

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GEOLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO DA DISPERSÃO GEOQUÍMICA SECUNDÁRIA DOS GRANITÓIDES
DAS FOLHAS BELO HORIZONTE, IGARAPÉ E OURO PRETO (MG) POR SEDIMENTOS DE
CORRENTE.**

BRUNO PHELIPE DE LEMOS

ORIENTADOR

PhD Eduardo Duarte Marques – CPRM

CO-ORIENTADOR

Dr. Francisco José da Silva – DG/IA/UFRuralRJ

Novembro / 2016

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Agradecimento

Primeiramente agradeço a minha mãe, Miriam Celeste Amaral e minha sobrinha Maria Fernanda Amaral. Sem o apoio, confiança, incentivo e suporte dados por vocês, jamais teria chegado a esse ponto. Esse trabalho é totalmente dedicado a vocês.

Agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida, desde o ensino pré-primário até a conclusão do ensino superior, sem seus ensinamentos, nada disso teria se tornado possível. Muito obrigado por todo conteúdo intelectual e profissional que vocês me cederam.

Agradeço a meu orientador Eduardo Duarte Marques, pela oportunidade concedida na realização desse trabalho e pela paciência e objetividade da transmissão de seus conhecimentos sobre o assunto deste trabalho em todos os momentos em que se encontrava disponível.

Agradeço ao meu co-orientador, Francisco José da Silva, pela sua ajuda e paciência na realização e orientação deste trabalho, principalmente por sua atenção e amizade, meu muito obrigado, professor!

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a vida, e a todas as pessoas que me ajudaram direta ou indiretamente para a conclusão desta fase. Agradeço, em especial, a turma de geologia de 2011, a qual me proporcionou vivenciar experiências inesquecíveis, e conhecer pessoas as quais carregarei por toda minha vida. Agradeço a república TatuGirando e seu moradores por todos os momentos que passamos juntos todos esses anos. Sem vocês essa trajetória com certeza não teria sido tão prazerosa, meus sinceros agradecimentos a todos.

Agradeço ao colega Marcus Vinícius, pela ajuda na confecção de alguns itens desse trabalho, que foram de extrema importância para seu término. Por fim, mas não menos importante, agradeço a três pessoas que hoje sem sombra de dúvida posso chamar de irmãos, João Marcos de Melo Corrêa, Pedro Henrique de Siqueira Santos e Nathalia Eugênio Fernandes, só o convívio com vocês já valeria todo o esforço prestado durante esta graduação.

Agradeço a todos novamente, e a instituição UFRuralRJ por ter me proporcionado toda essa experiência de vida, meu muito obrigado.

Resumo

O trabalho CARACTERIZAÇÃO DA DISPERSÃO GEOQUÍMICA SECUNDÁRIA DOS GRANITÓIDES DAS FOLHAS BELO HORIZONTE, IGARAPÉ E OURO PRETO POR SEDIMENTOS DE CORRENTE visa apresentar os resultados analíticos e interpretação geoquímica de 358 amostras de sedimentos ativos de corrente, coletados pela CPRM e analisados pelo laboratório SGS GEOSOL®, para a caracterização das dispersões hidromórficas e clásticas nas regiões de Belo Horizonte, Igarapé e Ouro Preto, no Estado de Minas Gerais. Em termos de tratamento e análise química, as amostras estudadas foram peneiradas na fração < 80# (0,177 mm), tendo sido aproveitado somente o material menor que esta granulometria. Esse material foi posteriormente pulverizado na fração < 200# (0,075 mm), aberto com água régia e analisado para 53 elementos químicos por ICPMS. Foram produzidos mapas da concentração e distribuição dos elementos químicos considerados como os mais importantes para a caracterização do relevo geoquímico da área e localização dos pontos onde ocorrem suas maiores concentrações.

Sumário

1.1 Introdução e justificativa	8
1.2 Objetivo da pesquisa	8
1.3 Localização.....	9
1.4 Materiais e métodos.....	10
Capítulo 2 – Geologia Regional.....	13
2.1 Geologia do Estado de Minas Gerais	13
2.2 Cráton São Francisco	13
2.3 Quadrilátero Ferrífero	15
2.4 Sequência Estratigráfica	16
2.4.1 Embasamento Cristalino.....	16
2.4.2 Supergrupo Rio das Velhas	16
2.4.3 Supergrupo Minas	17
2.4.4 Formação Itacolomi	18
2.5 Evolução dos Granitóides no Quadrilátero Ferrífero	19
2.6 Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero	23
2.6 Geologia Estrutural do Quadrilátero Ferrífero	24
2.7 Aspectos Fisiográficos.....	25
2.8 Hidrografia.....	26
2.9 Aspectos Socioeconômicos	27
Capítulo 3	28
3.1 Resultados Obtidos.....	28
3.1.1 Box-plot	28
3.1.2 Representação e simbologia nos mapas	29
3.1.3 Sumário Estatístico	31
3.1.4 Considerações do ambiente sobre a amostragem geoquímica	33
3.1.5 Distribuição dos elementos químicos analisados.....	34
3.2 Mapas de localização da distribuição dos elementos químicos.....	42
Capítulo 4	62
4.1 Interpretações dos dados geoquímicos segundo a estatística bivariada e multivariada.....	62
4.1.1 Análise de correlação (estatística bivariada).....	62
4.1.2 Transformação dos dados para as análises multivariadas	66
4.1.3 Análise estatística multivariada (análise de principais fatores)	66
Capítulo 5	74
5.1 Conclusão	74

Capítulo 6.....	75
6.1 Referencias Bibliográficas.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Elementos químicos e seus respectivos limites superiores e inferiores de detecção.....	11
Tabela 2: as principais atividades tectonotermais e magmáticas de parte da porção sul do Cratom do São Francisco.....	20
Tabela 3: Sumário estatístico dos 53 elementos analisados em amostras de sedimentos de corrente.	32
Tabela 4: Matrizes de correlação dos elementos analisados para sedimentos de corrente.....	63
Tabela 5: Segregação dos cinco primeiros fatores pela análise de principais fatores para amostras de sedimentos de corrente.	67
Tabela 6: Autovalores e suas respectivas porcentagens de variância para cada fator segregado da análises de principais fatores em amostras de sedimentos de corrente.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Localização.....	9
Figura 2: Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	12
Figura 3: O Cráton São Francisco segundo três setores. Estão indicados a borda do cráton (vermelho), setores (rosa) e divisas interestaduais (azul pontilhado).	14
Figura 4:Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. (Marshak e Alkmim 1998)	19
Figura 5: Representação do gráfico Box-Plot. Fonte: http://www.statcan.gc.ca/edupower-pouvoirch12/img5214889_02-eng.gif	29
Figura 6: – Representação da simbologia das faixas de concentração em mapas de pontos baseados em gráficos Box-Plot de acordo com a CPRM.	31
Figura 7: Localização dos agrupamentos criados por semelhança geoquímica nas áreas de estudo.....	35
Figura 8: Box-Plot da distribuição de elementos maiores, menores e traços em amostras de sedimentos de corrente nos cinco principais agrupamentos geológicos da área estudada.	36
Figura 9: Mapa de concentração de alumínio na área de estudo.....	43
Figura 10: Mapa de concentração de cálcio na área de estudo.....	44
Figura 11: Mapa de concentração de magnésio na área de estudo.	45
Figura 12: Mapa de concentração de potássio na área de estudo.	46
Figura 13: Mapa de concentração de ferro na área de estudo.....	47
Figura 14: Mapa de concentração de bário na área de estudo.....	48
Figura 15: Mapa de concentração de césio na área de estudo.....	49
Figura 16: Mapa de concentração de fósforo na área de estudo.	50
Figura 17: Mapa de concentração de rubídio na área de estudo.	51
Figura 18: Mapa de concentração de antimónio na área de estudo.	52
Figura 19: Mapa de concentração de arsénio na área de estudo.	53
Figura 20: Mapa de concentração de lantânio na área de estudo.....	54
Figura 21: Mapa de concentração de cério na área de estudo.....	55
Figura 22: Mapa de concentração de níquel na área de estudo.....	56
Figura 23: Mapa de concentração de zinco na área de estudo.....	57
Figura 24: Mapa de concentração de chumbo na área de estudo.....	58
Figura 25: Mapa de concentração de cobre na área de estudo.....	59
Figura 26: Mapa de concentração de lítio na área de estudo.....	60
Figura 27: Mapa de concentração de ouro na área de estudo.	61
Figura 28: Gráficos representando as melhores correlações entre os elementos para as amostras de sedimentos de corrente.	64
Figura 29: Gráfico do tipo Scree para a determinação da quantidade de fatores relevantes para a análise (critério de Kaiser) para as amostras de sedimentos de corrente.	67
Figura 30: Mapa da associação química entre Rb, Cs, k e Mg correspondente ao fator 1.	69
Figura 31: Mapa da associação química entre Cu, Ni e V correspondente ao fator 2.	70
Figura 32: Mapa da associação química entre As, Pb, Ce e La correspondente ao fator 3.....	71
Figura 33: Mapa da associação química entre Ca, P e Ba correspondente ao fator 4.....	72
Figura 34: Mapa da associação química entre Sb e Al e correspondente ao fator 5.	73

Capítulo 1

1.1 Introdução e justificativa

A monografia apresentada corresponde ao Trabalho Final de Graduação, disciplina do Curso de Geologia do Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (IA 243), para a obtenção do título de bacharel em geologia. O trabalho foi orientado pelos geólogos PhD Eduardo Duarte Marques, Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e Prof. Dr. Francisco José da Silva, orientador acadêmico e Professor na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Mapeamentos geoquímicos auxiliam no conhecimento da concentração e distribuição dos elementos e compostos químicos nos ambientes geológicos, e podem ser utilizados em aplicações diversas, como por exemplo, na prospecção de mineralizações e na avaliação de substâncias contaminantes em solos e recursos hídricos. A distribuição e concentração dos elementos químicos apresentam grande variabilidade, e são determinadas por fatores geológicos, processos biológicos e outras variáveis, como por exemplo, atividades antrópicas.

Mapeamentos geoquímicos em escala regional, com a utilização de amostragem de sedimentos ativos de corrente, têm sido realizados em várias partes do mundo, como na Europa, Canadá, China, Austrália, Estados Unidos, entre outros. Esses trabalhos têm como objetivos a pesquisa mineral e a avaliação de recursos naturais, bem como o gerenciamento do uso e ocupação do solo; são utilizados para o desenvolvimento de políticas ambientais e estudos sobre a saúde e o bem-estar de seres humanos, animais e plantas.

1.2 Objetivo da pesquisa

Este trabalho visa desenvolver estudos de mapeamento geoquímico de superfície, utilizando análises químicas provenientes de sedimentos de corrente, referente aos complexos graníticos/gnáissicos presentes nas folhas Belo Horizonte, Igarapé e Ouro Preto, à escala 1:100.000, na região do Quadrilátero Ferrífero (MG). O interesse em realizar o mapeamento geoquímico da grande região onde se insere a Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero - PMQF teve como principal motivador a presença de grandes lacunas em termos de levantamentos geoquímicos nas suas regiões periféricas, de grande potencial mineral, aliado à sua excelente localização, na abrangência da região metropolitana da cidade de Belo Horizonte, de grande densidade populacional e com uso e ocupação diversificada do solo.

1.3 Localização

A região do centro-sul de Minas Gerais que, ao final dos anos 50, passou a ser chamada de Quadrilátero Ferrífero, abrange uma área de cerca de 7.000 km², na qual um conjunto de serras dispostas quase ortogonalmente é assinalado pela ocorrência de formações ferríferas produtoras de minérios de ferro de grande importância. 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, formando um quadrilátero balizado pelas coordenadas 19°30'S/21°00'S e 42°30'W/45°00'W. A área de estudo desse trabalho corresponde às regiões de Belo Horizonte, Igarapé e Ouro Preto, todas as folhas em uma escala 1:100.000. (Figura 1).

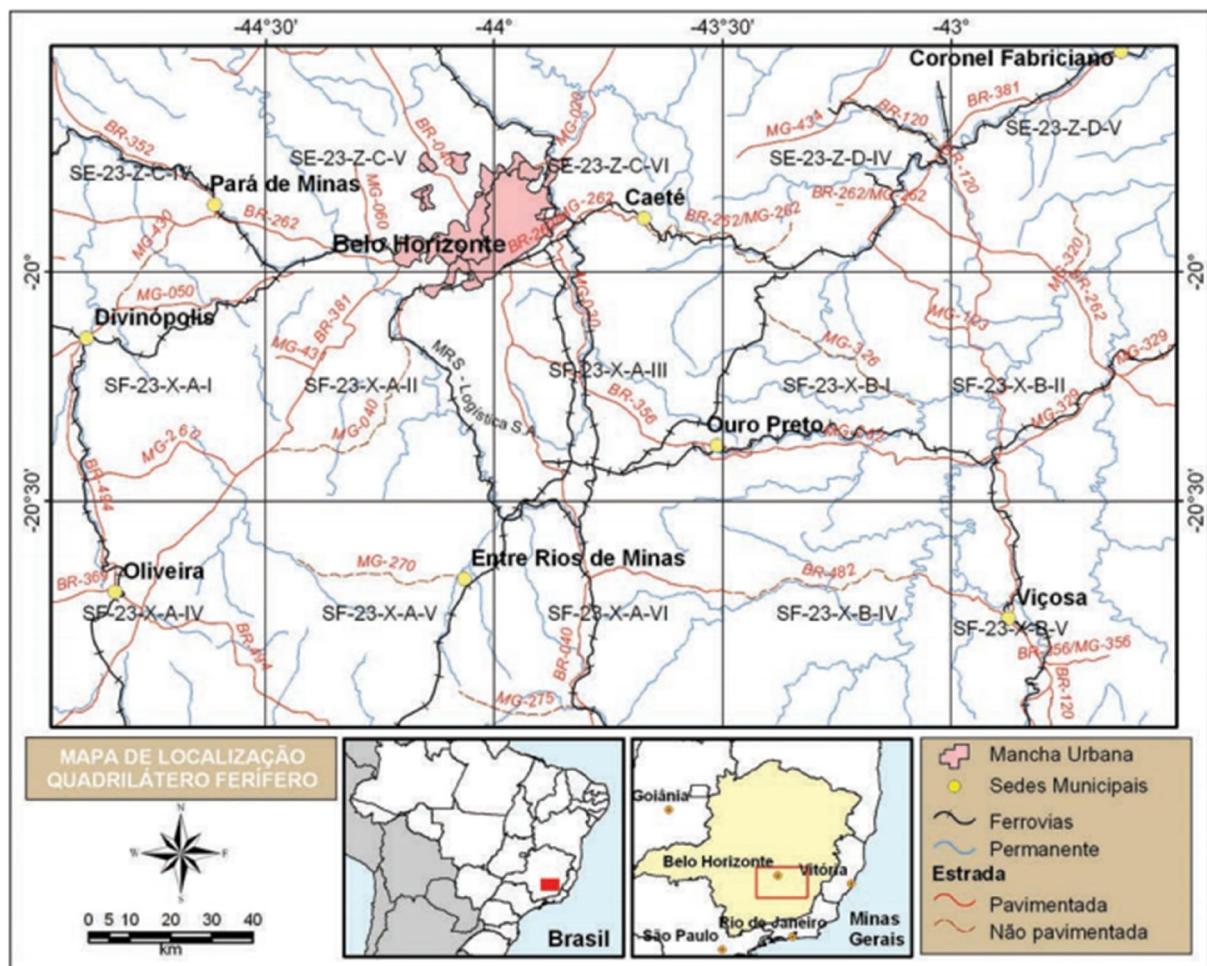


Figura 1: Mapa de Localização

1.4 Materiais e métodos

O trabalho aqui apresentado é constituído por duas etapas, a parte de campo, coleta e envio das amostras ao laboratório para análise química foi feito pela CPRM. A segunda etapa, que consiste na análise estatística e interpretação geoquímica dos dados gerados, foi feito por este pesquisador e será apresentado no decorrer desse trabalho.

O trabalho realizado pela CPRM consistiu em revisão bibliográfica da área de estudo, com a consulta de trabalhos já realizados na região, tanto em relação à prospecção geoquímica quanto a geologia regional. Em seguida, esta empresa elaborou um plano da campanha de coleta das amostras de sedimentos de corrente. O planejamento da amostragem de sedimentos ativos de corrente buscou contemplar drenagens cujas bacias de captação representassem áreas entre 10 e 30 km². O ponto mais baixo de cada bacia de captação foi escolhido como o mais apropriado para amostragem, levando-se em conta a influência de outras drenagens, presença de estradas, pontes e outras interferências antrópicas que pudessem trazer algum tipo de contaminação à amostra. As estações de amostragem visaram obter uma densidade de uma amostra por 10 Km². O local selecionado para a coleta das amostras foi o trecho onde o rio se apresentava mais retilíneo, coletando-se amostras compostas a cada 50 metros. Foi coletada uma amostra duplicata a cada 10 amostras de rotina para se verificar e controlar a qualidade da campanha.

A fração granulométrica das amostras de sedimentos ativos de corrente escolhida pela CPRM foi de <80# (0,177 mm) e a quantidade mínima de material coletado em torno de 1 Kg. As amostras foram devidamente embaladas, identificadas e enviadas ao laboratório SGS Geosol®, onde foram previamente preparadas para a análise química.

Primeiramente, as amostras foram secadas em estufas a 60º Célsius, seguidas do processo de quarteamento e peneiradas em malha com abertura < 80 mesh (<0.177 mm). O material abaixo da referida granulometria foi submetido à pulverização e digestão por Água Régia (uma mistura de ácido nítrico e ácido clorídrico concentrado, geralmente na proporção de uma para três partes) numa quantidade de 0.5 grama de amostra para três ml do referido ácido. A mistura é levada a uma chapa onde é aquecida a 95º Célsius durante o tempo de 1 hora. Após esse processo, o extrato é misturado com dez ml de água ultrapura e então submetido à análise nos aparelhos ICP-OES e ICP-MS (emissão óptica com plasma indutivamente acoplado e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado, respectivamente). O resultado é apresentado sob a forma de uma tabela com a análise de 53 elementos químicos e suas respectivas concentrações.

Tabela 1: Elementos químicos e seus respectivos limites superiores e inferiores de detecção.

<i>Elemento</i>	<i>Unidade</i>	<i>Limite inferior de detecção</i>	<i>Limite superior de detecção</i>
<i>Ag</i>	<i>PPM</i>	<i>0,01</i>	<i>10</i>
<i>Al</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>1</i>
<i>As</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>1%</i>
<i>Au</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>100</i>
<i>B</i>	<i>PPM</i>	<i>10</i>	<i>1%</i>
<i>Ba</i>	<i>PPM</i>	<i>5</i>	<i>1%</i>
<i>Be</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Bi</i>	<i>PPM</i>	<i>0,02</i>	<i>1%</i>
<i>Ca</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15</i>
<i>Cd</i>	<i>PPM</i>	<i>0,01</i>	<i>1%</i>
<i>Ce</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1%</i>
<i>Co</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Cr</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>1%</i>
<i>Cs</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1%</i>
<i>Cu</i>	<i>PPM</i>	<i>0,5</i>	<i>1%</i>
<i>Fe</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15%</i>
<i>Ga</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Ge</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Hf</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05%</i>
<i>Hg</i>	<i>PPM</i>	<i>0,01</i>	<i>1%</i>
<i>In</i>	<i>PPM</i>	<i>0,02</i>	<i>0,05%</i>
<i>K</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15</i>
<i>La</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Li</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>5%</i>
<i>Mg</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15</i>
<i>Mn</i>	<i>PPM</i>	<i>5</i>	<i>1%</i>
<i>Mo</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>1%</i>
<i>Na</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15</i>
<i>Nb</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1%</i>
<i>Ni</i>	<i>PPM</i>	<i>0,5</i>	<i>1%</i>
<i>P</i>	<i>%</i>	<i>50</i>	<i>1%</i>
<i>Pb</i>	<i>PPM</i>	<i>0,2</i>	<i>1%</i>
<i>Rb</i>	<i>PPM</i>	<i>0,2</i>	<i>1%</i>
<i>Re</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>S</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>5</i>
<i>Sb</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>1%</i>
<i>Sc</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Se</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>0,1%</i>
<i>Sn</i>	<i>PPM</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1%</i>
<i>Sr</i>	<i>PPM</i>	<i>0,5</i>	<i>1%</i>
<i>Ta</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>1%</i>
<i>Te</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1%</i>
<i>Th</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Ti</i>	<i>%</i>	<i>0,01</i>	<i>15</i>
<i>U</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>1%</i>
<i>V</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>1%</i>
<i>W</i>	<i>PPM</i>	<i>0,1</i>	<i>1%</i>
<i>Y</i>	<i>PPM</i>	<i>0,05</i>	<i>1%</i>
<i>Zn</i>	<i>PPM</i>	<i>1</i>	<i>1%</i>
<i>Zr</i>	<i>PPM</i>	<i>0,5</i>	<i>1%</i>

Os resultados obtidos pelo processo acima descrito foram cedidos gentilmente pela CPRM. De posse desses dados começa-se então a segunda etapa do trabalho, que consiste na análise estatística e interpretação geoquímica dos resultados (figura 2). O primeiro trabalho deste autor foi analisar esses dados geoquímicos do ponto de vista da estatística univariada, onde se obtém a análise em separados de cada variável (elemento químico). Em seguida, partiu-se para uma análise mais sofisticada por meio da estatística multivariada.

Todos os resultados obtidos nesse trabalho foram log-transformados com o intuito de normalizar a distribuição dos mesmos. Para o teste estatístico de normalidade Shapiro-Wilk foram utilizados os dados originais log-transformados. Este procedimento é importante uma vez que raramente existem dados com distribuição normal em variáveis geoquímicas. Ressaltando que os números que representam os quartis estão de acordo com a log-normalização e não com os dados brutos ou originais.

Com base nos dados acima descritos, foram elaborados para cada elemento químico, gráficos diversos, tais como: dispersogramas, histogramas, box-plot, matriz de correlação para além de mapas para melhor visualização dos dados obtidos.

