além de ser também um componente importante das enzimas. De forma geral, apresenta menor toxicidade quando comparado com outros elementos do seu grupo. Quando em excesso, o zinco pode causar toxicidade no solo e na água, afetando organismos aquáticos e terrestres. A exposição humana a níveis elevados de zinco pode afetar o sistema imunológico, bem como causar problemas gastrointestinais e neurológicos (Fung *et al.*, 2020).
- Fósforo (P): De acordo com Reimann e Caritat (1998), as associações naturais do fósforo são os fosfatos de muitos elementos que ocorrem na natureza. A mobilidade do fósforo é baixa em todo o tipo de condições: oxidação, redução, em ambientes ácido, neutro e alcalino, no entanto, o ion fosfato é muito móvel. A geoquímica do fósforo está intimamente relacionada aos ciclos biogeoquímicos, e à ocorrência de minerais ricos em fósforo, como apatita e rochas graníticas, sendo este elemento um componente fundamental para a vida, especialmente na agricultura. Sua dispersão no ambiente por vias antrópicas se dá principalmente por meio das atividades agrícolas que utilizam fertilizantes a base de fósforo para o cultivo de diversas culturas, pois trata-se de um nutriente importante para as plantas. Em grande quantidade pode levar à proliferação excessiva de algas e a processos de eutrofização, que têm forte impacto sobre corpo hídricos, principalmente lagos e lagoas. Na saúde humana é carreador de problemas gastrointestinais e doenças renais (Cavalcanti *et al.*, 2017). No contexto do fósforo cabe ressaltar que a melhor opção para a

análise do mesmo seria a utilização de fósforo disponível, pois de acordo com Novais e Smyth, (1999) refere-se à fração do fósforo que está imediatamente acessível para absorção pelas plantas ou que pode ser facilmente mobilizado no ambiente. Enquanto o fósforo total inclui todas as formas de fósforo presentes no solo ou sedimento, incluindo frações orgânicas, inorgânicas, solúveis e insolúveis (Murphy & Riley, 1962). Sendo assim, o fósforo total utilizado pelo trabalho também abarca frações insolúveis o que não seria indicado, entretanto, como são dados originados do Serviço Geológico do Brasil, só foi possível acessar os dados com valores quantificados de fósforo total.

Por fim, de acordo com Quináia e Plestch (2010, *apud* Pereira 2018), a determinação de metais-traço em sedimentos permite quantificar o estoque mobilizável de um determinado contaminante em um local específico, e assim, detectar o grau de contaminação a que a água e os organismos bentônicos estão sujeitos ao longo do tempo. Por esta razão, é necessário contar com ferramentas de avaliação ambiental que permitam estimar o risco existente tanto para a saúde dos ecossistemas aquáticos, como para a saúde humana, e uma das principais ferramentas utilizadas atualmente para a quantificação desse risco, são os índices geoquímicos.

3.4 Avaliação Ambiental e *Backgrounds*

Os metais têm contribuído de forma significativa para a poluição do ar, da água e do solo, interferindo temporária ou permanentemente na manutenção da biota terrestre e aquática, incluindo-se, enquanto organismo-alvo e de forma direta e indireta, a própria espécie humana (Fiori, 2008).

De acordo com Amarante (2021), expansão das atividades econômicas promove a dispersão de elementos inorgânicos em bacias hidrográficas, estes elementos são associados não só as atividades antrópicas como também estão ligadas ao enriquecimento natural segundo o contexto litológico de uma determinada área de estudo.

Existem várias ferramentas quantitativas para representar o grau de enriquecimento de metais pesados nos sedimentos a partir de faixas de impactos de contaminação (Leão, 2019, Ridgway & Shimmield, 2002; Salomons & Förstner,

1984; Müller, 1969; Hakanson, 1980). Essas ferramentas são conhecidas como índices geoquímicos ou índices ambientais. Os índices ambientais foram desenvolvidos com o intuito de quantificar o enriquecimento e empobrecimento desses elementos em diversas matrizes geológicas, principalmente sedimentos e solos.

Esses índices contribuem para caracterização dos efeitos ambientais e a identificação de padrões de potencial poluição, e podem ser aplicados para compreender o transporte químico dos elementos, a cumulatividade de substâncias contaminantes, além de permitir comparações temporais e espaciais. São metodologias versáteis e flexíveis podendo ainda ser utilizando conjuntamente a análises estatísticas mais complexas corroborando para uma maior robustez na avaliação ambiental dos dados de determinado ambiente (Lima *et al.*, 2019).

Essas avaliações ambientais, se estruturam sobre linhas de bases naturais, também conhecidos como *backgrounds*. De acordo com Rodrigues *et al.* (2009), eles são determinados, principalmente, por meio de valores médios da concentração de metais de uma área ou depósito sedimentar que não sofreu influência antropogênica. Conforme discutido por Costa (2007), a determinação de um dado valor de *background*, por esse método, requer um conhecimento sobre o comportamento geoquímico dos elementos estudados e sobre as condições ambientais prevalentes, incluindo o entendimento de condições paleoambientais e sedimentológicas, que nem sempre são facilmente entendidas.

Lemos (2000) apoia que o estabelecimento de valores de *background* para uma área consiste em uma ferramenta eficiente utilizada para quantificar o fator de enriquecimento de elementos tóxicos e quantificar a contaminação em uma região investigada, uma vez que as concentrações desses elementos podem variar em função de fatores geológicos e, também, em função de fatores antropogênicos.

Em sedimentos, a concentração de elementos-traço pode variar conforme a razão de sua deposição, sedimentação, natureza e tamanho das partículas, e conforme a presença ou não de matéria orgânica (Jesus *et al.*, 2004).

Galuszka (2007) argumenta que os valores de *background* da UCC podem não ser representativos para áreas com geologia distinta, levando a interpretações equivocadas sobre a origem e o grau de contaminação. O que é corroborado também pela afirmação de Taylor & McLennan (1985), que considera a

UCC uma ferramenta valiosa para estudos em escala continental, mas falha em representar condições locais específicas.

Em contraponto à utilização de valores regionais de *background* e a UCC para contexto locais, temos os autores Reimann e Caritat (2005) que apoiam o uso de valores de *background* como referência locais, sendo esses essenciais para avaliar corretamente a contaminação ambiental, pois considera a heterogeneidade natural dos solos e sedimentos. E de forma complementar temos Dung *et al.* (2013), dizendo que valores de referência locais são fundamentais para a definição de critérios de qualidade ambiental realistas e aplicáveis.

Os índices geoquímicos podem utilizar como referência a média crustal (UCC), entretanto a variação de concentrações em uma mesma área, ocasionada por diferentes substratos geológicos (litotipos) e diferentes atividades antropogênicas, pode extrapolar ou subdimensionar essas concentrações elementares, portanto, o ideal é se utilizar cálculos de *background* da própria área, o que foi realizado neste trabalho a partir da utilização do *background* UG (Unidades Geológicas)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção dos Dados

O processo metodológico envolve a coleta e análise de dados geoquímicos de diferentes pontos de amostragem, os quais são posteriormente analisados e representados de forma espacialmente explícita por meio da elaboração de mapas temáticos. Os dados foram obtidos através de solicitação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, via ofício, ao diretor da divisão de Geoquímica do Serviço Geológico do Brasil – SBGEO - CPRM, tendo como objetivo inicial ser a base de um trabalho de conclusão de curso de graduação (Pereira, 2018). Posteriormente, com a liberação dos dados em plataformas abertas pelo órgão responsável pelo projeto, a utilização dos dados foi continuada e aplicada também a essa dissertação de mestrado. Destaca-se que este autor não teve nenhum envolvimento com as etapas de coleta, análise química, produção dos dados geoquímicos e quaisquer outras atividades metodológicas envolvidas na produção dos valores amostrados. O objetivo deste trabalho é tão somente analisar os dados geoquímicos já prontos e valorados que foram fornecidos pela instituição.

Sendo assim, as informações relacionadas a coleta e produção desses dados geoquímicos não serão consideradas como etapas metodológicas deste trabalho, mas sucintamente citadas.

Foram coletadas amostras em 3662 estações, com densidade de amostragem aproximada de 1 amostra a cada 12 km².

Ainda de acordo com Larizzati *et al.* (2014), as amostras de sedimentos foram tratadas totalmente pelo antigo laboratório analítico ACME®, agora Bureau Veritas®, ou seja, além da análise química, o tratamento físico das amostras, tal como o peneiramento, também foi realizado pelo mesmo laboratório. Após a digestão com os ácidos, o extrato originado é diluído a 10 ml de água ultrapura e então, submetidos à análise em ICP-OES e ICP-MS (emissão óptica com plasma indutivamente acoplado e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado, respectivamente) para 50 elementos químicos.

Todos os elementos analisados pelo projeto e seus respectivos limites de detecção são mostrados na Tabela 3.

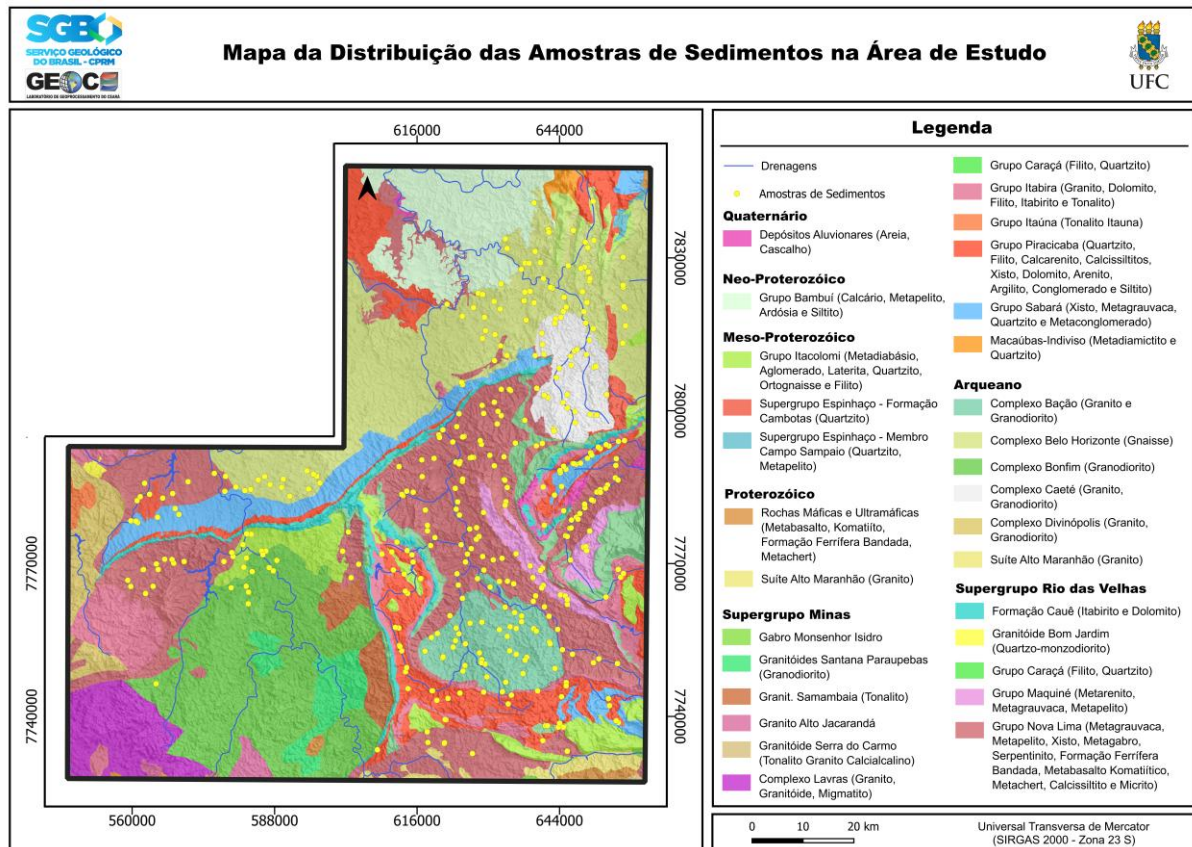
Tabela 3 – Elementos analisados e seus limites de detecção.

ELEMENTO	UNIDADE	LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO	LIMITE SUPERIOR DE DETECÇÃO
Al	%	0,01	10
As	PPM	0,1	10000
Au	PPB	0,2	100
B	PPM	20	2000
Ba	PPM	0,5	10000
Be	PPM	0,01	1000
Bi	PPM	0,02	2000
Ca	%	0,01	40
Cd	PPM	0,01	2000
Ce	PPM	0,1	2000
Co	PPM	0,1	2000
Cr	PPM	0,5	10000
Cs	PPM	0,02	2000
Cu	PPM	0,01	10000
Fe	%	0,01	40
Ga	PPM	0,1	1000
Ge	PPM	0,1	100
Hf	PPM	0,02	1000
Hg	PPB	5	100
In	PPM	0,02	1000
K	%	0,01	10
La	PPM	0,5	10000
Li	PPM	0,1	2000

ELEMENTO	UNIDADE	LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO	LIMITE SUPERIOR DE DETECÇÃO
Mg	%	0,01	30
Mn	PPM	1	10000
Mo	PPM	0,01	2000
Na	%	0,001	10
Nb	PPM	0,02	2000
Ni	PPM	0,1	10000
P	%	0,001	5
Pb	PPM	0,01	10000
Rb	PPM	0,1	2000
Re	PPB	1	1000
S	%	0,02	10
Sb	PPM	0,02	2000
Sc	PPM	0,1	100
Se	PPM	0,1	100
Sn	PPM	0,1	100
Sr	PPM	0,5	10000
Ta	PPM	0,05	2000
Te	PPM	0,02	1000
Th	PPM	0,1	2000
Ti	%	0,001	10
Tl	PPM	0,02	1000
U	PPM	0,1	2000
V	PPM	2	10000
W	PPM	0,1	100
Y	PPM	0,01	2000
Zn	PPM	0,1	10000
Zr	PPM	0,1	2000

Com posse de todas essas informações, foi elaborado um mapa (Figura 10) contendo as amostras trabalhadas e analisadas para a realização desse trabalho. Ao todo foram 589 amostras de sedimentos ativos de corrente, divididos em 3 folhas, totalizando uma área de aproximadamente 10,762,92 km² a amostragem de sedimento ativo de corrente buscou representar áreas de drenagem entre 10 e 30 km².

Figura 10 – Mapa da distribuição das amostras de sedimentos coletadas na área de estudo



Fonte: Larizzatti (2014)

4.2 Seleção e Tratamento dos Dados

Após a obtenção dos resultados analíticos das amostras, via Serviço Geológico do Brasil - SBG e Projeto de Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero, a segunda etapa foi a seleção de quais amostras seriam trabalhadas no contexto desse trabalho. Para isso realizamos a primeira filtragem dos dados a partir da área de estudo, sendo assim foram selecionadas 589 amostras que foram utilizadas no contexto das Folhas Ouro Preto, Igarapé e Belo Horizonte.

Após a seleção das amostras por critérios locais, o próximo filtro foi individualizar através de planilhas criadas no programa Excel 2021, os elementos de interesse e os normalizadores utilizados, são eles Arsênio (As), Cádmiu (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Zinco (Zn), Fósforo (P) e como elementos normalizadores para os cálculos referente ao do Fator de Enriquecimento temos, o Alumínio (Al), Ferro e Manganês (Fe + Mn) e o Cálcio e Magnésio (Ca + Mg). Os elementos foram divididos em colunas de forma a constar a concentração desses

em cada uma das amostras, selecionadas dentro da área de estudo. De posse dessa planilha foi iniciado o tratamento estatístico para cálculo dos *backgrounds* e dos índices geoquímicos por unidades geológicas, que será melhor discutido nos parágrafos que seguem.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado através do cálculo dos *backgrounds* que se origina dos conceitos e ferramentas da estatística descritiva, o que nos permitiu calcular a média, mediana, desvio padrão e distribuição das amostras.

É válido também ressaltar que, os números do sumário estatístico da Tabela 4, extraídos do trabalho de Pereira (2018), além de identificarem os valores máximos e mínimos e os *backgrounds* obtidos representados pela mediana para cada elementos na região do projeto, estão com valores de distribuição log-transformadas, pois reduz os efeitos dos *outliers* nos dados e auxilia na normalização da distribuição deles, além de evitar o efeito de múltiplas populações. Igualmente, foi aplicado nos dados log transformados o teste de normalidade Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar se a distribuição associada aos dados.

Relativamente aos critérios de eliminação de dados, Pereira (2018) excluiu os elementos que mostraram baixo grau de detecção, ou seja, apresentaram mais de 20% das amostras abaixo do limite detecção do método analítico. Estes, não foram considerados nos tratamentos estatísticos uni, bi e multivariados, são eles: Boro(B), Germânio (Ge), Rênio (Re), Enxofre (S), Tântalo (Ta), Telúrio (Te), Tungstênio (W). Portanto, apesar de estarem presentes no levantamento geoquímico realizado pela SGB, suas informações não integraram os trabalhos estatísticos anteriormente realizados sobre os dados.

Tabela 4 – Sumário estatístico dos dados log transformados (Estatística Univariada)

ELEMENTO (Unidade)	SUMÁRIO ESTATÍSTICO UNIVARIADO						
	Amostras (nº)	Média	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Ag (LOG)	731	28,01	2,00	18,00	27,00	38,00	1160,00
Al (LOG)	731	1,54	0,14	1,03	1,68	2,61	8,13
As (LOG)	731	4,92	0,05	1,30	5,00	15,00	1665,00
Au (LOG)	731	1,57	0,10	0,60	1,30	3,10	48980,00
Ba (LOG)	731	65,28	5,50	44,50	67,40	97,10	438,20
Be (LOG)	731	0,44	0,05	0,30	0,50	0,70	3,50
Bi (LOG)	731	0,21	0,01	0,12	0,23	0,37	4,11
Ca (LOG)	731	0,04	0,01	0,02	0,04	0,07	9,54
Cd (LOG)	731	0,04	0,01	0,02	0,03	0,07	4,10
Ce (LOG)	731	45,38	1,50	30,20	47,90	74,70	505,30
Co (LOG)	731	10,14	0,20	5,20	9,60	19,90	894,60
Cr (LOG)	731	46,64	2,40	20,80	43,20	104,20	7003,50
Cs (LOG)	731	0,79	0,01	0,40	0,97	1,66	8,30
Cu (LOG)	731	15,79	1,44	8,38	16,48	28,79	424,00
Fe (LOG)	731	5,20	0,24	2,93	5,08	9,53	40,00
Ga (LOG)	731	6,11	0,60	4,10	6,70	9,80	30,20
Hf (LOG)	731	0,10	0,01	0,06	0,10	0,16	1,65
Hg (LOG)	731	32,33	2,50	20,00	32,00	53,00	2136,00
In (LOG)	731	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,24
K (LOG)	731	0,08	0,01	0,05	0,09	0,14	0,48
La (LOG)	731	17,14	0,60	9,30	17,20	32,50	248,50
Li (LOG)	731	5,79	0,10	4,00	6,80	10,30	50,20
Mg (LOG)	731	0,06	0,01	0,04	0,07	0,12	6,30

ELEMENTO (Unidade)	SUMÁRIO ESTATÍSTICO UNIVARIADO						
	Amostras (nº)	Média	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Mn (LOG)	731	597,38	15,00	292,00	583,00	1307,00	10000,00
Mo (LOG)	731	0,49	0,06	0,31	0,49	0,77	8,38
Na (LOG)	731	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,10
Nb (LOG)	731	0,28	0,02	0,15	0,28	0,54	2,36
Ni (LOG)	731	17,77	0,90	8,00	16,80	38,30	2238,30
P (LOG)	731	0,03	0,00	0,02	0,03	0,04	0,26
Pb (LOG)	731	14,47	1,23	10,30	15,96	22,01	71,38
Rb (LOG)	731	8,81	0,10	3,70	11,50	20,90	115,20
Sb (LOG)	731	0,32	0,01	0,08	0,25	1,21	141,27
Sc (LOG)	731	3,78	0,30	2,40	3,80	6,00	35,60
Se (LOG)	731	0,21	0,05	0,10	0,20	0,40	20,40
Sn (LOG)	731	1,08	0,10	0,60	1,20	2,10	13,60
Sr (LOG)	731	5,17	0,60	3,00	5,30	8,50	506,10
Th (LOG)	731	8,79	0,20	4,50	8,40	17,80	147,10
Ti (LOG)	731	0,02	0,00	0,01	0,03	0,04	0,19
Tl (LOG)	731	0,15	0,01	0,08	0,18	0,31	1,50
U (LOG)	731	1,96	0,10	1,00	1,90	3,80	15,50
V (LOG)	731	35,45	1,00	22,00	37,00	60,00	238,00
Y (LOG)	731	6,27	0,60	3,42	6,46	12,09	55,68
Zn (LOG)	731	29,39	1,30	19,80	29,70	44,80	662,80
Zr (LOG)	731	4,84	0,20	3,20	5,00	7,50	57,20

Fonte: Autor

A aplicação da estatística univariada no cálculo dos *backgrounds* geoquímicos dos elementos estudados se deu através da metodologia MAD (Median Absolute Deviation), que se suporta a partir do cálculo de desvios absolutos dos dados em relação a mediana. Para aplicação da técnica foram seguidas as seguintes etapas, conforme orientado por (Reimann, 2005):

Primeira Etapa: Foi calculada a mediana das amostras de sedimentos ativos de corrente, buscando obter uma representação central em relação a distribuição dos dados.

Segunda Etapa: Realiza-se o cálculo do desvio absoluto de cada amostra em relação ao valor central da mediana obtido na primeira etapa, conforme a fórmula a seguir. Onde X_i = Valor da Amostra

$$(|X_i - \text{mediana}|)$$

Terceira Etapa: É a etapa onde o MAD é determinado a partir do cálculo da mediana dos desvios absolutos.

$$(\text{MAD} = \text{mediana}(|X_i - \text{mediana}|))$$

Quarta Etapa: Última etapa, onde se obtêm os *backgrounds* das amostras e ou elementos a partir da MAD calculado, para isso é necessário se utilizar um fator K tabelado, visando ajustar os desvios padrões no caso de distribuições normais. Onde: $K = 1,4826$. O fator $k = 1,4826$ utilizado na metodologia MAD (Median Absolute Deviation) é uma constante de correção estatística que permite transformar o MAD em um estimador consistente para o desvio padrão em distribuições normais (gaussianas), ou seja, o Fator K permite que o MAD não seja superestimado e seja corrija os dados, conforme seu valor de desvio padrão em dados normalmente distribuídos. (Reimann, 2005).

4.3 Análise Temporal de Uso e Ocupação do Solo

Para a realização da etapa de análise temporal do uso e ocupação do solo na região do trabalho, foram utilizados os dados fornecidos pela plataforma conhecida por MapBiomass, que resumidamente é uma iniciativa do SEEG/OC (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima). Trata-se de uma rede colaborativa de cocriadores formada por ONGs, universidades e empresas de tecnologia que mapeia anualmente o uso e ocupação de solo em âmbito nacional.

Com posse dessa plataforma aberta foi realizada a busca por imagens do tipo TIF, que são arquivos que armazenam informações gráficas *raster*, e imagem de alta precisão, muito utilizadas no geoprocessamento para obtenção de detalhes relevantes para as pesquisas e análises especiais.

Após acesso à plataforma Mapbiomas foi realizado o *download* das imagens TIF de uso e ocupação do solo no intervalo temporal de 20 anos, especificamente do ano de 1990 a 2010. O período escolhido de 20 anos está relacionado à necessidade de se ter um intervalo de tempo maior, visando compreender melhor as dinâmicas de ocupação que são lentas a nível regional. Já em relação ao critério dos anos escolhidos se deu a partir de 1990 até 2010, devido ao ano de coleta das amostras do projeto de mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero que foi em 2010. A escolha temporal dos registros dos sedimentos irá avaliar somente as alterações ambientais até o período de sua coleta, não possuindo informações que sejam posteriores a isso, além de ter sido um período importante no que condiz a ocupação e diversificação de atividades na área estudada e o próprio período de formação dos sedimentos e seus transportes para a área de drenagem.

Após a obtenção das imagens na plataforma MapBiomass, foi utilizado o *Software* QGIS para elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo, eles seguiram escalas e critérios de descrição dos usos originais da própria plataforma Mapbiomas, que variam desde tipos vegetacionais a atividades industriais e agrícolas diversas. Visando simplificar os resultados obtidos junto à plataforma, foi realizada uma reclassificação das classes reduzindo-as a atividades-chaves na região, são elas: Mineração, Área Urbana, Vegetação, Rios e Lagos e Agricultura.

Para análise espacial do uso e ocupação do solo, dividimos o período de 20 anos (1990 a 2010) em mapas de 5 em 5 anos, buscando avaliar a evolução do uso e ocupação do solo de forma gradual, com esse intuito foram criados os gráficos

que mostram a evolução das diferentes classes ao longo do tempo espaço na região estudada.

4.4 Cálculo dos Índices Geoquímicos

4.3.1 Fator de Enriquecimento (EF)

O fator de enriquecimento (ou “Enrichment Factor” - EF) é um índice que permite avaliar o enriquecimento de um elemento através da normalização por outro elemento considerado mais estável e imóvel no ambiente, pelo fato destes elementos atuarem como “esponja” para os conteúdos de metais presentes nas argilas (Windom *et al.*, 1989 *apud* Leão, 2019).

Os Fatores de Enriquecimento (EF) podem fornecer uma visão sobre como diferenciar uma fonte antropogênica de um processo natural. As classes de EF próximos a 1 indicam uma fonte crustal, enquanto valores maiores que 10 estão relacionados a fontes e/ou processos antropogênicos (Nolting *et al.* 1999). Como elemento normalizador, podem ser utilizados vários elementos tais como Sc, Fe, Al, Mn, Ti, Y e Li (Loska *et al.*, 2003; Sutherland, 2000; Lin *et al.*, 2008; Dias e Prudêncio, 2008; Hernandez *et al.*, 2003), neste trabalho foi utilizado o Alumínio (Al), Ferro e Manganês (Fe + Mn) e por fim o Cálcio e Magnésio (Ca + Mg). O Al, além de ser o normalizador mais utilizado, este pode representar as fases de argilominerais; Fe+Mn podem representar óxidos-hidróxidos; e Ca+Mg podem representar fases carbonáticas. Todas estas fases minerais são conhecidas como bons “carreadores” de metais, portanto, as mesmas serão utilizadas neste trabalho para comparação dos resultados e compreensão da influência desses normalizadores na disponibilidade ambiental dos metais pesados e do fósforo.

O cálculo do Fator de Enriquecimento é efetuado com base na seguinte fórmula:

$$EF = \frac{(C_X/C_R)_S}{(C_X/C_R)_{UCC}}$$

EF – Fator de enriquecimento

Cx – Concentração do metal ou elemento de interesse.

Cr – Concentração do metal ou elemento normalizador.

S – Local avaliado – Valores de referência utilizado (Média Crustal - UCC, ou valores de *background* regional)

Na Tabela 5 são apresentadas as categorias de avaliação ambiental referente aos valores de enriquecimento, conforme descrito por Sutherland (2000).

Tabela 5 – Categorias para enquadramento do EF

VALORES de EF	GRAU DE ENRIQUECIMENTO
EF < 1	Depleção/Sem enriquecimento
1 ≤ EF < 3	Enriquecimento natural ou leve
3 ≤ EF < 5	Enriquecimento moderado
5 ≤ EF < 10	Enriquecimento significativo
EF ≥ 10	Enriquecimento severo

4.3.2 Índice de Geoacumulação (Igeo)

O índice de geoacumulação (Igeo) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar o grau de contaminação de solos e sedimentos por metais pesados e outros elementos traço. Ele foi proposto por Müller (1969) e é calculado com base na concentração do elemento em estudo, comparada com um valor de referência (*background*) da crosta terrestre ou de áreas não contaminadas.

O Igeo tem sido utilizado na avaliação de contaminações por metais pesados globalmente, alguns exemplos são os trabalhos de Zhang e Liu (2002) na China, e o de Abraham e Parker (2008) na Nova Zelândia.