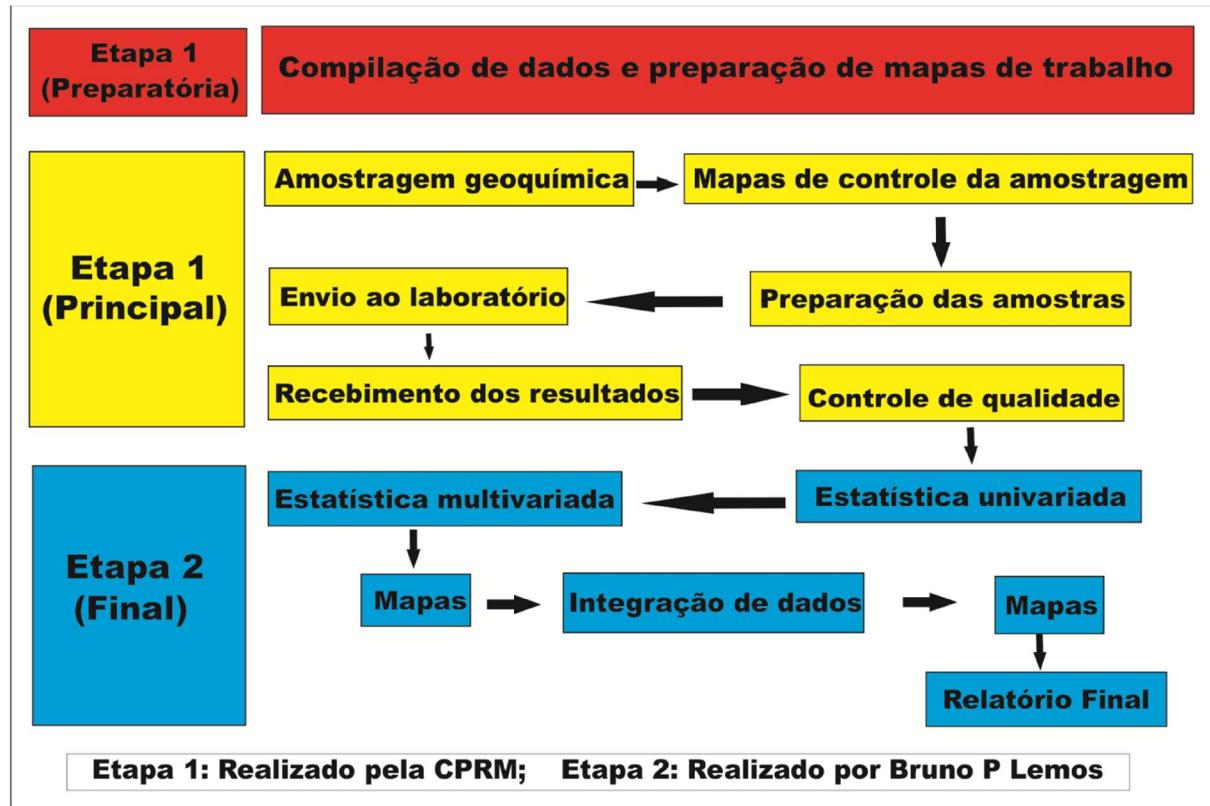


Figura 2: Fluxograma das atividades desenvolvidas.

Capítulo 2 – Geologia Regional

2.1 Geologia do Estado de Minas Gerais

O estado de Minas Gerais apresenta grande diversidade geológica, ocorrendo nessa área sequências de idade Arqueana a Fanerozóica, em contextos tectônicos e metamórficos dos mais variados. Tal variedade geológica tem por reflexo a história mineradora do Estado, cujo desenvolvimento está intimamente ligado à exploração de recursos minerais desde o período colonial e sua geodiversidade.

As principais unidades geológicas aflorantes no território mineiro são assim divididas: (i) Cráton do São Francisco; (ii) Faixa Brasília; (iii) Orógenos Araçuaí e Ribeira; (iv) Bacia do Paraná; (v) Coberturas Colúvio-Aluviais e Eluviais. Tais unidades, sob uma abordagem tectônica, são resultantes da deposição de sedimentos em bacias geradas em contexto de tafrogênese mundial, com a “quebra” do supercontinente Rodínia ocorrida durante o Toniano (1.8 Ga.) (Meert, J.G., Powell, C. McA., 2001.). Foram gerados, ainda, granitos e rochas básicas durante o desenvolvimento de bacias riftes, bem como rochas de crosta oceânica, geradas na evolução de bacias de margem passiva. Essas sequências foram, posteriormente, metamorfizadas durante a fase de compressão que culminou com a amalgamação do supercontinente Gondwana durante o Neoproterozóico (Brasiliano) e o estabelecimento do Cráton do São Francisco e seus limites principais: os Orógenos Araçuaí e Ribeira e a Faixa Brasília.

Nesse contexto, foram gerados vários estilos tectônicos de bacias, possibilitando a deposição de sedimentos e geração de granitos pré-, sin- e tarditectônicos. Durante o Mesozóico, com a “quebra” do Gondwana e o surgimento do oceano Atlântico, novas bacias foram geradas, sendo que os representantes mais importantes no estado referem-se às unidades que ocorrem nas bacias do Paraná e Sanfranciscana. Posteriormente, sucessivos eventos erosivos de aplanaamento e sedimentação de coberturas cenozóicas promoveram o entalhamento do relevo atual (Alkmim F.F. e Marshak S. 1998.).

2.2 Cráton São Francisco

Segundo Almeida F.F.M. 1977. o Cráton São Francisco tem área correspondente à da Província São Francisco e está situada no centro-leste do Brasil, entre os sistemas orogênicos Borborema ao norte, Tocantins a oeste, e Mantiqueira a leste. A leste dele estende-se a Província da Margem Continental Leste e, a noroeste o Cinturão Orogênico Rio Preto. A sua maior parte situa-se nos estados da Bahia e Minas Gerais e pequenas porções se prolongam para Sergipe, Pernambuco, Tocantins e Goiás.

O Cráton São Francisco é habitualmente dividido em três setores distintos: o setor Oriental, no leste da Bahia, é marcado pela atuação destacada de processos do Ciclo Transamazônico; o Central na

porção mediana desse estado, pela presença marcante de unidades Mesoproterozóicas; e o Ocidental por exibir, principalmente unidades Neoproterozóicas (figura 3).

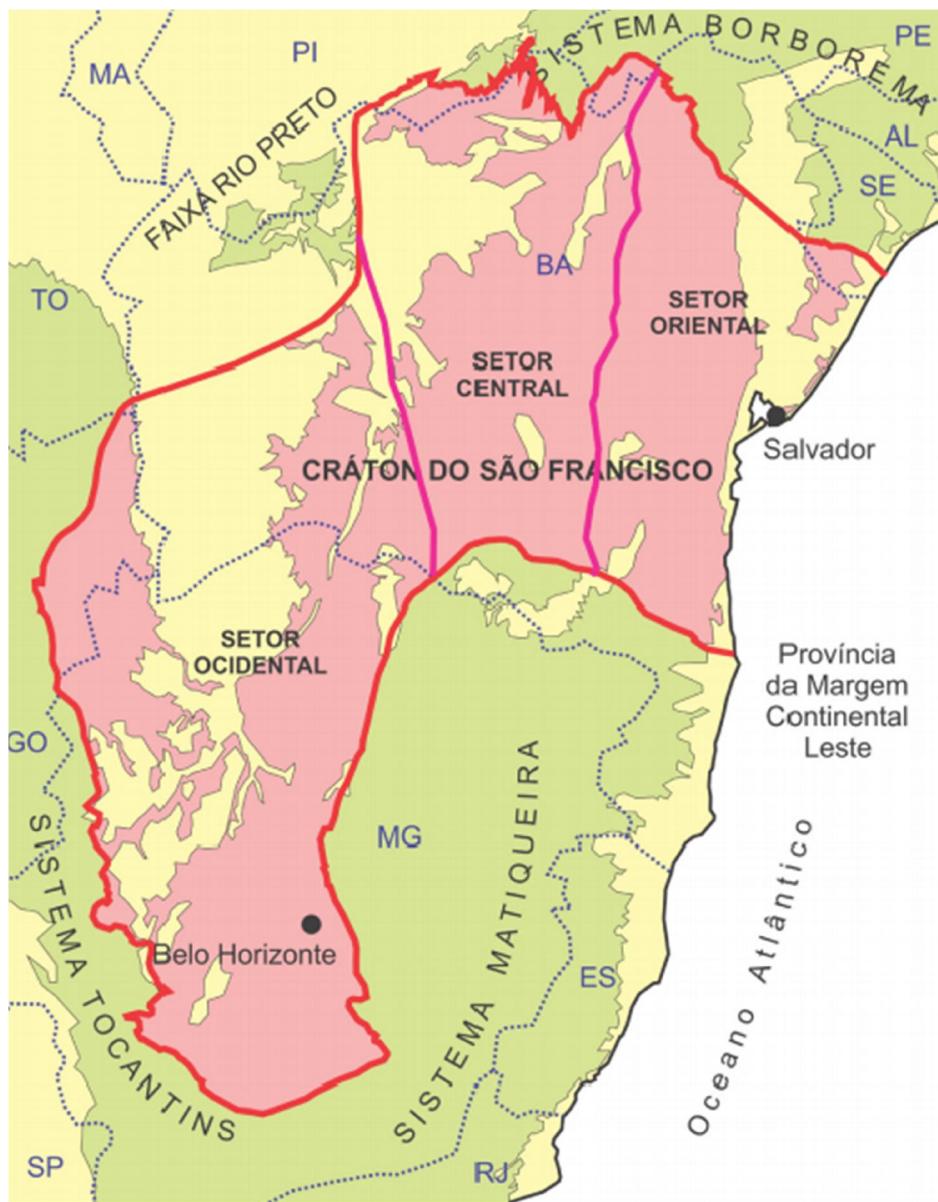


Figura 3: O Cráton São Francisco segundo três setores. Estão indicados a borda do cráton (vermelho), setores (rosa) e divisas interestaduais (azul pontilhado).

2.3 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero representa um polígono situando-se na região centro-sul do Estado de Minas Gerais, localizando-se entre Belo Horizonte, capital do Estado, e a cidade de Ouro Preto. Este abrange uma região montanhosa, de grande beleza natural e rica em depósitos minerais. O nome Quadrilátero Ferrífero resulta da abundância de formações ferríferas e jazidas de minério de ferro, contidas em uma área aproximadamente retangular em mapa, definida pela orientação de um conjunto de serras, as quais representam grandes estruturas dobradas, do tipo sinclinal e homoclinal.

Atualmente, as rochas da região são agrupadas, em função de características comuns, em três unidades geológicas principais: o complexo granito-gnáissico, o Supergrupo Rio das Velhas, ambos de idade arqueana (3,0 a 2,5 bilhões de anos) e o Supergrupo Minas, relacionado ao Paleoproterozóico (2,5 a 2,0 bilhões de anos). Desta forma, o Quadrilátero Ferrífero compreende várias unidades geológicas formadas em tempos diferentes no passado e que, progressivamente, foram se aproximando ou se superpondo geograficamente (Dorr, J.V.N. 1969).

A região central do Quadrilátero Ferrífero é constituída por rochas do Complexo Granito-Gnáissico e Supergrupo Rio das Velhas, geralmente mais erodidas, enquanto as principais serras são edificadas em rochas do Supergrupo Minas, mais resistentes à erosão, como os quartzitos e formações ferríferas.

As unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero são: o Embasamento Cristalino (Complexos Metamórficos), o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. Localmente são observadas bacias terciárias como Fonseca e Gandarela (Dorr, J.V.N. 1969).

As unidades geológicas do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas representam diferentes estágios de evolução do planeta Terra, que se inicia com a formação de uma bacia vulcanossedimentar, rica em rochas vulcânicas durante o Arqueano, e prossegue, durante o Paleoproterozóico, com a formação de uma bacia sedimentar com pouco ou nenhum vulcanismo. Ambas as unidades, depois de formadas, foram envolvidas em eventos orogenéticos, com dobramento e metamorfismo, que conduziram à formação de cadeias montanhosas. Finalmente, devido ao proeminente relevo formado, ocorreu uma erosão que lentamente tem aplainado o relevo anteriormente gerado. A partir daí, inicia-se novo ciclo, com formação de bacia, orogênese, formação de relevo e erosão, e assim sucessivamente.

2.4 Sequência Estratigráfica

2.4.1 Embasamento Cristalino

O embasamento cristalino é constituído por complexos gnáissicos metamórficos denominados de Complexo Bonfim e Complexo Moeda (a Oeste da Serra da Moeda), Complexo Congonhas (a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero), Complexo Santa Rita (a Sudoeste da Serra de Ouro Branco), Complexo Caeté (a Leste da cidade de Caeté), Complexo de Belo Horizonte situado ao Norte da Serra do Curral e a Leste da Serra do Caraça e Complexo de Santa Bárbara. O Complexo do Bação encontra-se no centro do Quadrilátero Ferrífero.

Estes complexos são constituídos por rochas gnáissicas, mostrou-se polideformados, de composição tonalítica a granítica, e subordinadamente por granitos, granodioritos, anfibolitos e intrusões maficas a ultramáficas (Herz 1970, Cordani et al. 1980). Estes complexos gnáissicos cujas bordas apresentam-se cisalhadas representam porções de um antigo embasamento que foi retrabalhado em eventos posteriores.

Análises geocronológicas em amostras de rochas de alguns destes complexos, revelaram idades de 2,9-3,2 Ga. São também encontradas duas gerações de plútôns para o Neoarqueano: 2,78-2,77 Ga. (plútôns cálcio alcalinos) e 2,73-2,62 Ga. (granitos anorogênicos) (Carneiro 1992, Carneiro et al. 1995).

2.4.2 Supergrupo Rio das Velhas

Dorr et al. 1957 denomina as rochas metavulcânicas e metassedimentares anteriormente denominadas de Série Minas por Série Rio das Velhas e, com base em uma discordância pouco expressiva, subdivide esta série em dois grupos (Nova Lima (base) e Maquiné (topo)). Trabalhos mais atuais substituem o termo Série por Supergrupo.

Dorr (1969) subdivide o grupo Maquiné em duas formações:

- 1) Formação Palmital (base): constituída por quartzitos sericíticos, filitos quartzosos e filitos. O contato desta formação com o Grupo Nova Lima apresenta-se ora discordante, ora concordante e ora gradacional.
- 2) Formação Casa Forte: originalmente definida por Gair (1962), é constituída por quartzitos sericíticos, cloríticos a xistosos e filitos. O contato desta formação com a Formação Palmital é gradacional e marcado por uma camada de conglomerado.

Ladeira (1980) interpretou os sedimentos do Grupo Nova Lima como representativo de uma sequência do tipo "*greenstone belt*" e subdivide o Grupo Nova Lima em três unidades, da base para o topo:

- 1) Unidade Metavulcânica composta por serpentinitos, esteatitos, talco-xistos, anfibolitos metamorfizados, metabasaltos e metatufo, além de komatiítos com estruturas spinifex;

- 2) Unidade Metassedimentar Química: representada por xistos carbonáticos, metacherts, formações ferríferas bandadas e filitos;
- 3) Unidade Metassedimentar Clástica: representada por quartzo-xisto, quartzo filitos, quartzitos impuros e metaconglomerados.

Segundo Alkmim & Marshak (1998), apesar das poucas análises geocronológicas disponíveis para o Supergrupo Rio das Velhas, as idades de 2,776 Ga. e 2,857 Ga. (obtidas pelo método U/Pb em cristais de zircão e monazita) permitem dizer que o Supergrupo Rio das Velhas, juntamente com as rochas plutônicas representam um típico terreno granito-greenstone do Arqueano.

2.4.3 Supergrupo Minas

Derby (1906) definiu a Série Minas e, desde esta data, esta sofreu muitas modificações, principalmente em função dos novos conhecimentos adquiridos. A Série Minas hoje é denominada de Supergrupo Minas e é subdividida da base para o topo nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Simmons & Maxwell (1961) definiram o Grupo Tamanduá como sendo representado por um conjunto de quartzitos, filitos, xistos quartzosos e argilosos, itabiritos filíticos e dolomíticos, conglomerados e quartzitos grosseiros.

Dorr et al. (1957) definiram o Grupo Caraça como sendo constituído pelos quartzito Caraça e xisto Batatal. Maxwell (1958) passou a chamar o xisto Batatal por Formação Batatal, enquanto Wallaca (1958) renomeou o Quartzito Caraça de Formação Moeda. Segundo Villaça (1981), a Formação Moeda é representada por conglomerados e quartzitos grosseiros, de origem fluvial, e quartzitos finos e filitos de origem transicional-marinha. Segundo Moraes (1985), os depósitos de filitos da Formação Moeda, itabiritos da Formação Cauê e os carbonatos da Formação Gandarela foram originados a partir de um evento transgressivo podendo estes sedimentos ser associados com fácies distais da Formação Moeda.

Segundo Dorr (1969) e Maxwell (1958), a Formação Batatal é constituída por filitos sericíticos, grafíticos. Localmente, esta formação pode apresentar clorita e sedimentos carbonáticos. Na parte superior desta unidade podem ser encontradas finas camadas de *chert* e hematita. Pires (1983) observou tanto na parte inferior como na superior da Formação Batatal a presença de material vulcânico.

Dorr (1969) subdividiu o Grupo Itabira em duas formações, da base para o topo:

1. Formação Cauê: representada predominantemente por uma formação ferrífera do tipo Lago Superior e, subordinadamente, por itabiritos dolomíticos e anfibolíticos com pequenas lentes de filitos e margas e alguns horizontes manganésicos.
2. Formação Gandarela: foi definida por Dorr (1958) como sendo constituída por camadas de rochas carbonáticas, principalmente dolomitos e, subordinadamente por itabiritos, filitos dolomíticos e filitos. O contato com a formação inferior, quando observável, é de natureza discordante com caráter erosivo.

Dorr et al. (1957) subdividiram o Grupo Piracicaba em cinco formações, da base para o topo:

1. Formação Cercadinho: representada por quartzito ferruginoso, filito ferruginoso, filito, quartzito e pequenas intercalações de dolomitos;
2. Formação Fecho do Funil: representada por filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros;
3. Formação Taboões: representada por quartzito fino e maciço;
4. Formação Barreiros: representado por filito e filito grafítoso;
5. Formação Sabará: representada por filito, clorita xisto, grauvaca e, localmente, tuhos e *cherts*.

Segundo Moraes (1985), a Formação Cercadinho representa um depósito do tipo deltaico originado a partir de uma sequência regressiva interrompida por uma fase transgressiva responsável pelos filitos dolomíticos da Formação Fecho do Funil e filitos grafítosos da Formação Barreiro.

2.4.4 Formação Itacolomi

Guimarães (1931) definiu a Série Itacolomi como uma unidade que repousa discordantemente sobre os sedimentos da Supergupo Minas. Atualmente, esta série é denominada de Grupo Itacolomi sendo representada por quartzitos, quartzitos conglomeráticos e lentes de conglomerado com seixos de itabirito, filito, quartzito e quartzo de veio, depositados em ambiente litorâneo ou deltaico (Dorr 1969). Segundo Glockner (1981), o Grupo Itacolomi representa um bloco tectonicamente alóctone de posição estratigráfica incerta. Segundo Alkmim (1987) e Alkmim et al. (1988), o Grupo Itacolomi foi depositado em uma margem de bacia intra ou epicontinental. Esses autores propõem ainda uma correlação entre os metassedimentos desse grupo com os da Formação Moeda e do Grupo Tamanduá, compondo uma mesma unidade faciológica (figura 4).

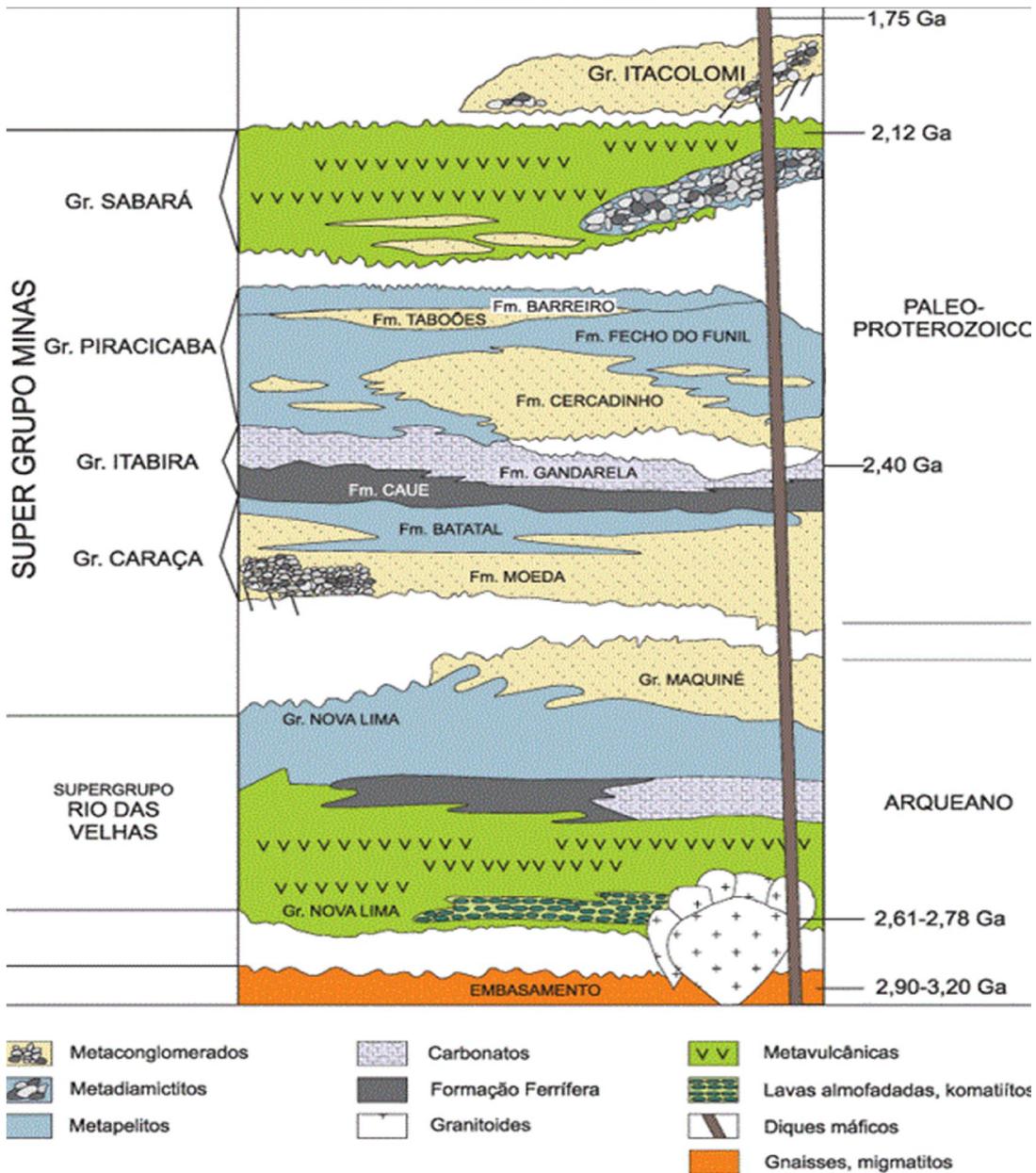


Figura 4:Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. (Marshak e Alkmim 1998)

2.5 Evolução dos Granitóides no Quadrilátero Ferrífero

Na evolução da porção meridional do Cráton do São Francisco vários eventos envolvendo complexos ortognáissicos TTG e migmatitos, associações *Greenstone Belt*, complexos máfico-ultramáficos acamadados, plutonismo tonalítico e magmatismo potássico estiveram associados entre 3.2Ga e 2.0Ga (Carneiro 1992, Noce 1995, Pinto 1995, Teixeira et al. 2000, Silva et al. 2002, Ávila et al. 2012, 2014; Romano et al. 2013) (tabela 2).

Segundo o modelo de Teixeira et al. (2000), em parte modificado, na passagem Paleo-Mesoarqueano, por volta de 3.2Ga., houve o surgimento de crosta continental (siálica) primitiva e a formação de *Greenstone Belts* associados (e.g. *Greenstone Belt* Piumhi, Fortaleza de Minas). Cerca de 150 Ma. após, por volta de 3 Ga., ocorreu a principal geração de crosta tonalito-trondjemito-granodiorítica - TTG (complexos ortognássicos TTG bandados). Este processo foi acompanhado de continuada acresção magmática, com assinaturas isotópicas de Pb compatíveis com derivação mantélica em estágio único. Nesse tempo também teria ocorrido metamorfismo em fácies granulito. Os autores concluem que durante o Mesoarqueano, entre cerca de 2.860 e 2.840Ma, houve retrabalhamento da crosta TTG e geração de migmatitos, como representados nos gnaisses Alberto Flores e Fernão Dias. A implantação do *Greenstone Belt* Rio das Velhas teria ocorrido mais ou menos nessa época (pouco antes ou pouco depois). Parte dessas rochas foi retrabalhada no Neoarqueano e, talvez, nos tempos das orogenias Transamazônica e Brasiliiana.