O Igeo é calculado pela seguinte fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right)$$

Onde:

C_n: Concentração do elemento no sedimento

B_n: Valor de referência (*background*) do elemento na crosta terrestre ou área não contaminada.

1,5: Fator de correção para variações naturais do *background*

Os valores de Igeo são classificados em sete categorias, que variam de "não contaminado" (Igeo ≤ 0) a "extremamente contaminado" (Igeo > 5), conforme proposto por Müller (1969). A Tabela 6 indica as classificações do Índice de Geoacumulação.

Tabela 6 – Classificação do Índice de Geoacumulação

VALORES Igeo	CLASSIFICAÇÃO	GRAU DE CONTAMINAÇÃO
Igeo ≤ 0	0	Não contaminado
0 < Igeo ≤ 1	1	Levemente contaminado
0 < Igeo ≤ 2	2	Moderadamente contaminado
0 < Igeo ≤ 3	3	Moderadamente a altamente contaminado
0 < Igeo ≤ 4	4	Altamente contaminado
0 < Igeo ≤ 5	5	Altamente a extremamente contaminado
Igeo > 5	6	Extremamente contaminado

Fonte: Muller, 1969.

4.3.3 Fator de Contaminação (Cf)

O nível de contaminação dos metais no sedimento pode ser avaliado a partir de um fator de contaminação (Cf) obtido através da razão entre a concentração do elemento no sedimento superficial e a concentração do seu nível de base natural (NBN) ou *background* (Muller, 1969).

O método é baseado no cálculo para cada poluente de um fator de contaminação (Cf).

$$Cf = C_i / C_b$$

(Cf) Fator de Contaminação

(C_i) Concentração medida de cada metal nos sedimentos

(C_b) Linha de base ou valor do *background* do metal

O Cf é definido de acordo com quatro categorias, de acordo com a Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Classificação do Fator de Contaminação

VALORES	DESCRIÇÃO
Cf < 1	Baixo fator de contaminação
1 < Cf < 3	Fator de contaminação moderado
3 < Cf < 6	Fator de contaminação considerável
Cf > 6	Fator de contaminação muito alto

4.3.4 Grau de Contaminação Modificado

O Grau de Contaminação Modificado é utilizado na avaliação ambiental de matrizes amostrais, tais como, sedimentos e solos. Sua aplicação ocorre principalmente em análise de metais pesados e permite avaliar descargas e poluições de fontes antropogênicas, sendo importante na avaliação dos índices de

risco em uma área (Loska *et al.*, 1997). De acordo com Lima (2020), no trabalho de Abrahim (2008, *apud* ABRAHIM, 2005) foi proposta uma nova fórmula algébrica para cálculo, que define, em escala quantitativa, um valor único para o grau de contaminação dada uma área de estudo, de acordo com a formulação seguinte:

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n}$$

mCd= Grau de Contaminação Modificado

Cf = O fator de contaminação de cada elemento analisado

n = Número de elementos analisados.

Na Tabela 8 é apresentada a relação que classifica os valores obtidos em uma área no contexto do grau de contaminação modificado.

Tabela 8 – Classificação do Grau de Contaminação Modificado

Intervalos de classificação	Nível Categórico
mCd < 1	Nula a muito baixo grau de contaminação
1,5 ≤ mCd < 2	Baixo grau de contaminação
2 ≤ mCd < 4	Moderado grau de contaminação
4 ≤ mCd < 8	Alto grau de contaminação
8 ≤ mCd < 16	Muito alto grau de contaminação
16 ≤ mCd < 32	Extremo grau de contaminação
mCd > 32	Ultra extremo grau de contaminação

Fonte: Lima, 2020 *apud* Abrahim e Parker 2008

Para a obtenção dos resultados, os valores do Grau de Contaminação Modificado foram calculados com base em três *backgrounds* de referência, são eles o Upper Continental Crust (UCC) que se refere a um valor global de concentração do elementos na crosta, o *background* geral da Área Total do Projeto (ATP), e por fim, o *background* com base nas diferentes unidades geológicas da área de estudo, o que nos traz uma visão mais compartimentada do comportamento elementar nos litotipos enriquecidos do Quadrilátero Ferrífero, cabe referenciar que os dados dos *backgrounds* foram extraídos do trabalho de Pereira (2018), cuja a análise e

refinamento dos dados será continuada nesse projeto.

4.3.5 Índice de Risco Ecológico Potencial (PERI)

O índice de risco ecológico (PERI) potencial leva em consideração, além da concentração dos elementos, fatores ambientais diversos, como a mobilidade química do elemento avaliado, seus efeitos nos seres vivos e no ecossistema, além de seu nível de toxicidade.

De acordo com Li *et al.* (2008), esse índice objetiva o fornecimento de uma estimativa de risco em relação à existência de contaminantes e suas concentrações, sendo muito aplicado para a gestão ambiental de áreas. Os valores para o PERI também foram calculados, considerando diferentes *backgrounds* de referência, assim como o índice de contaminação modificado, suas referências foram os valores de *background* elementar do UCC, da ATP e das unidades geológicas individualizadas.

A fórmula do IREP será apresentada a seguir:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot CF_i$$

Onde:

Tr: Fator de Resposta a Toxicidade de um determinado metal, sendo o mesmo tabelado, conforma valores a seguir: As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2), Cu (5), Mo (5), Mn (1), Ni (5), Pb (5), Ti (1) U (2) e Zn (1)

CF é o fator de contaminação para cada metal poluente considerado

Na Tabela 9 é apresentada a classificação de risco segundo os valores obtidos pelo IREP.

Tabela 9 – Classificação de Risco conforme Índice de Risco Ecológico Potencial

VALORES	DESCRIÇÃO
< 150	Baixo Risco
150 – 300	Risco Moderado
300 - 600	Alto Risco
> 600	Risco Extremo

4.5 Elaboração dos Mapas Temáticos e Geoquímicos

Para elaborar os mapas temáticos e geoquímicos dessa pesquisa contamos com o auxílio do QGIS (Quantum GIS), trata-se de um *software* globalmente conhecido, por se tratar de uma ferramenta de geoprocessamento gratuita, que possui seu código aberto e livre para utilização pelos diferentes entes da sociedade. Tornando-o acessível para muitos estudantes que necessitam realizar análises espaciais ou aplicar outros instrumentos do geoprocessamento em suas pesquisas (QGIS Development Team, 2024).

A etapa referente a construção dos mapas temáticos se dá através da organização dos dados espaciais georreferenciados e busca por informações vetoriais, geográficas e ambientais em plataformas oficiais, os dados são manipulados através do *software* QGIS Versão 3.34 – Prizen, que permite a criação de camadas temáticas e a utilização de funções avançadas de visualização e análise espacial. No que se refere à produção dos mapas geoquímicos e dos índices ambientais, a técnica utilizada foi a de a interpolação espacial, especificamente a *Interpolation by Inverse Distance Weighting* (IDW), que é comumente aplicada a situações em que é necessário estipular valores para pontos que não tiveram amostragem em campo, ou seja, normalmente em áreas de grande extensão, como é o caso da nossa área de estudo, em que a malha amostral não consegue atender toda a área.

A técnica IDW atribui um peso maior aos valores mais próximos dos pontos de amostragem, ou seja, os valores das variáveis dependem da distância entre os pontos amostrados e os locais de previsão (Shepard, 1968). A metodologia IDW foi escolhida devido suas vantagens, sendo um método matemático simples, (Shepard, 1968; Li & Heap, 2011), é adequado para dados espaciais onde a influência de um ponto diminui com a distância (Lu & Wong, 2008) e permite ajustar o parâmetro de ponderação (potência), o que possibilita controlar a influência dos pontos vizinhos. (Zimmerman *et al.*, 1999). Apresenta também algumas desvantagens, uma vez que pode gerar resultados imprecisos quando os pontos amostrados estão mal distribuídos ou agrupados, pois não considera a estrutura geral dos dados (Li & Heap, 2011).

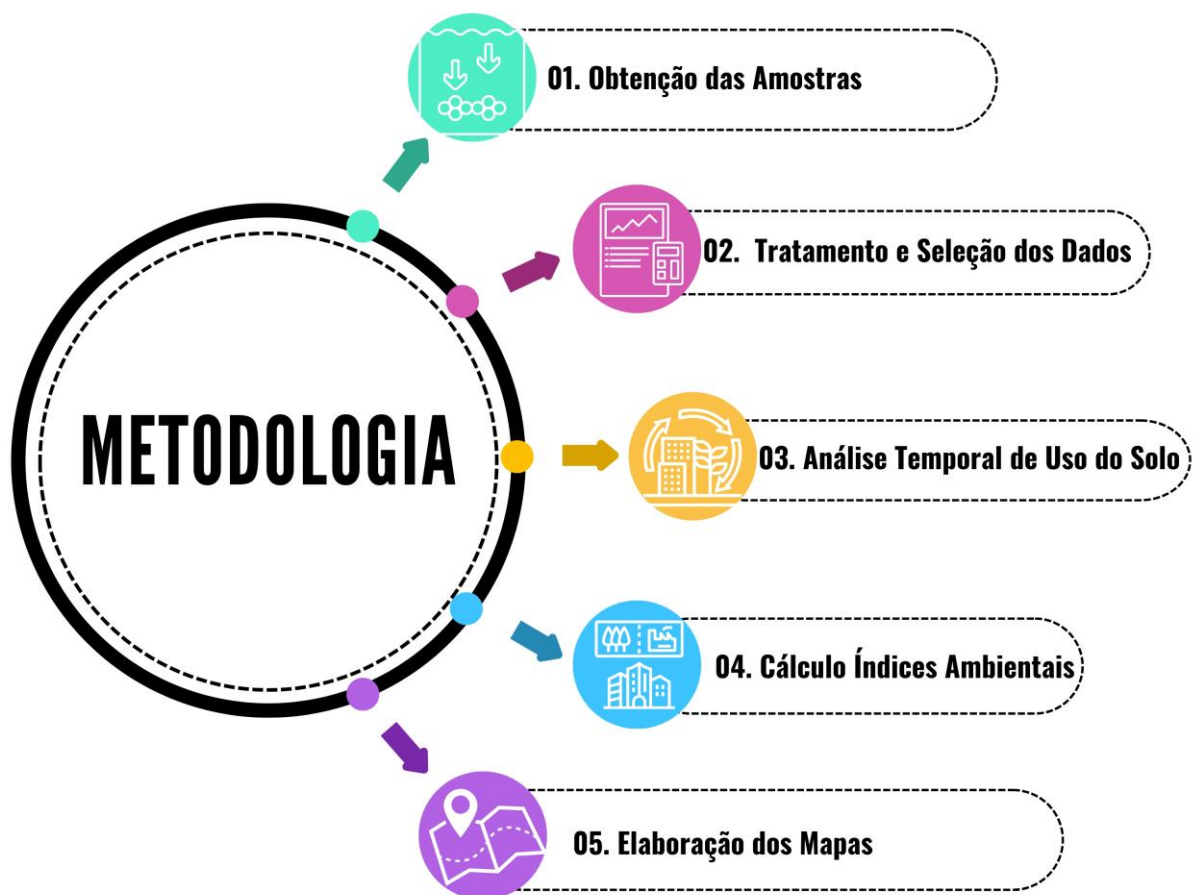
Os demais métodos de interpolação e estimação de dados, tais como, Krigagem e Regressão foram considerados, mas descartados devido o conjunto de

vantagens do IDW e as características dos dados.

Essa foi uma etapa importante do trabalho, pois como citado por Leão (2019, p.18) a elaboração de mapas com a temática ambiental proporciona uma concentração de informações que permite a fácil interpretação, auxiliando no reconhecimento e gestão ambiental de áreas impactadas.

4.6 Esquema Metodológico Geral

Figura 11 – Esquema Metodológico Geral



Fonte: Autor

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos para sedimentos de corrente foram explorados usando técnicas estatísticas comuns (estatística univariada) para cálculo dos *backgrounds* elementares e especializados a partir dos resultados referentes aos índices geoquímicos calculados, a partir dos quais foi possível identificar várias anomalias na região, relativamente aos os elementos avaliados.

A produção cartográfica desse trabalho permitiu avaliar a evolução do uso e ocupação do solo ao longo do período de 20 anos (1990 a 2010) e diferentes comportamentos geoquímicos ao longo da área estudada para os elementos selecionados, corroborando para a identificação de padrões já esperados em algumas porções das áreas e outros com caráter mais inquietante.

A seguir serão apresentados os dados que resultaram dessa pesquisa, a organização do tópico foi estruturada a partir da apresentação dos mapas de uso e ocupação do solo e suas evoluções ao longo do tempo analisado, dos cálculos dos índices geoquímicos produzidos para a área de estudo, expressos através da cartografia geoquímica. A exposição dos resultados para o uso e ocupação do solo, será feito de forma tabelada, apresentando dados da evolução ao longo dos anos das diferentes classes de ocupação na área de estudo. Referente aos resultados dos índices ambientais, os mesmos foram divididos em índices multielementares e unielementares. A interpretação dos resultados será feita a partir da distribuição dos valores ao longo do mapa, e quando possível, relacionando os dados obtidos a outros estudos e pesquisas disponíveis na literatura científica, observando as possíveis relações deles com a ocorrências das principais unidades geológicas da área de estudo: Complexo Bação (BA), Complexo Bonfim (BN), Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), Supergrupo Minas (SGM) e Complexo Belo Horizonte (BH). Criando assim mecanismos de análises robustos para a interpretação dos dados obtidos e suas respectivas fontes.

Para o auxílio da compreensão da distribuição espacial dos elementos químicos, considerados para elaboração dos índices geoquímicos, foram elaborados os respectivos mapas, os quais se encontram no Apêndice A.

5.1 Evolução Temporal do Uso e Ocupação do Solo (1990 à 2010)

Os resultados para a evolução temporal do uso e ocupação do solo, trazem informações referentes a cinco classes na área de estudo. São elas: Vegetação, Agricultura, Área Urbana, Mineração, Lagos.

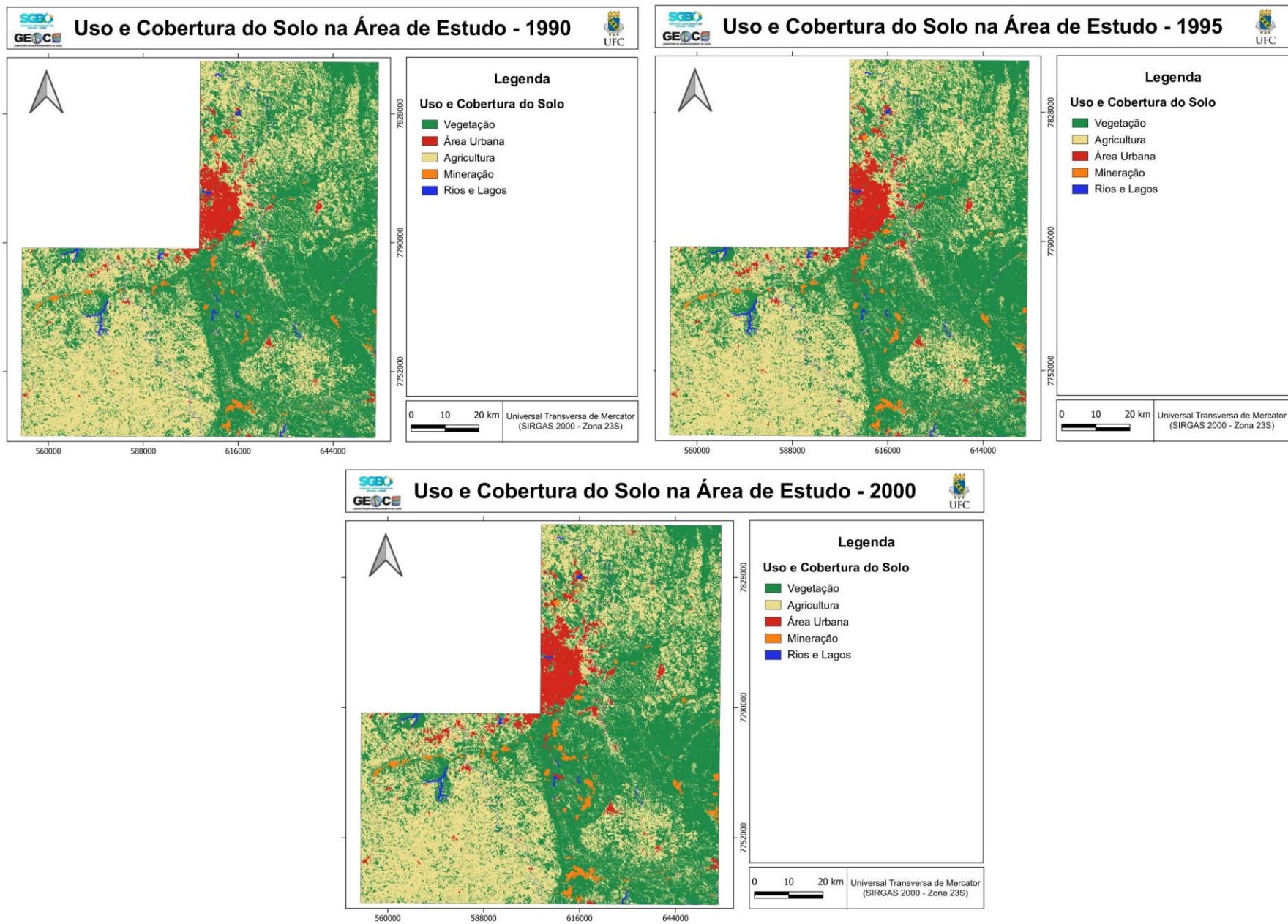
No contexto geral de 1990 a 2010, os resultados demonstram a diminuição da vegetação que passou de 53% em 1990 para 51% em 2010, as áreas ocupadas por atividades correlacionadas a agricultura também sofreram redução de 42% em 1990 para 40% em 2010. Em contramão a essa tendência temos o

aumento das áreas urbanas, que passaram de 3% em 1990 para 5% em 2010. E para as atividades de Mineração temos a seguinte progressão de 1% em 1990 e 2% em 2010. No que diz respeito às regiões de lagos ou represas hídricas, o valor se manteve em 1%.

A seguir serão apresentados na Figura 12 os mapas de uso e ocupação do solo na área de estudo para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010, e logo após na Tabela 10, os dados referentes as diferentes classes de ocupação contendo seus respectivos valores na área em km² e suas porcentagens ao longo dos anos. Em termos espaciais temos os seguintes resultados, as áreas urbanizadas cresceram aproximadamente 191,19 km², as áreas utilizadas para agricultura tiveram redução de aproximadamente 163,56 km², a extensão dos empreendimentos de mineração cresceu 102,89 km², e perdeu-se de vegetação 111,04 km² aproximadamente.

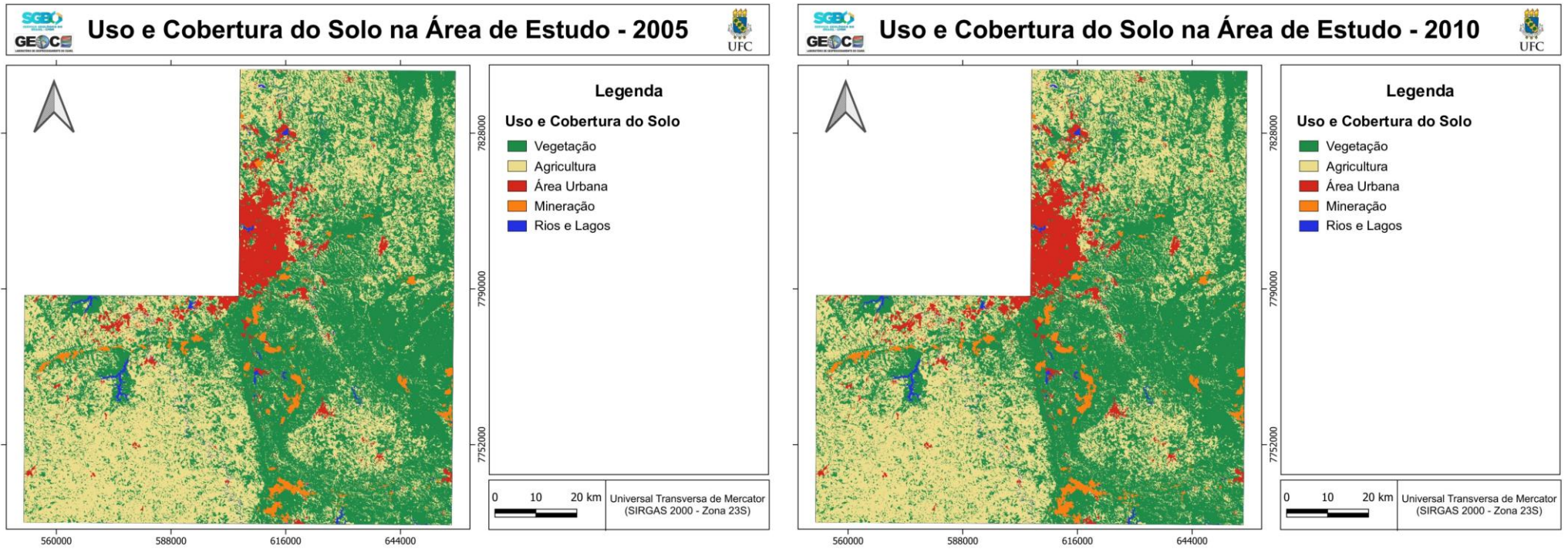
Apesar do aumento nas áreas urbanas, de mineração e agricultura na região, a extensão total da área de estudo é suficientemente grande para que esses incrementos não representem uma mudança significativa em escala regional. No entanto, tais atividades merecem atenção devido aos seus impactos locais, que podem afetar ecossistemas, recursos hídricos e a qualidade de vida das comunidades próximas, exigindo monitoramento contínuo e medidas de mitigação para garantir um desenvolvimento equilibrado e sustentável.

Figura 12 – Mapas de Evolução Uso e Ocupação do Solo - (1990-1995-2000)



Fonte: Autor

Figura 13 – Mapas de Evolução Uso e Ocupação do Solo - (2005-2010)



Fonte: Autor

5.2 Índices Unielementares

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos diferentes índices univariados utilizados nesse estudo, que revelaram concentrações anômalas de elementos como em áreas específicas, associadas principalmente a atividades minerárias e feições geológicas do Quadrilátero Ferrífero.

Cabe citar ainda que para cálculo dos índices foi utilizado como base os seguintes valores de backgrounds elementares, obtidos através da metodologia MAD, como já apresentado nesse estudo, os valores são os seguintes: As=1ppm, Cd=0,02ppm, Cr=14,75 ppm, Ni=6,05, P= 0,018 ppm, Pb=15,48 ppm e o Zn=23,15.

5.2.1 Fator de Enriquecimento e Normalizados (Al), (Fe+Mn) e (Ca+ Mg)

O fator de enriquecimento nesse trabalho teve o objetivo de identificar a concentração e ou empobrecimento de determinado elemento em uma amostra. Já os elementos normalizadores são responsáveis por ajudar a minimizar a variação natural das composições químicas presentes nas amostras, garantindo assim uma certa estabilidade no processo de identificação das possíveis fontes de enriquecimento de determinado elemento.

Os resultados do fator de enriquecimento foram estruturados com base em três conjuntos de elementos normalizadores, são eles: Alumínio (Al), Ferro e Manganês (Fe+Mn) e o Cálcio e Magnésio (Ca + Mg).

Resumidamente o Alumínio representa geologicamente os argilominerais, é um elemento que dificilmente é mobilizado em processos químicos e, portanto, isso permite corrigir os efeitos da granulometria. O Ferro + Magnésio são representantes dos minerais óxidos e hidróxidos e são comumente utilizados ambientes onde há precipitação de partículas ricas em Ferro e eficientes na identificação de fontes antrópicas ligadas a processos redox. E por fim, o Ca+Mg que representam geologicamente os carbonatos, muito utilizados na identificação de elementos principalmente os de fonte biogênicas.

De posse dessas informações a seguir serão apresentados os mapas obtidos para os fatores de enriquecimento na área de estudo para os 3 tipos de normalizadores

5.2.1.1 Arsênio

Os mapas para Arsênio em diferentes normalizadores apresentaram valores classificados como extremamente poluídos, para duas regiões específicas, a região limítrofe entre o Supergrupo Minas, Supergrupo Rio das Velhas e o Complexo Bonfim, mas especificamente na Região do Gabro Monsenhor Isidro na região central da área e na região próxima ao Complexo Caeté.

O normalizador que apresentou mais focos de enriquecimento elevado foi o Alumínio, seguido do Cálcio e Magnésio e posteriormente do Ferro e Manganês (Figura 16). É importante ressaltar que no caso do normalizador (Al), um dos focos mais extensos na região do mapa está locada sobre o Complexo Belo Horizonte. Na região que, de acordo com o mapa de uso e ocupação, se localiza a área urbanizada do município, trata-se de um dado que deve ser analisado com cautela, pois o levantamento geoquímico realizado na região, evitou amostrar em regiões intensamente urbanizadas, havendo nessas porções malhas amostrais de menor densidade, ou até mesmo nenhuma, apoiando a crença de que algumas concentrações nessa região podem ser resultantes do processo de interpolação dos dados e não necessariamente da geologia ou de fontes industriais.

Em relação ao Ca+Mg os resultados apresentam valores mais moderados e dispersos, considerando que as regiões de ocorrência estão divididas entre Complexo Bação e Bonfim (Granitóides) e o Supergrupo Minas entende-se que o enriquecimento por esse normalizador pode trazer informações mais específicas a fontes antrópicas, pois estão correlatas a regiões de pastagem e localmente minerações.

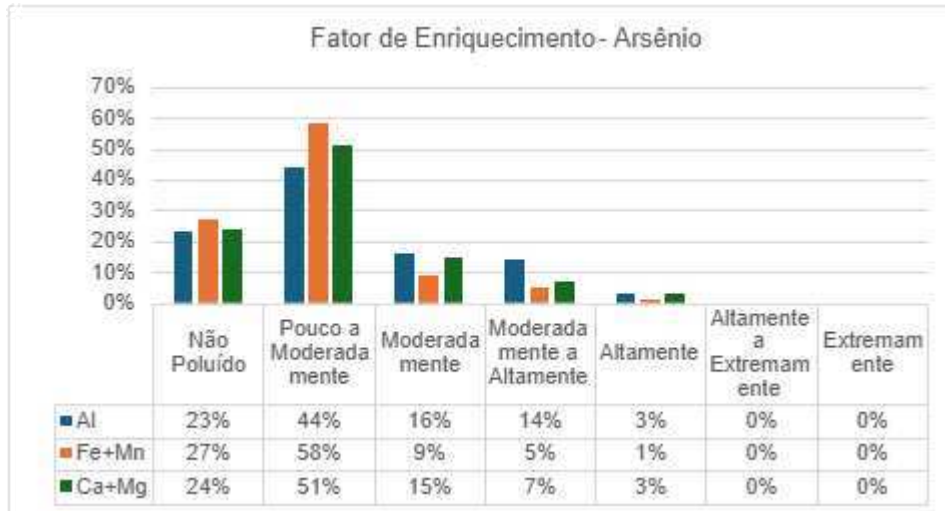
No que tange o normalizador Fe + Mn, foi o que apresentou os melhores resultados no que concerne os limiares de enriquecimento, apresentando valores menores e menos dispersos. Tendo em vista que esse normalizador é mais eficiente para avaliação de óxidos e hidróxidos, e o Arsênio na região tenha uma origem mais voltada aos sulfetos e aos Greenstones Belts do Supergrupo Rio da Velhas, pode estar havendo um subdimensionamento dos valores de arsênio.

De acordo com Costa *et al.*, 2015 as rochas do Grupo Bambuí, especialmente os folhelhos e carbonatos, apresentam teores naturalmente elevados de arsênio, que podem ser mobilizados para o ambiente por processos de

intemperismo. Além disso a presença de arsênio nos sedimentos do Grupo Bambuí está associada à mineralização de sulfetos e à matéria orgânica presente nas rochas sedimentares Sracek *et al.* (2010).