Tabela 2: as principais atividades tectonotermais e magmáticas de parte da porção sul do Cratom do São Francisco.

Evento	Intervalo de tempo (Ma)	Deformação e metamorfismo	Atividade ígnea	Unidade estratigráfica
Rio das Velhas	3.400 – 3.000	Gnaisses cinza-esverdeados e granulitos no Complexo Campo Belo/Deformação e metamorfismo, em facies anfibolito, do Gnaisse Moreiras (Complexo Santo Antônio do Pirapetinga)	Granitos intrusivos no Gnaisse Alberto Flores (Complexo Granito-gnássico Piracema-Passa Tempo)	Complexo Granito-gnássico Piracema-Passa Tempo/Gnaisses Alberto Flores, Belo Horizonte, Fernão Dias (?).
	3.000 – 2.940		Gnaisses, tonalitos e granitos (T_{DM}), no Complexo Bonfim	
	2.920 – 2.880		Plutonismo granítico (T_{DM} , Rb/Sr) no Complexo Campo Belo/Componente herdado em zircão em rocha vulcânica do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas	
Rio das Velhas	2.800 – 2.698	Deformação e metamorfismo, em facies anfibolito, dos gnaisses Alberto Flores e Belo Horizonte Deformação dos grupos Quebra Osso e Nova Lima, facies xisto verde a anfibolito* Deformação do Grupo Maquiné	Tonalito Samambaia($\gamma 1$)/Ortognaisse Souza Noschese ($\gamma 2$?) / Granito Barra do Gentio, Granodiorito Santana do Paraopeba*, Granito Brumadinho, Granito Alto Jacarandá, Granodiorito Ibirité ($\gamma 3$)	Grupo Quebra Osso/ Grupo Nova Lima* Formação Casa Forte do Grupo Maquiné * Gnaisse Cláudio
Rio das Velhas II	2.658 – 2.612	Distúrbio isotópico (Pb/Pb) em gnaisses e granitoides no Complexo Campo Belo/ Metamorfismo de facies granulítico do Ortognaisse Desterro	Diques de Gabronorito NE_SW/ Migmatização do Ortognaisse Desterro/Provável formação do Gnaisse Itapecerica e dos granitóides róseos relacionados	
Rio das Velhas III	2.612 – 2.555		Granito Salto do Paraopeba ($\gamma 4$)/ Granitos Bituri e Mirandas*	
Transamazônico I	2.250 – 2.059	Deformação do Supergrupo Minas e do Grupo Barbacena	Granodiorito Fé/Trondjemito Congonhas/Suíte Rezende Costa/Suite Alto Maranhão/Granito Ritápolis	Supergrupo Minas* Grupo Barbacena
Transamazônico II	2.059 - 1900	Deformação do Grupo Itacolomi	Complexo Ressaquinha/Granito Cupim	Grupo Itacolomi

	1.800 – 1.600		Sistema Lençóis 1: Diques de Gabronorito	
	1.600 – 1.000		Sistema Lençóis 2: Diques de Gabro	
Brasiliano	1.000 - 850	Deformação das formações Barroso e Prados (Grupo São João Del Rei)		

Tabela compilada e modificada de Teixeira et al. (1996) e Campos et al. (2003). Carneiro (1992); Chemale Jr. et al. (1993); Pinesi et al. (1997); Campos et al. (2003); Teixeira et al. (1996); Noce et al. (1998); Endo (1997). *Unidades sem datação geocronológica com posicionamento tectonoestratigráfico deduzido tentativamente, por relações de campo, características estruturais e dados petrológicos.

Lana et al. (2013) também apresentaram uma proposta de evolução para o embasamento cratônico Paleo-Mesoarqueano. Tal evolução se daria em três episódios principais, assim designados:

- 1) **Santa Bárbara** (3.220Ma – 3.200Ma), registrado pela presença de rochas paleoarqueanas na Província São Francisco meridional; alguns núcleos de zircões detriticos são ainda mais antigos, muitos deles presentes em rochas siliciclásticas dos supergrupos Rio das Velhas (Meso-Neoarqueano) e Minas (Neoarqueano – Paleoproterozóico).
- 2) **Rio das Velhas I** (2.930Ma – 2.900Ma), reconhecido nos domos ou complexos Bação, Belo Horizonte, Bonfim e em fragmentos no domínio do Cinturão Mineiro (Paleoproterozóico >2.4Ga a 2.03Ga); o metamorfismo desse evento se sobrepõe ao evento magmático Rio das Velhas II.
- 3) **Rio das Velhas II** (2.800Ma – 2.760Ma) que está presente nos domos ou complexos Bação, Bonfim, Belo Horizonte e Caeté e registrado em zircões herdados do evento anterior.

Lana et al. (2013) sugerem que toda a crosta TTG foi afetada por magmatismo e metamorfismo em fácies anfibolito entre 2.800Ma e 2.770Ma. Esses autores também destacam um plutonismo TTG que teria ocorrido entre 2.780Ma a 2.770Ma, representado nos corpos Trondjemita Caeté e Tonalito Samambaia (Complexo Bonfim) e capaz de ser reconhecido em gnaisses bandados mais antigos por estarem praticamente indeformados. O episódio magmático tonalítico – granodiorítico ocorreu em crosta TTG com associações *greenstone* relacionadas.

Romano et al. (2013), ampliando os estudos anteriores voltados principalmente para os gnaisses e granitóides pré-2.760Ma, reconheceram três pulsos magmático-tectônicos para os granitóides potássicos pós-2.760Ma, divididos em: 1. entre 2.760Ma e 2.750Ma; 2. entre 2.730Ma e 2.700Ma; e 3. há cerca de 2.615Ma. As unidades do pulso ‘1’ são granodioritos cinza foliados a fracamente foliados (Florestal, Pequi e Bação); as do pulso ‘2’ são biotita granodioritos cinza de grãos médios e leucogranitos brancos a rosados de grãos médios a grossos, não-foliados a fracamente foliados, que intrudiram os plutonitos anteriores (Pequi, Bação, Mamona, Souza Noschese, Bonfim, Santa Luzia, Piracema, General Carneiro, Ibirité); e as do pulso ‘3’ são granodioritos cinza foliados (Mamona). Este pulso final, cerca de 100Ma. mais novo, está representado por pequenos corpos e em pequena quantidade (menos de 1% dos corpos conhecidos), e que

ainda carecem de estudos mais consistentes. Todos são considerados granitóides de crosta intermediária intrusivos em crosta superior Arqueana TTG.

Os novos dados geocronológicos obtidos por Romano et al. (2013) e Lana et al. (2013) registram um importante episódio de magmatismo potássico entre 2.755Ma e 2.700Ma (com 99% dos granitóides potássicos datados até o momento) que afetou os gnaisses TTG e granitóides TTG mais antigos. Essa fase potássica mais nova cristalizou ao mesmo tempo em que ocorria o último episódio de metamorfismo de alto grau na porção meridional do domo Bonfim (*cf.* Campos et al. 2003) e registra o final de um grande evento de fusão parcial crustal, com um repique magmático de muito pequena intensidade (<1% do magmatismo conhecido) em 2.615Ma.

Após esse intenso magmatismo potássico, a crosta se estabilizou propiciando o início da sedimentação na Bacia Minas em ambiente de margem passiva/plataforma. Para Romano et al. (2013), não há evidências de magmatismo mais jovem que esse ou aquecimento metamórfico que teriam produzido sobrecrecimentos em zircões no Proterozóico, significando que a ampla deformação crustal e a ascensão de rochas magmáticas a 2.090Ma não estariam associadas a processos de fusão crustal e remobilização da crosta inferior. Essa afirmação parece questionável em virtude de inúmeros dados que apontam para intenso magmatismo de arco a pós-colisional a partir de 2,4Ga até 2,03Ga no Cinturão Mineiro (Pinto 1995; Teixeira et al. 2000; Ávila et al. 2014).

Esses granitoídes pós-2.760Ma são bem menos deformados que os gnaisses TTG mais velhos. Quando muito, apresentam discreta foliação, nem sempre penetrativa, ou têm bandamento irregular e pouco persistente, em muitos casos se parecendo com restos de encaixantes gnáissicas parcialmente assimiladas.

Durante a relativa quietude de magmatismo entre 2,70Ga e 2,60Ga, ou até antes, houve a geração de estruturas transcorrentes de dimensões regionais, hoje materializadas nos lineamentos Jeceaba – Bom Sucesso, Itatiaiuçu, São Vicente e outros, de direções nordeste e noroeste, com deslocamentos significativos das unidades arqueanas. Algumas delas mostram evidências de terem sido reativadas no Neoaqueano e mesmo após.

O modelo evolutivo Neoarqueano proposto por Romano et al. (2013) para essa porção meridional do Cráton do São Francisco prevê inicialmente uma crosta indiferenciada com gnaisses TTG e associações *greenstone* com idades entre 3.2Ga. e 2.9Ga., na qual se deu a deposição das unidades líticas do Supergrupo Rio das Velhas e a intrusão de suítes TTG entre 2.780Ma e 2.770Ma. Nessa crosta primitiva estariam presentes ‘plumas basálticas’ resultantes da fusão mantélica. Em estágio seguinte, entre 2.760Ma e 2.700Ma, ocorreram às deformações do Supergrupo Rio das Velhas e do embasamento mais antigo, originando a diferenciação e estratificação da crosta em um domínio inferior refratário e uma crosta superior enriquecida em elementos geradores de calor com abundante presença de granitóides potássicos, continuando termalmente estável daí em diante. O passo seguinte foi à erosão dessa crosta superior e a sedimentação siliciclástica das unidades do Supergrupo Minas.

Segundo Romano et al. (2013), citando diversos autores, essa enorme quantidade de rochas granítóides potássicas implica grande mobilização de fundidos magmáticos na crosta inferior que pode ter ocorrido pela ação dos elementos “quentes” como K-Th-U. Isso levaria a concentração desses elementos na crosta superior junto aos magmas graníticos, deixando a crosta inferior termalmente estabilizada. O processo seria de desidratação e fusão da crosta inferior com a geração de granulitos e a ascensão de volumosa quantidade de granítóides potássicos para os níveis mais elevados da crosta, facilitada pela natureza hidratada desses magmas graníticos.

Esse modelo não implica tectônica de placas na geração de granítóides potássicos. A crosta teria sofrido estratificação litosférica com a desidratação por ampla fusão parcial da crosta inferior e acumulação de grandes volumes de rochas graníticas potássicas na crosta superior, seguida por rápida exumação e geração dos sedimentos da bacia Minas. A geração dos granítóides estaria, provavelmente, associada com basaltos intraplaca relacionados à fusão parcial mantélica por descompressão (Romano et al. 2013), sugerindo a presença de uma raiz mantélica sob o Cráton do São Francisco anterior à orogênese Minas/Cinturão Mineiro de idade paleoproterozóica, transamazônica. De fato, as assinaturas geofísicas (magnetometria e gravimetria) mostram uma grande anomalia sob o Quadrilátero Ferrífero e sob os terrenos Arqueanos a sudoeste.

2.6 Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero

As análises radiométricas disponíveis para o Quadrilátero Ferrífero concentram-se, principalmente, em rochas dos complexos gnáissicos e subordinadamente nas supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas e Minas.

Segundo Endo (1988), as análises geocronológicas disponíveis para o Quadrilátero Ferrífero, possibilitam indicar três idades modais para a evolução tectono-metamórfica da área:

- 1) Cerca de 2.7 Ga.: orogenia na qual as sequências Pré-Minas foram deformadas e metamorfizadas. As condições metamórficas desta orogenia não podem ser diferenciadas das outras posteriores, a não ser por efeitos de retrometamorfismo em condições de fácie xisto-verde. Já as rochas mais antigas do complexo cristalino foram afetadas por um metamorfismo regional de fácie anfibolito médio a superior;
- 2) Cerca de 2.0 Ga.: principal fase de deformação, recristalização sintectônica e metamorfismo regional Ciclo Transamazônico. No Quadrilátero Ferrífero, esta fase tectono-metamórfica recebe a denominação de Orogenia Minas que imprimiu um metamorfismo regional progressivo em condições de P-T crescentes, de oeste para leste, de fácie xisto-verde inferior à fácie anfibolito superior;

- 3) Entre 0.5-0.6 Ga.: todas as rochas do quadrilátero Ferrífero sofreram um recondicionamento de natureza essencialmente térmica, ocasionando um metamorfismo relacionado ao Evento Brasiliano. Este evento tectono-metamórfico causou a formação de pegmatitos e soerguimentos tectônicos.

Com base em estudos estruturais, geocronológicos e na compilação de trabalhos Alkimim & Marshak (1998), surgiram a seguinte evolução tectônica para o Quadrilátero Ferrífero:

- 1) Fragmentos crustais com idade de até 3.2 Ga. serviram de embasamento para o “*Greenstone Belt*” Rio das Velhas (2.8 a 2.7 Ga.). Um plutonismo intermediário nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas marcou um evento tectônico de 2.7 a 2.6 Ga. e definiu a arquitetura destes terrenos com domos de granitos circundados por quilhas de rochas supracrustais;
- 2) Entre 2.6 e 2.4 Ga. o Quadrilátero Ferrífero tornou-se uma plataforma continental de uma bacia de margem passiva, possibilitando a deposição de sedimentos do Supergrupo Minas. Esta bacia foi originada a partir de um evento extensional, caracterizado pela distribuição faciológica e ambiente deposicional do Grupo Caraça.
- 3) Um cinturão de falhas e dobras com vergência para noroeste e responsável por zonas de cisalhamento de escala regional, originou-se a mais ou menos 2.1Ga. na região do Quadrilátero Ferrífero. Este evento teve inicio logo após a deposição da Formação Sabará e não gerou fortes foliações, trata-se da Orogênese Transamazônica.
- 4) O colapso orogênico transamazônico ocorreu por volta de 2.0Ga., foi responsável pela inversão da arquitetura em domos e quilhas e é caracterizado pela deposição das rochas do Grupo Itacolomi.
- 5) O “rifte” do Espinhaço foi aberto em 1.75 Ga., e foi responsável pela intrusão de diques de diabásio no Quadrilátero Ferrífero e representa a continuação do colapso transamazônico ou trata-se de um evento separado.
- 6) O segundo evento compressional do Quadrilátero Ferrífero data de 0.7-0.45 Ga. e criou um cinturão de dobras e falhas com vergência para oeste, que reativou e deformou estruturas anteriores. Este evento trata-se da Orogênese Brasiliana, que gerou o supercontinente Gondwana e retrabalhou de forma incisiva a borda leste do Quadrilátero Ferrífero.

2.6 Geologia Estrutural do Quadrilátero Ferrífero

As principais estruturas do Quadrilátero Ferrífero estão representadas por: Arqueamento Rio das Velhas, o qual compreende o distrito aurífero de Nova Lima; Serra do Curral, Sistema de Falhas do Fundão/Engenho e pelos Sinclinais Moeda, Dom Bosco, Gandarela, Vargem do Lima, Santa Rita e Ouro Fino e o sinclinório de Itabira. Estas estruturas constituem o arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Endo, 1988).

Alkimim & Marshak(1998) com base em dados geocronológicos e relações de campo propuseram quatro eventos responsáveis pela formação dos três conjuntos de estruturas identificadas por eles no Quadrilátero Ferrífero. Segundo os autores, o primeiro evento apresenta estruturas com direção NE e produziu zonas de cisalhamento e dobras em escala regional estando associado um metamorfismo progressivo regional. São reconhecidas como estruturas deste evento, dobras parasíticas alojadas em limbos de dobras regionais, xistosidade de direção SW-NE com mergulho para SE e lineação mineral com cimento para SE. Este evento foi observado na Serra do Curral, porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero e está relacionada a uma compressão responsável pelo desenvolvimento de um cinturão de dobras e falhas com vergência para noroeste. Este cinturão de dobras e falhas seria o resultado da Orogênese Transamazônica, responsável pela colagem continental.

O segundo evento é caracterizado por uma extensão regional que resultou na arquitetura em domos e quilhas, soergueu o embasamento cristalino ao mesmo nível crustal que os metassedimentos dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas (inversão tectônica). Este evento foi responsável pela formação de dobras da xistosidade com cimento contrário aos domos, clivagem espaçada, dobras e falhas reversas com direção leste-oeste, mudanças na direção de dobras F1, como o Sinclinal Ouro Fino, foliação milonítica das margens dos complexos metamórficos gerando o Anticlinal de Mariana e o “uplift” Rio das Velhas. Foi primeiramente observado na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, no contato do Complexo Bonfim com o limbo ocidental da Serra da Moeda. É entendido como um colapso orogenético do evento Transamazônico e seria o responsável pela deposição dos sedimentos do Grupo Itacolomi.

O terceiro evento de natureza extensional, seria o responsável pela abertura da Bacia do Espinhaço e pela intrusão dos diques de diabásio que cortam as rochas do Quadrilátero Ferrífero.

O quarto evento apresenta natureza compressional, estruturas com direção norte-sul, megadobras vergentes para oeste, mesodobras, foliações e lineações. É bem caracterizado na borda leste do Quadrilátero Ferrífero e apresenta direções das estruturas semelhantes ao sistema de cavalgamento Espinhaço. A este evento está associado um metamorfismo progressivo regional na fácies xisto-verde médio e um cinturão de dobras e falhas vergentes para oeste. Este evento é denominado de orogênese Brasiliiana ou Pan-Africana tendo sido responsável pela formação do Supercontinente Gondwana, implicando em um evento de colagem continental.

2.7 Aspectos Fisiográficos

O Quadrilátero Ferrífero corresponde a um bloco de estruturas geológicas do Pré-Cambriano, elevadas em seus quatro lados por erosão diferencial. Assim, quartzitos e itabiritos formam cristas nas altitudes de 1300 a 1600 metros; tais cristas correspondem ao alinhamento da serra do Curral, ao norte, da

serra do Ouro Branco, ao sul, da serra da Moeda, a oeste e, a leste, o conjunto formado pela serra do Caraça e o início da serra do Espinhaço.

A influência das variações de altitude favorece o surgimento de microclimas com temperatura e umidade bem diferentes da temperatura média anual da região, que se mantém entorno de 20°C com precipitação que varia entre 1300 mm e 2100 mm por ano. O clima temperado-quente predominante no Quadrilátero Ferrífero tem duas estações bem definidas: inverno seco e verão chuvoso.

Estão presentes na região as cabeceiras de duas grandes bacias hidrográficas denominadas bacia do rio São Francisco e bacia do rio Doce que contribuem para o abastecimento de água de parte da porção sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte. As estruturas das rochas influenciam o curso dos rios, formando trechos encachoeirados e vales profundos. Isto ocorre principalmente no rio das Velhas, onde as variações na altitude do relevo são marcantes.

A grande diversidade de feições hidrológicas, pedológicas, topográficas, geológicas e geomorfológicas, cria condições suficientes à configuração de grande riqueza de flora na região, que tem sua cobertura vegetal partilhada entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Ressalta-se que o bioma Mata Atlântica, apesar de outrora bem distribuído, encontra-se atualmente bastante degradado, representado principalmente por fragmentos de vegetação. O bioma do cerrado é composto por um mosaico de fitofisionomias, onde se observam áreas florestais como matas ciliares, matas de galerias, além de áreas abertas como campo limpo, campo sujo, campo cerrado e ainda áreas intermediárias como cerradão e o cerrado stricto sensu. Uma menção especial deve ser feita ao campo rupestre. Esta fisionomia característica do cerrado ocorre geralmente em altitudes superiores a 900 metros, em relevo movimentado, sobre afloramentos rochosos, normalmente sobre quartzito e canga, e em pequena extensão sobre itabirito, filito e granítóide, com solo arenoso, fino ou cascalhento, pobre em nutrientes e matéria orgânica e com baixa capacidade de retenção de água.

2.8 Hidrografia

A região de estudo é composta por seis bacias hidrográficas principais, a saber: (1) Bacia do Rio Doce; (2) Bacia do Rio Piracicaba; (3) Bacia do Rio das Velhas; (4) Bacia do Rio Paraopeba; (5) Bacia do Rio Pará; e (6) Bacia do Rio Paraná.

O rio das Velhas forma uma malha com disposição de sul para norte-noroeste, constituindo o principal captador na região do Quadrilátero Ferrífero. Tem suas nascentes na conjunção das serras de Ouro Branco e Caraça, quase na porção central da área, as quais, juntamente com a serra de Gandarela, são seus principais divisores em relação à bacia do rio Doce, localizada a leste. A serra da Moeda, por sua vez, é seu principal marco divisor a oeste, separando-a da bacia do rio Paraopeba. A bacia do rio das Velhas, em

relação às demais bacias, apresenta nitidamente maior controle estrutural da sua malha, com vales relativamente mais encaixados e estruturalmente mais controlados.

A Bacia do Rio Doce, com dois dos seus principais formadores, os rios Piranga e Carmo, configura uma malha com disposição sudoeste-nordeste, com fluxo de suas drenagens em sentido nordeste. Como as malhas dos rios Paraopeba e Paraná, exibe um padrão mais dissecado, com vales mais abertos e drenagens menos encaixadas e profundas, em relação à bacia do rio das Velhas. O rio Paraopeba tem sua malha de captação alinhada de SSE para NNW, grosso modo, em paralelo a bacia do rio das Velhas, acompanhando a serra da Moeda, de onde partem vários afluentes pela margem direita. Os rios Doce e Paraopeba são os mais extensos, formando as bacias mais expressivas na área do Projeto.

A Bacia do Rio Pará, afluente da margem direita do Rio São Francisco, apresenta drenagens correndo para NW e, na área do projeto, apresenta como principais contribuintes os rios São João e do Peixe.

A Bacia do Rio Paraná é a menos abrangente, ocupando um pequeno trecho da porção SW da área levantada, com fluxo de suas drenagens para sul-sudoeste.

2.9 Aspectos Socioeconômicos

Do ponto de vista socioeconômico, a população atual da área do Quadrilátero Ferrífero é de cerca de 3.150.000 habitantes sendo que, desde a descoberta do ouro no final do século XVII até os dias de hoje, a região do Quadrilátero Ferrífero abriga a maior concentração urbana do estado de Minas Gerais. Em sua parte norte está localizada a capital do Estado, Belo Horizonte com cerca de 2,4 milhões de habitantes. Os municípios da região têm uma população que corresponde a cerca de 20% da população do estado e a sua produção abrange 26,8% do PIB de Minas Gerais, sendo a mineração a base da economia de vários desses municípios, uma vez que o Quadrilátero Ferrífero é a província mineral mais importante do sudeste do Brasil.

De uma maneira geral, os municípios que compõem o Quadrilátero Ferrífero têm uma economia dinâmica e apresentaram, nos últimos anos, crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) acima da média do Estado e nacional. A economia da região é fortemente influenciada por Belo Horizonte, que detém cerca de 73% do PIB, cuja composição tem forte participação do setor de serviços. No que se refere ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), a maioria dos municípios está enquadrada dentro da faixa de médio desenvolvimento humano e apenas alguns municípios como Nova Lima e Belo Horizonte podem ser considerados de alto desenvolvimento humano.

Capítulo 3

3.1 Resultados Obtidos

Um dos objetivos do tratamento dos dados geoquímicos é entender a distribuição dos diferentes elementos químicos e sua dispersão no ambiente de interesse, localizando concentrações que não se enquadram no habitual.

No estudo dos resultados obtidos pelas análises químicas dos sedimentos de corrente foram usadas técnicas comuns de estatística univariada, como sumário estatístico, gráficos box-plot, mapas geoquímicos baseados nos percentis dos gráficos box-plot, análise de correlação não paramétrica (correlação de Spearman estatística bivariada) além de análise mais complexa como a análise fatorial (estatística multivariada).

3.1.1 Box-plot

Uma área de interesse pode conter uma grande variedade de tipos litológicos, possuindo assim concentrações químicas com padrões diferentes entre si, sendo necessário estimar para cada área um *background* geoquímico. O *background* representa um conjunto de valores, teores ou porcentagens relacionadas a um padrão regional normal para efeitos de comparação. O *background* representa um conjunto de valores que podem ser considerados como comuns, dada uma determinada geologia. Os valores podem ser apresentados sob a forma de % (porcentagem), ppm (parte por milhão) ou ppb (parte por bilhão). Quando os valores encontrados são diferentes daqueles pertencentes a faixa de valores (normais) do *background*, estes são considerados como anômalos ou relacionados a uma anomalia.

O box-plot é um gráfico construído com base no resumo dos cinco parâmetros estatísticos, a saber:

- Valor mínimo
- Primeiro quartil (Q1)
- Segundo quartil (Q2) (mediana)
- Terceiro quartil (Q3)
- Valor máximo

O gráfico é formado por uma caixa construída paralelamente ao eixo da escala dos dados (pode ser horizontal ou vertical). Essa caixa vai desde o primeiro quartil até o terceiro quartil, sendo esta dividida por uma linha na posição da mediana (figura 5).

Dada à escala de mensuração dos dados, os quartis são valores nessa escala que dividem o conjunto de dados em quatro partes, todas elas com o mesmo número de observações. Isso significa que

25% das observações são menores que o primeiro quartil, 50% são menores que o segundo quartil e 75% são menores que o terceiro quartil.

A regra que adotamos para identificação dos valores atípicos se baseia na amplitude interquartil AIQ, definida como a distância entre o primeiro e o terceiro quartis: $AIQ = Q3 - Q1$.

Note que AIQ é o comprimento da caixa. Quaisquer valores abaixo de $Q1 - 1,5 \times AIQ$ ou acima de $Q3 + 1,5 \times AIQ$ serão considerados valores atípicos e terão tratamento especial no box-plot. Assim, serão valores atípicos os valores X tais que $X < Q1 - 1,5 \times AIQ$ ou $X > Q3 + 1,5 \times AIQ$.

O valor que representa o limite considerado como *whisker* inferior é aquele que corresponde a $Q1 - 1,5 \times AIQ$. Já o valor que representa o limite considerado como *whisker* superior é aquele que corresponde a $Q3 + 1,5 \times AIQ$.

Considera-se anomalia (*outlier*) os valores discrepantes em relação ao box-plot, isto é, que ficam abaixo do valor do *whisker* inferior e/ou acima do valor do *whisker* superior, classificando assim, respectivamente, a anomalia como negativa ou positiva (Figura 5).

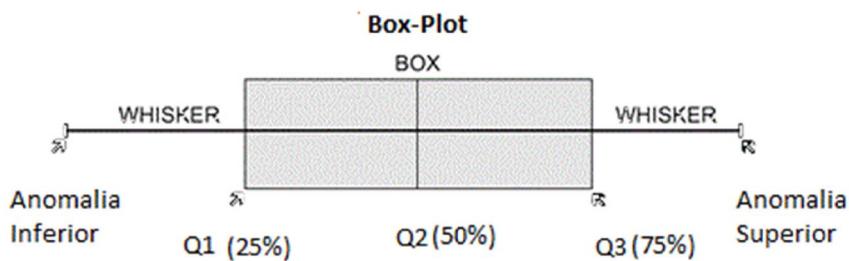


Figura 5: Representação do gráfico Box-Plot. Fonte: http://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoirsched/ch12/img5214889_02-eng.gif

3.1.2 Representação e simbologia nos mapas

Com a grande variação de unidades geológicas e geoquímicas nas áreas de estudo foram elaborados mapas de elementos químicos para sedimentos de corrente para uma melhor integração do conhecimento e correlação dos mesmos. Para essa integração levou-se em consideração as características geoquímicas da amostragem, tais quais:

- 1) Tipo de amostragem nas drenagens, o qual pode gerar informações não contínuas, ou seja, representar litologias de pouca ou nenhuma representatividade da área;
- 2) Distribuição dos pontos de amostragem, que é dependente do padrão da rede de drenagem da área a ser estudada.

Por fim então, foi elaborado um mapa com os pontos de concentração para cada elemento químico em cima de mapas geológicos da CPRM.

Importante destacar que todos os dados de concentração dos elementos químicos foram log-transformados, para que sua interpretação não fosse influenciada por valores discrepantes ou muito altos.

Nos mapas de geoquímica de sedimentos ativos de corrente, foi utilizada uma representação para os quartis apresentados nos gráficos box-plot para cada elemento, segundo normatização utilizada pela CPRM (Figura 6). A confecção da legenda foi elaborada da seguinte forma:

1. Círculo maior representa os *outliers* inferiores, ou seja, os valores abaixo do *whisker* inferior (valor $< Q1 - 1,5 \cdot AIQ$);
2. Círculo médio representa os valores entre o *whisker* inferior até o primeiro quartil (25% ou Q1) ($Q1 - 1,5 \cdot AIQ < \text{valor} < Q1$);
3. Círculo menor representa os valores entre o primeiro quartil e o terceiro quartil. Esses valores representam a amplitude interquartil (AIQ) e também o *background* da população ($Q3 - Q1$);
4. A cruz representa os valores entre o terceiro quartil (75% ou Q3) e o *whisker* superior ($Q3 < \text{valor} < Q3 + 1,5 \cdot AIQ$).

A faixa de valores entre o terceiro quartil e o *whisker* superior representa as amostras que possuem certa elevação da concentração em relação à faixa de *background*, mas ainda não podem ser consideradas com anomalias (*outliers*).

A faixa de anomalia positiva (*outliers* superior) foi dividida em três conjuntos de amplitudes, as quais correspondem:

- A. Quadrado amarelo representa as anomalias de terceira ordem, valores que representam o intervalo entre $Q3 + 1,5 \cdot AIQ$ e $Q3 + 3 \cdot AIQ$;
- B. Quadrado laranja representa as anomalias de segunda ordem, valores que representam o intervalo entre $Q3 + 3 \cdot AIQ$ e $Q3 + 4,5 \cdot AIQ$;
- C. Quadrado vermelho representa as anomalias de primeira ordem, valores que ultrapassam o valor de $Q3 + 4,5 \cdot AIQ$.

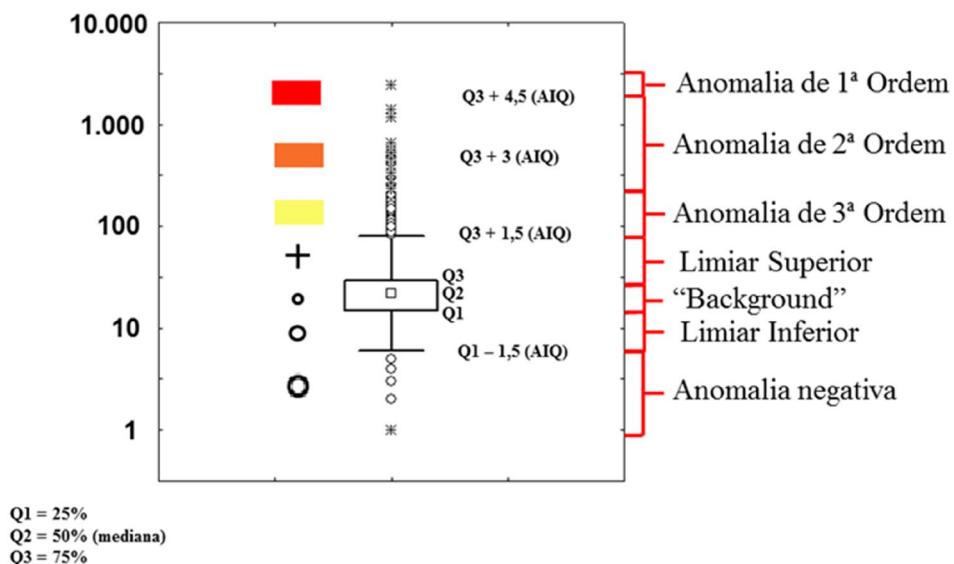


Figura 6: – Representação da simbologia das faixas de concentração em mapas de pontos baseados em gráficos Box-Plot de acordo com a CPRM.

3.1.3 Sumário Estatístico

Para utilização com os métodos de estatística univariada foram selecionados 53 elementos analisados para as amostras de sedimentos de corrente (tabela 3).

Tabela 3: Sumário estatístico dos 53 elementos analisados em amostras de sedimentos de corrente.

	N (validos)	N (validos) %	Média	Min.	Máx.	Q1 (25%)	Q2 (Mediana)	Q3 (75%)	Q3 + 1,5*AIQ	Q3 + 3,0*AIQ	Q3 + 4,5*AIQ	UCC
Ag (ppm)	358	100	28.23	2	227	17	24	32	54.5	77	99.5	0.055
Al (%)	358	100	2.35	0.16	8.13	1.33	2.16	3.00	5.51	8.02	10.53	7.7
As (ppm)	343	95.81	5.33	0.01	88.2	0.9	1.7	5	11.15	17.3	23.45	2
Au (ppb)	324	90.50	5.12	0.1	538.4	0.325	0.9	1.7	3.76	5.83	7.89	3.1
B (ppm)	101	28.21	12.82	10	20	10	10	20	35	50	65	17
Ba (ppm)	358	100	81.54	8.9	267.2	52.58	73.5	99.75	170.51	241.28	312.04	668
Be (ppm)	355	99.16	0.73	0.05	3.5	0.4	0.6	0.9	1.65	2.4	3.15	3.1
Bi (ppm)	356	99.44	0.35	0.01	4.11	0.1	0.21	0.43	0.93	1.42	1.92	0.123
Ca (%)	354	98.88	0.06	0.01	0.52	0.03	0.05	0.07	0.13	0.19	0.25	2.9
Cd (ppm)	338	94.41	0.03	0.01	0.2	0.02	0.03	0.04	0.07	0.1	0.13	0.102
Ce (ppm)	358	100	84.03	7.9	505.3	46.5	65	100.5	181.5	262.5	343.5	65.7
Co (ppm)	358	100	11.90	0.7	347.6	4.1	7.45	12.55	25.23	37.9	50.58	11.6
Cr (ppm)	358	100	54.31	3	992.7	14.8	27.5	52.78	109.74	166.7	223.66	35
Cs (ppm)	358	100	1.73	0.09	8.3	0.95	1.4	2.24	4.17	6.10	8.03	5.8
Cu (ppm)	358	100	14.35	1.44	139.52	6.44	10.52	17.95	35.21	52.47	69.73	14.3
Fe (%)	358	100	5.55	0.54	36.65	2.36	4.08	6.04	11.56	17.07	22.59	3.1
Ga (ppm)	358	100	8.43	0.7	30.2	5.1	7.8	10.6	18.85	27.1	35.35	14
Ge (ppm)	203	56.70	0.09	0.05	0.6	0.05	0.1	0.1	0.18	0.25	0.33	1.4
Hf (ppm)	355	99.16	0.14	0.01	1.65	0.07	0.11	0.17	0.32	0.47	0.62	5.8
Hg (ppb)	354	98.88	30.03	2.5	309	16	26	37	68.5	100	131.5	0.05
In (ppm)	263	73.46	0.03	0.01	0.1	0.01	0.02	0.03	0.06	0.09	0.12	0.056
K (%)	358	100	0.14	0.01	0.48	0.08	0.13	0.17	0.31	0.44	0.575	2.9
La (ppm)	358	100	38.65	2.8	248.5	18	28.65	48.08	93.19	138.3	183.41	32.3
Li (ppm)	358	100	9.09	0.5	50.2	5.5	7.8	11.28	19.94	28.6	37.26	22
Mg (%)	357	99.72	0.10	0.01	0.53	0.05	0.08	0.12	0.23	0.33	0.435	1.4
Mn (ppm)	358	100	706.93	44	6753	248.25	436.50	831.75	1707	2582.25	3457.50	527
Mo (ppm)	358	100	0.44	0.06	2.56	0.26	0.38	0.54	0.96	1.38	1.8	1.4
Na (%)	353	98.60	0.01	0.00	0.10	0.003	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	
Nb (ppm)	358	100	0.57	0.06	2.36	0.26	0.46	0.76	1.51	2.26	3.01	26
Ni (ppm)	358	100	18.53	1.2	287.7	5.8	10.35	20.15	41.68	63.2	84.73	18.6
P (%)	358	100	0.03	0.00	0.26	0.02	0.02	0.03	0.06	0.09	0.12	655
Pb (ppm)	358	100	19.26	2.97	43.96	14.07	18.73	23.43	37.46	51.5	65.54	17
Pd (ppb)	271	75.70	17.55	5	185	10	10	20	35	50	65	
Pt (ppb)	168	46.93	2.06	1	14	1	1	2	3.5	5	6.5	
Rb (ppm)	358	100	22.80	1.4	115.2	13.3	20.5	29.38	53.49	77.6	101.71	110
Re (ppb)	102	28.49	0.65	0.5	2	0.5	0.5	1	1.75	2.5	3.25	0.0001
S (%)	147	41.06	0.02	0.01	0.14	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	62
Sb (ppm)	350	97.77	0.34	0.01	11.38	0.05	0.1	0.2	0.43	0.65	0.88	0.31
Sc (ppm)	358	100	4.27	0.3	35.6	2.23	3.3	5.38	10.1	14.83	19.55	84
Se (ppm)	310	86.59	0.26	0.05	1	0.1	0.2	0.4	0.85	1.3	1.75	0.09
Sn (ppm)	358	100	2.26	0.2	13.6	1.13	1.8	2.9	5.56	8.23	10.89	2.5
Sr (ppm)	358	100	7.64	0.7	36.7	3.9	6.3	9.5	17.9	26.3	34.7	316
Ta (ppm)	101	28.21	0.03	0.025	0.05	0.03	0.03	0.05	0.09	0.13	0.16	1.5
Te (ppm)	149	41.62	0.02	0.01	0.09	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	
Th (ppm)	358	100	22.22	2.3	147.1	10.03	16.35	27.78	54.4	81.03	107.65	10.3
Ti (%)	358	100	0.04	0.00	0.19	0.02	0.03	0.05	0.09	0.14	0.18	0.3
Tl (ppm)	357	99.72	0.33	0.01	1.5	0.2	0.3	0.43	0.78	1.12	1.47	
U (ppm)	358	100	4.49	0.3	15.5	2.4	3.8	6.28	12.09	17.9	23.71	2.5
V (ppm)	357	99.72	37.88	1	238	17	29	47.75	93.88	140	186.13	53
W (ppm)	119	33.24	0.08	0.05	1.4	0.05	0.05	0.1	0.18	0.25	0.33	
Y (ppm)	358	100	12.37	0.88	55.68	6.51	10.63	16.24	30.83	45.43	60.02	20.7
Zn (ppm)	358	100	31.81	3.2	346.1	19.65	28.2	37.65	64.65	91.65	118.65	52
Zr (ppm)	358	100	6.30	0.7	57.2	3.3	4.95	6.9	12.3	17.7	23.1	237

Os elementos B, Ge, In, Pd, Pt, Re, S, Ta, Te e W mostraram mais de 80% dos seus valores abaixo do limite de detecção do equipamento em relação ao método analítico utilizado e, por isso, não serão considerados no tratamento estatístico realizado no âmbito do presente trabalho.

Foi acrescentada uma coluna ao sumário estatístico com os valores da concentração média da crosta superior (*Mean Upper Crust Concentration – UCC* - Green 1959; Taylor 1964; Wedepohl 1978, 1995), com os elementos disponíveis, para uma melhor avaliação do fator de enriquecimento dos mesmos.

3.1.4 Considerações do ambiente sobre a amostragem geoquímica

Sob condições naturais, os elementos químicos agrupam-se segundo regras de comportamento e de afinidade que possibilitam predizer a presença de um elemento, quando detectada a presença de outro com o qual tenha afinidade geoquímica. Esse é um dos princípios que embasam a petrologia, a metalogenia e a geoquímica aplicada à exploração mineral.

A área de estudo apresenta nos mapas de concentração dos elementos químicos, áreas com altas concentrações assim como áreas com baixíssimas concentrações. Isso se deve a decomposição das rochas em condições supergênicas, formando halos geoquímicos secundários enriquecidos ou empobrecidos em vários elementos químicos. Estas zonas são formadas pelo processo de dispersão superficial, que consiste no carreamento do material decomposto das rochas para os solos, as drenagens, águas superficiais e subterrâneas.

Dos fatores que governam a mobilidade dos elementos em solução, o conjunto pH e Eh talvez seja o mais importante. Assim, a química de muitos elementos no ambiente superficial pode ser representada por meio de diagramas de Eh x pH. Entretanto, como salientado por Plant e Raiswell (1983), o emprego desses diagramas deve ser criterioso, pois em muitas situações naturais os controles dos estados redox e das reações de dissolução/precipitação dependem muito mais da cinética do que dos fatores de equilíbrio. Esses autores ainda enfatizam que as relações de equilíbrio entre minerais e solução são aceitáveis no ambiente natural de superfície, apenas para os elementos maiores, já que o comportamento dos elementos traço é muito mais complexo e controlado por outros mecanismos como a co-precipitação, os efeitos de superfície e a interação com fases orgânicas.

A dispersão superficial pode ser classificada de acordo com o tempo de formação em relação à matriz (solo, água, vegetal ou rocha), ou seu modo de formação. Portanto a dispersão pode se dar de duas formas: 1) clástica e 2) hidromórfica.

A dispersão clástica se caracteriza por ocorrer em regiões com baixas taxas de pluviosidade e predominância do intemperismo físico, assim a assinatura geoquímica dos sedimentos será parecida com a assinatura do solo, que por sua vez refletirá a assinatura geoquímica da rocha, já que não haverá decomposição química efetiva dos minerais.

A dispersão hidromórfica se caracteriza pela ocorrência em regiões com altas taxas de pluviosidade, tornando assim a ação do intemperismo químico maior que a do intemperismo físico. Devido à decomposição mineral pela percolação da água na região, a fase dos argilominerais é a mais importante, fazendo da água o agente dinâmico. Neste tipo de feição, os elementos químicos são influenciados diretamente por características físico-químicas das águas que os lixiviam.

Nos sedimentos de corrente, os processos geoquímicos mais comuns envolvendo elementos químicos são: 1) adsorção de metais em argilas, óxidos-hidróxidos e matéria orgânica; 2) co-precipitação de metais; 3) complexação de metais a outros compostos sob diferentes faixas de pH e Eh nas águas

(James;1967; Krauskopf, 1995; Faure, 1998). Esse pode ser o motivo pelo qual os elementos químicos sejam concentrados ou dispersos na forma de anomalias geoquímicas.

Segundo Butt e Zeegers (1992), o clima é o fator de maior relevância na definição dos processos de dispersão geoquímica na evolução do perfil de um solo. As serras que dominam o Quadrilátero Ferrífero afetam diretamente o clima da região, principalmente da área central do Quadrilátero, pois atuam como barreiras à movimentação das massas de ar, gerando localmente áreas com diferentes sistemas morfoclimáticos.

As anomalias relacionadas com as fases sólidas, líquidas e gasosas estão ligadas aos processos formadores dos depósitos minerais magmáticos, metamórficos e sedimentares.

O halo geoquímico é a região que contém teores anormalmente elevados ou reduzidos de elementos químicos nas rochas encaixantes, solos, vegetação, etc. que pode revelar a presença de um alvo geoquímico. A origem do halo geoquímico está relacionada com os processos de formação do alvo (halo geoquímico primário), ou de sua destruição supergênica (halo geoquímico secundário).

Cada elemento químico tem sua abundância relativa na crosta terrestre considerada como normal. Para que a concentração de um elemento seja considerada anômala, esta deve ter quantidades, no mínimo, superior a sua concentração normal, se isso ocorrer, então aciona-se o sinal de “alerta” para que estudos mais aprofundados sejam feitos na área.

Elementos maiores (formadores de rocha, componentes da água e alguns dos principais constituintes dos organismos) como Na, Mg, Al, Si, K, Ca e Fe são aqueles cuja abundância média nos materiais crustais, excede 1 %. Os elementos maiores são expressos em uma proporção percentual em massa do elemento com relação à massa da amostra. Desse modo, quando um teor é reportado como 1,35% K, isto significa que de cem partes da massa da amostra analisada, 1,35 partes são constituídas exclusivamente por potássio.

Ti, P, S e Mn são considerados como elementos menores, pois têm uma abundância média na faixa entre 1,0 e 0,01 %.

Elementos traço como Be, B, As, Mo e U têm uma abundância média na ordem de 1 parte por milhão (ppm ou mg/kg ou µg/g). Assim, 8 ppm U indicam que em 1.000.000 de gramas da amostra analisada existem 8 gramas de urânio.

3.1.5 Distribuição dos elementos químicos analisados

Para uma melhor elaboração dos resultados, foram criados cinco agrupamentos na área de estudo de acordo com suas semelhanças geoquímicas, esses agrupamentos são (figura 7):

1. Agrupamento Belo Horizonte (laranja): composto pelo complexo Belo Horizonte, granitóide General Carneiro, granitóide Santa Luzia.
2. Agrupamento Caeté (roxo): composto pelo complexo Belo Horizonte\ Caeté e granito Caeté
3. Agrupamento Bação (verde): composto pelo complexo Bação.

4. Agrupamento Gnaisse Cláudio (rosa): composto pelo Complexo Bonfim, Gnaisse Cláudio, Granito Piracema e Leucogranito Cachoeira do Chaves.
5. Agrupamento Bonfim (azul): composto pelo Complexo Bonfim, Santana do Paraopeba, Samambaia e Gnaisse Souza Noschese.

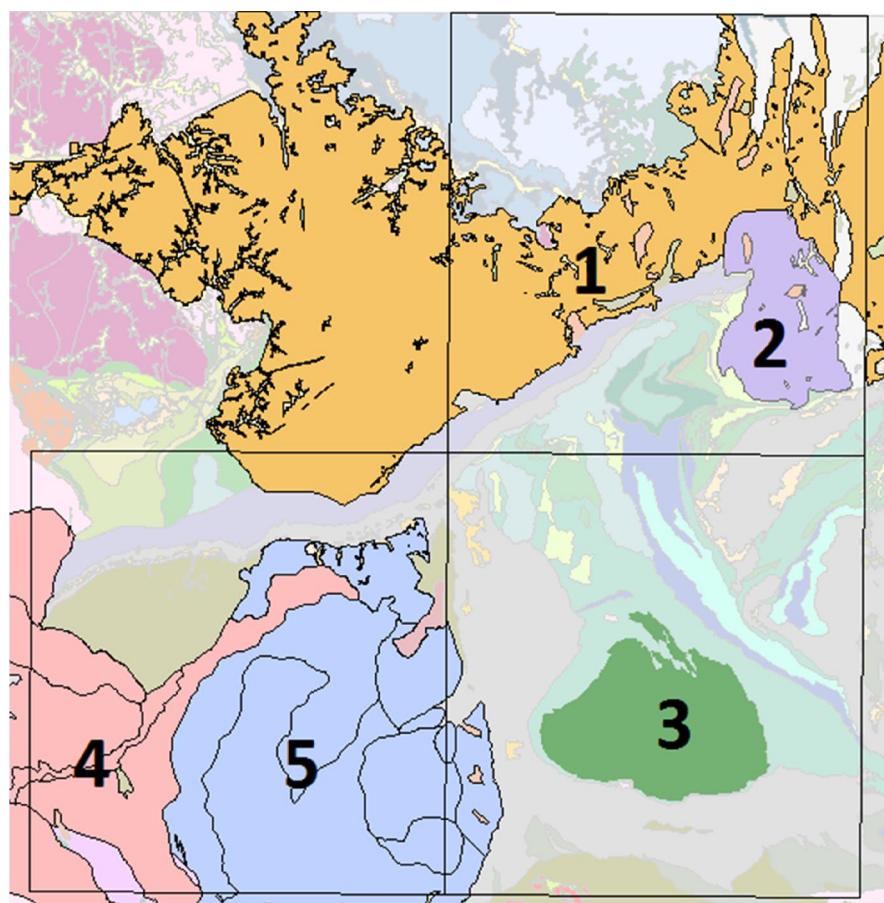


Figura 7: Localização dos agrupamentos criados por semelhança geoquímica nas áreas de estudo.