O Gráfico 3, apresenta um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Arsênio, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

Gráfico 1 – Distribuição de valores do FE para Arsênio nos diferentes normalizadores

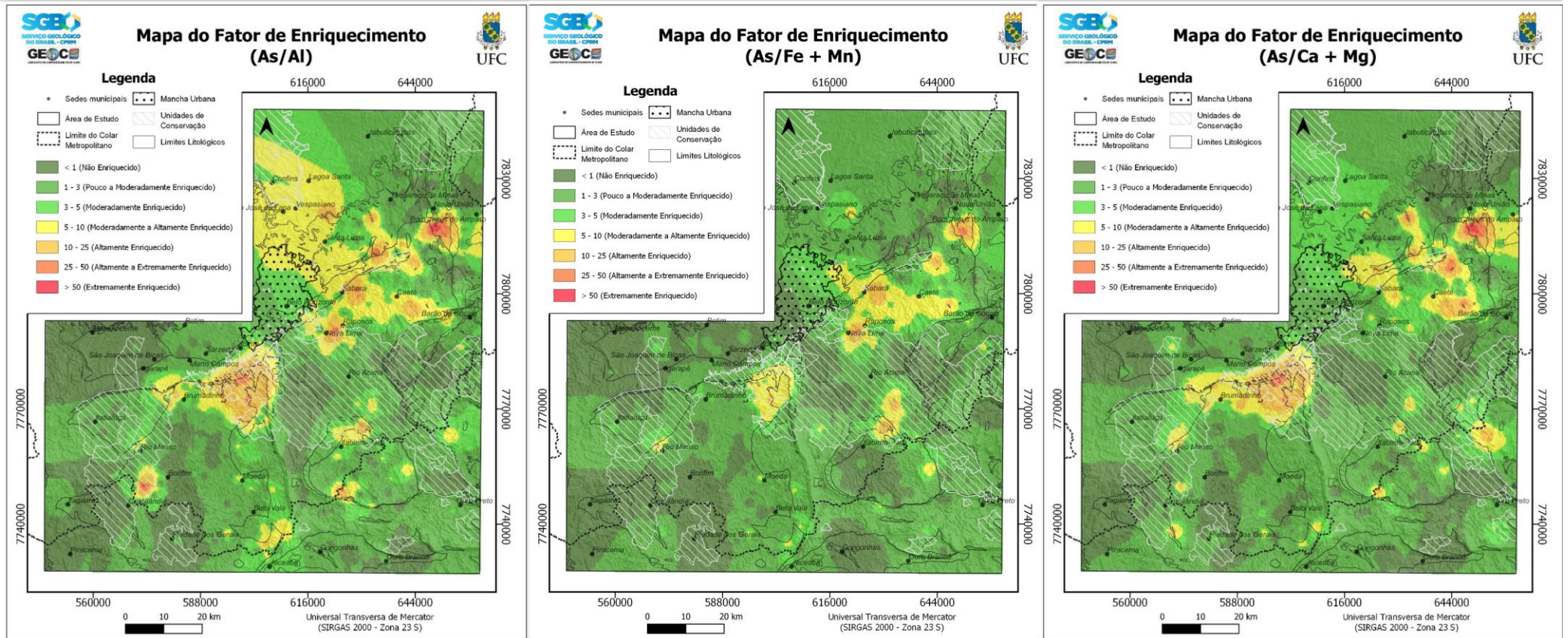


Fonte:Autor

O gráfico mostra que os valores, no contexto dos normalizadores Alumínio e Cálcio+Magnésio, apresentaram dados maiores para valores no limiar de moderada a altamente enriquecido, enquanto o normalizado Ferro+Manganês, apresentou maiores porcentagens em limiares mais baixos, como não enriquecido ou pouco a moderadamente enriquecido.

De forma geral os normalizadores Ca+Mg e Al apresentaram valores com maior distribuição no que se refere ao enriquecimento de Arsênio na área de estudo.

Figura 14 – Fator de Enriquecimento do Arsênio com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.1.2 Cádmio

Os mapas para Cádmio (Figura 17), mesmo em diferentes normalizadores, apresentaram resultados similares, onde os valores variaram de moderada a extremamente poluídos, em apenas uma região o extremo sudeste do mapa, entre as regiões dos municípios de Ouro Preto, Congonhas e Ouro Branco, vinculado a região de ocorrência do Supergrupo Minas.

O normalizador que apresentou mais foco de enriquecimento foi o Ferro e Manganês, seguido do Alumínio e Cálcio e Magnésio. É relevante ressaltar que no caso dos normalizadores Fe+Mn, a região é conhecida pela intensa atividade mineira e depósitos de ferro com altas concentrações, sendo assim a presença de óxidos e hidróxidos de ferro é abundante e foi onde os resultados tiveram registro de maior contaminação. Os minerais típicos do Cádmio são a greenockita (CdS), a octavita (CdCO₃), entre outros, além disso, de acordo com Reimann e Caritat (1998), o Cádmio pode substituir o Mn²⁺, o que permite explicar sua acumulação no Supergrupo Minas que pode estar vinculada ao minério de ferro deste grupo que também tem associação com o Manganês (Mn). No caso do Alumínio, o mesmo seguiu o mesmo padrão do Ferro e Manganês, com a diferença que ele apresentou uma concentração moderadamente elevada na região central na região do Supergrupo Rio das Velhas próximo ao limite com o Supergrupo Minas, especificamente na região da Suíte Alto Maranhão, nos quartzitos do Grupo Itacolomi e sobre as rochas ultramáficas do Grupo Nova Lima, em uma região que o mapa de uso e ocupação registra atividades mineiras e um pequeno aglomerado urbano e até mesmo uma Unidade de Conservação, o Parque Estadual da Serra de Ouro Branco mais precisamente a Área de Proteção Especial Veríssimo.

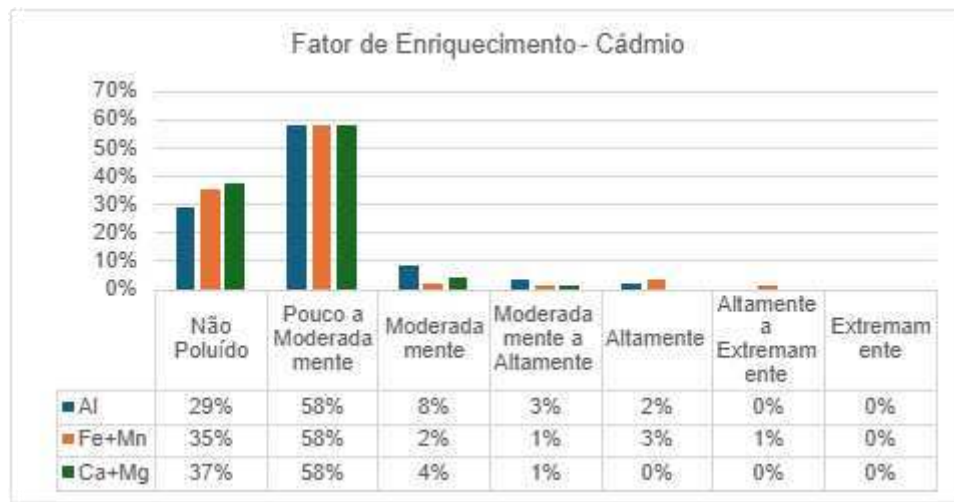
Em relação ao Ca+Mg, os resultados apresentam valores mais baixos e o que desperta maior atenção é uma pequena ocorrência de concentração do Cádmio na região do Grupo Bambuí ao norte do mapa, em regiões ocupadas por pastagem, permitindo inferir uma fonte antrópica decorrente da utilização de pesticidas e demais produtos agrícolas, que tenham resíduos desse elemento, tendo em vista que a geologia na região, não teria muito efeito sobre a ocorrência de Cádmio.

De acordo com Alkmim & Marshak, (1998), as litologias do Quadrilátero Ferrífero, como formações ferríferas bandadas (BIF's) e rochas metavulcânicas, apresentam teores variáveis de cádmio, dependendo da presença de sulfetos

associados. De forma geral os solos e sedimentos derivados de rochas do Quadrilátero Ferrífero apresentam concentrações elevadas de cádmio, devido à herança geoquímica das rochas fonte ricas em sulfetos. Matschullat *et al.*, (2000)

No Gráfico 4, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Cádmio, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

Gráfico 2 – Distribuição de valores do FE para Cádmio nos diferentes normalizadores

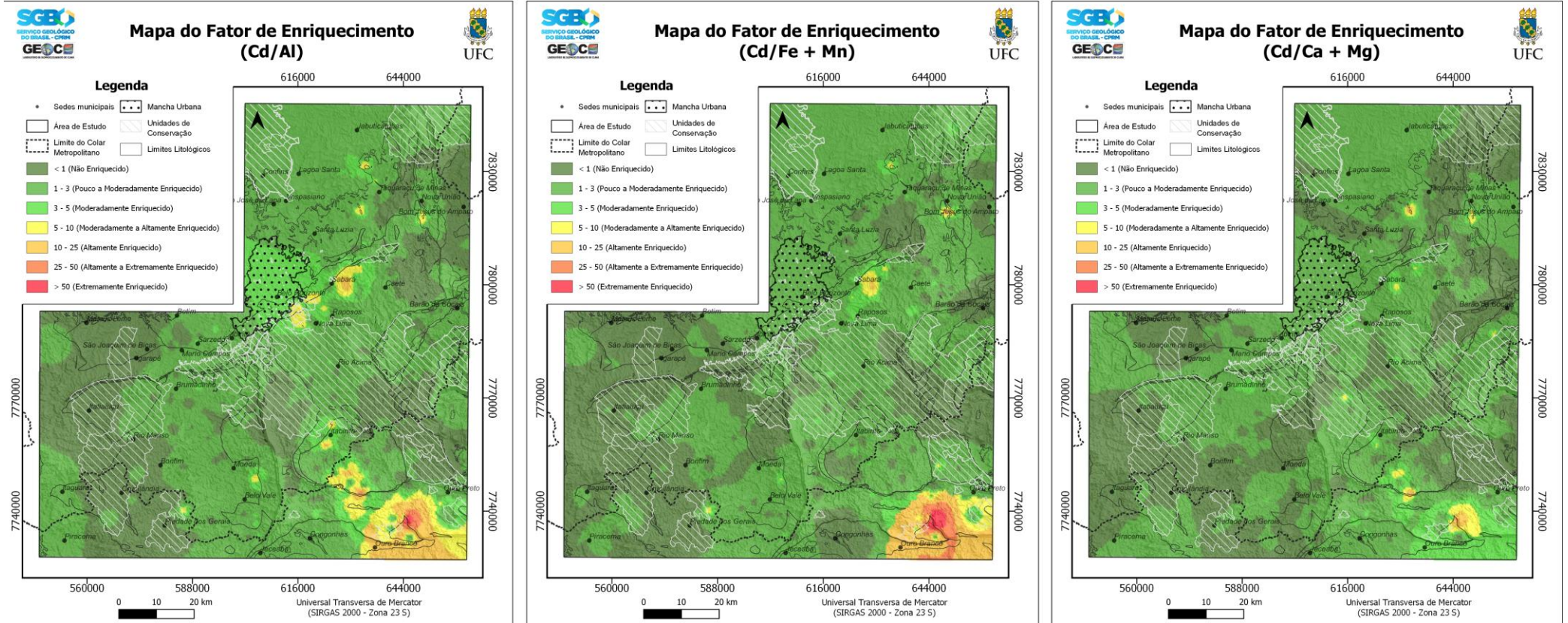


Fonte: Autor

O gráfico mostra que os valores no contexto do normalizador Fe e Mn, apresentaram dados mais enriquecidos e em maiores limiares atingindo classes de altamente e altamente a extremamente enriquecidos. Enquanto Ca e Mg e Al tiveram seus valores mais distribuídos em classes menores de enriquecimento, no caso do Al chegando à região máxima a de altamente enriquecido e o Ca e Mg somente até moderada a altamente enriquecido.

De forma geral o normalizador Fe apresentou as maiores distribuições no que concerne o enriquecimento de Cádmio na área de estudo.

Figura 15 – Fator de Enriquecimento do Cádmio com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.1.3 Chumbo

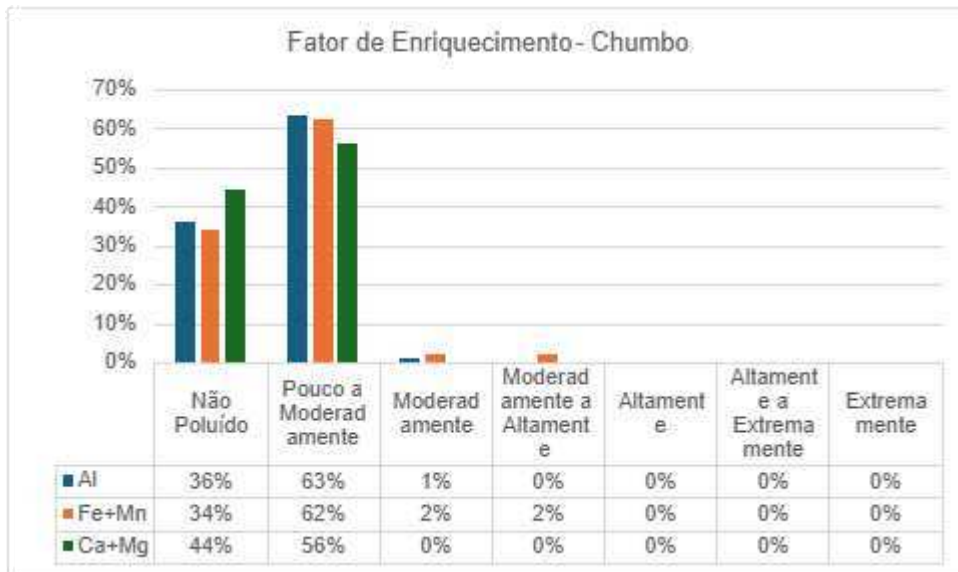
No que tange os resultados para Chumbo (Figura 18) temos, no caso do normalizador Alumínio, poucas regiões consideradas moderadamente contaminadas, são poucos os focos existentes e bem localizados, encontram-se geologicamente sobre os Granitos do Complexo Bação e os Granitos Samambaia e próximo a região de ocorrência do Grupo Nova Lima pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas. No caso do mapa com o normalizador Ferro e Manganês os resultados foram mais marcantes que em relação aos outros normalizadores de ocorrência pontual, porém, com valores que variaram de moderadamente a altamente contaminado, um aspecto importante a ser analisado é em relação à geologia, sendo que está localizado no mesmo ponto onde ocorreram valores de extremamente poluídos para Chumbo. No que diz respeito ao normalizador Cálcio e Magnésio, toda a área de estudo apresentou valores não poluído a pouco ou moderadamente poluído, não produzindo áreas que chamassem atenção para este elemento.

Conforme citado por Vieira (2006), a mineralização de chumbo no Quadrilátero Ferrífero está frequentemente associada a veios hidrotermais e zonas de alteração em rochas metassedimentares e tem como sua principal ocorrência a Galena (PbS - Sulfeto de Chumbo) comumente encontrado em rochas ultramáficas, explicando a sua concentração maior no mapa do normalizador de Fe e Mn, na porção sul do mapa, sobre o Grupo Nova Lima, pertencente ao supergrupo Rio da Velhas.

Lobato *et al.* (2001) afirmam que as rochas metassedimentares do Grupo Caraça e as rochas metavulcânicas do Grupo Nova Lima apresentam teores significativos de chumbo, especialmente em zonas mineralizadas.

No Gráfico 5, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Chumbo, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

Gráfico 3 – Distribuição de valores do FE para Chumbo nos diferentes normalizadores

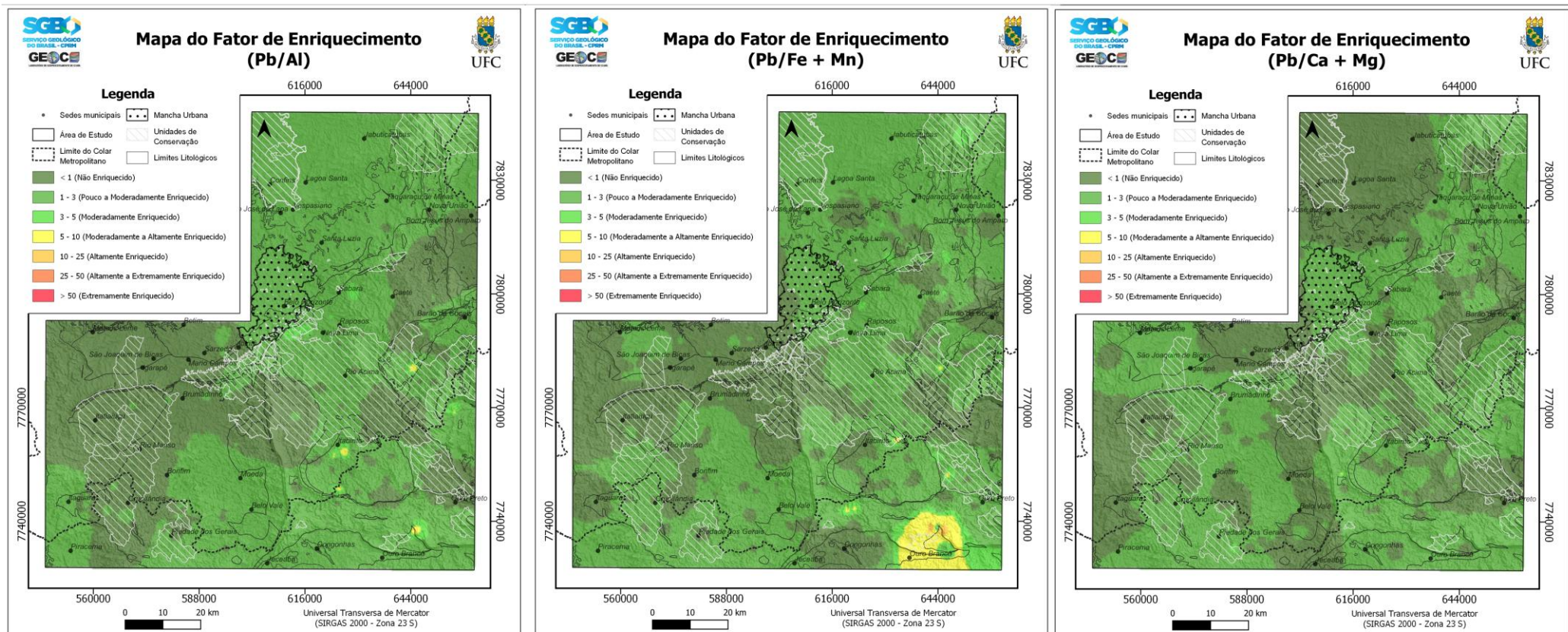


Fonte: Autor

O gráfico mostra que os valores no contexto do normalizador Fe e Mn, apresentaram dados mais enriquecidos e em maiores limiares atingindo classes de altamente e extremamente enriquecidos. Enquanto Ca e Mg e Al tiveram seus valores mais distribuídos em classes menores de enriquecimento, no caso do Al chegando à região máxima, a de altamente enriquecido, e o Ca e Mg somente até moderada a altamente enriquecido.

O normalizador Fe apresentou as maiores distribuições relativamente ao enriquecimento de Cádmio na área de estudo.

Figura 16 – Fator de Enriquecimento do Chumbo com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.1.4 Cromo

Referente ao comportamento do Cromo em relação aos normalizadores (Figura 19), os resultados apresentam as seguintes estruturas. Os resultados são relativamente similares, entretanto para o normalizador Al os dados apresentaram picos com regiões alta e extremamente poluídos, no caso do Fe + Mn o valor máximo atingiu valores até altamente poluídos. Com a menor influência em relação ao Cromo temos o Ca+Mg, com exceção da sua porção a sudoeste do mapa, que apresentou uma área de ocorrência mais extensa, porém somente entre moderado e altamente poluído.

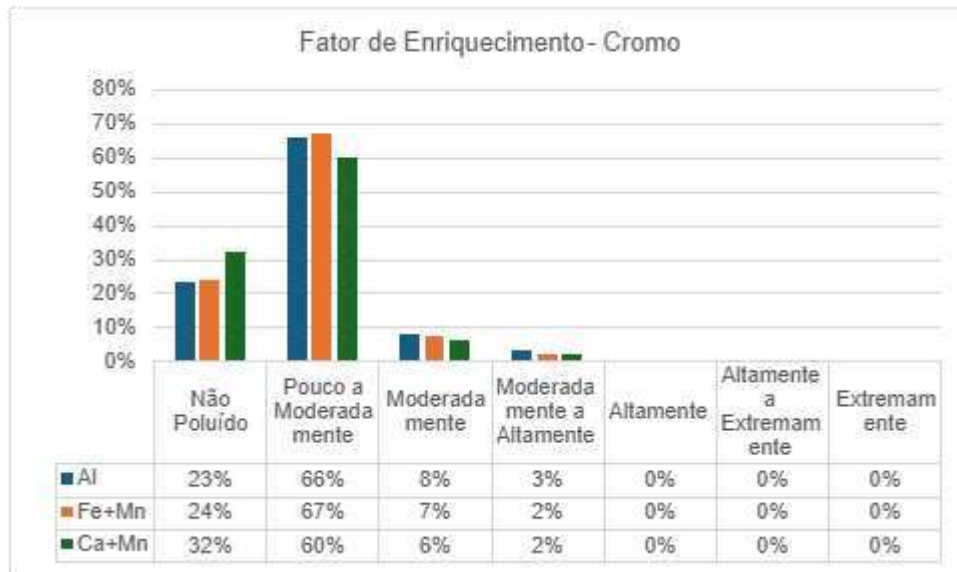
No que se refere às principais unidades geológicas afetadas pelos valores de cromo, temos o Complexo Bação com ocorrência de granitoides, no contexto do Supergrupo Rio das Velhas o Grupo Nova Lima com ocorrências de rochas máficas e ultramáficas e no Supergrupo Minas temos o Grupo Sabará composto por metassedimentos.

O cromo é um elemento característico de rochas máficas e ultramáficas, como peridotitos e serpentinitos, que ocorrem em associação com os complexos ofiolíticos do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak, 1998). No contexto geológico, o cromo é encontrado em rochas ultramáficas, particularmente associadas a minerais como a cromita (FeCr_2O_4), o que corrobora para crer na fonte natural no Grupo Nova Lima, porém quando se vai para o contexto do Complexo Bação, temos uma região extensa ocupada por usos agrícolas diversos e sem registros de atividades mineiras, apesar dessa área ter tido um ressalte grande no que concerne o normalizador Ca+Mg, nos demais normalizadores sua concentração foi bastante pontual, o que pode indicar uma fonte de enriquecimento antrópica.

No contexto dos BIF's, localizado no Supergrupo Minas, de acordo com Rosière *et al.* (2008), o cromo é frequentemente encontrado em zonas de alteração hidrotermal, onde ocorre a substituição de minerais primários por fases ricas em cromo.

No Gráfico 6, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Cromo, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

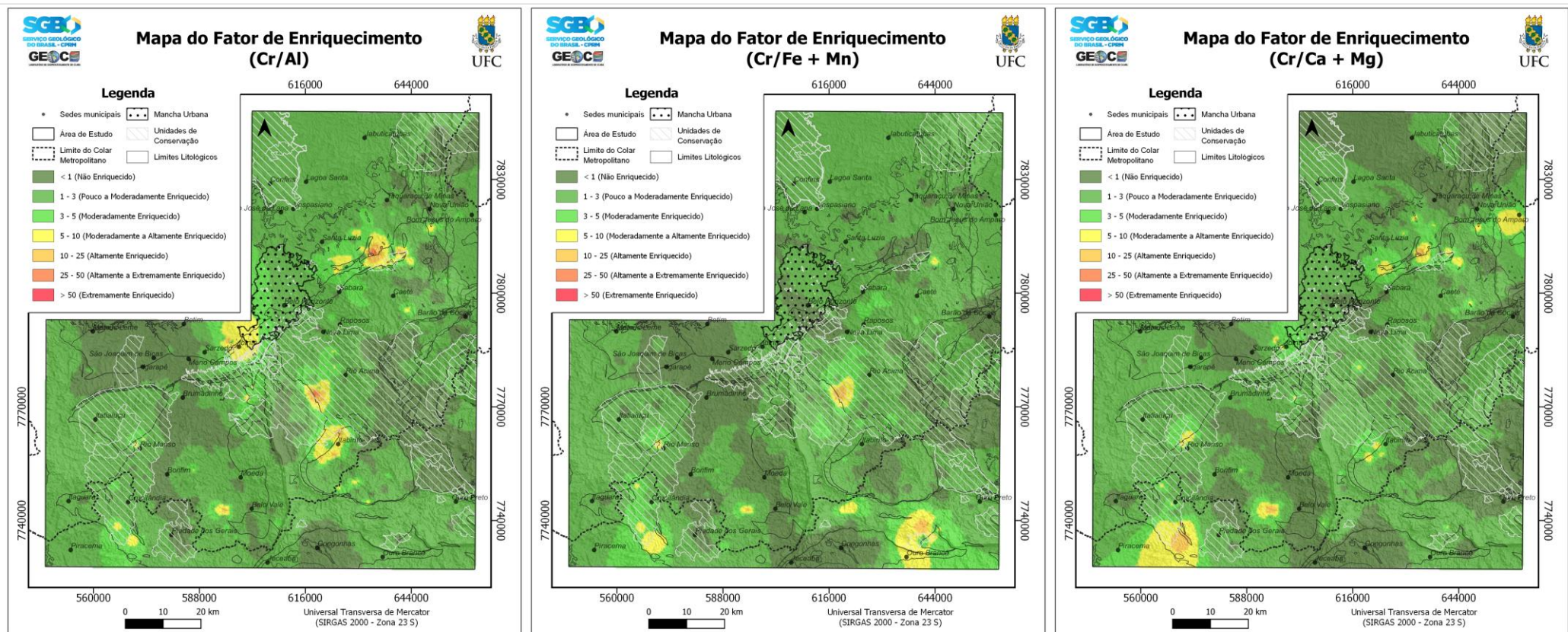
Gráfico 4 – Distribuição de valores do FE para Cromo nos diferentes normalizadores



Fonte: Autor

O gráfico mostra que os valores no contexto dos três normalizadores foram bem similares, ambos atingiram como limiar máximo a região de moderada a altamente enriquecido. A distribuição de seus valores nas diferentes classes também é bem parecida com um pequeno destaque para o alumínio, que apresentam valores nas classes de maior enriquecimento um pouco maiores.

Figura 17 – Fator de Enriquecimento do Cromo com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.1.5 Níquel

Referente aos dados de Níquel temos as seguintes características para os fatores de enriquecimento (Figura 20). No que concerne o normalizador Al, os maiores valores foram registrados na região do Complexo Bação, Grupo Sabará e Grupo Nova Lima. Em relação aos normalizadores Fe+Mn e Ca+Mg, houve menos focos com concentrações mais enriquecidas no elemento, porém seguem a mesma relação geológica com os grupos já supracitados para o Alumínio, com a diferença que nesses normalizadores houve a ocorrência de pontos sobre o Complexo Bonfim, principalmente com Ca+Mg.