As análises estatísticas feitas a seguir têm em consideração quantificar de cada elemento químico separadamente dentro de cada agrupamento criado na área de estudo.

Foram selecionados alguns elementos de maior relevância dentro dos agrupamentos geológicos pesquisados para serem descritos aqui. Para cada elemento químico selecionado, foi gerado um gráfico box-plot mostrando a quantidade disponível desse elemento químico dentro de cada um dos agrupamentos geológicos criados na área de estudo (figura 8).

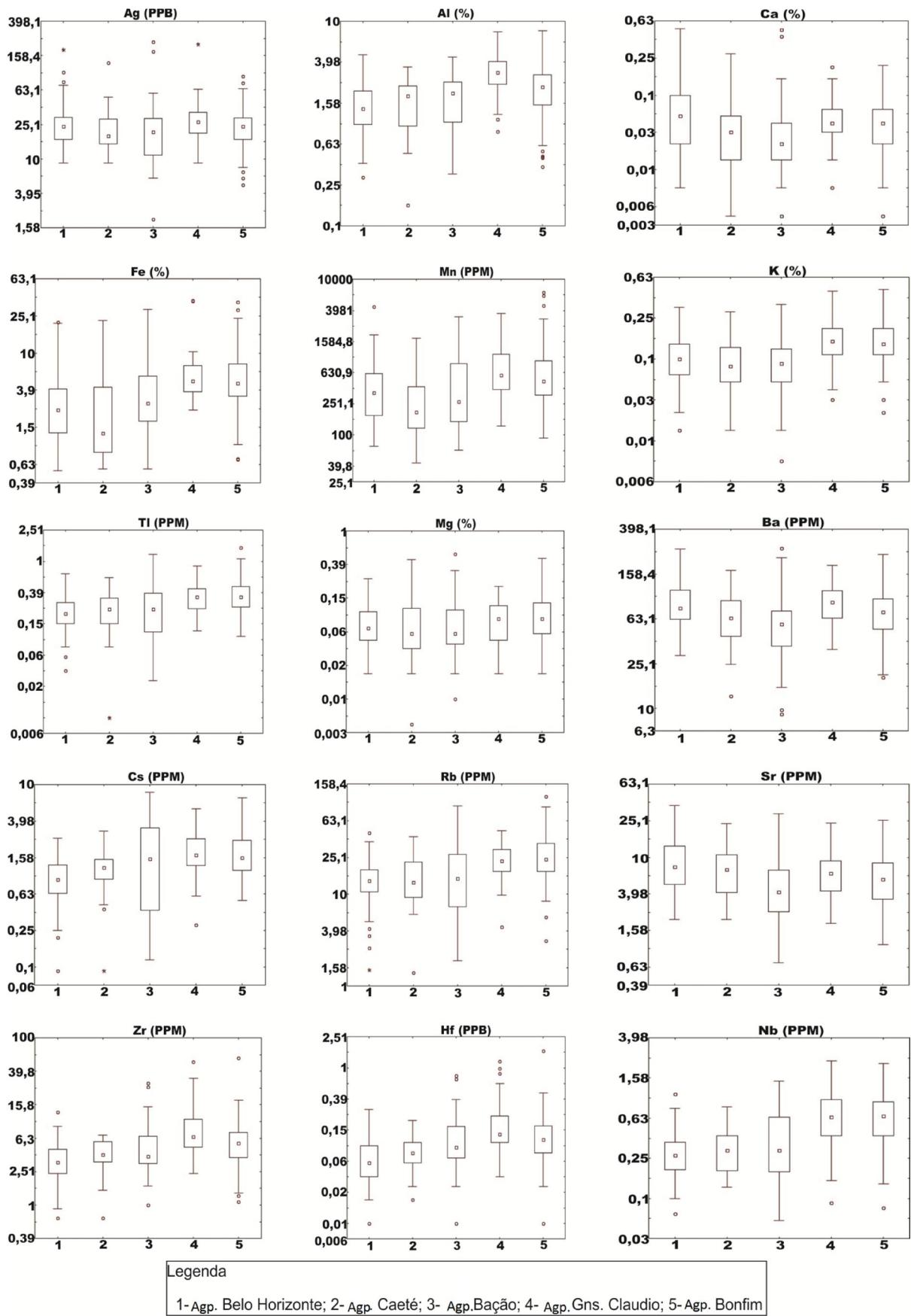
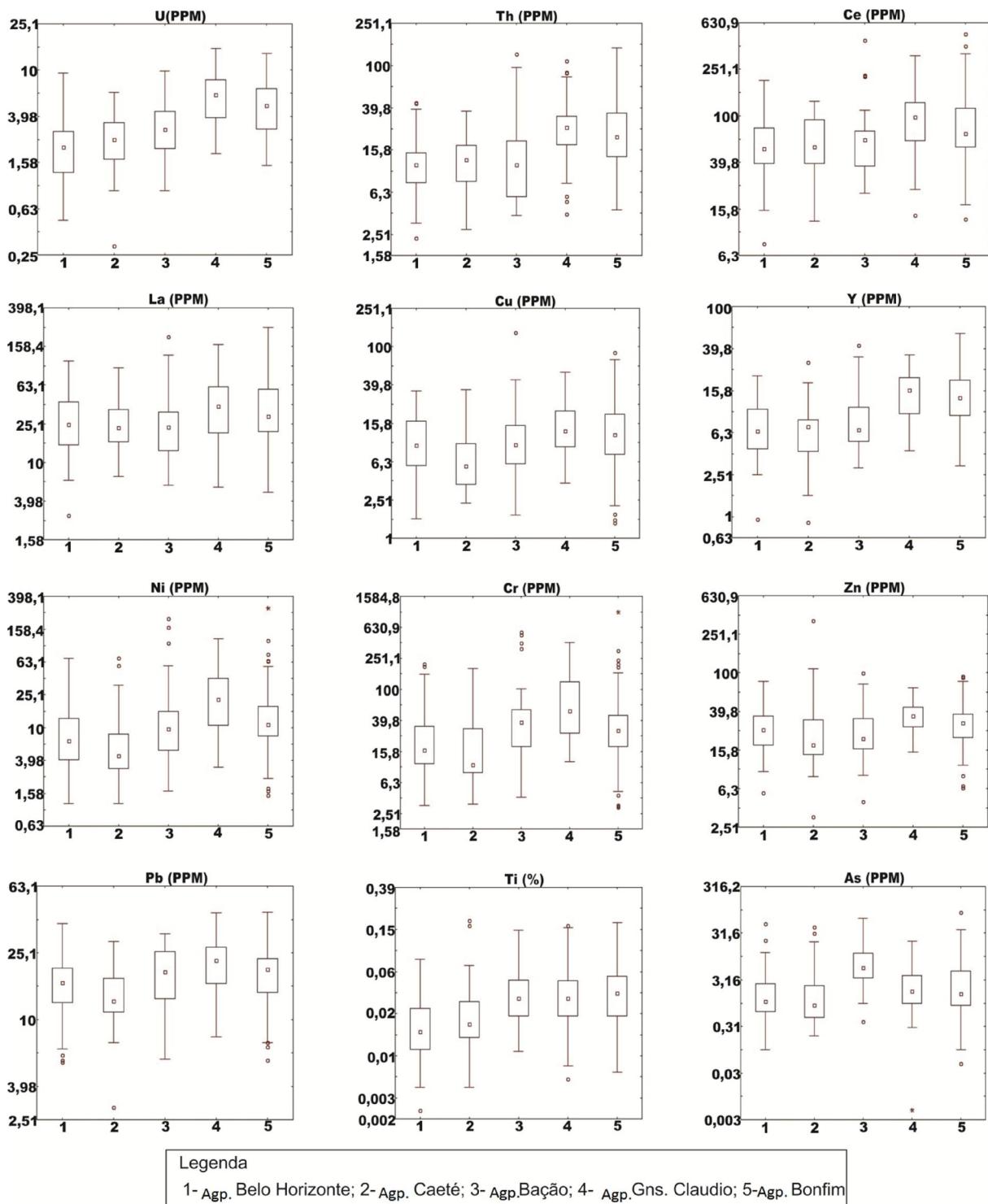


Figura 8: Box-Plot da distribuição de elementos maiores, menores e traços em amostras de sedimentos de corrente nos cinco principais agrupamentos geológicos da área estudada.

Continuação da figura 8.



3.1.5.1 Distribuição dos elementos maiores por agrupamento

Alumínio: As maiores concentrações de Alumínio estão nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim que apresentam um *whisker* superior de 6,3%. As menores concentrações se encontram nos agrupamentos Belo Horizonte e Caeté, que apresentam anomalias inferiores de 0,28% e 0,15%, relativamente aos seus *whiskers* inferiores de 0,4% e 0,3%, respectivamente.

O maior valor de *background* encontra-se no agrupamento Gnaisse Cláudio com valor central de 3%, seguido pelo agrupamento Bonfim com 2,3%. O menor valor central encontra-se no agrupamento Belo Horizonte com valor de 1,4%. A maior variância entre todos os agrupamentos é mostrada pelo agrupamento Bação.

Cálcio: No agrupamento Bação, a anomalia se caracteriza por ser de 3^a ordem, apresentando o valor de 0,56%, sendo seu *whisker* superior o valor de 0,15%. O agrupamento Belo Horizonte apresenta um valor do *whisker* superior de 0,56%, equiparando-se a anomalia do agrupamento Bação.

O maior valor central de *background* se encontra no agrupamento Belo Horizonte com 0,06%, e o menor no agrupamento Bação com 0,02%. A maior dispersão dos valores do *background* se localiza no agrupamento Caeté.

Magnésio: Três agrupamentos apresentaram anomalias de 3^a ordem, são eles: Caeté, Bação e Bonfim.

O valor do *whisker* superior nos agrupamentos Caeté e Bonfim é de 0,45%, com os pontos de anomalia nos valores 0,53%. No agrupamento Bação, o valor do *whisker* superior é igual a 0,33% enquanto a anomalia positiva apresenta um valor de 0,56%.

Os maiores valores de *background* se encontram nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim, com valores centrais de ambos iguais a 0,12%. Os menores valores centrais estão nos agrupamentos Bação e Caeté com ambos os valores de 0,07%. O agrupamento Caeté apresenta a maior variação na faixa de *background*.

Potássio: O valor do *whisker* superior, tanto no agrupamento Gnaisse Cláudio quanto o Bonfim é de 0,5%. O maior valor central de *background* se encontra no agrupamento Gnaisse Cláudio com 0,15%, e o menor valor central está no agrupamento Caeté com 0,07%. A variabilidade de *background* nos agrupamentos é similar, no entanto, quatro dos cinco agrupamentos apresentam anomalia negativa os quais são: 0,02% no agrupamento Belo Horizonte, 0,01% para o agrupamento Bação, 0,04% para o agrupamento Gnaisse Cláudio e 0,03% para o agrupamento Bonfim.

Ferro: As anomalias positivas encontradas na área de estudo se caracterizam por ser de 3^a ordem e estão localizadas nos agrupamentos Bonfim e Bação se apresentando no valor de 31,6%.

O maior valor do *whisker* superior corresponde ao agrupamento Baçao, com um valor de 28,1%, enquanto o menor valor se encontra nos agrupamentos Belo Horizonte, Caeté e Baçao todos com valor de 0,5%.

3.1.5.2 Distribuição dos elementos Menores e traços por agrupamentos

Bálio: A área apresenta três pontos de anomalia positiva de 3^a ordem, uma no agrupamento Baçao, com um valor de 281,8 ppm, e relativa a um *whisker* superior de 223,8 ppm, sendo os outros dois agrupamentos, o Belo Horizonte e Bonfim mostrando um *whisker* superior no valor de 251 ppm e as anomalias neles presentes com o valor de 264,7 ppm.

O maior valor central de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com valor de 79,4 ppm, e o menor valor central de *background* está no agrupamento Baçao, com valor de 56,2 ppm. A dispersão da faixa de valores do *background* é similar entre os agrupamentos.

Césio: Os agrupamentos Baçao e Bonfim apresentam um *whisker* superior no valor de 7,9 ppm tendo cada um dos agrupamentos um ponto de anomalia positiva de 3^a ordem de valor 8,3 ppm.

O maior valor central de *background* encontra-se no agrupamento Gnaisse Cláudio com 1,6 ppm, seguido do agrupamento Baçao com 1,5 ppm, o qual também apresenta a maior variabilidade de *background* e com o menor valor do *whisker* inferior no valor de 0,1 ppm.

Fósforo: O elemento químico fósforo apresenta uma anomalia positiva de 3^a ordem no agrupamento Baçao mostrando valores iguais a 0,25%. Os agrupamentos Caeté, Gnaisse Cláudio e Bonfim também apresentam anomalias de 3^a ordem com o valor de 0,1%. Em contra partida, o agrupamento Belo Horizonte não apresenta anomalia, mas seu *whisker* superior tem um valor de 0,1%, se equiparando a anomalia dos três agrupamentos supracitados.

O maior valor de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com valor central de 0,03%, enquanto o menor valor está no agrupamento Caeté com 0,01%. A maior dispersão da faixa de valores do *background* está no agrupamento Belo Horizonte, onde o valor central mostra 0,02%. O agrupamento que apresenta o menor valor de anomalia negativa é o Bonfim com 0,003%.

Rubídio: O agrupamento que apresenta o maior valor de *whisker* superior é o Baçao com valor de 91,2 ppm seguido do Bonfim com 89,1 ppm, com um ponto anômalo positivo de 3^a ordem no valor de 112,2 ppm.

O maior valor central de *background* está nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim com 22,3 ppm. A maior variabilidade do *background* está no agrupamento Baçao com valor central de 15,1 ppm. O agrupamento Belo Horizonte apresenta uma anomalia inferior de 1,5 ppm.

Antimónio: Uma anomalia de 3^a ordem pode ser observada nos agrupamentos Belo Horizonte com valor de 10 ppm, Bonfim com valor de 11 ppm e Baçao com 11,3 ppm.

O agrupamento com o maior valor de *whisker* superior é o Bação com 5 ppm, enquanto os outros agrupamentos ficam por volta de 0,2 ppm.

O maior valor de *background* está no agrupamento Bação com valor central de 0,12 ppm, também apresentando a maior variância da faixa de valores do *background*. O menor valor central de *background* encontra-se no agrupamento Caeté com 0,03 ppm. O agrupamento que apresenta o menor valor de *whisker* inferior é o Gnaisse Cláudio com valor de 0,01 ppm.

Arsénio: As anomalias de 3^a ordem observadas nos agrupamentos Bação e Bonfim mostram valores de 100 ppm.

O maior valor de *whisker* superior está no agrupamento Bação com o valor de 63 ppm, e o menor se encontra no agrupamento Bonfim com valor de 0,1 ppm.

O maior valor central de *background* encontra-se no agrupamento Bação com 3,9 ppm. Os outros agrupamentos apresentam, tanto o valor central quanto a variância do *background*, no valor de 1,2 ppm.

3.1.5.3 Distribuição dos ETR leves por agrupamento

Lantânio: Dois agrupamentos apresentam anomalias de 3^a ordem, o Bação e o Gnaisse Cláudio, ambos com valores de 199,5 ppm.

O maior *whisker* superior está no agrupamento Bonfim com o valor de 251 ppm, estando nesse agrupamento também o menor valor do *whisker* inferior com 4,5 ppm.

O maior valor central de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com 36,3 ppm e o menor valor central está no agrupamento Caeté com 19,9 ppm.

Cério: Três agrupamentos apresentam anomalia de 3^a ordem, o Bação com um valor de 446,6 ppm, o Gnaisse Cláudio e o Bonfim com valores de 501 ppm.

O *whisker* superior com o maior valor se encontra nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim com 316,2 ppm. O menor valor do *whisker* inferior está no agrupamento Caeté com 12,5 ppm.

O maior valor central de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com 89,1 ppm e o menor no agrupamento Belo Horizonte com 50,1 ppm.

3.1.5.4 Distribuição dos metais por agrupamento

Níquel: Dentre os agrupamentos, três apresentam anomalia positiva de 3^a ordem. O agrupamento Bação apresenta dois pontos com anomalia positiva de 199 ppm, o agrupamento Gnaisse Cláudio apresenta uma anomalia de 158,4 ppm e o agrupamento Bonfim apresenta uma anomalia positiva no valor 281,8 ppm.

O maior valor de *whisker* superior encontra-se no agrupamento Gnaisse Cláudio com valor de 112,2 ppm, enquanto o menor valor do *whisker* superior está nos agrupamentos Caeté e Belo Horizonte com 1,1 ppm.

O maior valor central de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com 22,3 ppm. A esse agrupamento também está associado a maior variabilidade das faixas de valores do *background*. O menor valor central do *background* está no agrupamento Caeté com 3,9 ppm.

Zinco: Anomalias de 2^a ordem foram observadas nos agrupamentos Caeté, com valores de 398 ppm, agrupamento Belo Horizonte com valor de 346,1 ppm e no agrupamento Bação com valor de 346,1 ppm.

Anomalias de 3^a ordem foram encontradas nos agrupamentos Belo Horizonte com valor de 110,1 ppm, agrupamento Bação com valores de 100 ppm e nos agrupamentos Bonfim e Gnaisse Cláudio com valor de 79,4 ppm cada um.

O *background* de maior valor central está no agrupamento Gnaisse Cláudio com 31,6 ppm, o menor valor central está no agrupamento Caeté com 17,7 ppm, o qual também possui o maior valor de *whisker* superior com 112,2 ppm e o menor valor de *whisker* inferior com 7,9 ppm.

Chumbo: O maior valor do *whisker* superior se encontra nos agrupamentos Bonfim e Gnaisse Cláudio com 44,6 ppm, seguido do agrupamento Belo Horizonte com 35,4 ppm e o menor valor do *whisker* inferior está no agrupamento Bação com 5,6 ppm.

O maior valor central de *background* está no agrupamento Gnaisse Cláudio com 22,3 ppm e o menor valor central no agrupamento Caeté com 11,4 ppm, a maior variância na faixa de valores do *background* se encontra no agrupamento Bação com valor central de 19,9 ppm.

O agrupamento Caeté apresenta uma anomalia inferior no valor de 2,9 ppm.

Cobre: Anomalias de 3^a ordem são observadas nos agrupamentos Bação com valor de 125,8 ppm e Bonfim com valor de 79,4 ppm.

O agrupamento que apresenta o maior valor do *whisker* superior é o Bonfim com 69,1 ppm e o menor valor do *whisker* inferior está no agrupamento Belo Horizonte com 1,5 ppm.

O agrupamento com o maior valor de *background* é o Gnaisse Cláudio com 12,5 ppm e o menor valor central do *background* está no agrupamento Caeté com 5,6 ppm.

Lítio: Dois agrupamentos apresentam anomalia de 3^a ordem , o Bação com valor de 57 ppm e o Gnaisse Cláudio com valor de 40 ppm.

O maior *whisker* superior encontra-se no agrupamento Bação com valor de 52 ppm, que também possui o menor valor do *whisker* inferior com 1,2 ppm.

O agrupamento com o maior valor central do *background* é Gnaisse Cláudio com 10,7 ppm e o menor valor central do *background* se encontra no agrupamento Belo Horizonte com valor de 5,6 ppm. O agrupamento com a maior variabilidade dos valores de *background* é o Bação com o valor central de 6,3 ppm.

Ouro: Apresenta anomalia de 2^a ordem em quatro agrupamentos, Belo Horizonte, Caeté, Bonfim e Gnaissé Cláudio, todos com valor de 538,4 ppb ou superior.

A anomalia de 3^a ordem foi observada em todos os agrupamentos com valores concentrados entre 18,7 ppb até 171,9 ppb, sendo o agrupamento Caeté o que apresenta as anomalias com os maiores valores.

O agrupamento com o maior valor do *whisker* superior é o Caeté com 28,1 ppb e o menor valor do *whisker* inferior se encontram nos agrupamentos Belo Horizonte, Caeté, Bação e Bonfim, com o valor de 0,1 ppb.

O maior valor central de *background* se encontra no agrupamento Gnaissé Cláudio com valor de 1,5 ppb e o menor valor central se encontra no agrupamento Belo Horizonte com 0,6 ppb.

3.2 Mapas de localização da distribuição dos elementos químicos

A proposta dos mapas de distribuição dos elementos químicos é realçar a abundância dos diversos elementos espacialmente na área de estudo e entender a migração dos elementos químicos individualmente, assim como os princípios que controlam essa distribuição e migração. As informações geoquímicas originais dos sedimentos de corrente foram log-transformadas e inseridas no programa ESRI para a representação da dispersão dos elementos químicos nas áreas de estudo.

Alumínio: A concentração de alumínio mais significativa está localizada na região sul da área estudada estando relacionada aos agrupamentos Bação, Gnaissé Cláudio e Bonfim. Baixas concentrações destes elementos são encontradas nos agrupamentos Belo Horizonte e Caeté (figura 9).