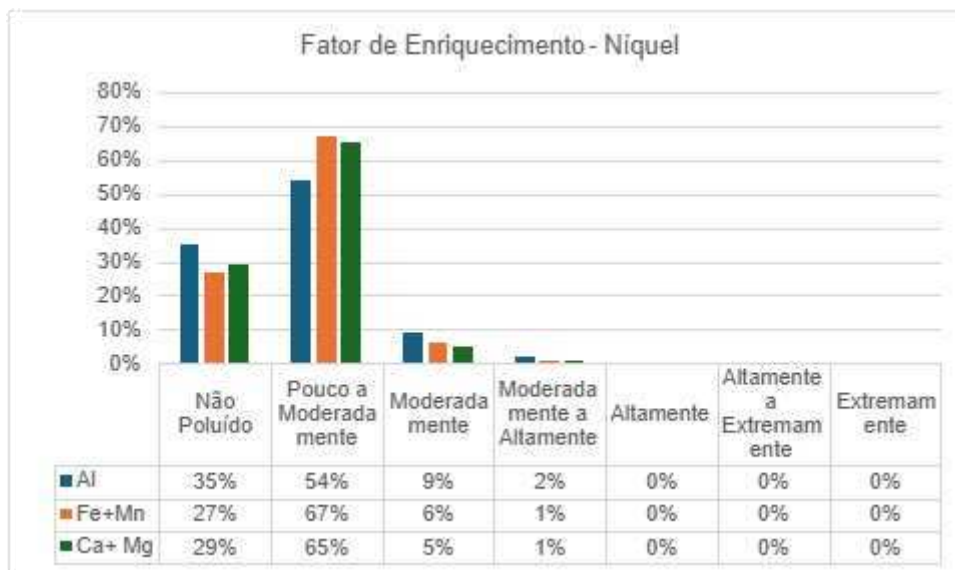
O Alumínio parece representar melhor as ocorrências geológicas que os demais normalizadores para este elemento, pois seus grupos de ocorrência, principalmente o Grupo Nova Lima e Sabará, estão em regiões próximas de ocorrências de rochas máficas e ultramáficas. A forte correlação do níquel com cobalto e ferro em solos e sedimentos reflete sua origem comum em minerais primários de rochas máficas e ultramáficas, onde está associado a minerais como a pentlandita ((Ni,Fe)₉S₈) (Turekian & Wedepohl, 1961), com o detalhe de que os pontos de altamente a extremamente contaminado, ocorrem em regiões em que há também registros da atividade de mineração, que pode ser um atenuador desses valores. Em relação aos demais normalizadores, são ocorrências mais pontuais e moderadamente poluídas na região do Complexo Bonfim, que sofre com a atividade agrícola mais intensa e onde os dois normalizadores mostraram ocorrências, a sua existência pode ser correlata a utilização de fertilizantes.

Nas rochas ultramáficas do Complexo Metamórfico do Quadrilátero Ferrífero, de acordo com Lobato *et al.* (2001), os teores elevados de níquel são frequentemente associados à formação de minerais como pentlandita e garnierita.

Já no contexto laterítico e de metassedimentos a alteração de rochas ultramáficas no Quadrilátero Ferrífero, de acordo com Vieira (2006), resulta na formação de depósitos lateríticos de níquel, onde o elemento é concentrado em zonas de intemperismo.

No Gráfico 7, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Níquel, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

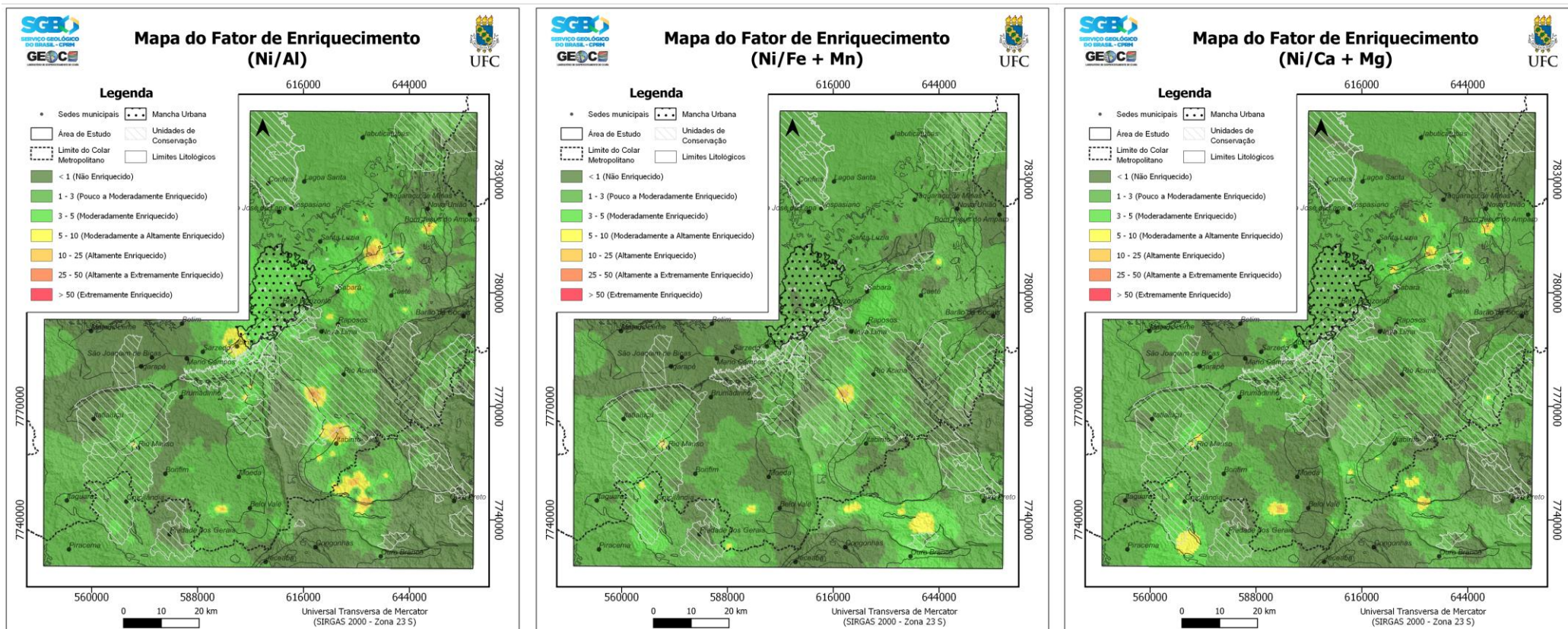
Gráfico 5 – Distribuição de valores do FE para Níquel nos diferentes normalizadores



Fonte: Autor

O gráfico mostra que os valores no contexto dos três normalizadores foram bem similares, todos atingiram como limiar máximo a região de moderada a altamente enriquecido. A distribuição de seus valores nas diferentes classes variou com tendências maiores de distribuição para Al em limiar de não enriquecido, e destaque para Fe e Mn e Ca e Mg na região de pouco a moderadamente enriquecido.

Figura 18 – Fator de Enriquecimento do Níquel com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

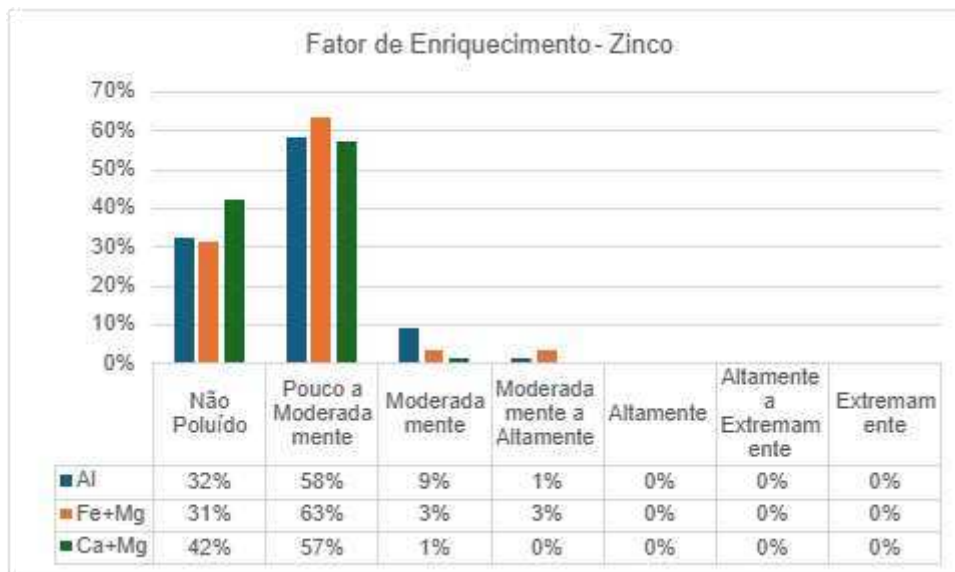
5.2.1.6 Zinco

De acordo com Door (1969), o zinco no Quadrilátero Ferrífero está frequentemente associado a sulfetos em formações ferríferas e zonas hidrotermais, refletindo processos de alteração e deposição mineral. Isso se reflete nos mapas entre os diferentes normalizadores (Figura 21), já que as zonas de maior enriquecimento no elemento estão registradas no Grupo Piracicaba do Supergrupo Minas, em especial no extremo sudeste do mapa, com base no normalizador Fe e Mn que são mais presentes nas rochas dos chamados BIF's, e em menor concentração em regiões do Grupo Sabará pertencente ao Supergrupo das Velhas, onde ocorrem as rochas máficas e ultramáfica ricas em sulfetos. O Alumínio apresentou um comportamento similar ao do Fe e Mn, com a observação de que atingiu índices menores de enriquecimento ficando em moderadamente poluído. Já o Ca+Mg, não foi um normalizador eficiente para esse elemento, sombreando regiões de concentrações expostas pelos outros normalizados, apresentando poucos e pequenos focos com níveis variando de pouco a, no máximo, moderadamente poluído.

A ocorrência de zinco no Quadrilátero Ferrífero está relacionada a processos hidrotermais que afetaram as sequências metassedimentares e metavulcânicas durante a evolução geológica da região (Chemale Jr. *et al.*, 1994). A mineralização de zinco no Quadrilátero Ferrífero está também frequentemente associada a veios hidrotermais e zonas de alteração em rochas metassedimentares e, de acordo com Borba *et al.* (2003), é comumente encontrado em depósitos de sulfetos no Quadrilátero Ferrífero, especialmente associado a minerais como esfalerita (ZnS) e galena (PbS).

No Gráfico 8, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Zinco, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

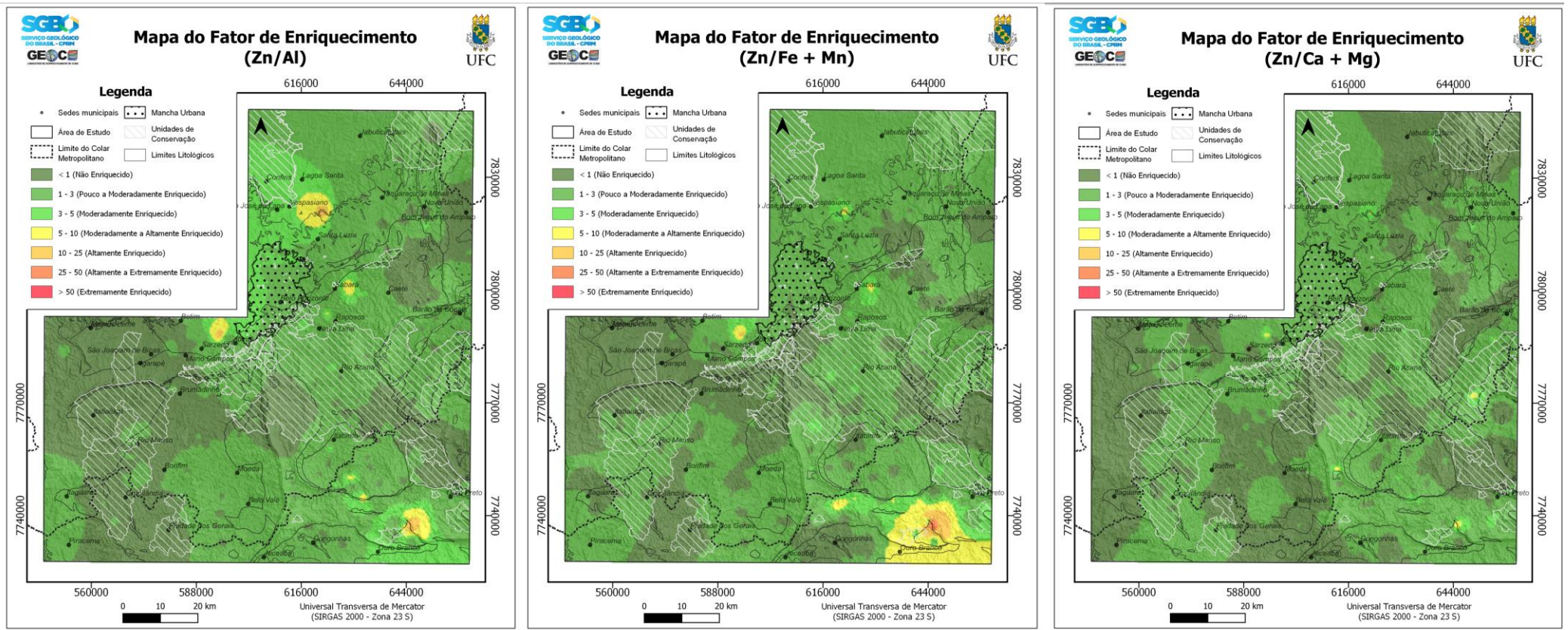
Gráfico 6 – Distribuição de valores do FE para Zinco nos diferentes normalizadores



Fonte: Autor

O desempenho dos três normalizadores no contexto do Zinco foi bem similar, ambos atingiram como limiar máximo a região de moderada a altamente enriquecido, com exceção do Ca e Mg, e com destaque para Fe e Mn que teve uma porcentagem um pouco maior nesse limiar máximo. Enquanto o Al teve seus dados mais distribuídos na região do moderadamente enriquecido.

Figura 19 – Fator de Enriquecimento do Zinco com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.1.7 Fósforo

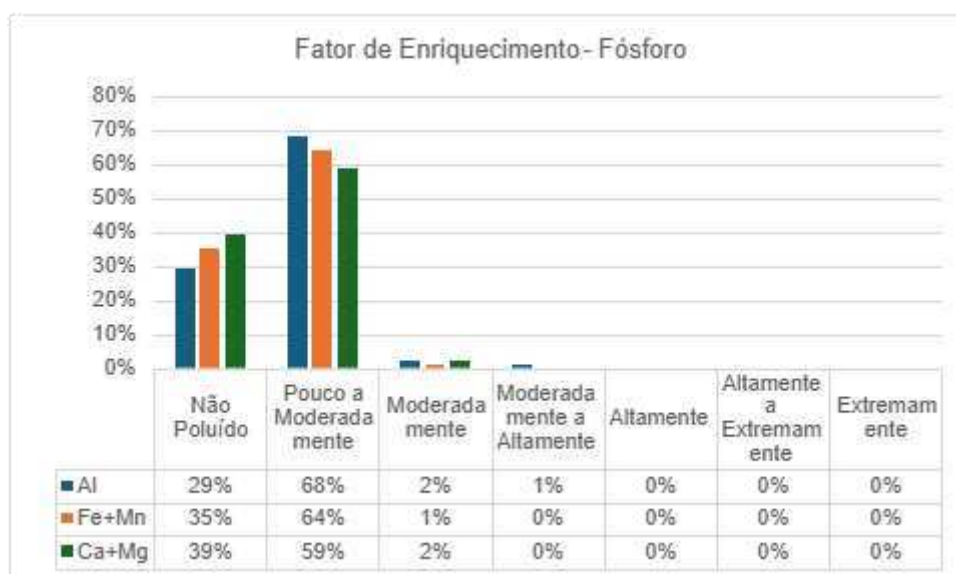
No Quadrilátero Ferrífero, as altas concentrações de fósforo estão associadas à adsorção em óxidos de ferro, controlando sua disponibilidade em solos lateríticos (Lacerda & Melfi, 1986), sendo assim, sua correlação geoquímica ocorre como no caso do Zinco com os BIF's, e no Quadrilátero Ferrífero está associado, também, ao intemperismo das apatitas presentes nas formações ferríferas, resultando na formação de fosfatos secundários (Resende *et al.*, 1988).

No caso das Rochas fosfáticas, como fosforitos, estas ocorrem em associação com sequências metassedimentares no Quadrilátero Ferrífero, contribuindo para a ocorrência natural de fósforo na região (Chemale Jr. *et al.*, 1994).

No geral em relação aos três normalizadores o Fósforo não apresenta focos extensos e volumosos, a ocorrência nos normalizadores Al e Fe + Mn, se dá na zona limite entre o Complexo Bação e o Grupo Itabira (Supergrupo Minas). No âmbito do normalizador Ca + Mg, os focos são ainda menores e não ultrapassam valores de moderadamente poluídos e ocorrem também no Grupo Itabira e no Gabro Monsenhor Isidro a Oeste da Folha (Figura 22).

No Gráfico 9, é apresentado um resumo comparativo dos fatores de enriquecimento do Fósforo, no contexto de cada um dos elementos normalizadores.

Gráfico 7 – Distribuição de valores do FE para Fósforo nos diferentes normalizadores



Fonte: Autor

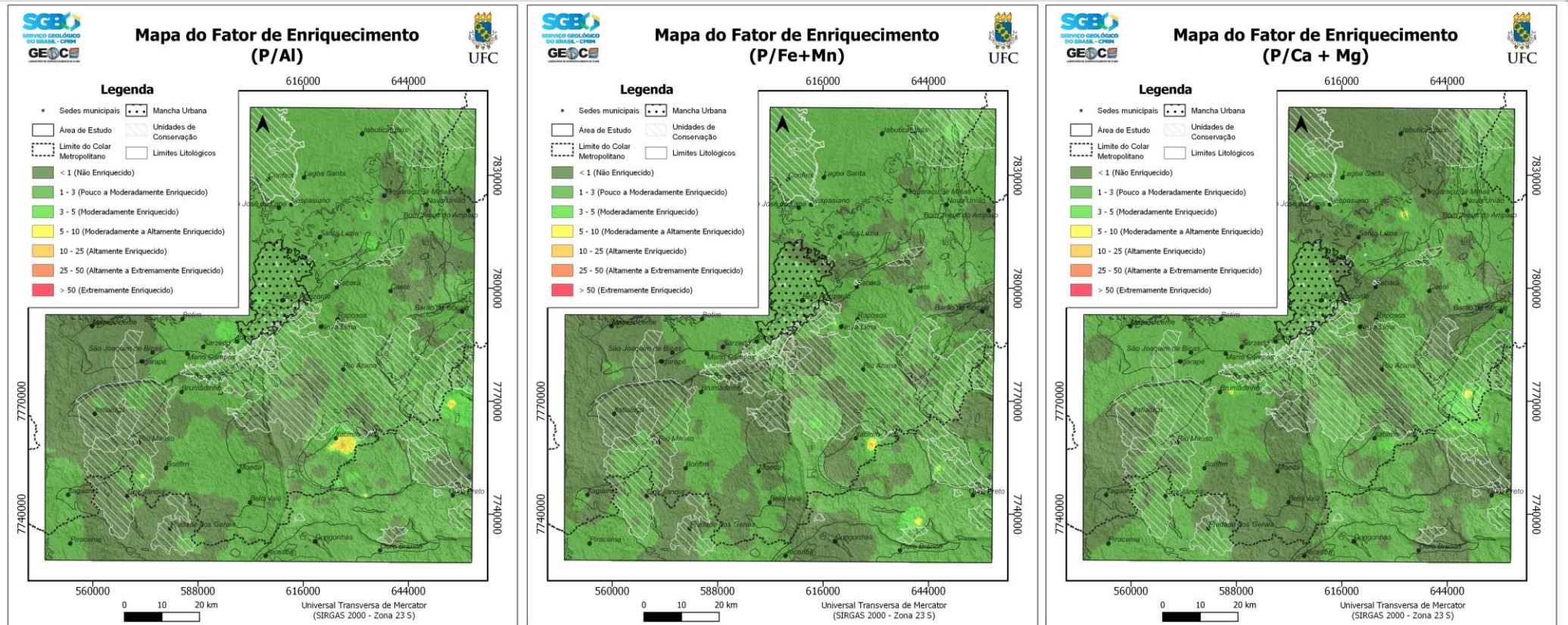
O gráfico mostra que os valores no contexto do normalizador Al apresentaram

distribuição um pouco maior, atingindo a região de moderadamente a altamente enriquecidos, enquanto os demais normalizadores não tiveram distribuição nessa área.

Os normalizadores Ca e Mg e Fe e Mn atingiram, como classe máxima, a região de moderadamente enriquecidos e se distribuíram em maior % na região de não poluído.

De forma geral o normalizador Al teve melhor distribuição ao longo de todas as classes de enriquecimento no contexto do elemento Fósforo.

Figura 20 – Fator de Enriquecimento do Fósforo com diferentes normalizadores



Fonte: Autor

5.2.2 Fator de Contaminação

5.2.2.1 Arsênio

Em relação aos resultados do fator de contaminação para o elemento Arsênio (Figura 23), temos extensas porções da área com marcadores para altamente poluído e moderadamente a altamente poluído. Entretanto, algumas observações são importantes de serem feitas, no que se refere à região nordeste do mapa, locada sobre a unidade geológica do Complexo Belo Horizonte, temos uma porção considerável de marcadores de contaminação, cabe definir que essa é a região urbana da cidade de Belo Horizonte e entorno, onde não ocorreu amostragem, o que torna imprecisa e insatisfatória a base científica dessas delimitações através dos resultados do processo de interpolação, o que exige certa cautela na análise do que é apresentado.

Relativamente às demais litologias, com os valores de contaminação mais alto para Arsênio temos o Complexo Caeté, a nordeste da área e dentro do Supergrupo Minas, os valores mais altos ocorrem na Formação Cauê e Grupo Caraça e no Supergrupo Rio das Velhas, que está localizado principalmente no Grupo Nova Lima, na região mais centro sul da área.

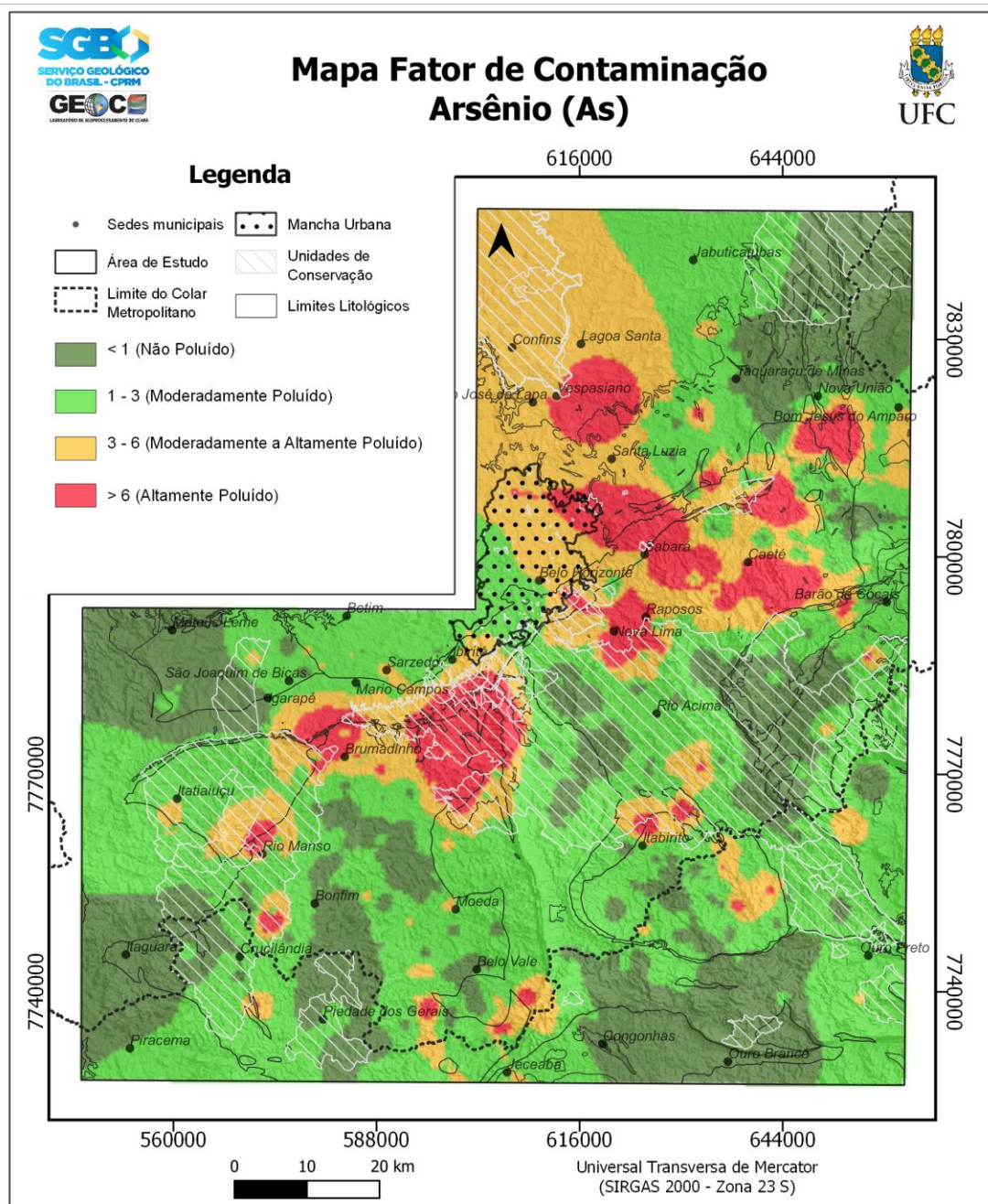
Referente ao uso e ocupação na área, as porções com valores mais altos seguem uma tendência geográfica similar a áreas mapeadas com empreendimento mineiro, dessa forma é possível verificar alguma influência antrópica nesses valores. Em complemento a isso, também temos a afirmação de Farias *et al.*, (2003) que diz que a contaminação natural de arsênio no Grupo Bambuí é um exemplo clássico de como a geologia local pode influenciar a qualidade ambiental e a saúde pública.

O Quadrilátero Ferrífero (QF), em Minas Gerais, é reconhecido por sua riqueza mineral, mas também por apresentar elevadas concentrações naturais de arsênio (As) em solos, sedimentos e águas. Esses picos geoquímicos estão associados a processos geológicos e antrópicos e existem vários trabalhos que trazem esses dados. O As de origem geológica ocorre principalmente em sulfetos como **arsenopirita (FeAsS)** e **pirita (FeS₂)**, comuns em depósitos auríferos e formações ferríferas do QF. A oxidação desses minerais libera As para o ambiente, elevando seus teores em solos e recursos hídricos (DESCHAMPS; MATSCHULLAT,

2011; BORBA *et al.*, 2003).

No contexto antrópico, a exploração histórica de ouro e ferro no QF contribuiu para a dispersão de As e trabalhos como o de (LOBATO *et al.*, 2001); que os vincula a Rejeitos de Mineração o de (MATSCHULLAT *et al.*, 2000); que traz dados sobre a fonte de Arsênio originário de drenagem ácida de rochas, além do processo de assoreamento de rios com sedimentos contaminados, como é abordado no trabalho de (FERNANDES *et al.*, 2016).

Figura 21 – Mapa do Fator de Contaminação do Arsênio



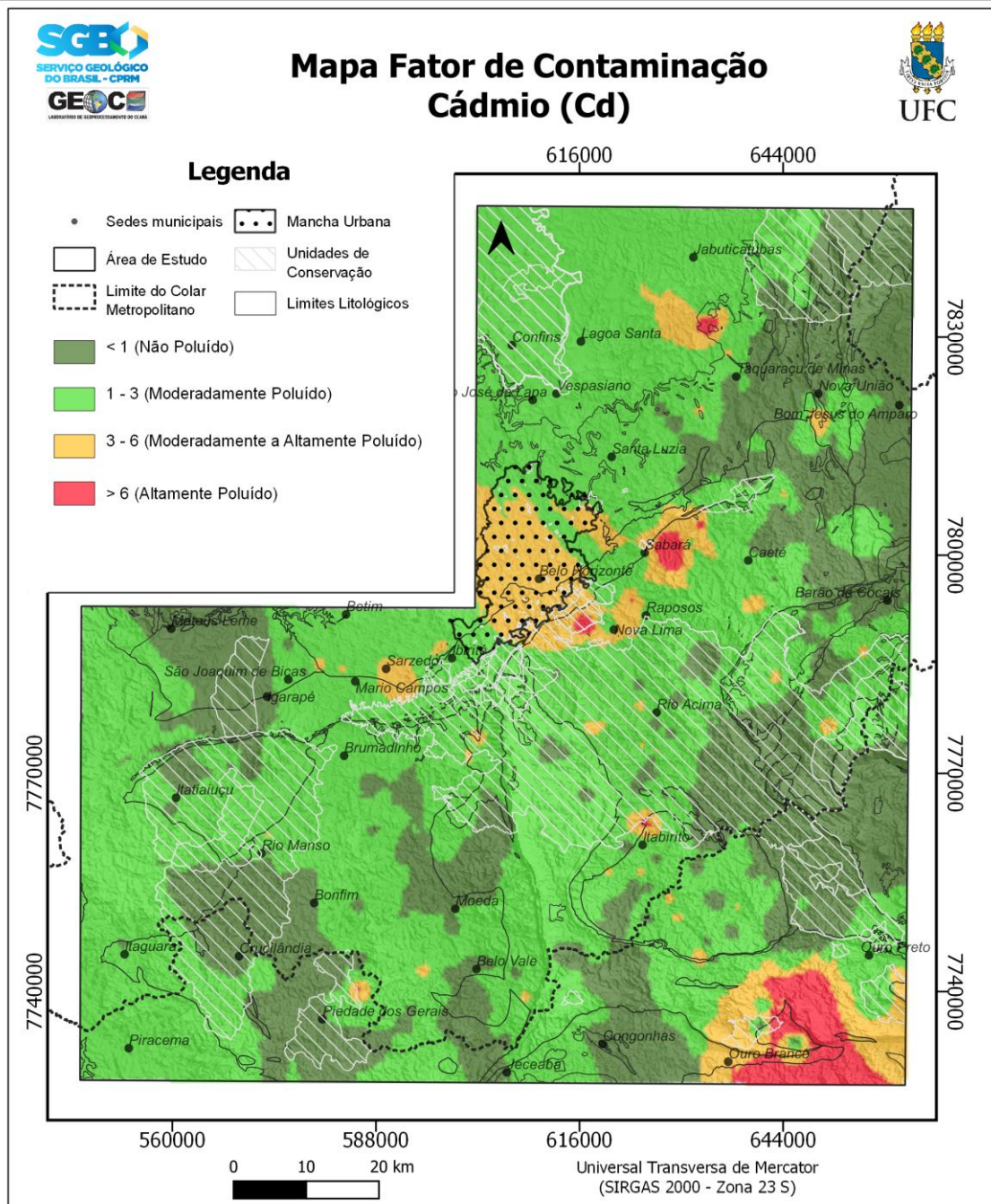
Fonte Autor

5.2.2.2 Cádmio

Com respeito ao mapa do fator de contaminação no contexto do Cádmio (Figura 24), as regiões altamente poluídas e moderadamente a altamente poluídas em relação ao Arsênio são menos extensas e possuem menor quantidade de marcadores. Os principais pontos mapeados com níveis altos para o fator de contaminação para esse elemento estão localizados nas seguintes unidades geológicas: Grupo Nova Lima, Grupo Itacolomi e Grupo Piracicaba, no extremo sul do mapa, e a norte ocorrências menos significativas na região do Complexo Belo Horizonte e novamente no Grupo Nova Lima

No que condiz a características de uso e ocupação, na área as porções com valores mais altos não seguem uma tendência geográfica similar a áreas mapeadas com empreendimento mineiros. No extremo sul, por exemplo, onde estão localizadas as concentrações mais relevantes para o elemento, estas ocorrem em uma unidade de conservação, o Parque Estadual da Serra de Ouro Branco mais precisamente a Área de Proteção Especial Veríssimo, indicando assim nessa região uma fonte de contribuição geogênica para os valores de contaminação obtidos para o elemento, enquanto os outros focos mais pontuais dentro do contexto do complexo Belo Horizonte, por serem regiões urbanizadas, podem indicar fontes antrópicas devido à pequena extensão e à localização em si, já que se trata de uma unidade geológica com pouca contribuição no que se relaciona à ocorrência de Cádmio, ou um efeito do processo de interpolação das amostras considerando a menor densidade amostral nessa região.

Figura 22 – Mapa do Fator de Contaminação para Cádmi



Fonte: Autor

5.2.2.3 Cromo

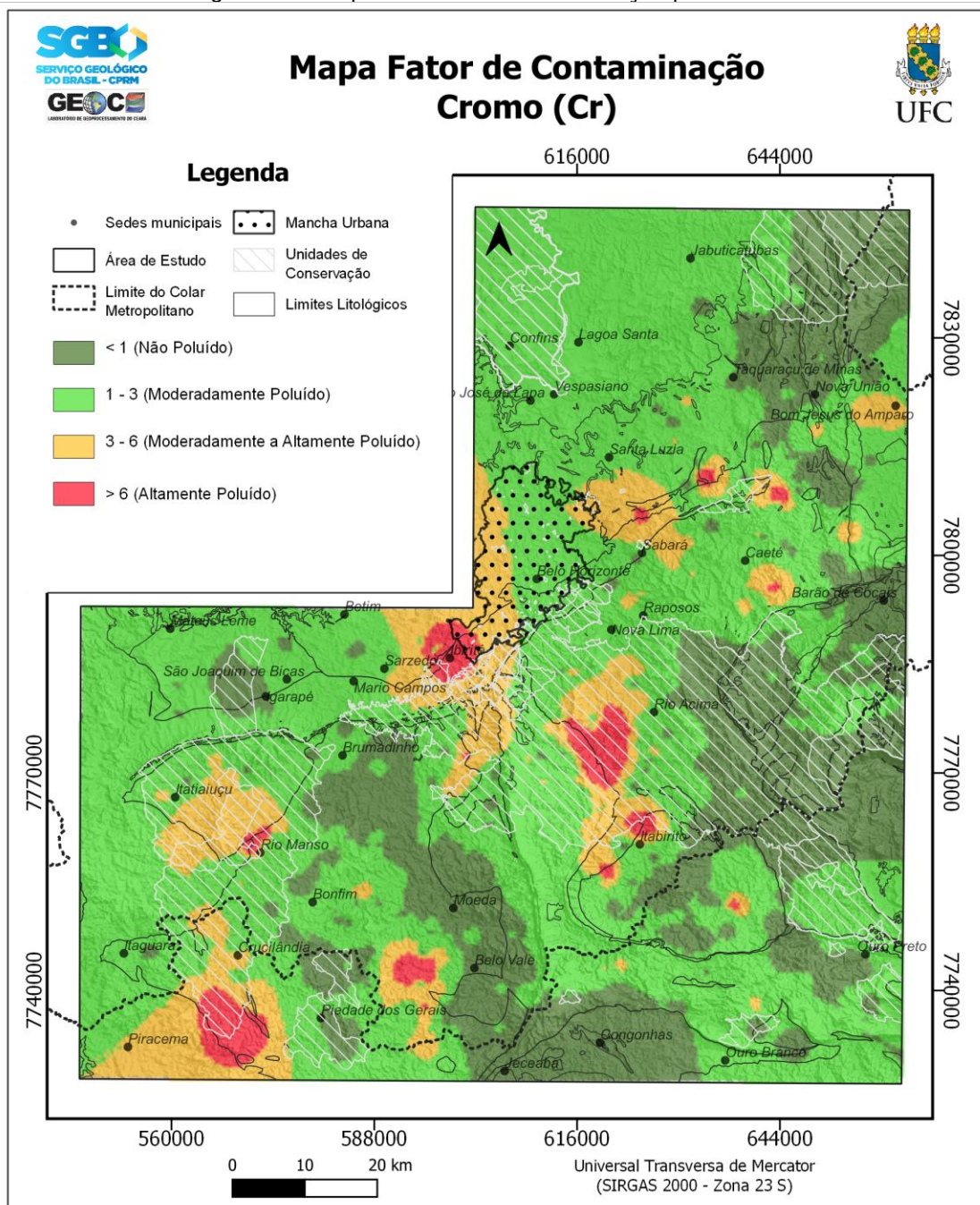
Os principais marcadores de Cromo para o fator de contaminação que atingiram a classe altamente poluído e moderadamente a altamente poluído na área estão localizados nas seguintes litologias: Complexo Bonfim, Grupo Nova Lima, Grupo Sabará e o Complexo Belo Horizonte (Figura 25).

Os principais marcadores estão locados no Complexo Bonfim a sudoeste

do mapa e os marcadores do Complexo Belo Horizonte e Grupo Nova Lima na região central. A região do Complexo Bonfim está próxima ao limite com a Unidade Nova Lima mapeada como Metagabro, que são rochas ultramáficas enriquecidas em minerais, tais como: espinélio, piroxênio e onde pode ocorrer, também, a cromita, principal mineral de cromo. Sendo assim, a ocorrência nessa região pode ser explicada devido a geologia local, já que o Complexo Bonfim é margeado a sudoeste por essa unidade. No contexto do Supergrupo Minas, no Grupo Sabará pode ter de ocorrer recristalização de minerais portadores de cromo, o que pode localmente concentrar o elemento. E por fim, no caso do Complexo Belo Horizonte, na região da urbana de Belo Horizonte onde se localizam as margens dos marcadores, com resultados moderadamente a altamente contaminados, provavelmente resultam do processo de interpolação, com exceção das ocorrências que estão em zonas limítrofes com o Grupo Sabará e o Grupo Nova Lima, sendo este último composto por rochas máficas e ultramáficas.

De forma geral a dispersão de cádmio em solos e sedimentos na região está relacionada à lixiviação de minerais sulfetados e à erosão de áreas mineralizadas. (Costa *et al.*, 2015).

Figura 23 – Mapa do Fator de Contaminação para Cromo



Fonte: Autor

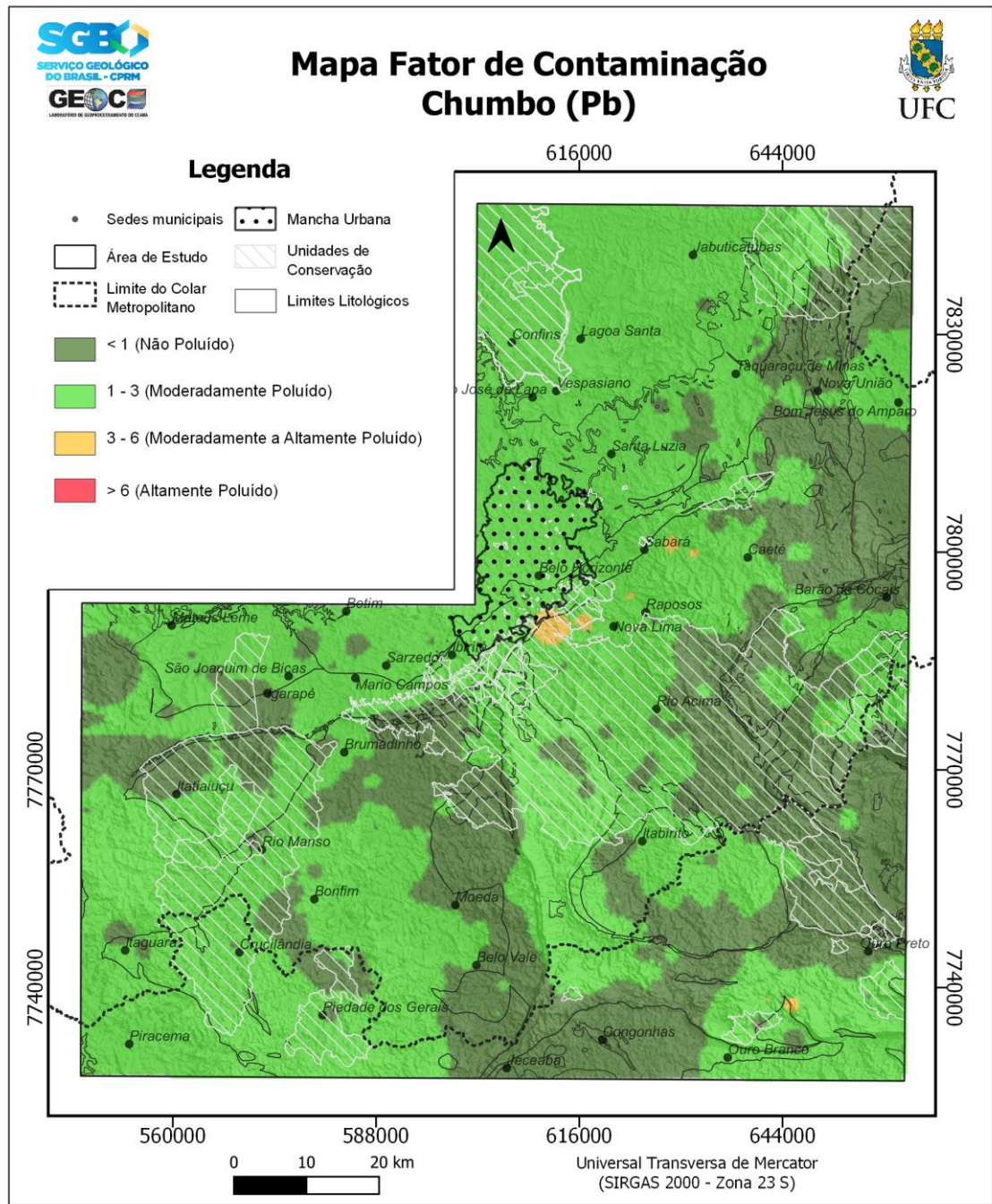
5.2.2.4 Chumbo

Em relação aos resultados do fator de contaminação para o Chumbo, esse elemento praticamente não apresentou valores acima de moderadamente poluído (Figura 26), resultou em apenas 6 focos de pequenas extensões concentradas somente no Grupo Nova Lima que pertence ao contexto do

Supergrupo Rio das Velhas, que são formações vulcanogênicas sedimentares de idades arqueanas, ricas em sulfetos e depósitos de ouro, porém entre eles pode ocorrer também galena (PbS). No extremo sudeste do mapa um dos focos ocorre em uma região de Unidade de Conservação, e em relação aos focos mais ao norte, eles ocorrem próximo a áreas mapeadas com ocorrência de empreendimentos mineiros, sendo importante ressaltar que por se tratar de sedimentos de corrente esse material pode se originar de regiões a montante, onde também há atividades de outros empreendimentos.

A dispersão e os efeitos do chumbo na região foram discutidos por autores como Matschullat *et al.*, (2000) que citam que, a oxidação de minerais, como a galena, libera chumbo para o ambiente, representando um risco significativo para a saúde humana e ecossistemas.

Figura 24 – Mapa do Fator de Contaminação para Chumbo



Fonte: Autor

5.2.2.5 Níquel

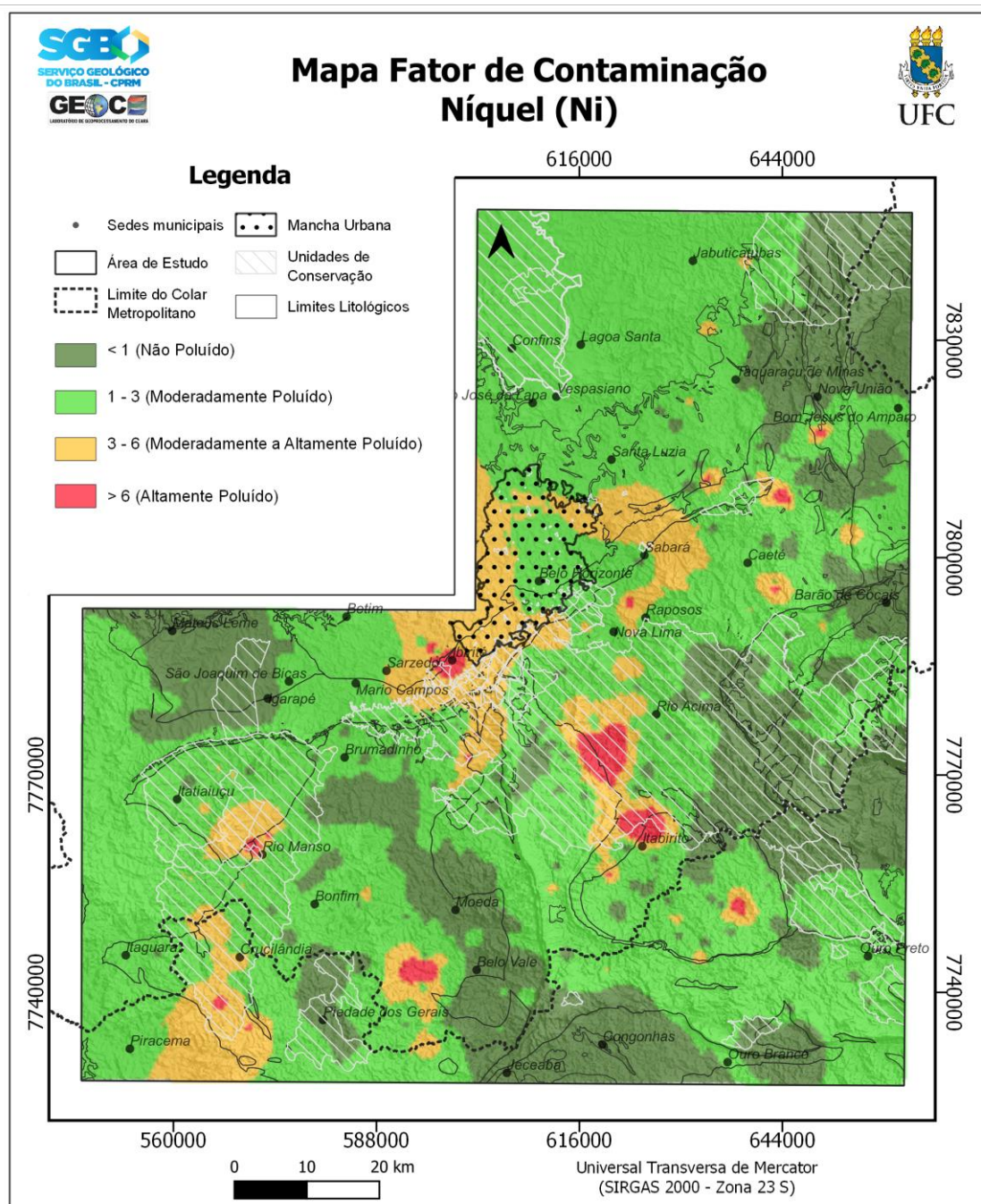
O fator de contaminação para o elemento Níquel possui diversos focos distribuídos ao longo da área de estudo classificados como altamente e moderadamente a altamente poluído (Figura 27), as ocorrências desses marcadores estão em diferentes unidades geológicas, dentre elas: Complexo Belo Horizonte, Complexo Bação, Complexo Bonfim, Grupo Sabará, Grupo Piracicaba e Formação

Cauê.

Uma observação interessante é que, o Níquel na região dos Complexos Bação, Belo Horizonte e Bonfim, tem suas ocorrências registradas próximo a regiões limítrofes com o Grupo Nova Lima e Sabará, o que pode indicar o transporte dos materiais dessas litologias enriquecidas em rochas máficas e ultramáficas para as regiões dos granitoides que são mais empobrecidas, ou então, à atuação de processos geológicos vinculados a metamorfismo, tais como, recristalização e contatos. No contexto das rochas sedimentares, a origem estar associada às lateritas de níquel que, de acordo com (Golightly, 1981), são o produto da lateritização de rochas ricas em Mg ou ultramáficas que possuem teores de Ni primário de 0,2-0,4%. Essas rochas são geralmente dunitos, harzburgitos e peridotitos que ocorrem em complexos ofiolíticos e, em menor extensão, komatiitos e rochas intrusivas máficas-ultramáficas em (Brand *et al.*, 1998). No Quadrilátero Ferrífero, especificamente, não há estudos voltados para caracterizar a ocorrência do Níquel laterítico, porém sua ocorrência é citada no trabalho de Borba e Figueiredo (2004) que explica sobre a mobilização de níquel durante o intemperismo de rochas ultramáficas que pode resultar em concentrações economicamente viáveis em perfis lateríticos.

Em relação ao uso e ocupação do solo, as regiões altamente poluídas na região do Grupo Nova Lima seguem um lineamento de minerações que podem ser fontes de contribuição para essa intensificação da contaminação por níquel, o que é apoiado pela citação de Sracek *et al.* (2010), que discorre sobre a oxidação de minerais sulfetados, como a pentlandita, liberando níquel para o ambiente, representando um risco potencial para a qualidade da água, dos sedimentos solos.

Figura 25 – Mapa do Fator de Contaminação para Níquel



Fonte: Autor

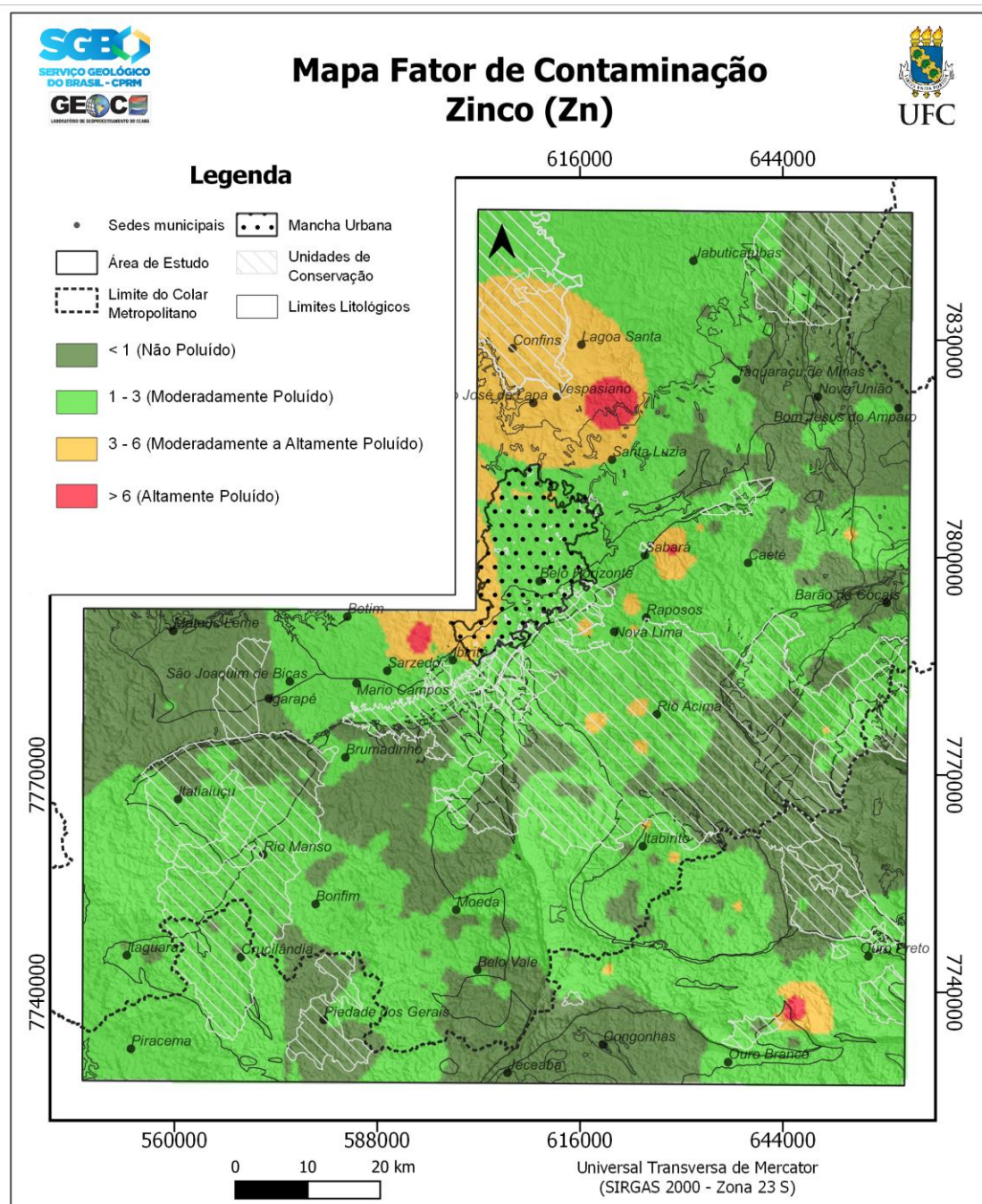
5.2.2.6 Zinco

O Zinco apresentou seus marcadores mais relevantes na área do Complexo Belo Horizonte e mais ao sul do mapa, na região do Grupo Nova Lima e Grupo Piracicaba (Figura 28). Na região do Complexo Belo Horizonte, na porção mais a oeste adota-se a hipótese de os valores elevados serem resultantes da interpolação dos dados, que ocupam uma área extensa, e onde houve poucas coletas de amostras, atingindo valores moderadamente a altamente poluído. Em

relação a porção mais a oeste, onde há um foco classificado com altamente poluído, o mapa de uso e ocupação do solo define a região como área onde há regiões de pastagem e sugere que parte desse enriquecimento pode ter origem antrópica, já que o zinco é um micronutriente para plantas e sua aplicação é comum em plantações, mesmo que de fontes secundárias.

A oxidação de minerais sulfetados, como a esfalerita, liberam zinco para o ambiente, representando um risco potencial para a qualidade da água e dos solos. A mobilização de zinco a partir de depósitos minerais no Quadrilátero Ferrífero pode resultar em contaminação de solos e águas, especialmente em áreas de mineração ativa ou abandonada (Borba & Figueiredo, 2004).

Figura 26 – Mapa do Fator de Contaminação para Zinco



Fonte: Autor

5.2.2.7 Fósforo

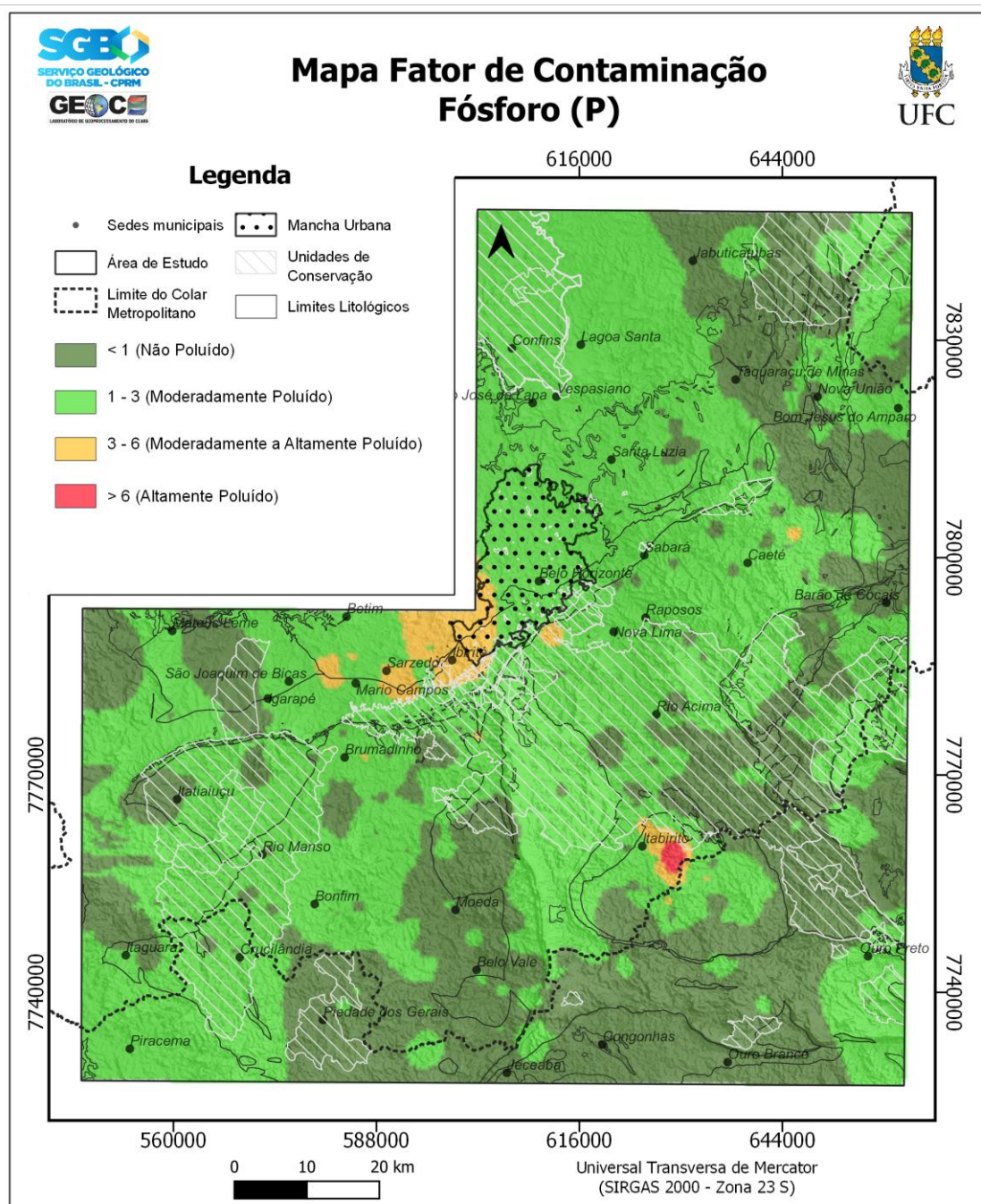
Em relação aos resultados do fator de contaminação para o Fósforo, esse elemento apresentou somente uma região com resultados no limiar de altamente poluído, locada sobre o contexto do Complexo Bação e mais 3 focos de pequenas extensões na região do Grupo Sabará e Complexo Belo Horizonte (Figura 29). No caso do Complexo Bação a origem do fósforo pode estar relacionada aos minerais

acessórios dos granitoides que podem conter apatita, mineral rico no elemento, e no caso do Grupo Sabará, que tem formação sedimentar alterada metamorficamente, pode estar relacionado ao fósforo laterítico produzido a partir do intemperismo químico intenso em climas tropicais.