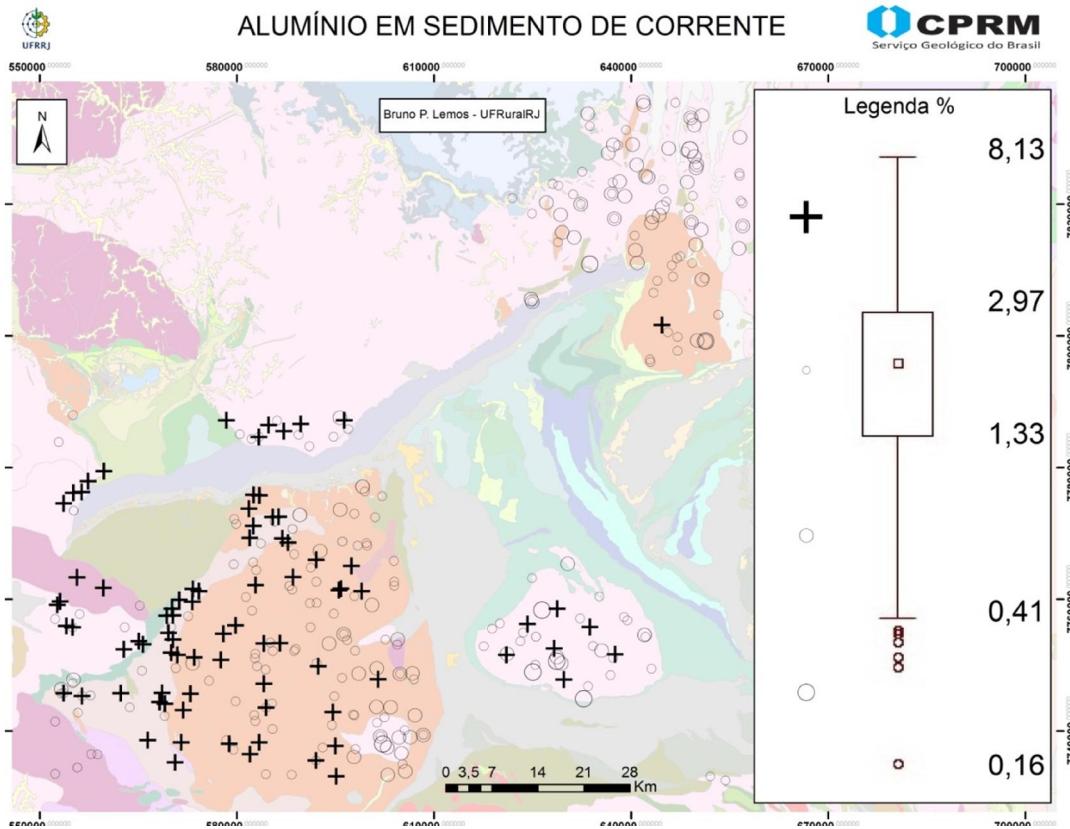


Figura 9: Mapa de concentração de alumínio na área de estudo.

A concentração de alumínio provavelmente relaciona-se com a decomposição de rochas cálcio-alcalinas da região, provocadas por águas meteóricas e intenso processo de intemperismo.

Cálcio: A concentração de cálcio está bem distribuída entre todos os agrupamentos, à exceção do agrupamento Caeté, que apresenta baixa concentração deste elemento químico. Ocorrem anomalias positivas de 3^a ordem em dois agrupamentos, em maior número no agrupamento Belo Horizonte e em menor número no agrupamento Bação. Em ambos os agrupamentos as anomalias se concentram nas bordas dos mesmos (figura 10).

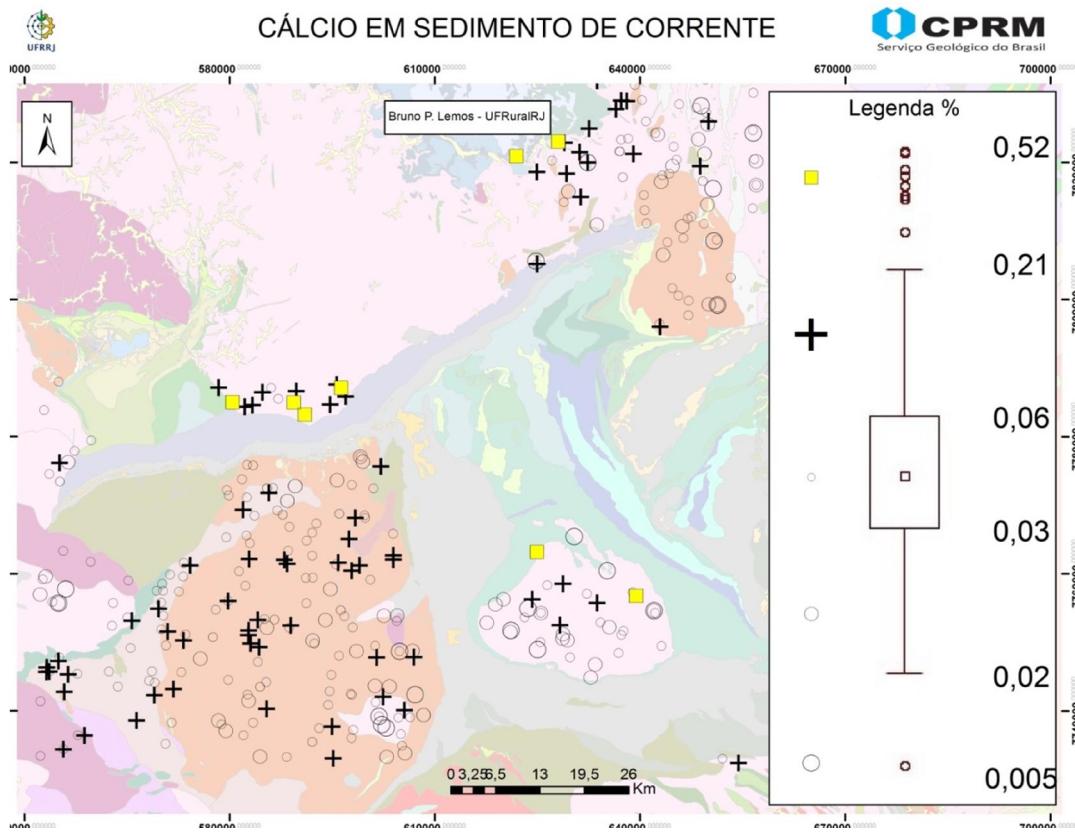


Figura 10: Mapa de concentração de cálcio na área de estudo.

A concentração de cálcio está, provavelmente, relacionada com a remobilização por lixiviação do Ca do Supergrupo Rio das Velhas.

Magnésio: O magnésio se distribui por toda a área de estudo, mas se nota uma maior concentração na parte sul do mapa. Três agrupamentos apresentam anomalias de 3^a ordem, são eles: agrupamento Caeté, agrupamento Bação e agrupamento Bonfim.

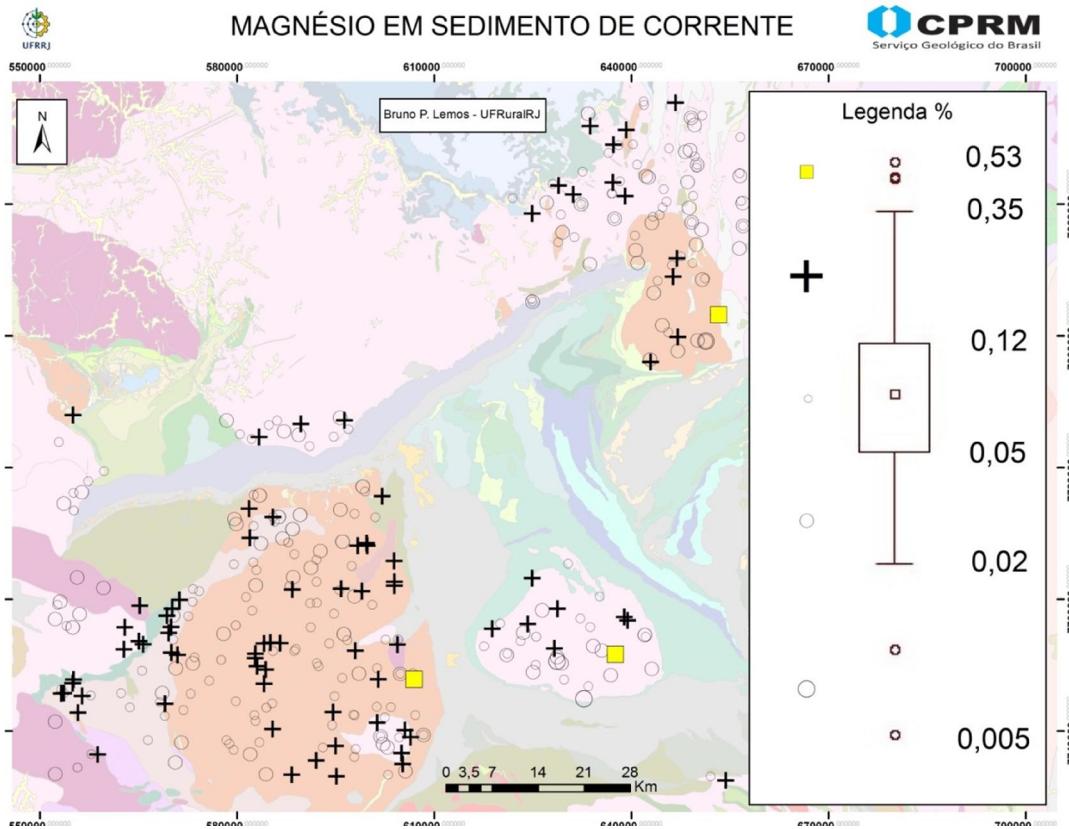


Figura 11: Mapa de concentração de magnésio na área de estudo.

O agrupamento Caeté e Bação apresentam anomalias negativas em torno do ponto das anomalias positivas, o que pode indicar uma remobilização do magnésio para o ponto das anomalias positivas (figura 11).

O magnésio presente, provavelmente, se originou da alteração hidrotermal de rochas básicas-ultrabásicas devido à ação de soluções carbonatadas em condições de baixo metamorfismo. Este processo provocou a transformação dos silicatos magnesianos em carbonatos de magnésio, com consequente liberação de sílica.

Potássio: A maior concentração de potássio está, praticamente, toda relacionada com o agrupamento Bonfim. Outra considerável concentração ocorre na região sudoeste do agrupamento Belo Horizonte. No agrupamento Gnaisse Cláudio há uma distribuição mais homogênea (figura 12).

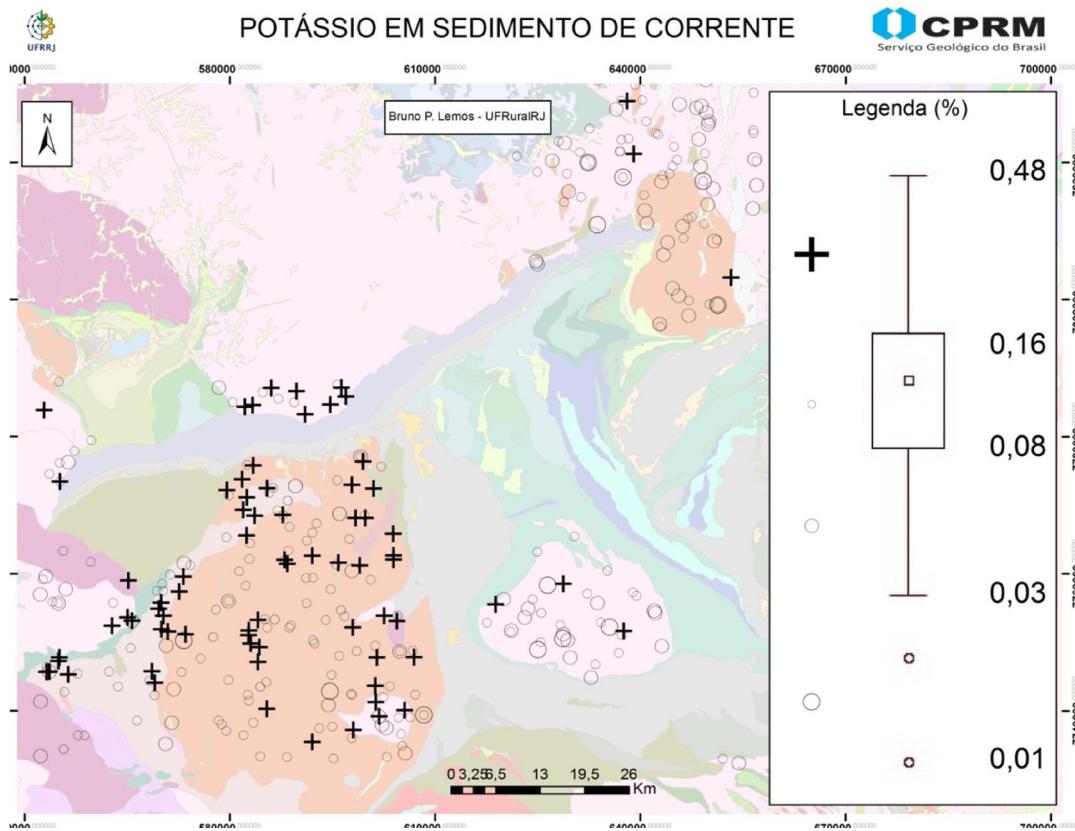


Figura 12: Mapa de concentração de potássio na área de estudo.

A concentração de potássio está, provavelmente, associada com o intemperismo dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas.

Ferro: O ferro mostra-se bem distribuído em todos os agrupamentos, mas as anomalias de 3^a ordem estão concentradas, em sua maior parte, no agrupamento Bonfim e pontualmente nos agrupamentos Bação e Gnaisse Cláudio (figura 13).

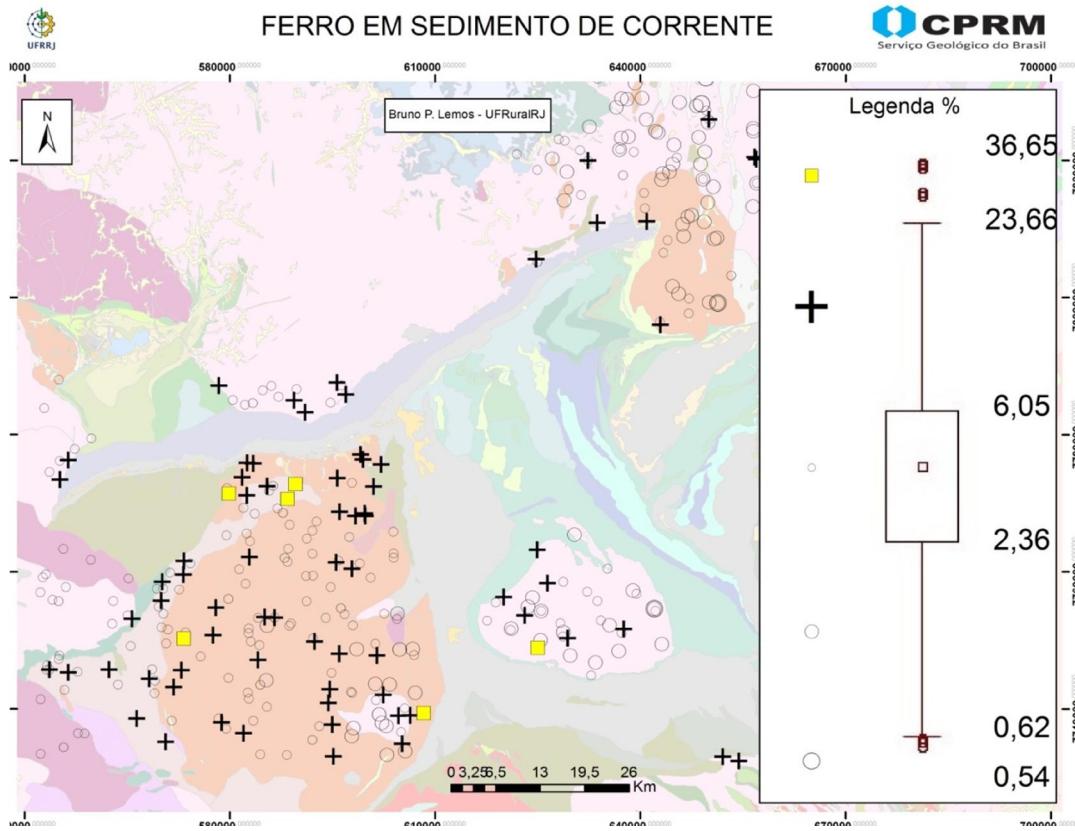


Figura 13: Mapa de concentração de ferro na área de estudo.

No caso do ferro, a concentração deste elemento está relacionada com as formações ferríferas do tipo Lago Superior no Supergrupo Minas e, seus produtos de intemperização.

Bário: A concentração de bário está mais presente nos agrupamentos Belo Horizonte e Bonfim, os quais apresentam anomalias de 3^a ordem. O agrupamento Bação também apresenta uma anomalia de 3^a ordem (figura 14).

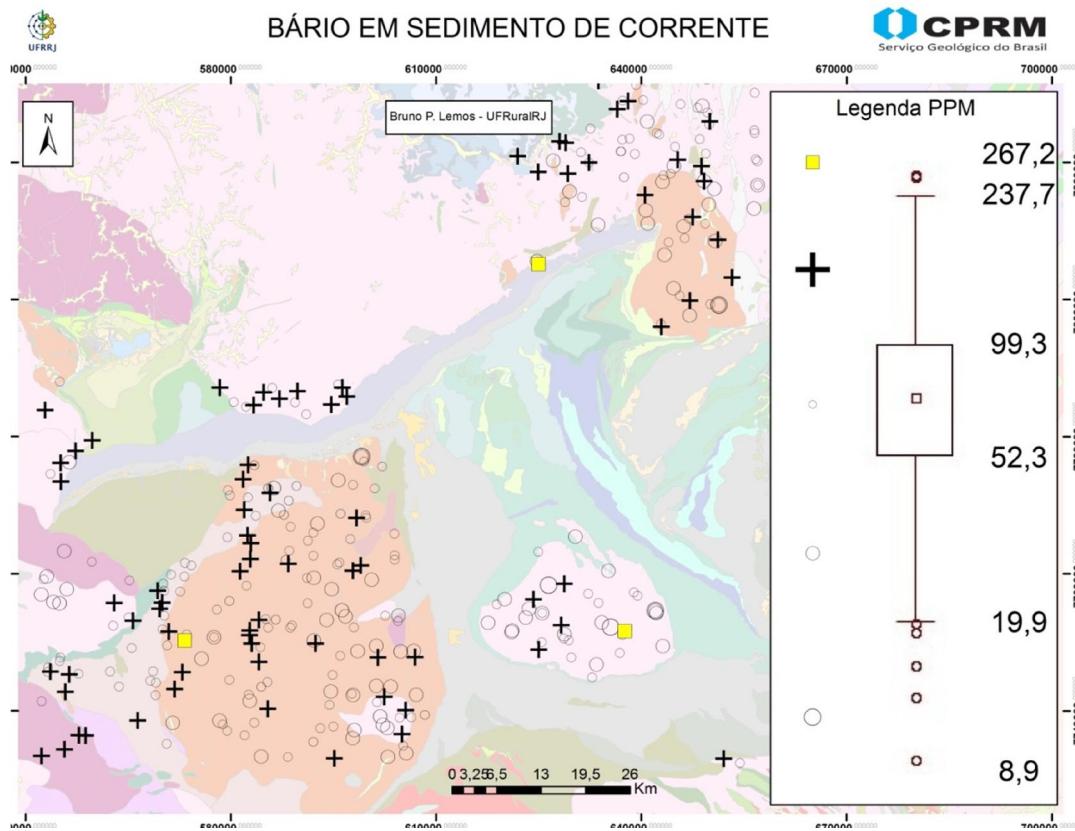


Figura 14: Mapa de concentração de bário na área de estudo.

A concentração de bário provavelmente está associada com depósitos residuais formados durante o intemperismo de rochas contendo barita ou depósitos em veios por atuação de por fluidos.

Césio: As principais concentrações de césio se encontram na parte leste do agrupamento Bonfim estando também presente nos agrupamentos Bação e Gnaisse Cláudio. Anomalias de 3^a ordem estão presentes nos agrupamentos Bação e Bonfim (figura 15).

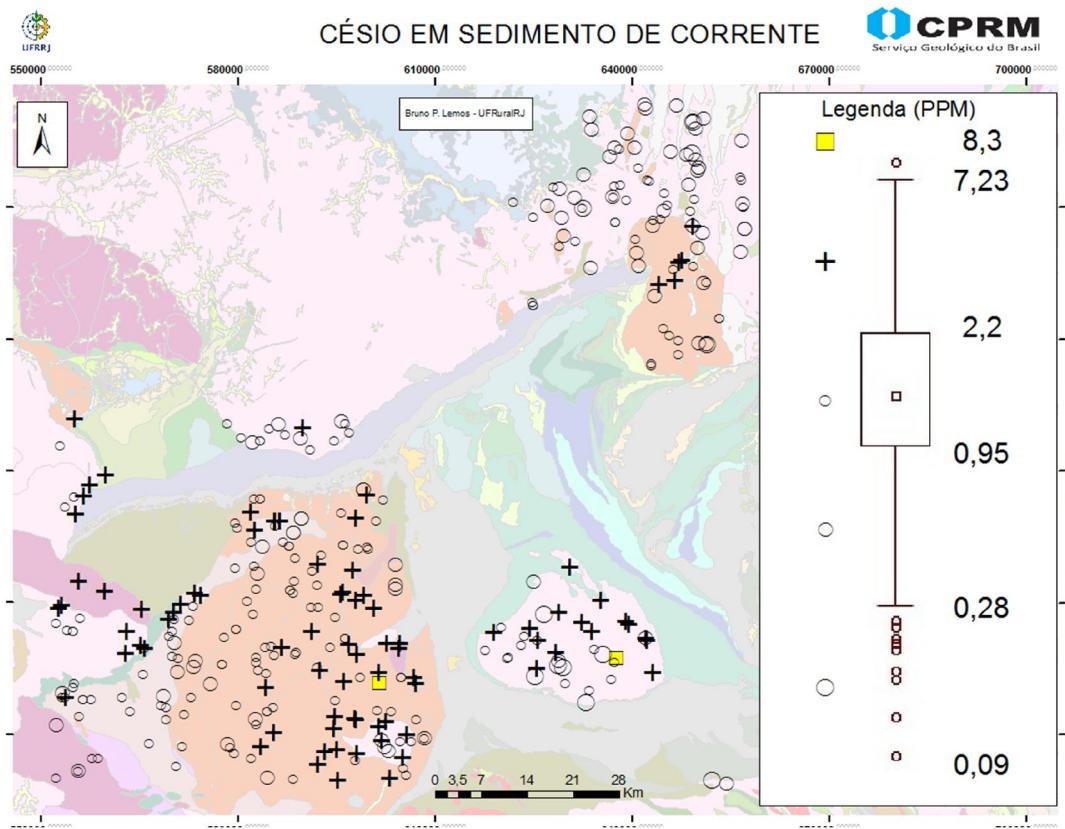


Figura 15: Mapa de concentração de césio na área de estudo.

A concentração de césio provavelmente se deve ao intemperismo e sua alta reatividade com a água que o lixivia dos sedimentos. Outra possibilidade são pegmatitos mais evoluídos enriquecidos no mineral polucita.

Fósforo: A concentração de fósforo está pontualmente distribuída em algumas regiões do agrupamento Belo Horizonte, estando homogeneamente distribuído nos agrupamentos Gnaissé Cláudio e Bonfim. Foi observada uma anomalia de 3^a ordem no agrupamento Bação (figura 16).

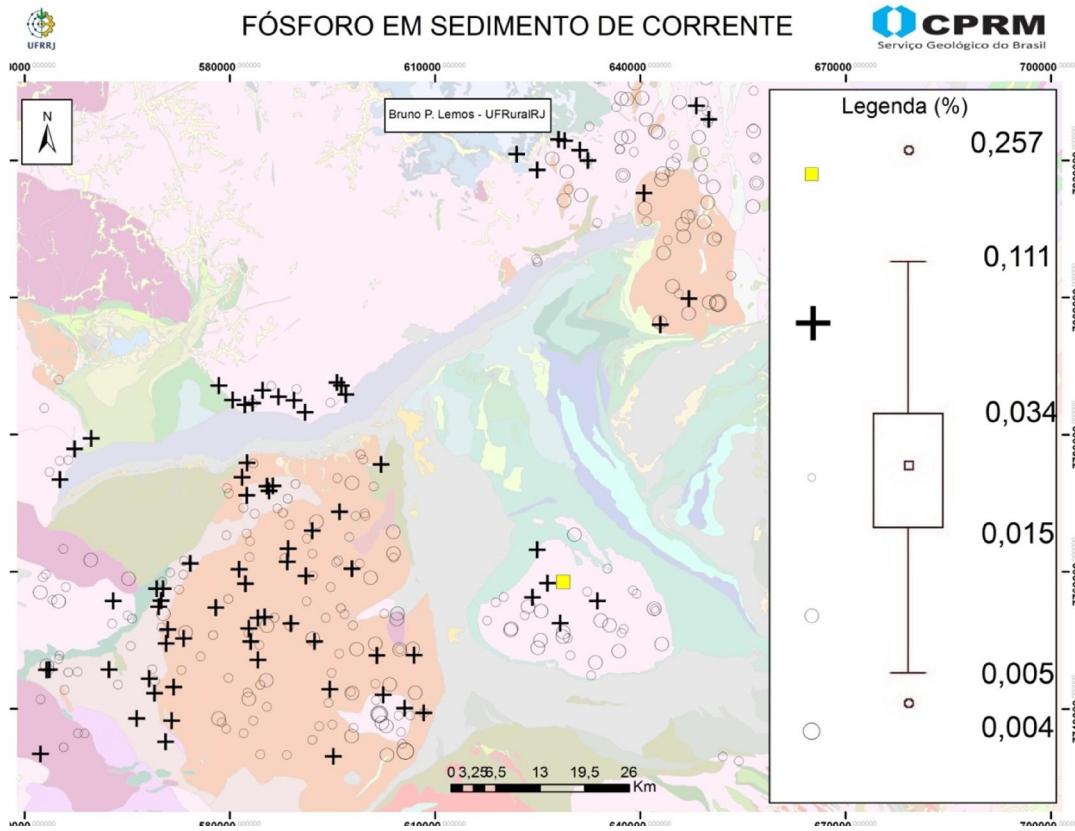


Figura 16: Mapa de concentração de fósforo na área de estudo.

A concentração de fósforo está muito provavelmente associada com a diferenciação magmática e metassomatismo em veios na região.

Rubídio: A concentração de rubídio está bem distribuída no agrupamento Bonfim, o qual apresenta uma anomalia de 3^a ordem. O agrupamento Bação apresenta uma distribuição bem homogênea, assim como o agrupamento Gnaisse Cláudio (figura 17).

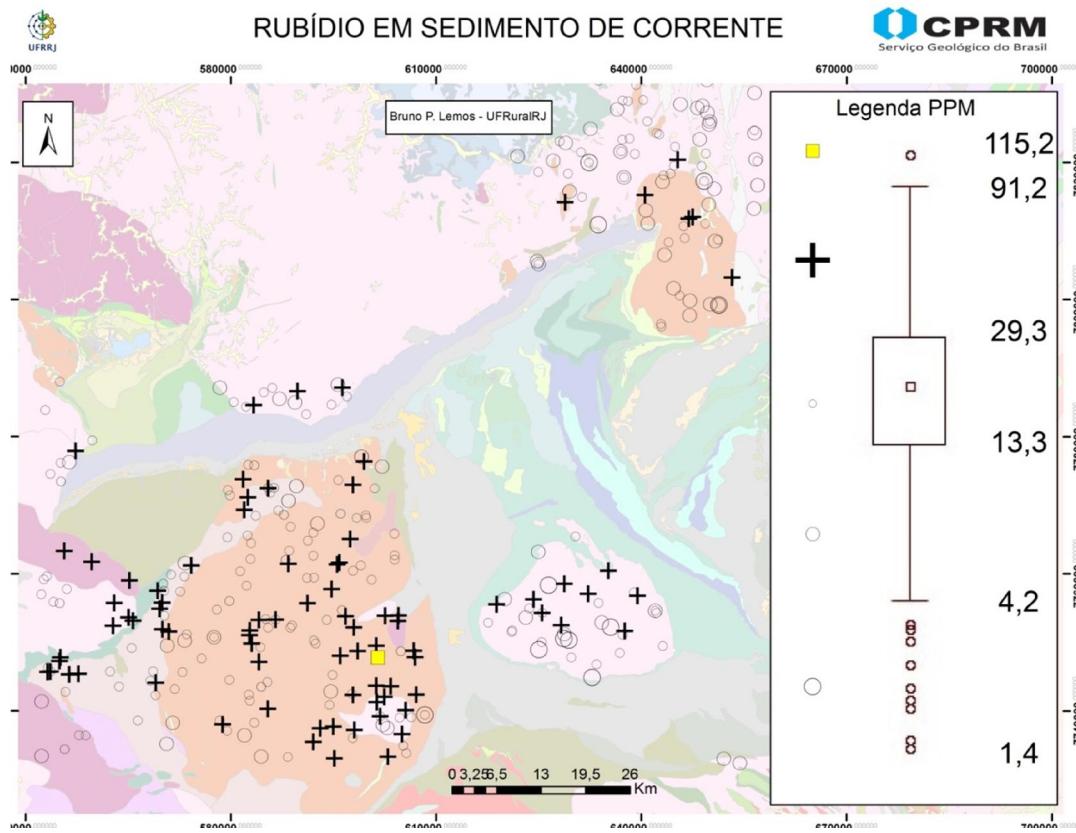


Figura 17: Mapa de concentração de rubídio na área de estudo.

A concentração do Rb provavelmente se deve a deposição por processos hidrotermais em veios da região.

Antimônio → A concentração de antimônio está bem distribuída por toda a área de estudo, apresentando muitos pontos com anomalias de 3^a ordem como, por exemplo, nos agrupamentos Belo Horizonte, Bação e principalmente o agrupamento Bonfim (figura 18).

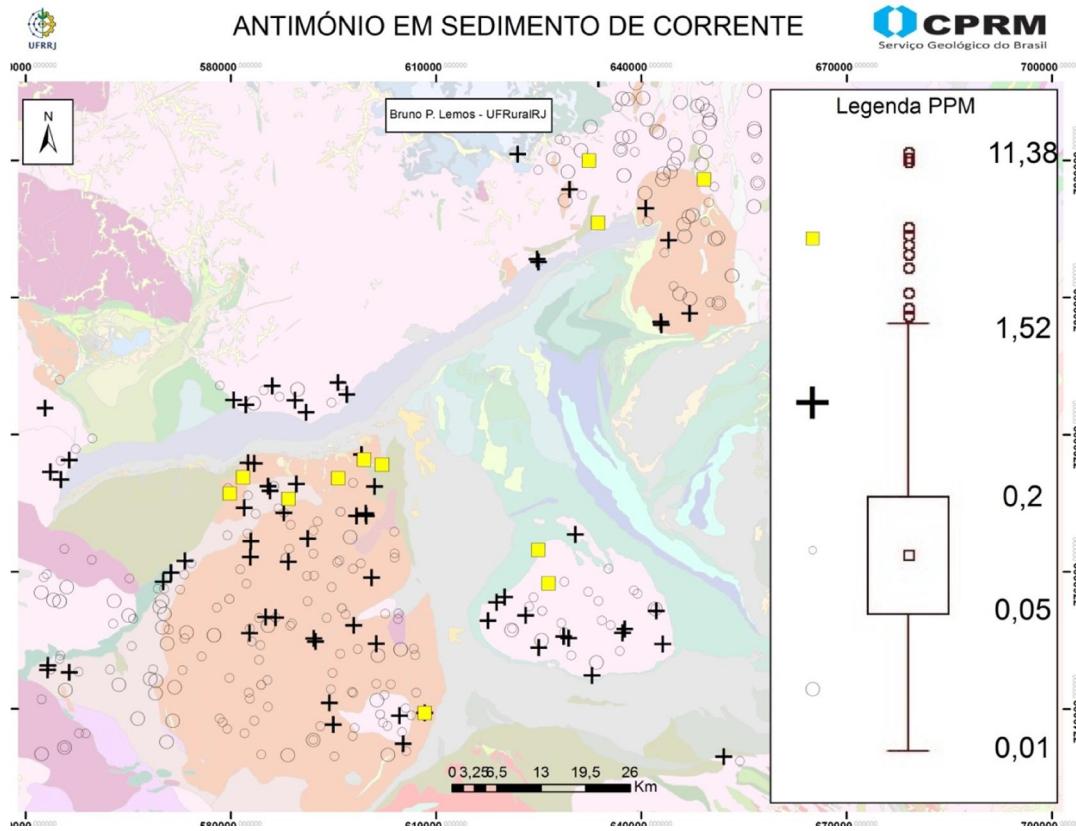


Figura 18: Mapa de concentração de antimônio na área de estudo.

A concentração de antimônio está provavelmente relacionada a uma ampla zona metalogenética caracterizada por hidrotermalismo que afetou diversas rochas metamórficas que atuaram como hospedeiras para veios e zonas hidrotermalizadas.

Arsênio: A concentração de arsênio está distribuída principalmente nas bordas dos agrupamentos que compõem a área de estudo, sendo a sua maior concentração no agrupamento Bação onde apresenta um ponto com anomalia de 3^a ordem. O agrupamento Bonfim também apresenta uma anomalia de 3^a ordem no que concerne o elemento em questão (figura 19).

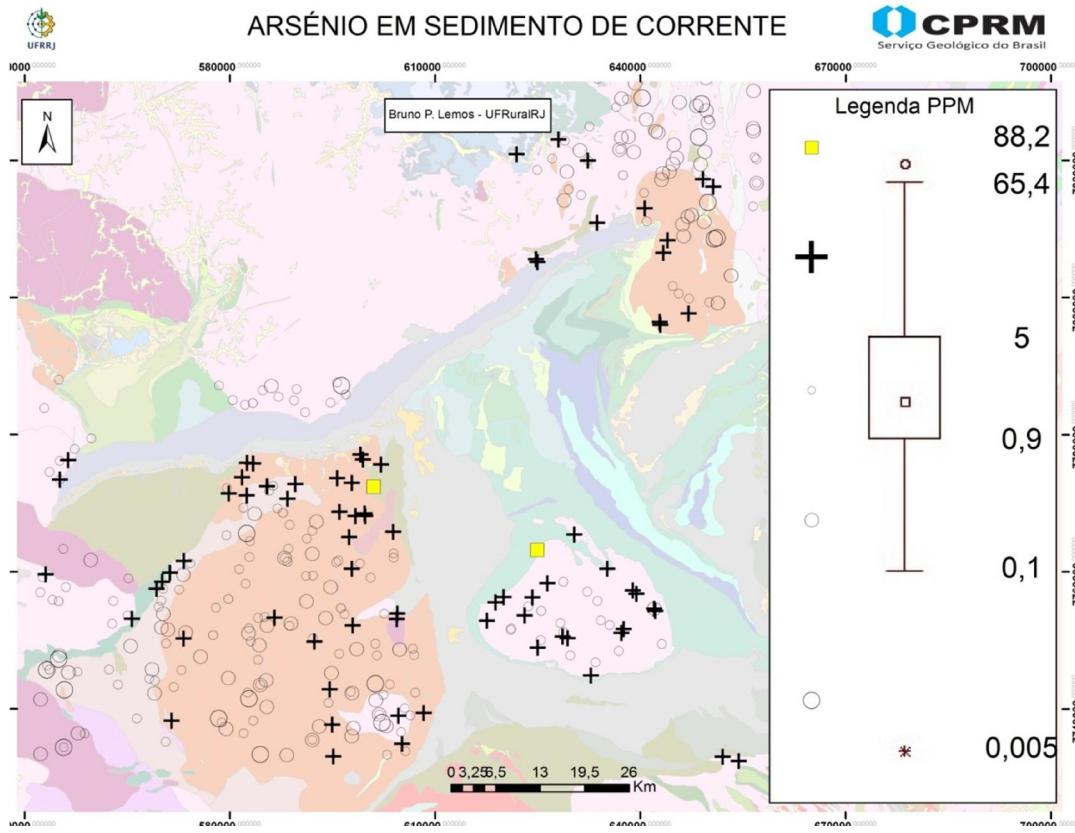


Figura 19: Mapa de concentração de arsênio na área de estudo.

A concentração de arsênio está, provavelmente, relacionada a zonas hidrotermalizadas em rochas básicas enriquecidas em ferro e seus equivalentes metamórficos e formações ferríferas em geral.

Lantânia: A concentração de lantânia está situada na região nordeste do agrupamento Belo Horizonte e amplamente distribuído nos agrupamentos Bonfim e Gnaissé Cláudio sendo que, este último, apresenta uma anomalia de 3^a ordem, junto ao agrupamento Bação (figura 20).

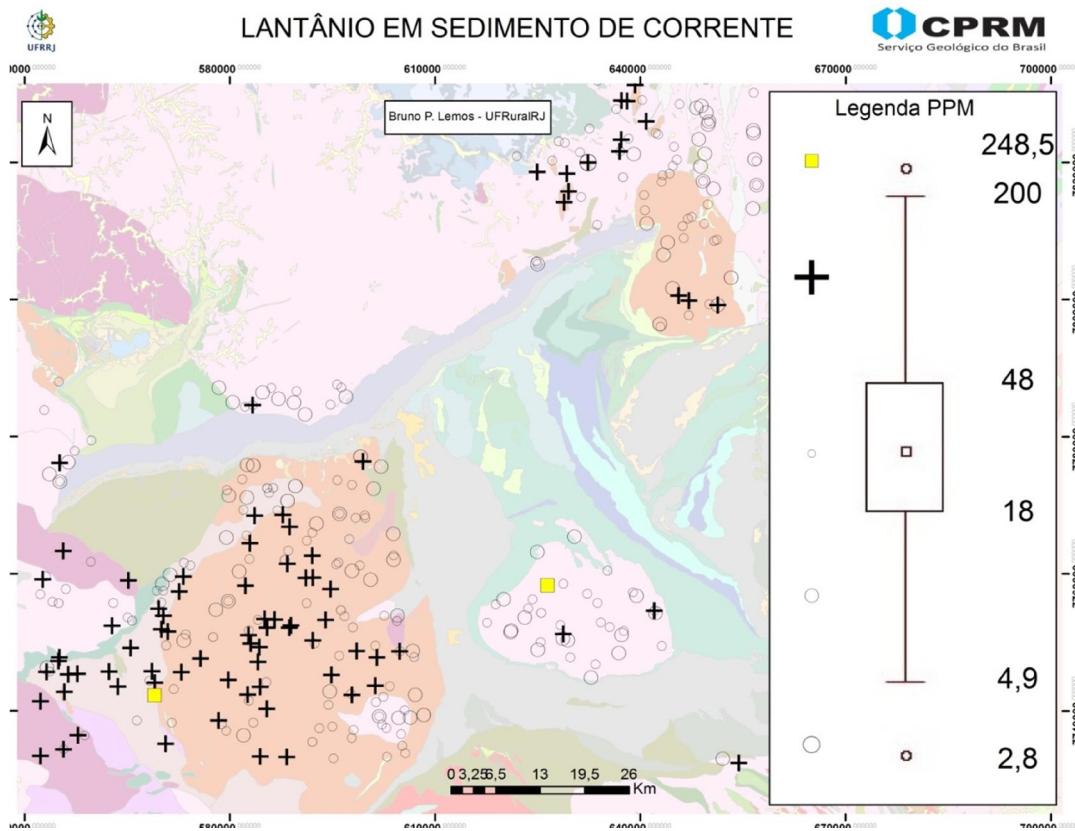


Figura 20: Mapa de concentração de lantânia na área de estudo.

A concentração de lantânio está provavelmente associada com a exposição de pegmatitos ricos em minerais de fósforo ou rochas sedimentares metamorfizadas ricas neste elemento.

Cério: A concentração de cério está mais presente nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim, ambos com várias anomalias de 3^a ordem. O agrupamento Bação também apresenta uma anomalia de 3^a ordem, apesar de sua distribuição e concentração serem mais baixas em termos gerais (figura 21).

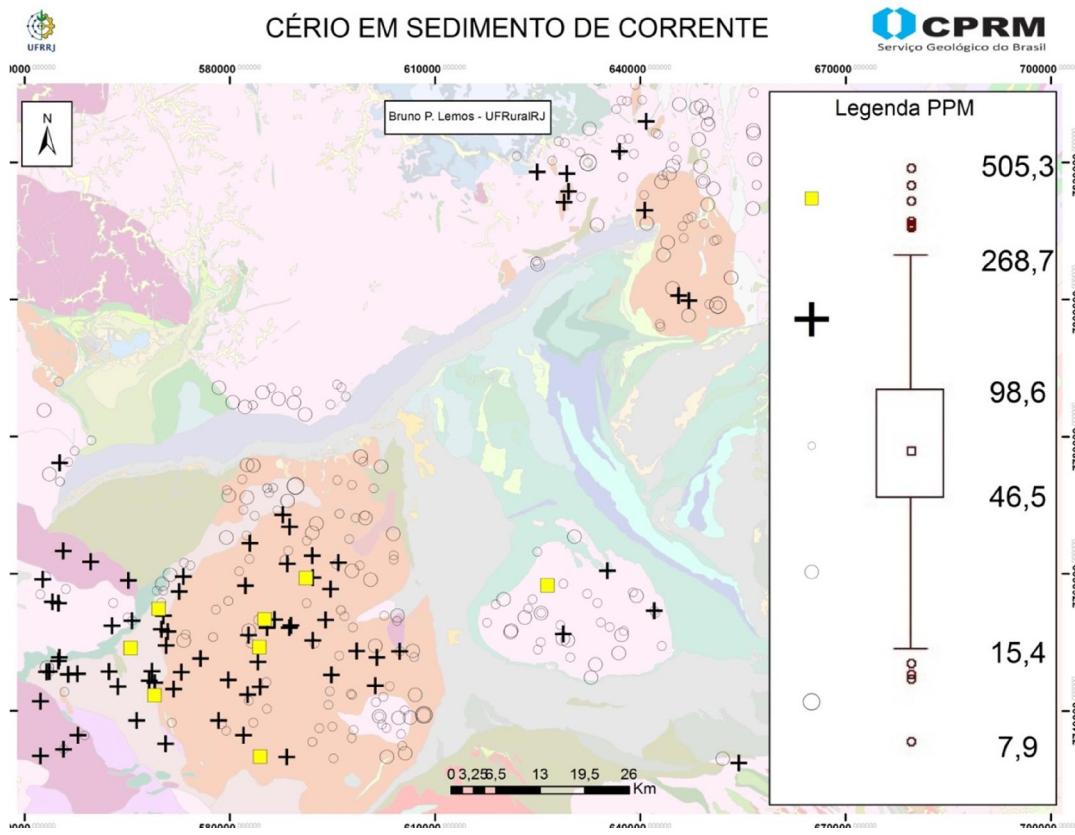


Figura 21: Mapa de concentração de cério na área de estudo.

A concentração de cério está, provavelmente, associado com a exposição intempérica prolongada de pegmatitos ricos em fosfato ou rocha metamórfica onde este elemento esteja presente.

Níquel: A maior parte da concentração de níquel encontra-se distribuída no agrupamento Gnaisse Cláudio. Os outros agrupamentos apresentam uma distribuição mais homogênea. Três agrupamentos apresentam anomalias de 3^a ordem, são eles: agrupamento Baçao, Gnaisse Cláudio e Bonfim (figura 22).

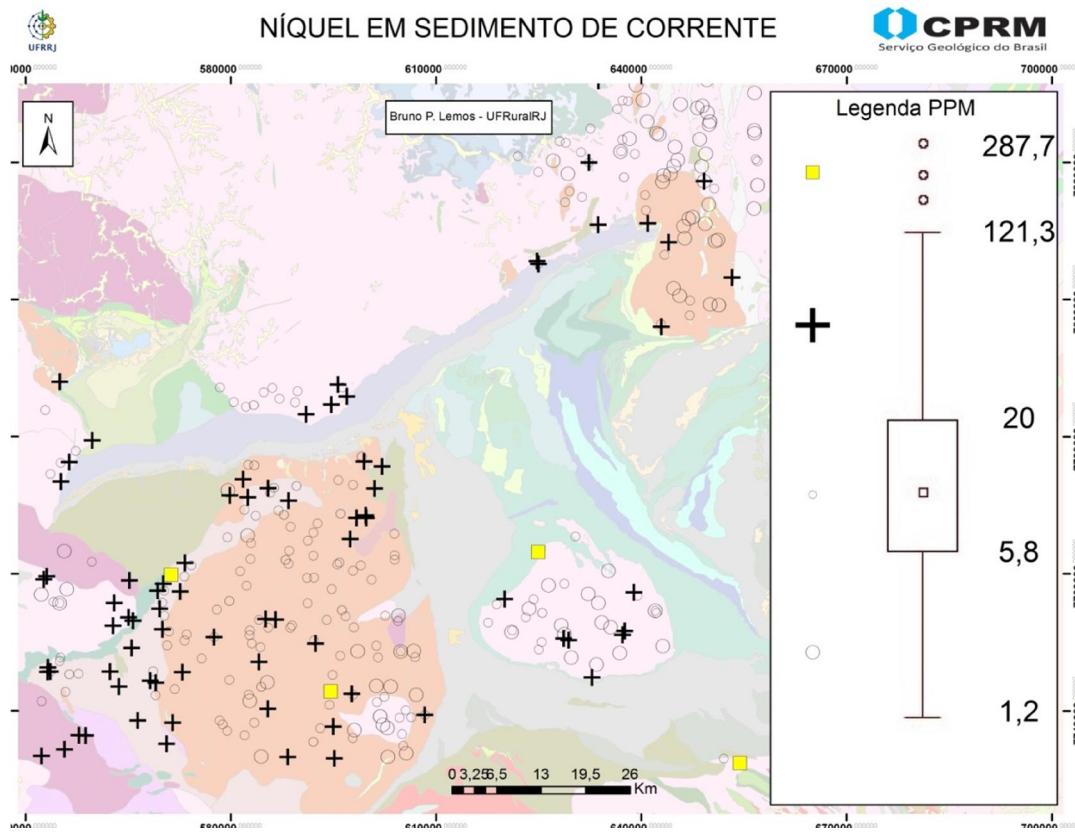


Figura 22: Mapa de concentração de níquel na área de estudo.

A concentração de níquel está possivelmente relacionada com laterização causada pelo intemperismo de rochas máficas-ultramáficas.

Zinco: A concentração de zinco está melhor representada nos agrupamentos Gnaisse Cláudio e Bonfim, que também apresentam anomalias de 3^a ordem. Os agrupamentos Belo Horizonte e Baçao, além de apresentarem anomalias de 3^a ordem, também apresentam anomalias de 2^a ordem, assim como o agrupamento Caeté (figura 23).