No contexto de possíveis fontes antrópicas temos na região do Complexo Bação onde houve o foco de maior contaminação para fósforo uma região, com ocorrências em área para pastagem, que induz o pensamento de que essas concentrações podem ter relação externa à utilização de fertilizantes, ricos nesse elemento, para gestão dos cultivos existentes na região.

Em relação aos seus impactos, a lixiviação de fósforo de rochas fosfáticas e BIFs na região do Quadrilátero Ferrífero pode contribuir além do aumento da concentração nos sedimentos para a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, representando um desafio para a gestão ambiental (Matschullat *et al.*, 2000).

Figura 27 – Mapa do Fator de Contaminação para Fósforo



Fonte: Autor

5.2.3 Índice de Geoacumulação

5.2.3.1 Arsênio

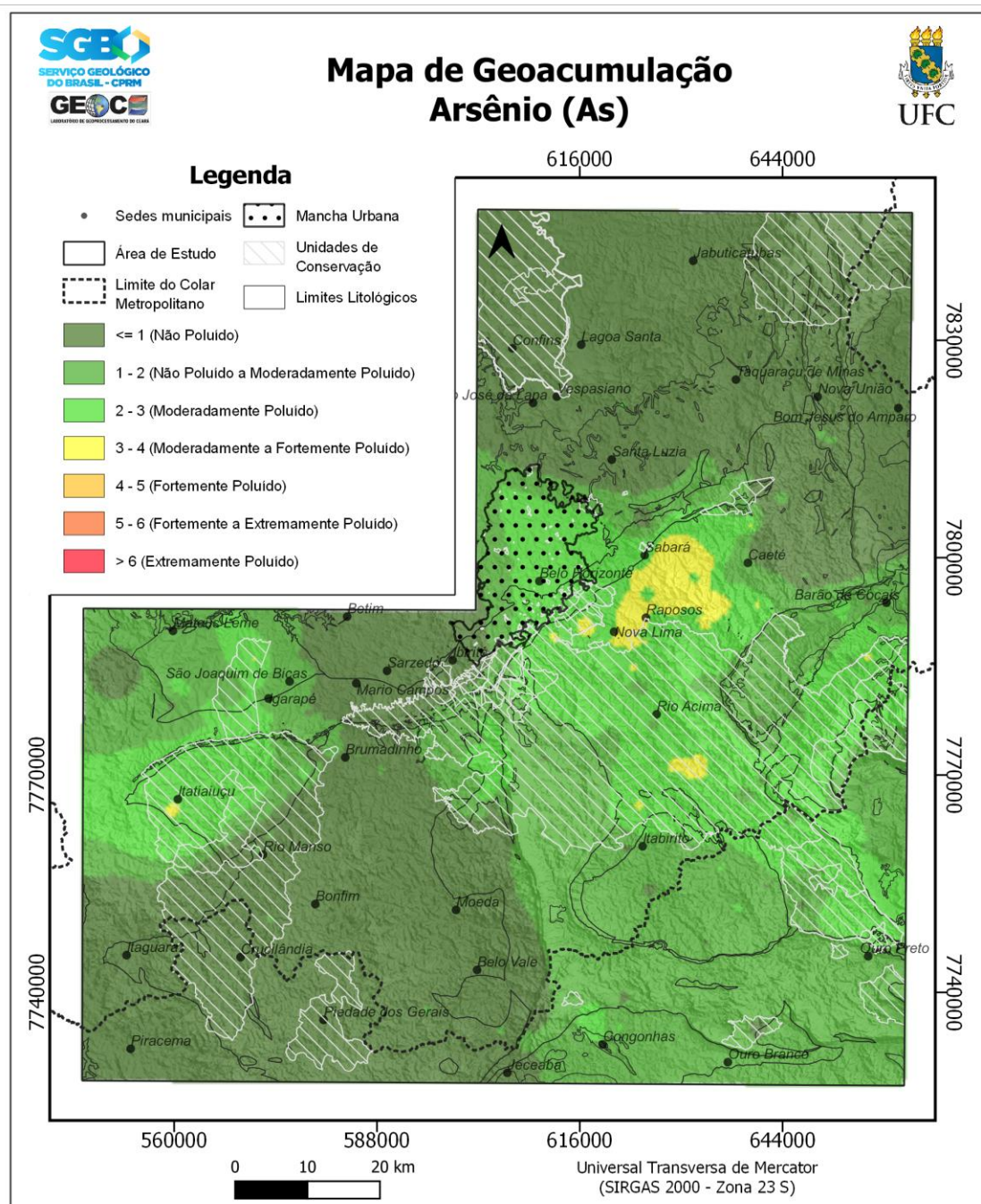
Os resultados do Índice de Geoacumulação para Arsênio na área de estudo (Figura 30), teve como maior limiar de ocorrência valores entre 3 e 4, classificados como (moderadamente a fortemente poluído), os demais valores

ficaram entre <1 a 3 (não poluído a moderadamente poluído). Entretanto, os valores maiores que indicam algum alerta sobre poluição, estão restritos a 2 grandes grupos geológicos, são eles: Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas.

O destaque desse índice para Arsênio na área de estudo fica restrito as proximidades da cidade de Itatiaiuçu, próximo a região do Granito Samambaia (Tonalito) - SGRM a sudoeste, e na área central entre os limites de Nova Lima, Raposos e Sabará, na região de ocorrência do Grupo Nova Lima – SGRV e um pouco mais a sul entre as cidades de Rio Acima e Itabirito, também no contexto do Grupo Nova Lima.

De acordo com Borba *et al.* (2003), o Arsênio nessa região frequentemente ocorre associado a sulfetos, como arsenopirita (FeAsS), em depósitos de ouro. A lixiviação desses minerais libera arsênio para o ambiente e o mesmo pode ocorrer com rochas ricas em Minério de Ferro, o que justificaria a ocorrência nessas regiões. Cabe ressaltar que, nas regiões onde a geoacumulação do Arsênio é maior as atividades de mineração são bastante conhecidas, isso pode corroborar para uma maior exposição dessas rochas aos processos de intemperismo e oxidação de sulfetos, como a arsenopirita, liberando arsênio para o ambiente, onde pode ser adsorvido por óxidos de ferro, argilas e matéria orgânica e se concentrar nos sedimentos.

Figura 28 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Arsênio



Fonte: Autor

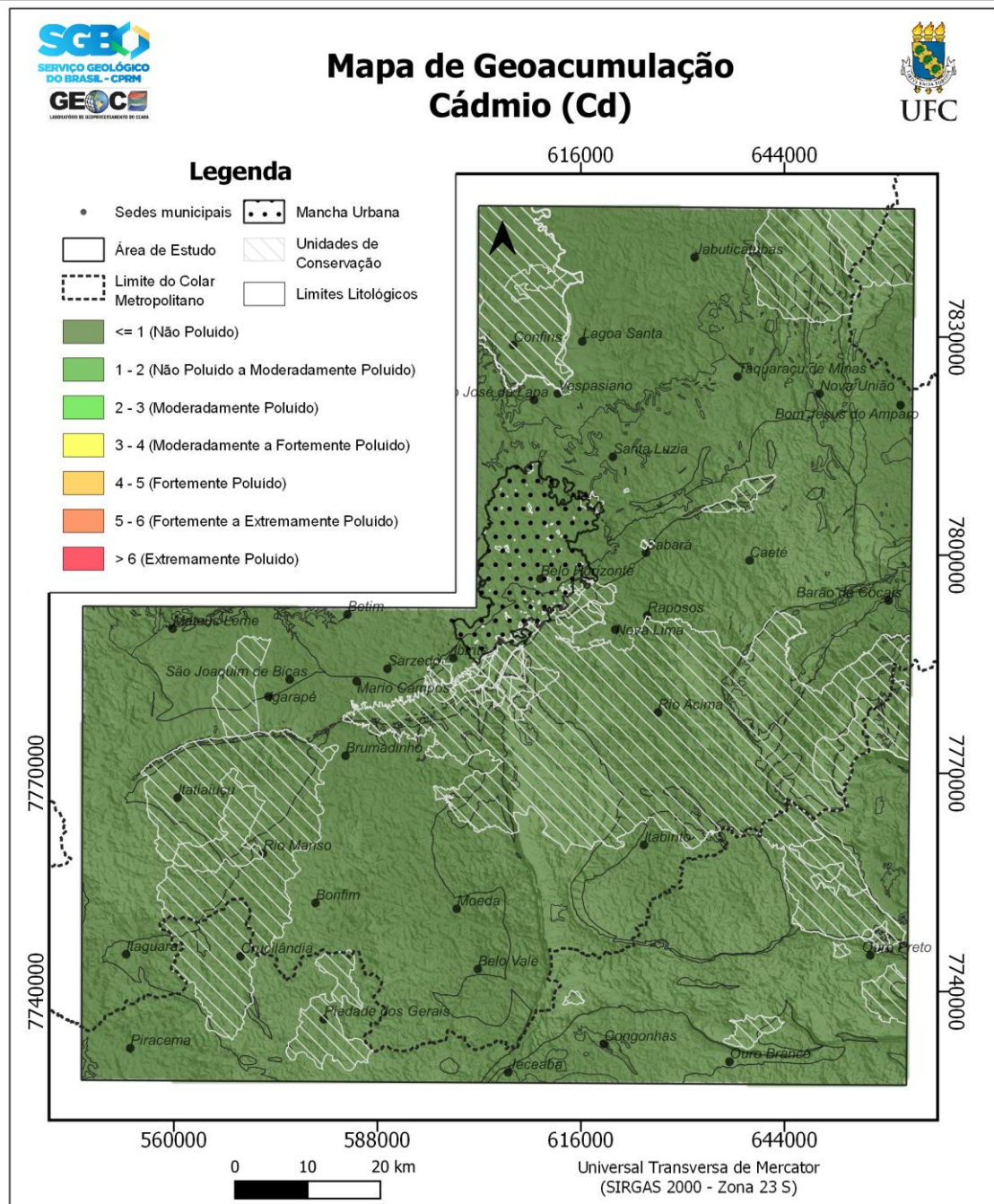
5.2.3.2 Cádmi

No contexto do elemento Cádmi, a área de estudo não apresentou nenhum valor acima da classe ≤ 1 (Não poluído), o mapa (Figura 31) se manteve uniforme nos diferentes contextos geológicos e regiões, indicando assim que, o índice de geoacumulação não foi capaz de identificar focos de contaminação por

Cádmio na região.

A uniformidade do índice de geoacumulação para Cádmio é uma informação inédita dessa análise, já que os demais índices avaliaram, mesmo que em pequenas proporções, algum nível de enriquecimento do elemento e ou contaminação por ele.

Figura 29 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Cádmio



Fonte: Autor

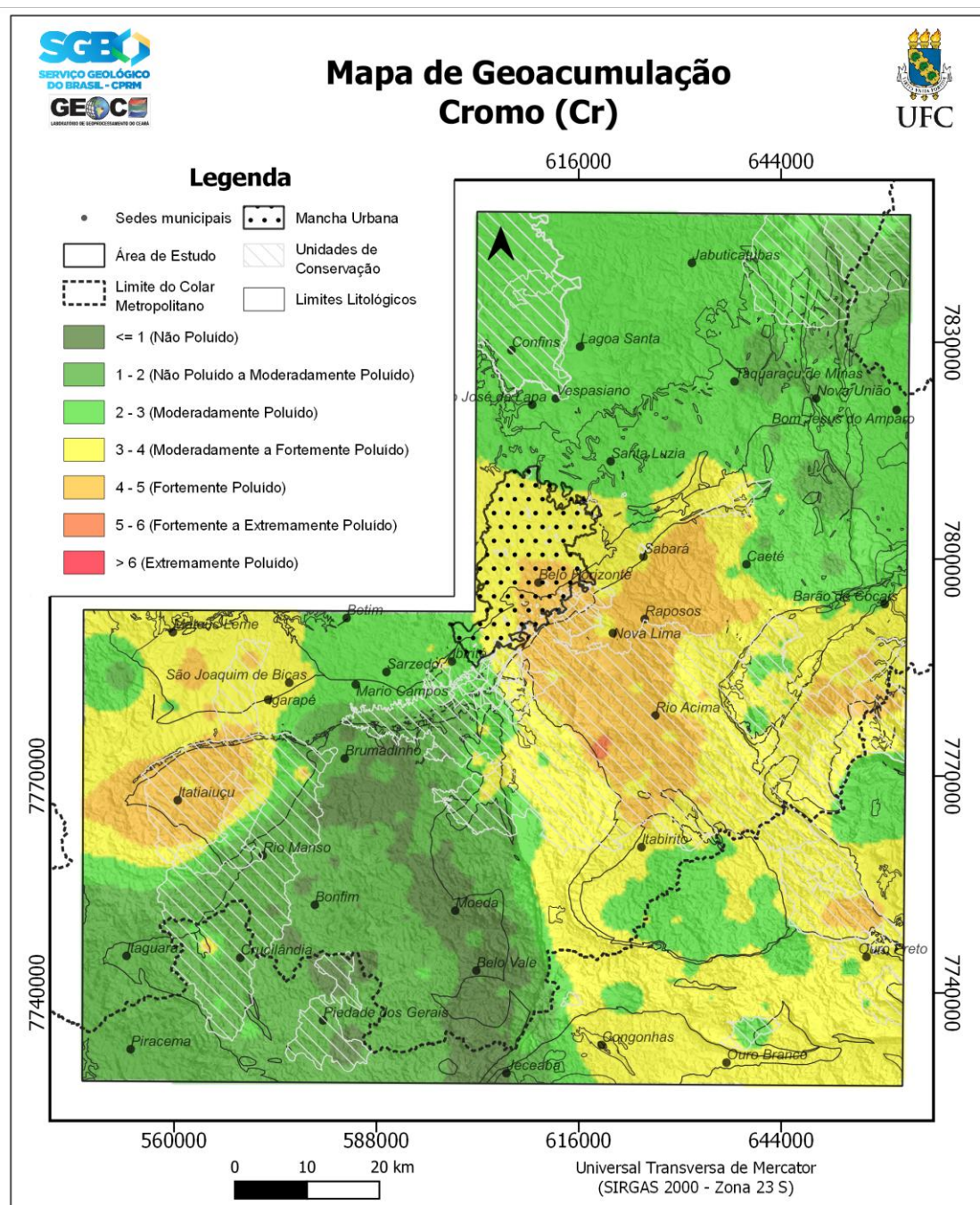
5.2.3.3 Cromo

Diferentemente do Cádmiio o elemento Cromo, apresentou diversas nuvens com valores de geoacumulação classificadas entre os limiares 3 – 4 (moderadamente a fortemente poluído) e 4 – 5 (fortemente poluído) que se espalham por uma grande extensão da área de estudo (Figura 32). Esses valores são compartilhados em diversas unidades geológicas, dentre elas: o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), Supergrupo Minas (SGRM) e o Complexo Bação (BA). Os principais municípios que se localizam nesse contexto são: Nova Lima, Raposos, Sabará, Caeté, Rio Acima, Ouro Preto, Congonhas, Itatiaiuçu, Igarapé, Mateus Leme e São Joaquim de Bicas.

O Cromo atingiu o limiar máximo de contaminação do índice que é o > 6 (extremamente poluído), porém nesse caso sua ocorrência foi bastante restrita a um único ponto, entre as cidades de Rio Acima e Itabirito.

De acordo com Lobato *et al.* (2000), no contexto do Quadrilátero Ferrífero, o cromo está associado principalmente à presença de rochas máficas e ultramáficas, como komatiitos e basaltos, que são ricas em minerais portadores de cromo, como cromita (FeCr_2O_4), e que também são liberados ao ambiente a partir de processos intempéricos, contribuindo para o transporte e concentração desse elemento nos sedimentos, camadas argilosas e na matéria orgânica.

Figura 30 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Cromo



Fonte: Autor

5.2.3.4 Chumbo

O elemento Chumbo na região de estudo apresentou somente 2 limiares de classificação de acordo com o índice de geoacumulação, são eles: ≤ 1 (não poluído) e 1 – 2 (não poluído ou moderadamente poluído). Os valores estão bem

distribuídos ao longo do mapa (Figura 33), com destaque para os complexos graníticos Complexo Bação (BA), Bonfim (BN) e Grupo Bambuí (GB), a norte da área de estudo que, praticamente, em sua totalidade ficaram no limiar de não poluído a moderadamente poluído. Litologias, como Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupos Minas (SGRM), apresentaram no geral valores de não poluído, o que é uma tendência contrária quando comparado aos elementos anteriores, como o Arsênio e Cromo.

Os Complexos Bação e Bonfim são duas das unidades geológicas mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, ambos de idade Arqueana. De acordo com Deschamps *et al.* (2002), eles podem conter mineralizações de sulfetos, incluindo galena (PbS), podendo ainda hospedar mineralizações de sulfeto que possuem chumbo em suas estruturas como elemento acessório, o que poderia explicar um limiar de geoacumulação maior nessas regiões.

No contexto das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, acredita-se que a ocorrência do Chumbo pode provir de substituição iônica e ou interação com fluidos hidrotermais (Valeriano, 2017).

(SGRM). Os principais municípios que se localizam nesse contexto são: Nova Lima, Raposos, Sabará, Rio Acima, Ouro Preto, Itatiaiuçu, e São Joaquim de Bicas.

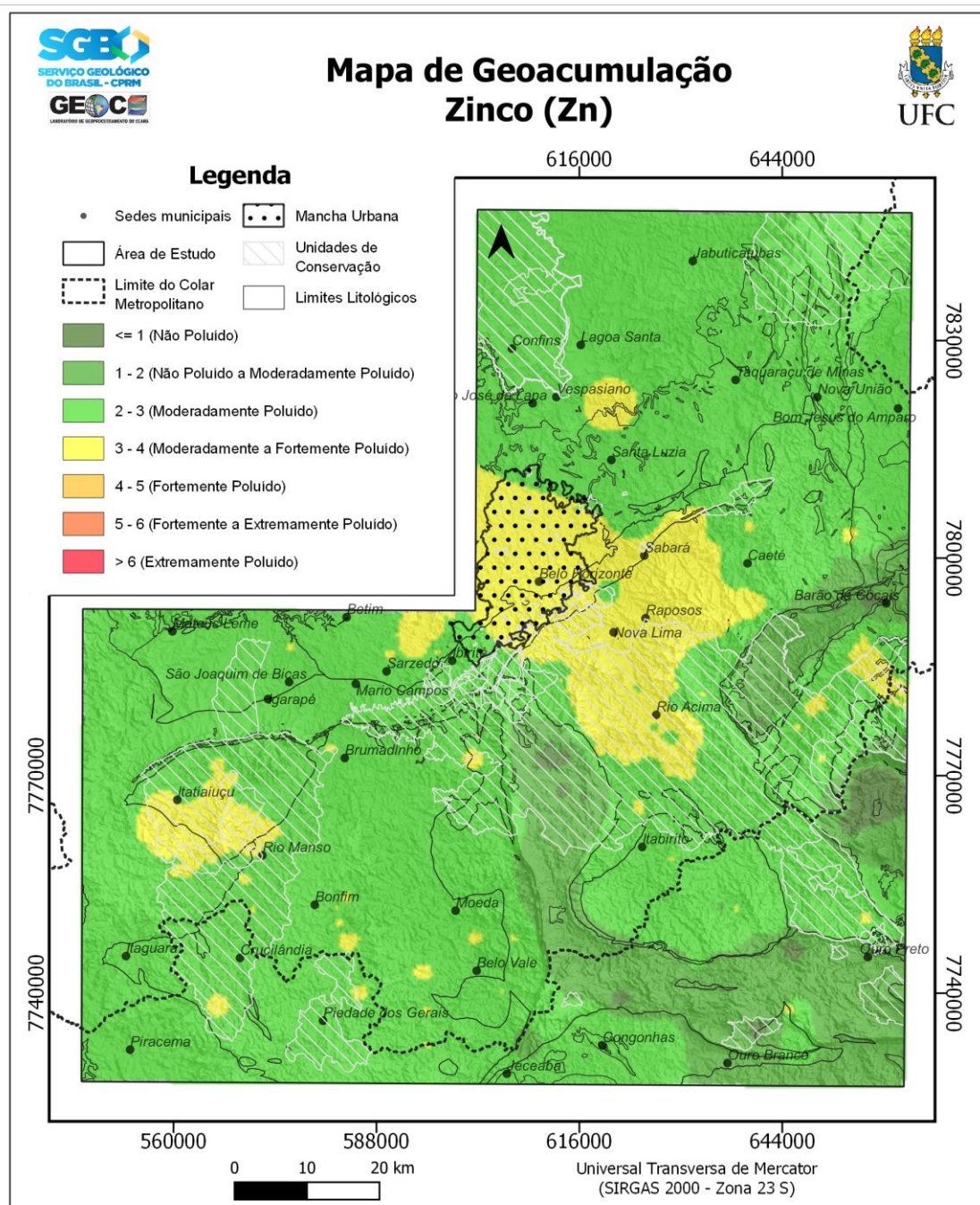
O Níquel atingiu o limiar 4 - 5 (fortemente poluído), em apenas um único ponto de pequena extensão entre as cidades de Rio Acima e Itabirito. Essa região é a mesma onde o Cromo atingiu seu maior limiar de contaminação, o que desperta atenção a essa área, por apresentar maiores valores de geoacumulação para mais de um elemento. Entretanto a afinidade geoquímica de ambos os elementos, de acordo com Valério (2023), está correlacionada à presença de rochas máficas e ultramáficas, que são ricas nesses elementos.

das Velhas (SGRV), Supergrupo Minas (SGRM), pequenos focos no Complexo Bonfim (BN) e um pouco mais relevante no contexto do Grupo Bambuí, entre as cidades de Vespasiano e Santa Luzia. Os demais municípios que se localizam nesse limiar de geoacumulação são: Nova Lima, Raposos, Sabará, Rio Acima, Rio Manso, Itatiaiuçu e São Joaquim de Bicas.

Relativamente à geologia do SGRV e o SGRM, conforme citado por Nascimento *et al.* (2018), a ocorrência de zinco em sedimentos pode ter sido originada nos processos intempéricos de rochas sulfetadas, como calcopirita e esfarelita presentes na área investigada.

Em relação ao Grupo Bambuí, o Zinco se concentra especialmente em suas formações carbonáticas como a Formação Sete Lagoas, apresentando ocorrências de zinco e chumbo. Essas mineralizações estão associadas a sedimentos pelítico-carbonáticos, indicando um ambiente favorável à concentração desses metais (Valeriano, 2017).

Figura 33 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Zinco



Fonte: Autor

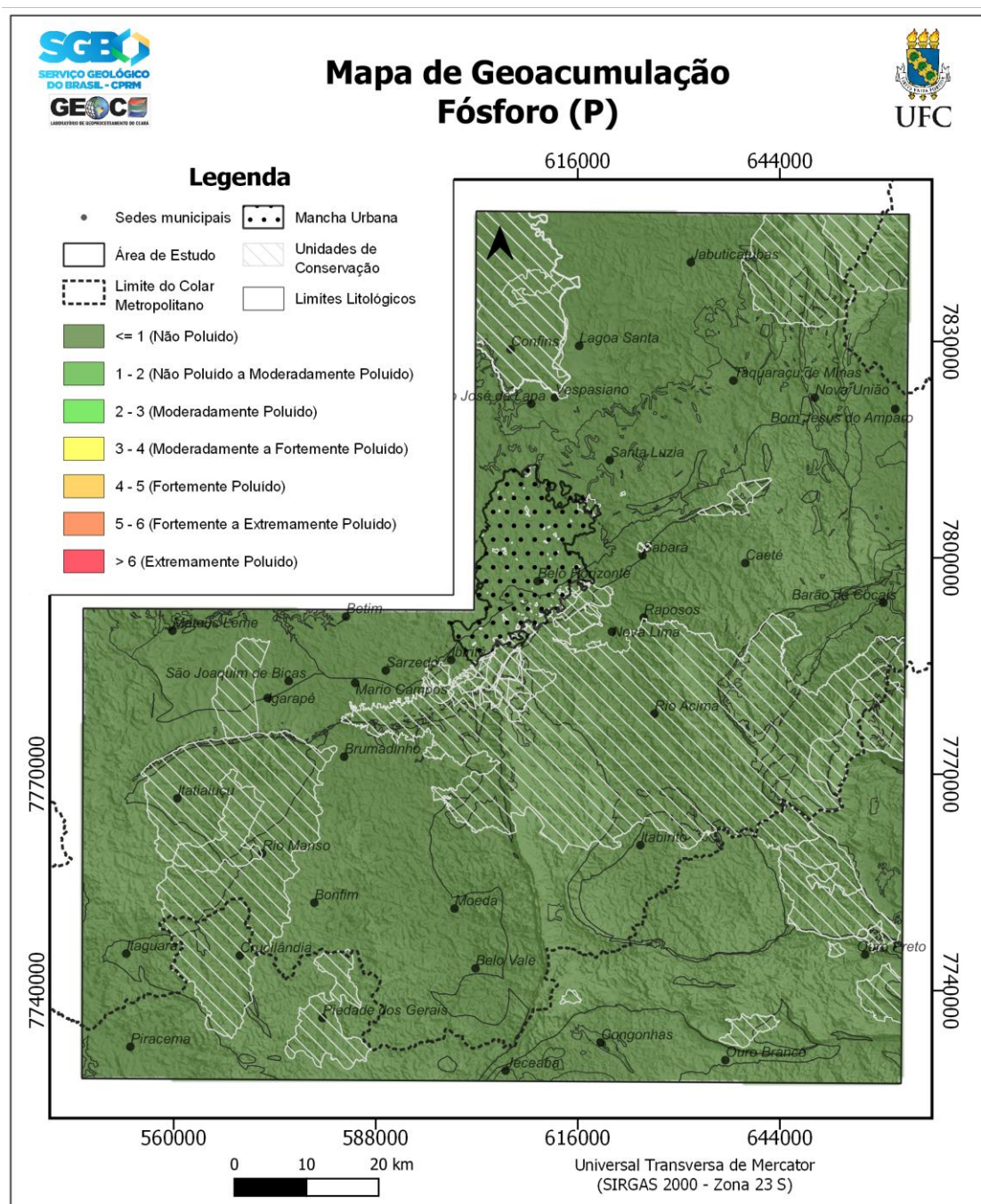
5.2.3.7 Fósforo

No contexto do elemento Fósforo, a área de estudo não apresentou nenhum valor acima da classe ≤ 1 (Não poluído), o mapa se manteve uniforme nos diferentes contextos geológicos e regiões (Figura 36), indicando assim que o índice de geoacumulação não foi capaz de identificar focos de contaminação por Fósforo

na região, um comportamento similar ao que ocorreu com o índice de geoacumulação para o elemento Cádmiu.

A uniformidade do índice de geoacumulação para Fósforo no contexto da área foi uma informação inédita dessa análise, já que os demais índices o avaliaram mesmo que em pequenas proporções algum nível de enriquecimento e ou contaminação pelo elemento.

Figura 34 – Mapa do Índice de Geoacumulação para Fósforo



Fonte: Autor

5.3 Índices Multielementares

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos dois índices multielementares utilizados nesse estudo, são eles o Grau de Contaminação Modificado (GCM) e o Índice de Risco Potencial Ecológico (IREP) que revelaram valores pontuais indicando que a atividade de mineração é um fator significativo para as variações locais.

5.3.1 Grau de Contaminação Modificado

O Grau de contaminação modificado como citado por Hakanson (1980) é uma metodologia encorpada do Fator de Contaminação, pois ele leva em consideração o fator de contaminação de vários elementos em seu cálculo, o que possibilita o fornecimento de informações gerais da área partindo-se de um contexto multielementar.

Os resultados (Figura 13) nos trazem a confirmação de umas algumas hipóteses levantadas para a área. A primeira delas se refere aos valores obtidos para o UCC e o ATP, quando se compara os três mapas nota-se as diferenças de regiões com marcadores de contaminação, sendo que o UCC apresenta regiões com marcadores maiores e mais extensos, seguido da referência de ATP e por último o mapa cujas referencias foram os *backgrounds* das unidades geológicas. Isso nos mostra como são importantes os procedimentos de definição de *backgrounds* compatíveis com a realidade da área estudada, pois o que ocorre quando se utiliza *backgrounds* mais generalistas, como o UCC e o ATP, é que a realidade geológica da área dificilmente é representada. O que corrobora para a geração de resultados superestimados para a região, pois seu *background* de referência acaba sombreando o enriquecimento elementar natural da região. No caso do Quadrilátero Ferrífero esse efeito tem uma intensidade maior, pois se trata de uma província geoquímica que é enriquecida em diversos elementos e tal característica acaba sendo ignorada quando se utilizam *backgrounds* regionais e globais, pois eles possuem valores pouco fidedignos ao arcabouço geoquímico da área de estudo. Isso é notável a partir das classificações atingidas pelos mapas, onde no UCC e ATP, temos regiões com marcadores de ultra extremo e extremo grau de contaminação, enquanto o mapa calculado com *backgrounds* das unidades

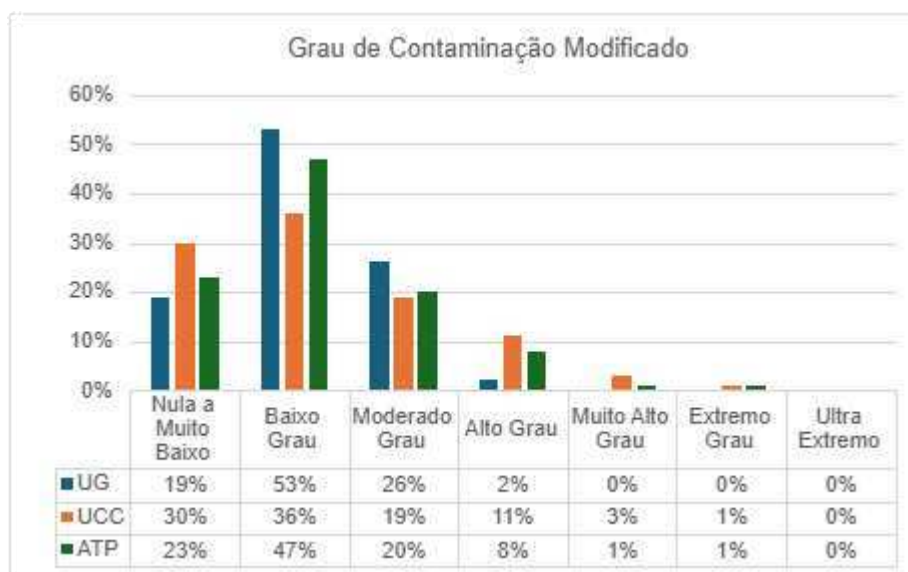
geológicas teve como maior classificação muito alta contaminação. Podemos identificar ainda que, os marcadores diminuem em extensão e intensidade seus níveis de contaminação, quando comparados aos valores *backgrounds* de UCC, ATP e unidades geológicas

Os resultados nos mostram uma maior adequabilidade da utilização dos *backgrounds* provindos das unidades geológicas, por considerarem de forma efetiva o enriquecimento geoquímico da área, não sofrendo com a intensificação dos resultados como ocorre em UCC e ATP, já que esses *backgrounds* diluem a real concentração elementar existentes na área de estudos.

As principais unidades que marcaram níveis de contaminação mais alto, são Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte, Grupo Nova Lima e Grupo Piracicaba.

No Gráfico 1, é apresentado um resumo comparativo dos valores em termos de porcentagem de extensão na área.

Gráfico 8 – Distribuição dos valores de GCM nos diferentes tipos de *background*



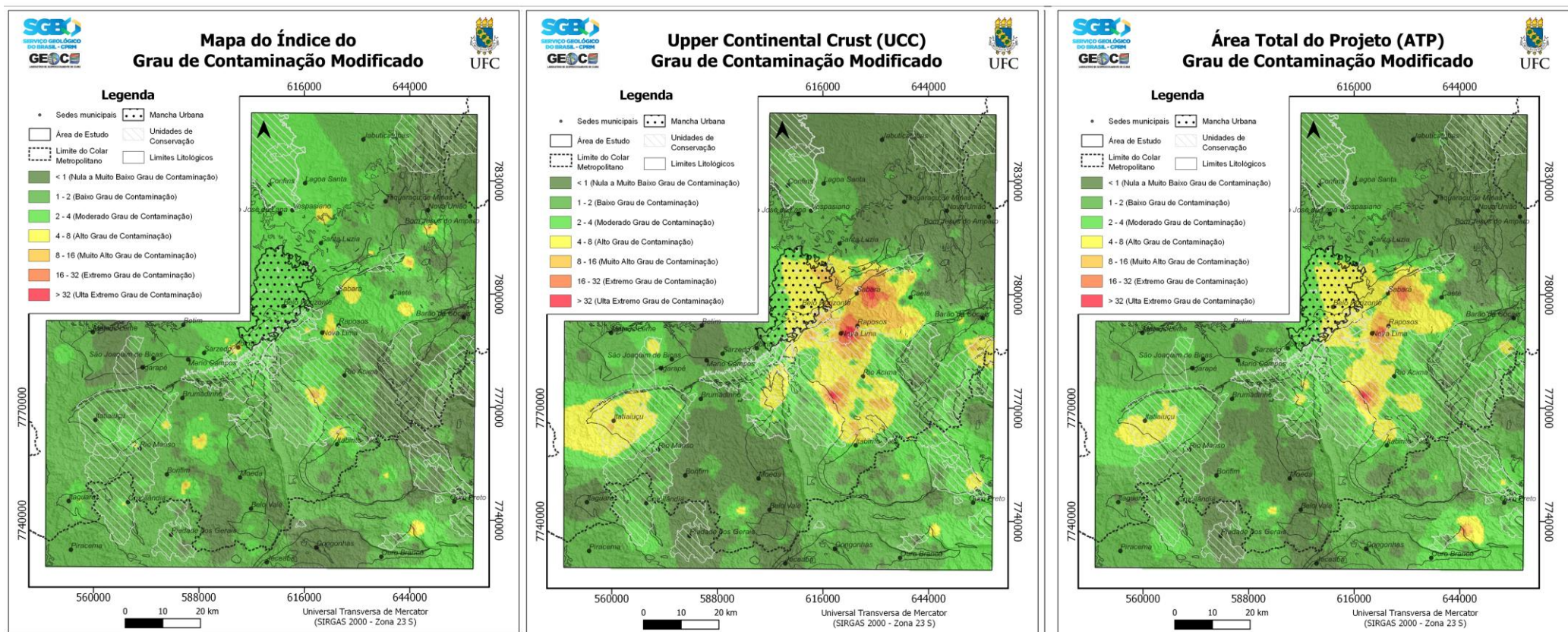
Fonte: Autor

O gráfico mostra que os valores para o grau de contaminação modificado, são intensificados e superestimados em valores de *background* mais regionais como a área total do projeto (ATP) e o Upper Continental Crust (UCC). Entretanto no contexto do *background* local, vinculado às Unidades Geológicas (UG), a distribuição dos dados fica mais presente em limiares de contaminação mais baixos, atingindo o nível máximo de Alto Grau, enquanto os demais chegam ao limiar de

Extremo Grau, duas classes acima.

Resumidamente, isso nos mostra como a aplicação de *backgrounds* locais, traz informações mais fidedignas, enquanto valores mais regionais de base podem gerar extrapolações por não serem capazes de estruturar de forma verdadeira as características geológicas e ambientais. Além disso os picos do grau de contaminação modificação são observados no estudo em regiões diretamente correlacionadas com a presença de empreendimentos minerários na região do Quadrilátero Ferrífero, indicando que a atividade de mineração é um fator significativo para as variações locais.

Figura 35 – Comparação do Grau de Contaminação Modificado com diferentes valores de Base - (Unidade Geológicas x UCC x ATP)



Fonte: Autor

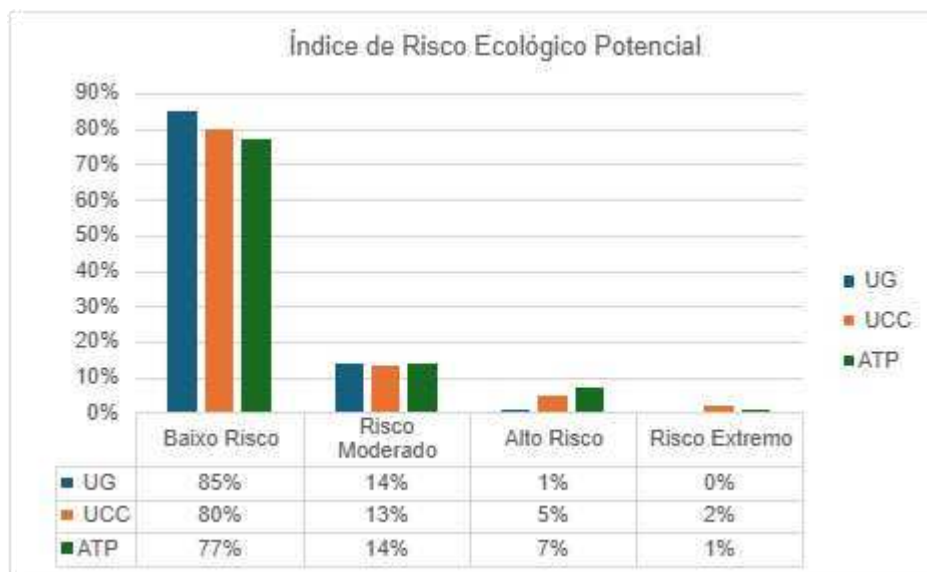
5.3.2 Índice de Risco Ecológico Potencial

Os resultados do IREP (Figura 15) nos trazem as mesmas confirmações que o Grau de Contaminação Modificado, com o mesmo comportamento, o UCC apresenta regiões com marcadores maiores e mais extensos, seguido dos *backgrounds* oriundos de ATP e, por último, o mapa cuja referência foram os *backgrounds* das unidades geológicas. Podemos identificar o mesmo comportamento dos marcadores decrescendo em extensão e intensidade dos seus níveis de contaminação, quando comparados os valores *backgrounds* de UCC, ATP e unidades geológicas

O IREP apresentou os resultados mais alarmantes para a região central e extremo sudeste do mapa, os pontos considerados como de Risco Extremo estão localizados pelo Grupo Nova Lima e Grupo Piracicaba.

As principais unidades que marcaram níveis de contaminação mais alto, são Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte, Grupo Nova Lima, Formação Cauê, Grupo Sabará e Grupo Piracicaba, sendo que as porções mais extensas e de classificação mais altas foram atingidas pelos mapas com os *backgrounds* de UCC e ATP. Em relação à localização dos marcadores de risco, eles seguiram uma lógica similar, variando somente em extensão e intensidade.

No Gráfico 2, é apresentado um resumo comparativo dos valores obtidos quanto a seus riscos, em cada contexto de *background*.

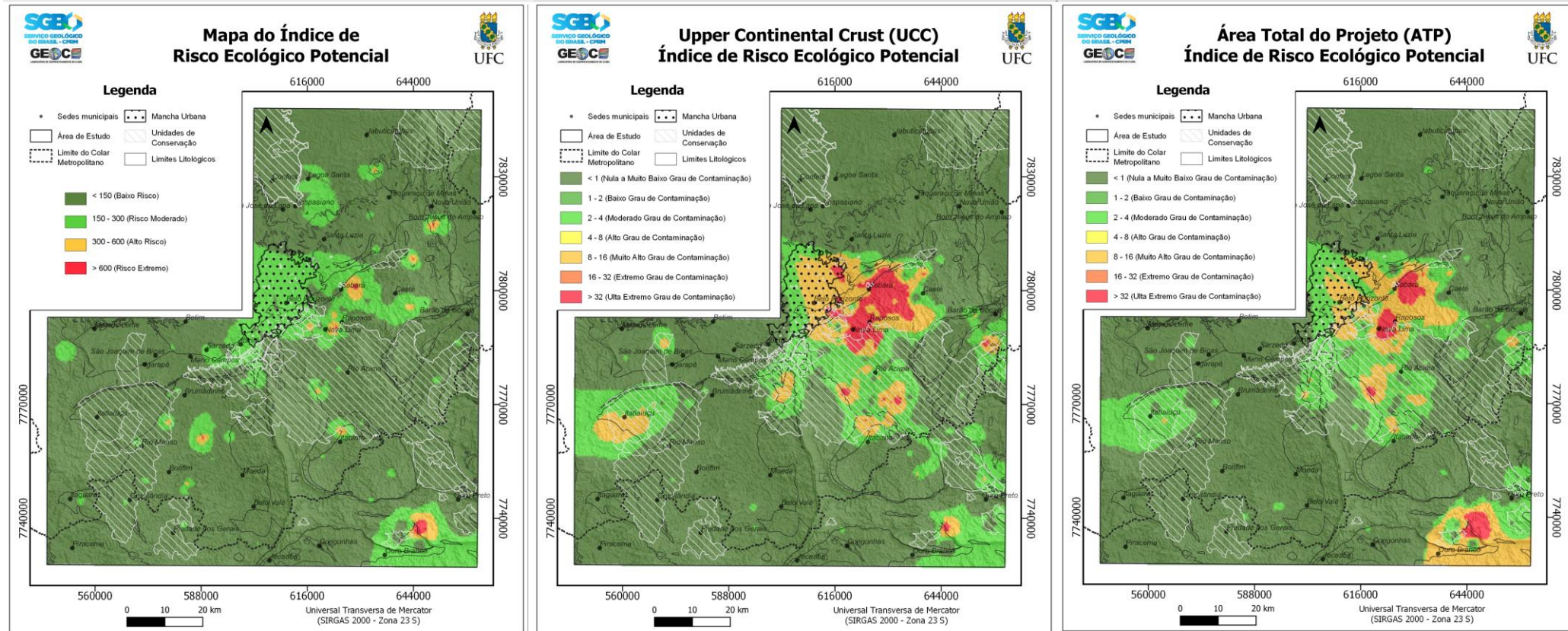
Gráfico 9 – Distribuição dos valores de IREP nos diferentes tipos de *background*

Fonte: Autor

O comportamento do IREP é similar ao do GCM, tendo em vista que os valores também, são intensificados e superestimados em valores de *background* mais regionais como a área total do projeto (ATP) e o Upper Continental Crust (UCC). Os valores vinculados as Unidades Geológicas (UG) têm a distribuição percentual em limiares de risco menores, atingindo o nível máximo de 1% em Alto Risco, enquanto os demais chegam ao limiar de Alto Risco e Risco Extremo, com número de dados e distribuição maiores.

Corroborando mais uma vez para a ideia de se aplicar valores locais de *background*, por esses serem capazes de representar de forma mais realista o contexto ambiental e geológico dos dados.

Figura 36 – Comparação do Índice de Risco Ecológico Potencial com diferentes valores de Base - (Unidades Geológicas x UCC x ATP)



,Fonte:Autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do trabalho trouxe algumas discussões relevantes em vários aspectos que envolvem a eficiência dos índices geoquímicos para verificação das fontes de origem e avaliação de área contaminadas, os efeitos dos diferentes normalizadores e seus respectivos comportamentos na análise dos dados, além da grande influência da geologia complexa e enriquecida em vários elementos do Quadrilátero Ferrífero.

No que se refere aos índices geoquímicos, podemos discutir as características e eficiências dos mesmo para a definição de valores em uma região. Os melhores resultados desta pesquisa foram obtidos a partir dos índices multielementares, sendo eles o Grau de Contaminação Modificado e o Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP), calculados com base nos *backgrounds* de referência oriundo das unidades geológicas e não de valores regionais como o caso do ATP e globais como ocorre com o UCC.

. No caso dos índices uni-elementares, o Fator de Enriquecimento foi a ferramenta que revelou melhores e mais adequados resultados relativamente à realidade geológica da área de estudo. Entretanto, esse índice exige cautela, já que o mesmo é influenciado diretamente por seus elementos normalizadores e isso pode acarretar resultados bastante distintos mesmo quando considerada uma mesma região.

Os normalizadores no cálculo do Fator de Enriquecimento apresentam características peculiares a cada um de seus elementos e respectivas afinidades geoquímicas, como é o caso do (Al) com os argilominerais, o (Fe+Mn) com os oxihidróxidos e o (Ca+Mg) com os carbonatos. A riqueza e complexidade geológica da área de estudo gera resultados interessantes para os elementos estudados, mas de forma geral podemos trazer as seguintes discussões. O Alumínio e o Ferro+Manganês apresentaram resultados mais condizentes para os metais pesados no que concerne os valores de enriquecimento mais elevados, por estes estarem sobre zonas litológicas previamente já conhecidas para ocorrência desses elementos em maiores concentrações. Entretanto, o normalizador Ca+Mg apresenta melhores análises na região norte do mapa próximo ao Grupo Bambuí (Carbonatos),

que nos demais normalizadores acaba sendo negligenciado, apesar de ser um resultado esperado devido sua afinidade geoquímica com os carbonatos, esse normalizador também apresentou marcadores mais realistas para região do Complexo Belo Horizonte, onde houve poucas coletas devido a região urbana da capital e região metropolitana.

Podemos trazer à discussão que o cálculo dos índices com valores de *background* calculados a partir das unidades geológicas da região, mostraram resultados mais coerentes em comparação a resultados regional (ATP) e globais (UCC), e isso provavelmente se deve também ao fato de que os valores de *background* mais generalistas não conseguem refletir com nitidez o efeito do enriquecimento regional nos diversos elementos analisados. Sendo assim, quando se opta por gerar o *background* pelas unidades geológicas existentes esse efeito é corrigido e, portanto, é possível obter resultados mais condizentes e fidedignos sobre a influência da diversidade geológica local.

No aspecto ambiental os resultados evidenciaram concentrações mais elevadas e valores potencialmente alarmantes de elementos geoquímicos em áreas do Quadrilátero Ferrífero próximas e dentro de Unidades de Conservação (UCs) de Uso Sustentável com extensão e valores maiores que em comparação com UCs de Proteção Integral, onde os efeitos refletem predominantemente a assinatura geológica natural. Destaca-se a Unidade de Conservação do Veríssimo (Lei Estadual nº 20.810/2013), criada para garantir o abastecimento hídrico de Ouro Branco, que registrou altas concentrações tanto nos índices unielementares quanto multielementares, indicando possível influência antrópica sobre os recursos hídricos locais, tendo em vista a ocorrência de atividades mineiras no contexto da área da UC. Esses dados reforçam a necessidade de pesquisa e políticas públicas direcionadas e ações de diagnóstico como este estudo, mas também de mitigação, como monitoramento contínuo da qualidade da água e do solo, além da adoção de melhores práticas na gestão territorial, visando preservar os ecossistemas sensíveis e garantir a segurança ambiental para as comunidades do entorno. O estudo serve, assim, como base técnica para decisões estratégicas na região.

REFERÊNCIAS

ABRAHIM, G.M.S. **Holocene sediments of Tamaki Estuary: characterization and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand.** 2005. 361 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Department of Geology, University of Auckland, Auckland, 2005.

ABRAHIM, G.M.S.; PARKER, R. J. Assessment of Heavy Metal Enrichment Factors and the Degree of Contamination in Marine Sediments from Tamaki Estuary, **Environmental Monitoring and Assessment**, Auckland, v. 136,n.3, p. 227-238, 2008.

ABREU, A.; MATEUS, A.; TABORDA, R.; BATISTA, M. J. Geochemistry of stream sediments in W-Sn and precious metals ore-systems exploration in Central-Iberian Zone. *In*: CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA,10., 2015, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa:ULisboa, 2015.p.125-128.

ABREU, A.P.F.; COSTA, C. R.; GOMES, I.R.; BARRAL, U. M.; VIANA, A. J. S.; TASSINARI, D; TORRADO, P.V.; SILVA, A. C. Soils and landscape evolution of the Serra do Espinhaço Meridional, Brazil. **Revista Espinhaço**, Diamantina, v.10, num.1,p.1-23,2021.

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

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils.** 2.ed. London: Blackie Academic & Professional,1995.

ALMEIDA, F. F. M. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** 1.ed. São Paulo: Editora da USP, 1998.

AMARAL, F. C. S.; SANTOS, H. G.; AGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N.; PEREIRA, N. R.; OLIVEIRA, R. P.; JUNIOR, W.C. **Mapeamento de solos e aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais.** 1.ed. Rio de Janeiro: Embrapa. 2004.

AMARANTE, R. T. **Mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente na borda do Cráton São Francisco e Cinturão Brasília, Minas Gerais: definição de *background* geoquímico e aplicação de análise estatística multivariada.** 2021. 108f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

AZEVEDO, U.R.; MACHADO, M. M. M.; CASTRO, P. T. A.; RENGER, F. E.; TREVISOL, A.; BEATO, D. A. C. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG).**1.ed. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

BALTAZAR, O. F.; BAARS, F. J.; LOBATO, L. M.; REIS, L. B.; ACHTSCHIN, A. B.;

BERNI, G. V.; SILVEIRA, V. D. **Mapa geológico - Projeto Quadrilátero Ferrífero**. 3.ed. Belo Horizonte: CPRM,2005.

BRAND, N.W., BUTT, C.R.M.; HELLSTEN, K.J. Structural and lithological controls in the formation of the Cawse nickel laterite deposits, Western Australia - Implications for supergene ore formation and exploration in deeply weathered terrains. **Australian Institute of Mining and Metallurgy**, Carlton, v 6.n.96, p.185-190.1996.

BRASIL. **Banco de Dados Georreferenciado do Exército Brasileiro (BDGEx)**. Brasília, DF: Exército Brasileiro, 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 10 dez.2024.

BEZERRA, D. P. **Quadrilátero Ferrífero – MG: Fatores condicionantes do relevo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BILINSKI, S.F.; SAKAN, S. Geochemistry of Water and Sediment. **Water**, v.13, n.4, p.693, p.1-5, 2021.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; RAWLS, G. Arsenic in water and sediment in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 18, n. 2, p. 263-271, 2003.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; MATSCHULLAT, J. Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from Iron Quadrangle, Brazil. **Environmental Geology**, Berlin, v. 44, n. 1, p. 39-52, 2003

CALMANO, W.; HONG, J.; FÖRSTNER, U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. **Water science and technology**, Viena, v. 28, n. 8, p. 223–235, 1993.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e evolução da Bacia do Espinhaço na região do Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 223-236, 2003.

CARITAT, P.; LECH, M.; MCPHERSON, A.; PHILLIPS, D. National Geochemical Survey of Australia: outline of a new proposal. **Geoscience Australia**, Camberra, v. 1,n. 1, p 1-55. 2007.

CARVALHO, A; JUNIOR, A.P.M.; FILIZZOLA, B. R.; MAGALHÃES, M. C. P. O papel dos processos fluviais na configuração de fundos de vale na bacia do Rio Paraúna – Serra do Espinhaço Meridional, sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 19, n. 4, p. 123-145, 2018.

CASTRO, P.T.A; ENDO, I.; GANDINI, A. L. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do**

conhecimento nos últimos 50 anos. 1.ed. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020.

CAVALCANTE, E. P. et al. Utilização de sedimentos fluviais na definição de *background* geoquímico para avaliação de contaminação ambiental. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 47, n. 3, p. 345-357, 2017.

CHEMALE JR., F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. The Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Recife, v. 7, n. 3-4, p. 241–257, 1994.

COELHO, T. Mineração e dependência no quadrilátero ferrífero. **Revista Intratextos**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 128-146, 2012.

COSTA, A. T.; LIMA, H. M.; FERREIRA, V. G.; NALINI JÚNIOR, H. A. Geochemistry of arsenic in the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 152, p. 37–45, 2015.

RODRIGUES, F. A.C.; RODRIGUES, L. C.R.; ROSIÈRE, C. A. Análise crítica sobre a controvérsia do Grupo Tamanduá, Quadrilátero Ferrífero. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 6., 1992, Ouro Preto. **Anais [...]**.Ouro Preto:UFOP, 1992.p. 47-48.

DESCHAMPS, E.; CIMINELLI, V. S. T.; LANGE, F. T. Arsenic and heavy metals in the Iron Quadrangle, Brazil: A review of their sources, behavior, and environmental impact. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 1-12, 2002.

DESCHAMPS, E.; MATSCHULLAT, J. **Arsenic: Natural and Anthropogenic.** 1.ed. Flórida: CRC Press, 2011.

DIAS, M. I.; PRUDENCIO, M. I. On the importance of using scandium to normalize geochemical data preceding multivariate analyses applied to archaeometric pottery studies. **Microchemical Journal**, São Carlos, v. 88, p. 136-141, 2008.

DORR, J. V. N.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A. **Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** 81.ed. Rio de Janeiro: DNPM.1957.

DORR, J.V.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **U.S. Geological Survey**, v. 1, p. 1–17, 2015.

DUNG, T. T. T.; KRETZSCHMAR, R.; CAPPELLYN, P.; VANGRONSVELD, J.; CORNELIS, R.; SMOLDERS, E. Geochemical baseline establishment and pollution assessment of heavy metals in urban soils. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 185, n. 8, p. 6575–6586, 2013.

FARIAS, S. S.; CASA, V. A.; VÁZQUEZ, C.; FERRO, O.; DONAIRE, R.; SMICHOWSKI, P. Natural contamination with arsenic and other trace elements in groundwaters of Argentine Pampean Plain. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 309, n. 1-3, p. 187–199, 2003.

FARINA, F.; ALBERT, C.; DOPICO, C.M.; GIL, C.A.; MOREIRA, H.; HIPPERT, J. P.; CUTTS, K.; ALCKMIM, F. F.; LANA, C. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. **Journal of South American Earth Sciences**, Buenos Aires, v. 68, n.1, p. 4-21, 2016.

FERNANDES, H. M.; FRANKLIN, M. R; VEIGA, L. B. P.; FREITAS, P. S. G.; GOMES, M. A.; LICHT, O.A.B.; SANTOS, M. A. B.; SANTOS, M. C. V. Environmental assessment of arsenic-rich tailings in the "Quadrilátero Ferrífero" (Brazil): A case study. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 542, p. 1056-1063. 2016.

FILZMOSE, P.; REIMANN, C.; GARRETT, R. G. **Multivariate statistical analysis of environmental data**. 1.ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2010.

FIORI, C.S. **Integração de indicadores geoquímicos e biológicos na avaliação da contaminação de sedimentos por metais pesados em regiões costeiras do Estado do Rio de Janeiro, Brasil**. 2008. 128f. Dissertação (Mestrado em Geociências - Geoquímica) - Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

FREITAS, M. E.; RODRIGUES, F. A.C; ROSIÈRE, C. A. A correlação do quartzito Cambotas com a sequência Espinhaço apoiada por mapeamento geológico em escala 1:10.000. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS, 6., 1992, Ouro Preto. **Anais** [...]. Ouro Preto: UFOP, 1992. p. 51-53.

FUNG, K. Y. et al. Toxicity of zinc and its compounds: Impacts on health and the environment. **Environmental Toxicology**, Amsterdã, v. 39, p. 307-318, 2020.

GAŁUSZKA, A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland. **Environmental Geology**, Amsterdã, v.42, n.1, p. 7-17, 2007.

GOLIGHTLY, J.P. Nickeliferous laterite deposits. **Economic Geology**, Boulder, v.15, n.1, p. 710-735. 1981.

GONÇALVES, G. F. **Estratigrafia de sequências e proveniência sedimentar do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

GONÇALVES, H. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2018.

HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. **Water Research**, Oxford, v.14, n.8, p. 975-1001, 1980.

HARRISON, R. M. et al. Nickel: Toxicity and environmental risks. **Environmental Geochemistry and Health**, Berlin, v. 43, p. 1915-1928, 2021.

HARTMANN, L. A.; ENDO, I.; SUITA, M. T. F.; SANTOS, J. O. S.; FRANTZ, J. C.; CARNEIRO, M. A.; MCNAUGHTON, N. J.; BARLEY, M. E. Provenance and age

delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U–Pb isotopes. **Journal of South American Earth Sciences**, Buenos Aires, v. 20, p. 273-285, 2006.

HERNANDEZ, L.; PROBST, A.; PROBST, J. L.; ULRICH, E. Heavy metal distribution in some French forest soils: Evidence for atmospheric contamination. **The Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 312, p. 195-219, 2003.

HUGHES, M. F. Arsenic toxicity and health effects. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, Helsinki, v. 74, n. 19, p. 1134-1141, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraopeba abre procedimento para implementar programa de conservação e produção de água em microbacias da região**. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/w/cbh-paraopeba-abre-procedimento-para-implementar-programa-de-conservacao-e-producao-de-agua-em-microbacias-da-regiao?redirect=%2F#:~:text=A%20Bacia%20Hidrogr%C3%A1fica%20do%20Rio,de%20habitantes%20em%2047%20munic%C3%ADpios>. Acesso em: 29 nov. 2024

JESUS, H.C., COSTA, E.A., MENDONÇA, A.S.F., ZANDONADE, E. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da ilha de Vitória do Espírito Santo, ES. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 378-386, 2004.

KOGLIN, N.; ZEH, A.; CABRAL, A. R.; JUNIOR., A. A. S.G.; NETO, A. V.C.; BRUNETTO, W. J.; GALBIATTI, H. Depositional age and sediment source of the auriferous Moeda Formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil: New constraints from U–Pb–Hf isotopes in zircon and xenotime. **Precambrian Research**, Sydney, v. 255, n.7, p. 96-108, 2014.

LANDAU, E. C.; GUIMARAES, D. P. **Bacia hidrográfica do Rio das Velhas: caracterização ambiental, demográfica, agrária e socioeconômica**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2023

LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F.V. **Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno**. 1.ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2014.

LEÃO, L. P. **Mapeamento geoquímico de sedimentos fluviais: diferentes métodos e suas aplicações ambientais**. 2019. 211 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

LEE, D. T.; SCHACHTER, B. J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. **International Journal of Computer & Information Sciences**, Zagazig, v. 9, n. 3, p. 219-242, 1980.

LEMONS, M. M. G.; DIAS, C. L.; ROCCA, A. C. C.; CASARINI, D. C. P. **Metodologia adotada para o estabelecimento dos valores de referência de qualidade para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. 1.ed. São Paulo: CETESB,

2000.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, Amsterdã, v. 6, n.4, p. 228-241, 2011.

LI, X.; LI, Y.; LIU, C.; ZHAO, Z.; ZHAO, Y. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Pearl River Delta, *South China*. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 155, p. 274-281, 2008.

LIMA, G.F.C. **Análise geoquímica de metais pesados em sedimentos de corrente na represa da Cemig - Três Marias/MG: distribuição e influência dos processos naturais e antropogênicos**. 2020.140 f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LIMA, J. R. Chromium toxicity and its effects on human health. **Journal of Environmental Toxicology**, Seongnam-si, v. 14, n. 2, p. 204-217, 2019.

LIN, C.; HE, M.; ZHOU, Y.; GUO, W.; YANG, Z. Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 137, n.3, p. 329-342, 2008.

LOBATO, L. M.; RODRIGUES, L. C.R.; VIEIRA, F. W. R. Brazil's premier gold province. Part II: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. **Mineralium Deposita**, Heidelberg, v. 36, n. 4, p. 249-277, 2001.

LOBATO, L. M.; VIEIRA, F. W. R.; -RODRIGUES, L. C.R.; SOUZA, T. R. Brazil's premier gold province: The Quadrilátero Ferrífero. **Gondwana Research**, Amsterdã, v. 4, n. 4, p. 691–693, 2001.

LOSKA, K.; WIECHUŁA, D.; KUSI, I.; PELCZAR, J.; OKRUSZEK, T.; KOWAL, E. Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 93, n. 1, p. 347-365, 1997.

LOSKA, K.; WIECHULA, D.; KORUS, I. Metal contamination of farming soils affected by industry. **Environment International**, Amsterdã, v. 30, n.1, p. 159-165, 2004.

LÖW, E.; SCHILDHAUER, M.; KÖHLER, S.; BARRIONUEVO, M.; SCHMIDT, P.; EGGEN, R. I. L. Cadmium contamination and human health. **Environmental and Molecular Mutagenesis**, Hoboken, v. 59, n. 5, p. 247-256, 2018.

MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. 1.ed. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A.; DE OLIVEIRA, O. A. B. U-Pb geochronology of the Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the

Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 104, n.2, p. 1221-1227, 1992.

MADEIRA, M. R; MARTINS, M.S; MARTINS, G.P; ALKMIM, F. F. Caracterização faciológica e evolução sedimentar da Formação Moeda (Supergrupo Minas) na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 12-148, 2019.

MARQUES, J. A. et al. Geoquímica dos sedimentos fluviais: método de monitoramento e avaliação de contaminação. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 123-135, 2015.

MARQUES, E. D. **Caracterização geoquímica de elementos em sedimentos de corrente para análise ambiental: Estudo de caso na bacia do Rio São Francisco**. Dissertação Mestrado em Geoquímica) - Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

MATSCHULLAT, J.; BORBA, R. P.; DESCHAMPS, E.; FIGUEIREDO, B. R.; GABRIEL, F.; SCHWARZBACH, A. Arsenic in the geosphere a review. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v. 249, n. 1-3, p. 297–312, 2000.

MATSCHULLAT, J; BORBA, R. P; DESCHAMPS, E; FIGUEIREDO, B. R; GABRIO, T; SCHWENK, M. Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 15, n. 2, p. 193-202, 2000.

MATOS, F; DIAS, R. Consórcios intermunicipais e a bacia hidrográfica do rio Paraopeba. **Revista Espacios**, Bogotá, v. 32, n. 4, p. 24, 2011.

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. **GeoJournal**, Heidelberg, v. 2, n. 3, p. 108-118, 1969.

NASCIMENTO, L.P.; REIS, D. A.; ROESER, H. M. P.; SANTIAGO, A.F. Avaliação geoquímica de metais em sistemas fluviais afetados por atividades antrópicas no Quadrilátero Ferrífero. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 715-728, 2018.

NOCE, C. M. Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a review. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p. 15-23, 2000.

PELECH, A. S; NUNES, B. T. A; GATTO, L. C. S; BOTELHO, R. G. M. Considerações sobre o mapeamento geomorfológico do território brasileiro: algumas abordagens na representação regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Brasília, v.29, n.3, 2019

PEREIRA, E. M.O. **Aplicação do mapeamento geoquímico para a avaliação de contaminações ambientais no Quadrilátero Ferrífero – MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

POMERENE, J. B. The Cercadinho Formation. **Sociedade Brasileira de Geologia**,

Boletim, v. 7, n. 2, p. 64-65, 1958.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.34. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 30 set. 2024.

QUINÁIA, A.B.S.P.; PLETSCHE, A.L. Avaliação da contaminação de metais em sedimentos superficiais das praias do lago de Itaipu. **Revista Química Nova**. São Paulo, v.33. n. 2, p.613-617, 2010.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 17, n.2, p.23-29, 2014.

REIMANN, C.; CARITAT, P. **Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist**. 1.ed. Berlim: Springer, 1998.

REIS, A. F.; SCHMIELE, M. Características e potencialidades dos frutos do Cerrado na indústria de alimentos. Characteristics and potentialities of Savanna fruits in the food industry. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2019.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 1-11, 1994.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4.ed. Lavras: Editora UFLA. 1988.

RODRIGUES, A. S.L.; JÚNIOR, H. A.N. Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 2, p. 203-214, 2009.

RODRIGUES, S. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; NAZAR, T.I.S.M. Mapeamento Geomorfológico do Estado de Minas Gerais: uma proposta com base na morfologia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 20, n. 1, p. 34-39, 2019.

ROSIÈRE, C. A.; SPIER, C. A.; RIOS, F. J.; SUCIU, P. A. The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: An overview. **Reviews in Economic Geology**, Chelsea. v. 15, n.4, p. 223–254, 2008.

SANTOS, G. B. **Geomorfologia fluvial no Alto Vale do Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero-MG: paleoníveis deposicionais e a dinâmica atual**. 2008.143 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *In: PROCEEDINGS OF THE 1968 ACM NATIONAL CONFERENCE*, 2., 1968, San Francisco. **Anais [...]**. San Francisco: USF, 1968. p. 517-524.

SIMMONS, G. C.; MAXWELL, C. H. **Projeto Apa Sul RMBH**. 1.ed. Belo Horizonte: DNPM, 1962.

SALOMÃO, G.N.. **Mapeamento geoquímico da bacia do rio Itacaiúnas, Província Mineral de Carajás: Assinatura geoquímica dos blocos crustais: implicações para recursos minerais e meio ambiente**. 2020. 235 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém, 2020.

SARMANI, S.; ABDULLAH, M. P.; BABA, I.; MAJID, A. A. The Source of Anthropogenic Heavy Metals in Fluvial Sediments of a Rural Catchment: Coxs River, Australia. **Hydrobiology**, Basileia, v.235, n.3. p. 655-661. 1992.

SCHRANK, A.; CHAVES, M. L. S.; CAMPOS, A. C.R. Tectônica e sedimentação na Bacia do Espinhaço: uma visão integrada. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 11, n. 1, p. 123-134, 1981.

SOUZA, D. H. **Modelagem evolutiva do planalto Sul de Minas através de correlações entre análise morfométrica da rede de drenagem e termocronologia por traços de fissão em apatitas**. 2013. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

SRACEK, O.; BHATTACHARYA, P.; JACKS, G.; GUSTAFSSON, J. P.; VON BROMSSEN, M. Behavior of arsenic and geochemical modeling of arsenic enrichment in aqueous environments. **Applied Geochemistry**, Heidelberg, v. 25, n. 2, p. 284–297, 2010.

SUTHERLAND, R. A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. **Environmental Geology**, Berlim. v. 39, n. 6, p. 611-627, 2000.

TAYLOR, S. R.; MCLENNAN, S. M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. **Geological Magazine**, Cambridge, v.122, n.6, p.673-674. 1985.

TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 72, n. 2, p. 175-192, 1961.

VALERIANO, C. M.; HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F. São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. 1.ed. Berlim: Springer, 2017.

VARAJÃO, C.A.C.; SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, A.F.D.C.; BRAUCHER, R.; JÚNIOR, H.A.N. Estudo da Evolução da Paisagem do Quadrilátero Ferrífero (MG-Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão e da Pedogênese. **Revista Brasileira de Solos**, Ouro Preto, v. 33, n.3, p.1409 – 1425, 2009.

VICQ R. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. 185 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

VIEIRA, L. M. Geoquímica de elementos traço em depósitos de sulfetos no Quadrilátero Ferrífero. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 643–652, 2006.

VILLAÇA, J. N. Alguns aspectos sedimentares da Formação Moeda. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Minas Gerais**, Belo Horizonte, v. 2, n.2 p. 93-137, 1981.

WINDOM H. L.; SMITH R.G. J.; RAWLINSON, C. Particulate trace metal composition and flux across the south eastern US continental shelf. **Marine Chemistry**, Amsterdã, v. 22, n.2, p.283–297. 1989

ZHANG, J.; LIU, C. L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, Amsterdã, v. 54, n. 6, p. 1051-1070, 2002.

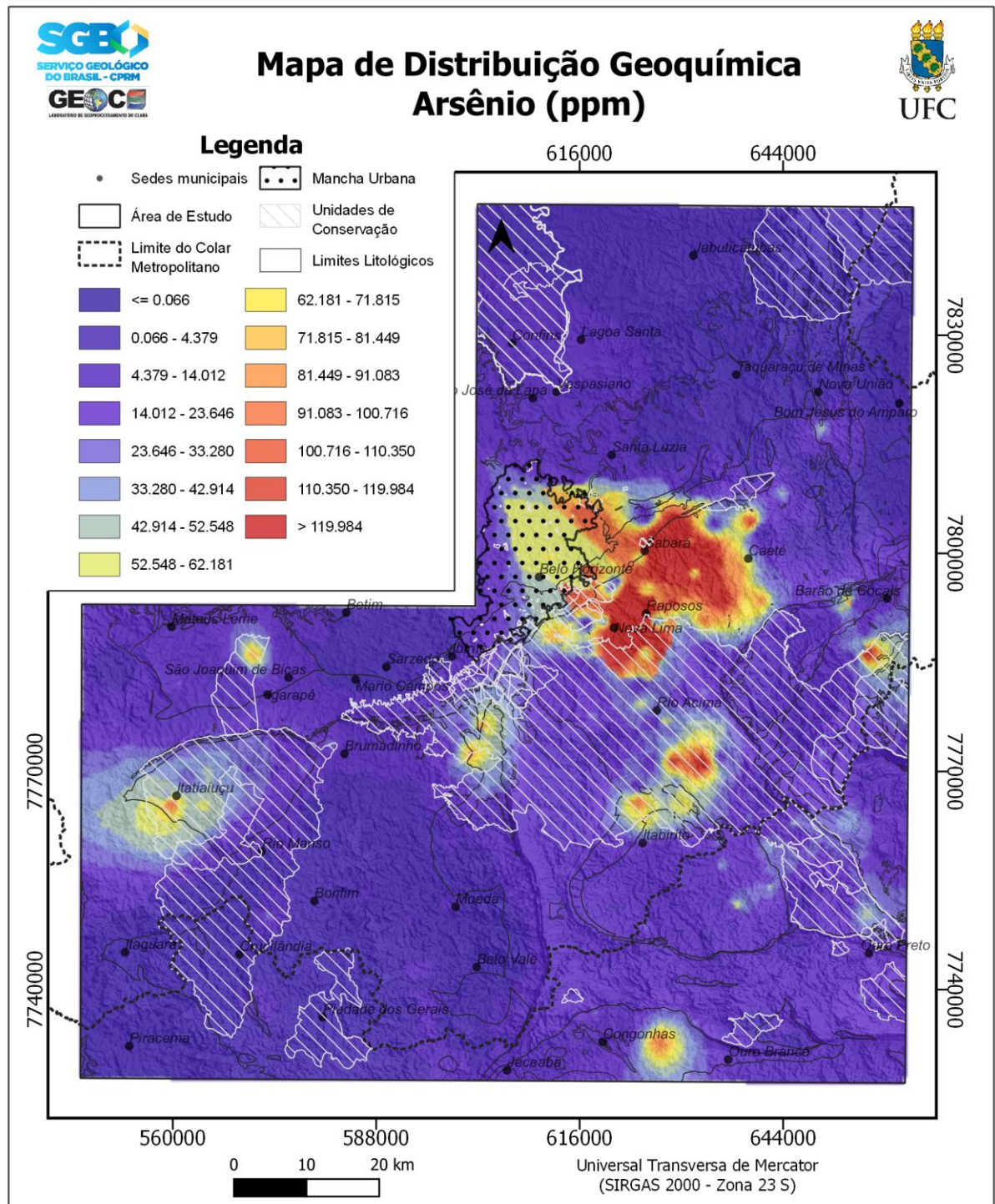
ZHAO, F. Lead exposure and its health effects: A comprehensive review. **Environmental Health Perspectives**, Durhan, v. 124, n. 5, p. 589-601, 2016.

ZIMMERMAN, D. L.; PAVLIK, C.; RUGGIERI, A.; ARMSTRONG, M. P. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. **Mathematical Geology**, New York, v. 31, n. 4, p. 375-390, 1999.

APÊNDICES

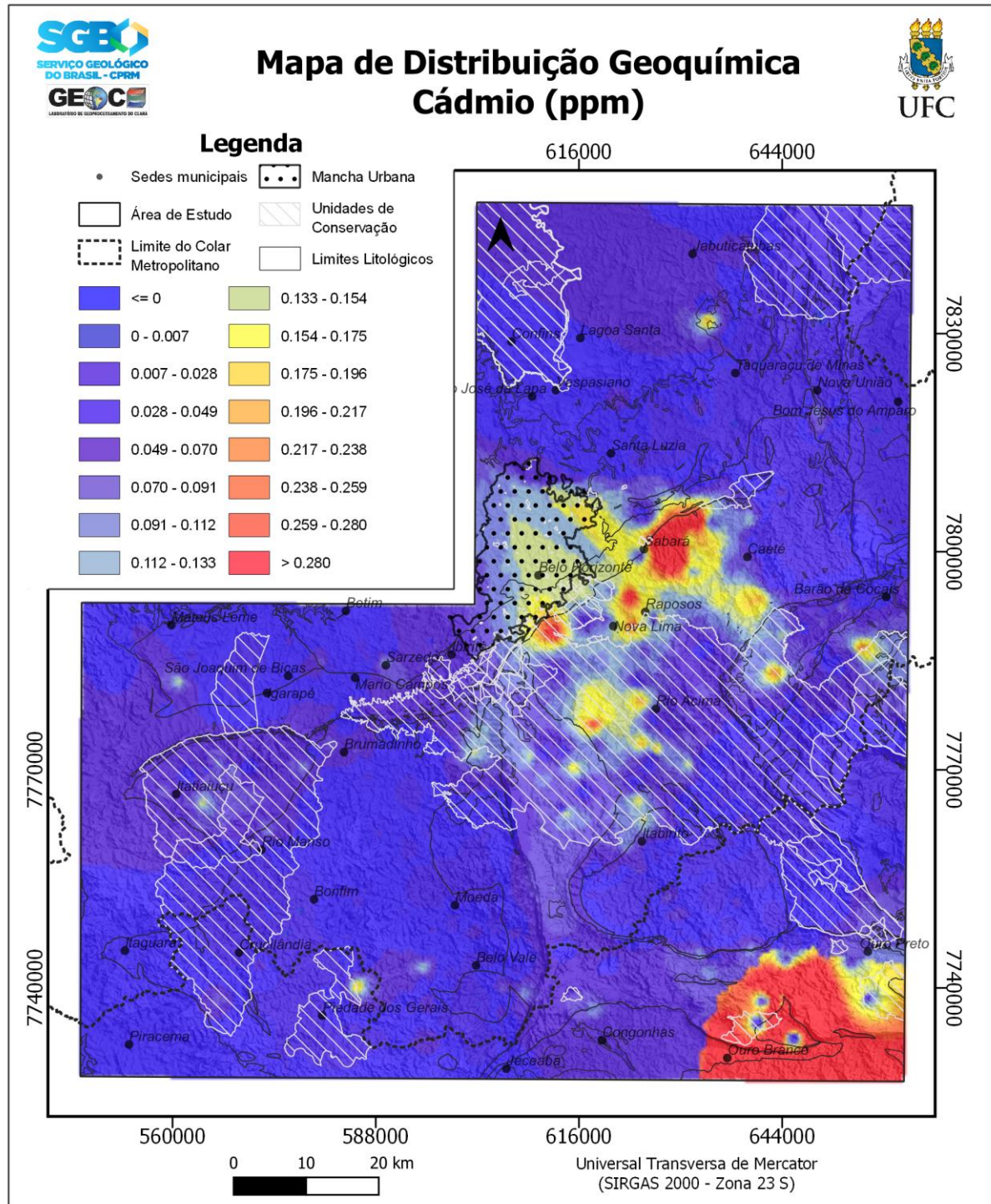
Apêndice A – Mapa Geoquímicos dos elementos

Apêndice A 1 – Mapa Geoquímico do Arsênio



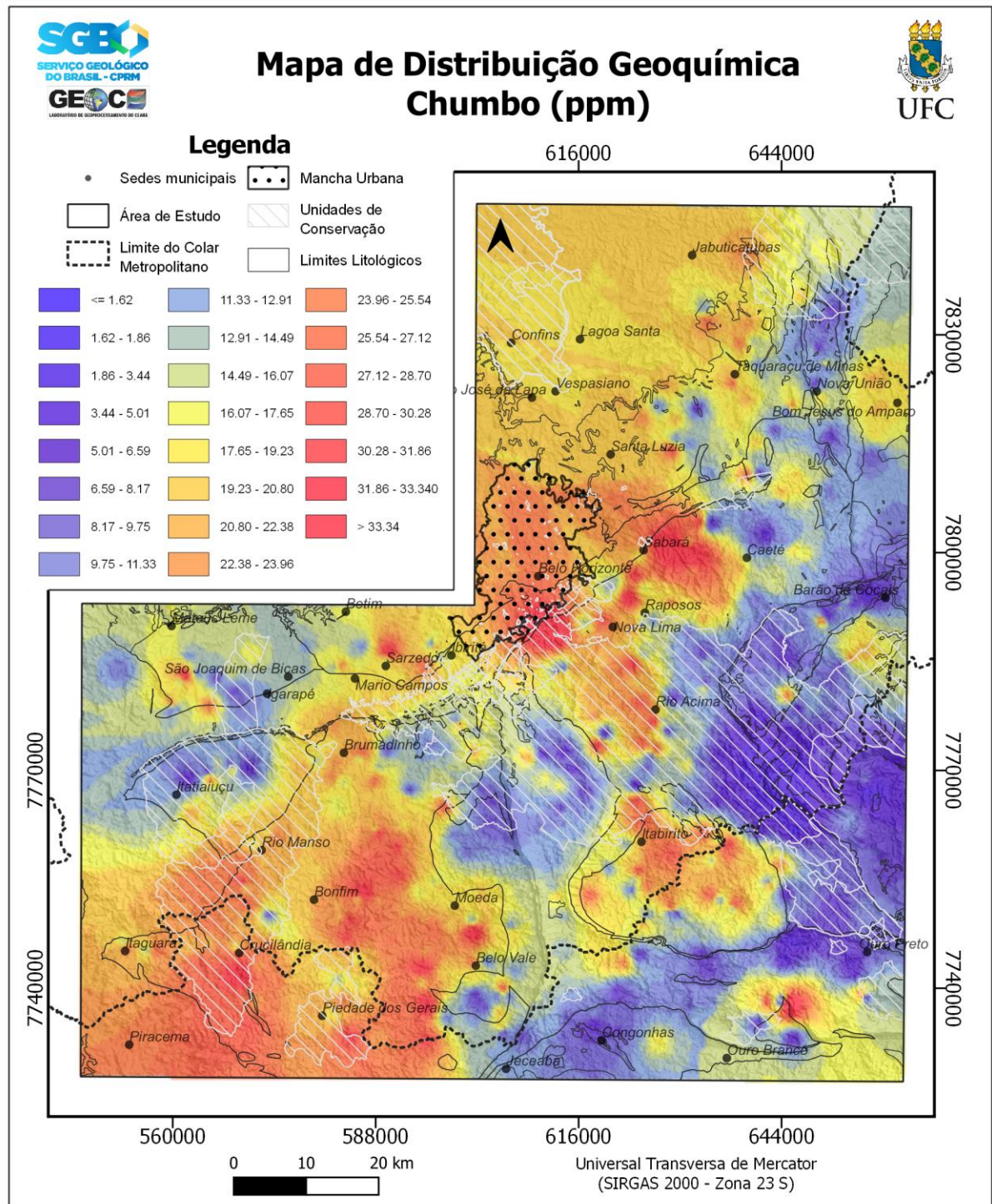
Fonte: Autor

Apêndice A 2 – Mapa Geoquímico do Cádmi



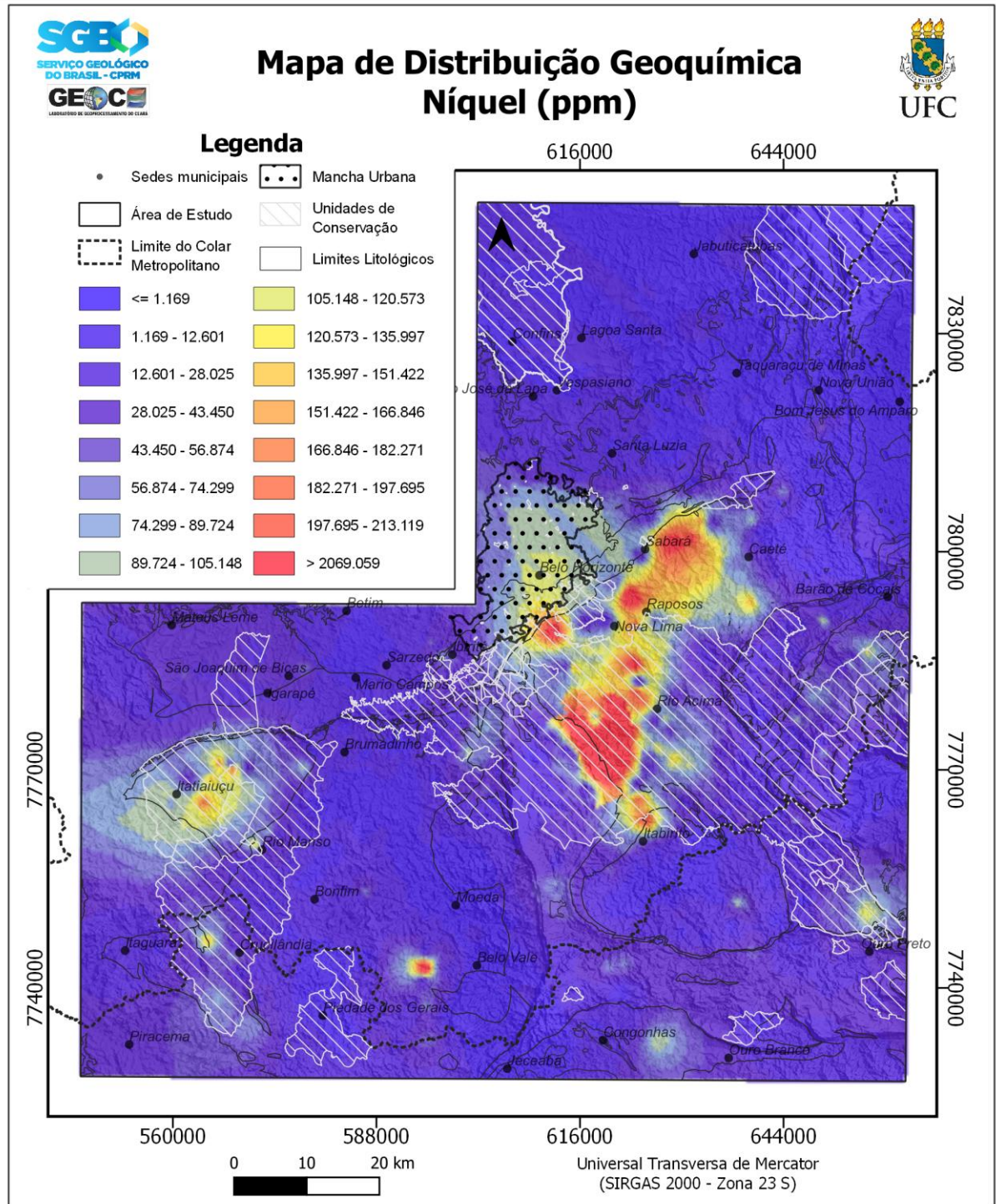
Fonte: Autor

Apêndice A 4 – Mapa Geoquímico do Chumbo



Fonte: Autor

Apêndice A 5 – Mapa de Geoquímico do Níquel



Fonte: Autor