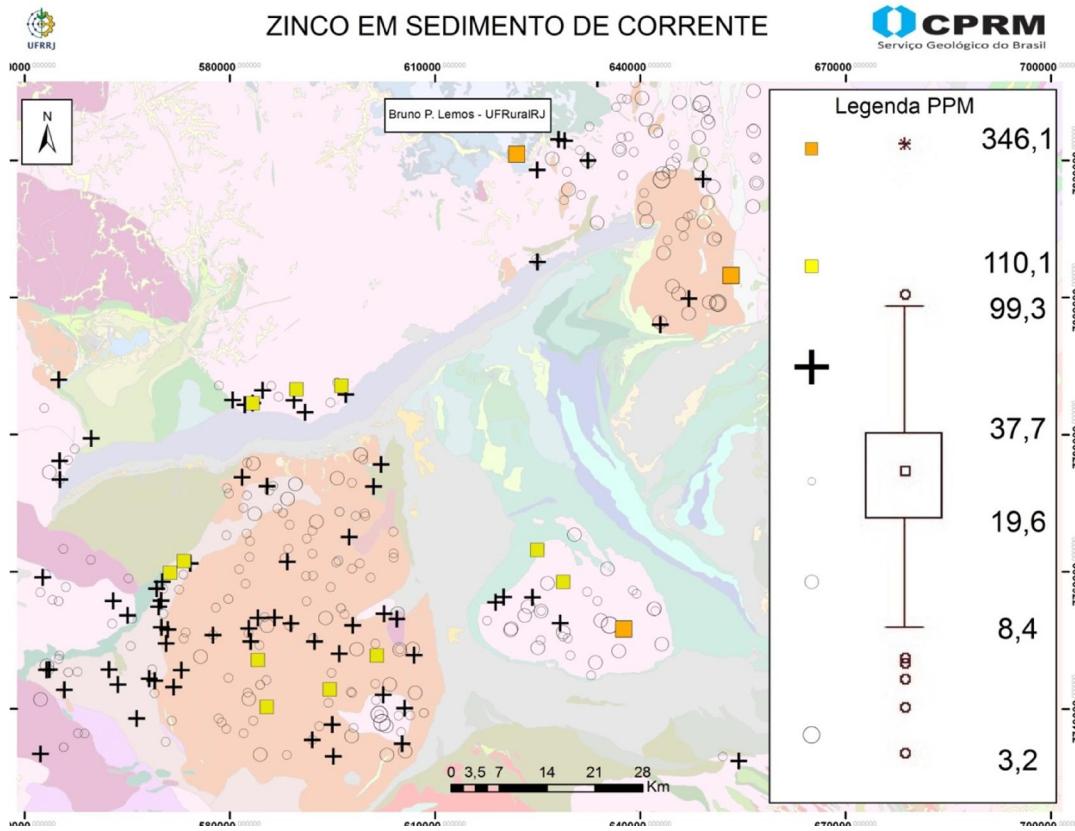


Figura 23: Mapa de concentração de zinco na área de estudo.

A concentração de zinco está provavelmente associada com zonas de cisalhamento, em faixas de alta deformação, gerando fluxos hidrotermais a partir dos quais precipitam os minerais ricos em zinco, e também há presença de depósitos exalativo de Esfalerita em rochas sedimentares.

Chumbo: A concentração de chumbo está melhor distribuída nos agrupamentos Bação, Gnaissé Cláudio e Bonfim, apresentando-se baixíssima no agrupamento Caeté (figura 24).

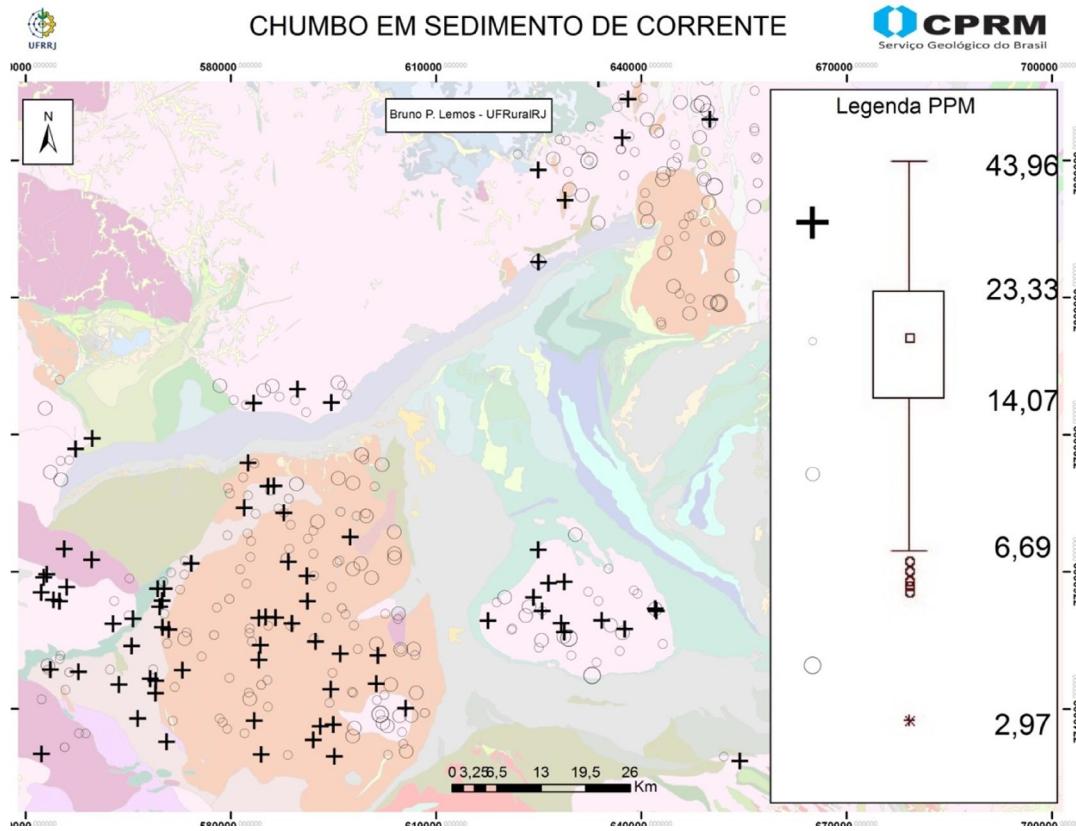


Figura 24: Mapa de concentração de chumbo na área de estudo.

A concentração do chumbo provavelmente está associada com veios hospedados preferencialmente em sequências vulcânicas e vulcanogênicas, geneticamente associados a sistemas epitermais.

Cobre: A concentração de Cu está mais distribuída nos limites entre os agrupamentos Bonfim e Gnaisse Cláudio e na borda sudeste do agrupamento Belo Horizonte. Os agrupamentos Bação e Bonfim apresentam anomalias de 3^a ordem (figura 25).

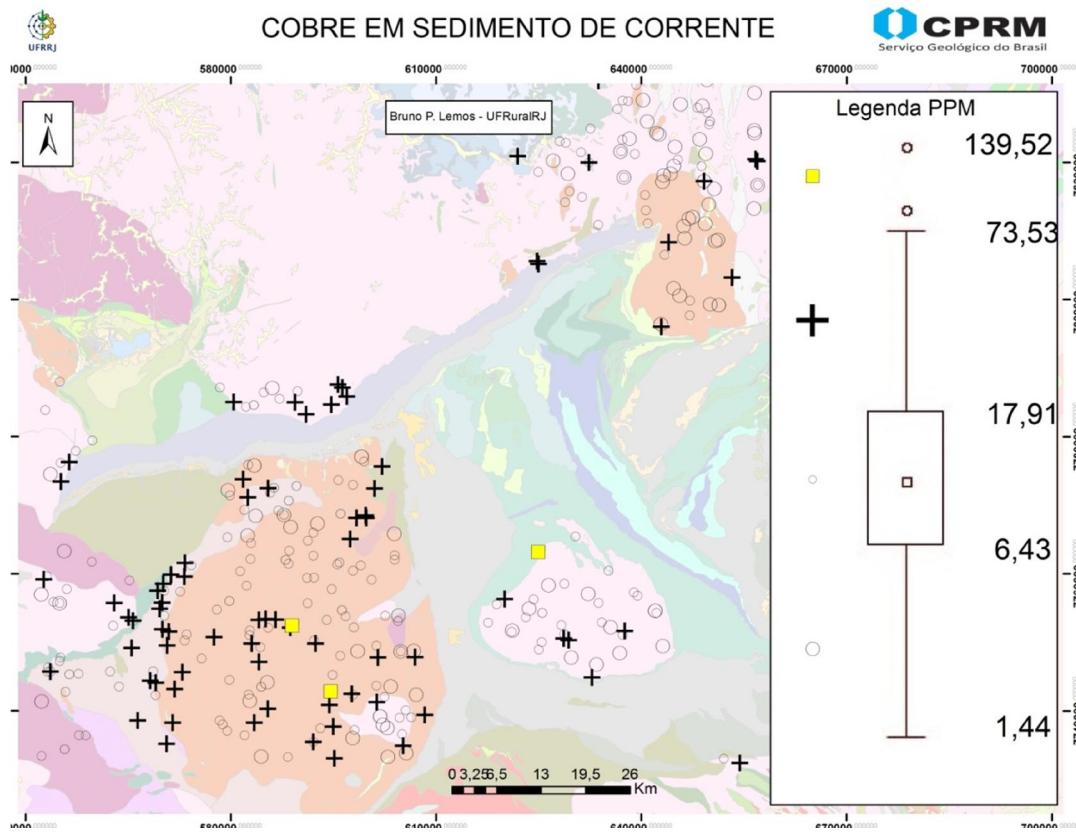


Figura 25: Mapa de concentração de cobre na área de estudo.

A concentração de cobre deve estar associada provavelmente a eventos termais relacionados com metamorfismo de baixo grau e intrusões máficas em áreas de formações ferríferas bandadas.

Lítio: A concentração de lítio na área de estudo está predominantemente localizada nos agrupamentos Bação, Gnaisse Cláudio e Bonfim. Apresenta anomalias de 3^a ordem nos agrupamentos Bação e Gnaisse Cláudio (figura 26).

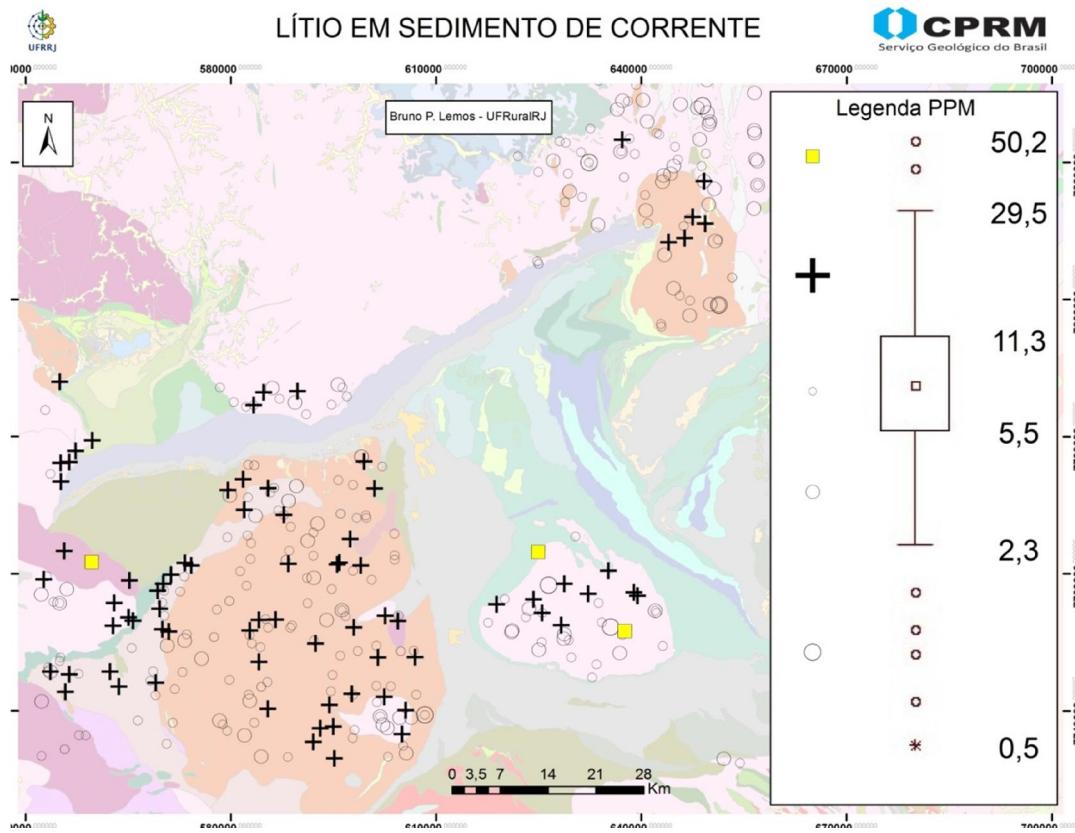


Figura 26: Mapa de concentração de lítio na área de estudo.

A concentração de lítio está provavelmente associada com o intemperismo de pegmatitos graníticos mais evoluídos do tipo LCT.

Ouro: O ouro está amplamente distribuído por todos os agrupamentos estudados, apresentando anomalias de 2^a ordem nos agrupamentos Belo Horizonte, Caeté e Bonfim e anomalias de 3^a ordem em todos os agrupamentos (figura 27).

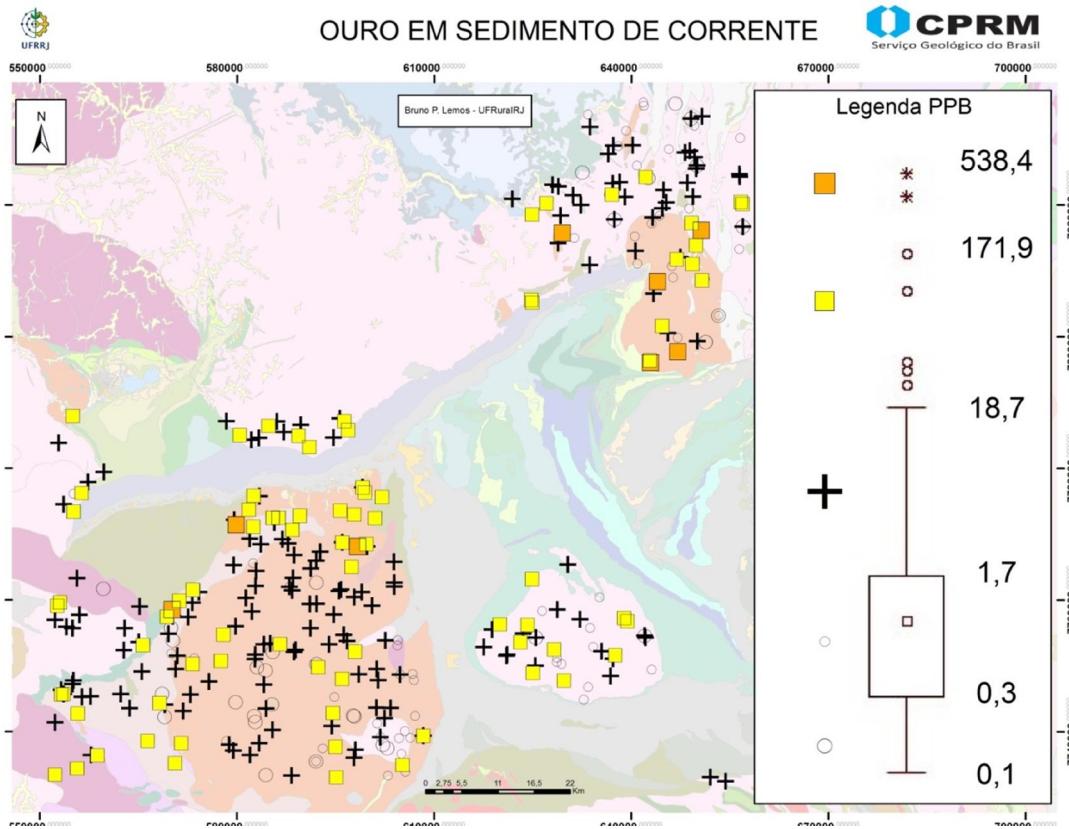


Figura 27: Mapa de concentração de ouro na área de estudo.

A concentração de ouro está, muito provavelmente, relacionada com zonas de cisalhamento e zonas hidrotermalizadas, principalmente constituídas por rochas máficas e substituições sulfetadas em formações ferríferas bandadas de idade predominantemente arqueanas.

Capítulo 4

4.1 Interpretações dos dados geoquímicos segundo a estatística bivariada e multivariada

A análise estatística de correlação (bivariada) dos principais elementos químicos e a análise de agrupamento (multivariada) foram utilizadas para ajudar na interpretação dos dados geoquímicos. Foi escolhida a correlação de Spearman para a análise de correlação, pois esse método não requer uma distribuição normal e nem uma relação linear entre suas variáveis, ou seja, representa uma análise estatística não-paramétrica. Esta análise tem por objetivo informar o grau de afinidade de um elemento com os demais, criando-se grupos de afinidades geoquímicas semelhantes.

Para a obtenção desses grupos, foi levado em consideração que valores superiores a 0,90 entre dois elementos químicos possuem uma correlação elevada; valores entre 0,89 e 0,70 possuem correlação mediana e valores menores ou iguais a 0,69 possuem uma correlação não significativa, de acordo com os padrões estabelecidos pela CPRM. Um grande número de variáveis não apresenta uma boa visualização e a determinação dos grupos com as associações geoquímicas. Para resolver este problema é usada a estatística multivariada, com a análise dos principais fatores. Esta é utilizada para identificar importantes componentes ou fatores que explicam a variância de um sistema. Outra vantagem na utilização desse método é reduzir a quantidade de variáveis em pequenos números de índices, preservando as relações dos dados originais.

4.1.1 Análise de correlação (estatística bivariada)

Para que a variância do sistema seja melhor explicada, foi necessário uma triagem nos elementos químicos com base na análise de correlação e, somente os escolhidos foram utilizados na estatística multivariada.

Em resultado, foram utilizados somente os elementos que apresentaram na estatística bivariada uma correlação superior ou igual a 0,70 para prosseguir para a análise multivariada. Os valores das anomalias (*outliers*) e *whiskers*, obtidos pelas análises dos *box-plots*, foram retirados para uma melhor confiabilidade nos valores da correlação.

Tabela 4: Matrizes de correlação dos elementos analisados para sedimentos de corrente.

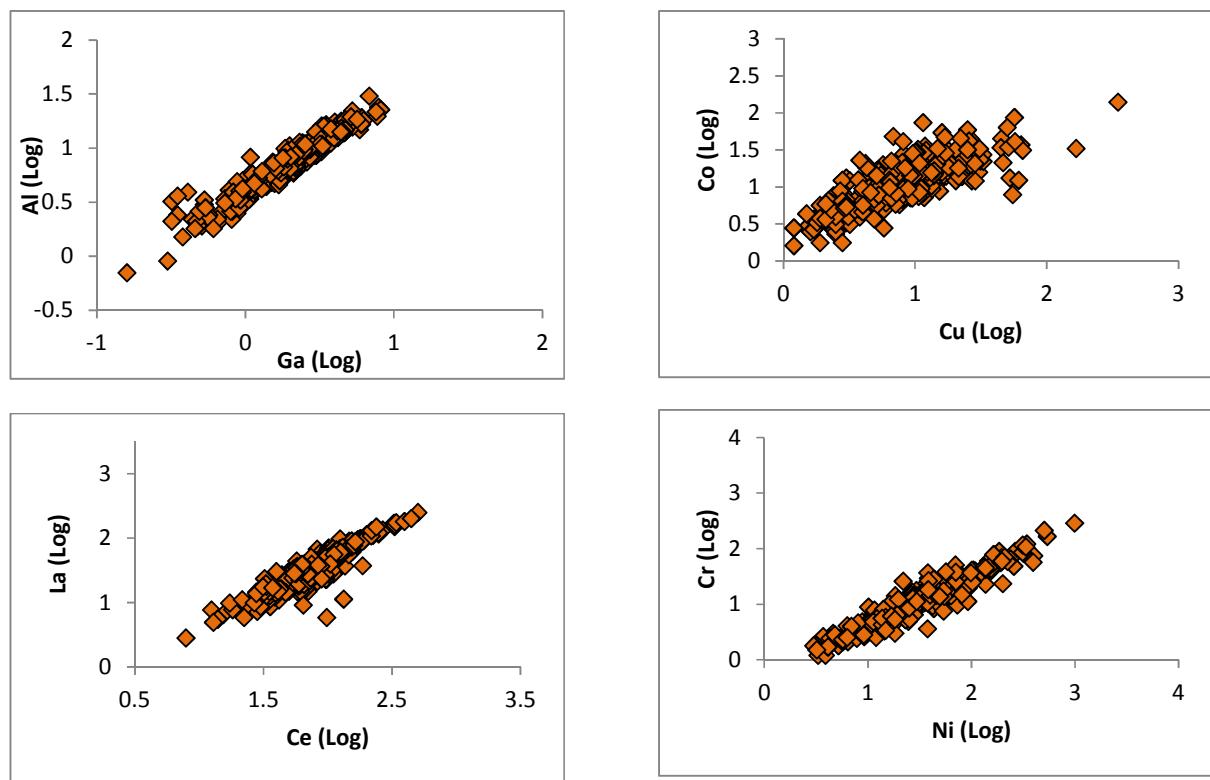
	Al (%)	Ba (PPM)	Be (PPM)	Ca (%)	Ce (PPM)	Co (PPM)	Cr (PPM)	Cs (PPM)	Cu (PPM)	Fe (%)	Ga (PPM)	Hf (PPM)	K (%)	La (PPM)	Li (PPM)	Mg (%)	Mn (PPM)	Mo (PPM)	Ni (PPM)	P (%)	Rb (PPM)	Sc (PPM)	Se (PPM)	Sn (PPM)	Ti (PPM)	Th (PPM)	V (PPM)	Zn (PPM)	Zr (PPM)
Al (%)	1,00																												
Ba (PPM)	0,40	1,00																											
Be (PPM)	0,65	0,45	1,00																										
Ca (%)	0,34	0,73	0,33	1,00																									
Ce (PPM)	0,31	0,16	0,25	0,15	1,00																								
Co (PPM)	0,39	0,55	0,51	0,49	0,12	1,00																							
Cr (PPM)	0,43	0,30	0,45	0,30	0,14	0,79	1,00																						
Cs (PPM)	0,51	0,21	0,71	0,14	0,14	0,31	0,29	1,00																					
Cur (PPM)	0,49	0,43	0,53	0,41	0,12	0,82	0,81	0,30	1,00																				
Fe (%)	0,41	0,29	0,43	0,28	0,00	0,68	0,67	0,16	0,67	1,00																			
Ga (PPM)	0,96	0,38	0,69	0,31	0,35	0,47	0,50	0,56	0,57	0,46	1,00																		
Hf (PPM)	0,32	-0,11	0,34	-0,08	0,19	0,22	0,29	0,17	0,23	0,45	0,34	1,00																	
K (%)	0,37	0,43	0,55	0,36	0,19	0,24	0,16	0,43	0,24	0,19	0,31	0,27	1,00																
La (PPM)	0,10	0,14	0,16	0,89	0,01	0,01	0,08	-0,02	-0,18	0,12	0,06	0,26	1,00																
Li (PPM)	0,64	0,51	0,78	0,40	0,27	0,47	0,44	0,81	0,46	0,25	0,65	0,17	0,57	0,21	1,00														
Mg (%)	0,30	0,57	0,52	0,54	0,24	0,47	0,37	0,45	0,42	0,14	0,31	0,01	0,69	0,31	0,66	1,00													
Mn (PPM)	0,28	0,58	0,40	0,49	0,03	0,76	0,53	0,14	0,58	0,72	0,31	0,22	0,21	-0,07	0,21	0,26	1,00												
Mo (PPM)	0,26	0,09	0,30	0,12	0,00	0,56	0,61	0,24	0,54	0,69	0,32	0,34	-0,02	-0,21	0,19	0,00	0,50	1,00											
Ni (PPM)	0,43	0,50	0,40	0,13	0,83	0,94	0,26	0,84	0,71	0,47	0,30	0,28	0,04	0,49	0,44	0,64	0,57	1,00											
P (%)	0,52	0,55	0,50	0,54	0,17	0,63	0,55	0,22	0,68	0,66	0,66	0,68	0,21	0,03	0,40	0,30	0,57	0,43	0,60	1,00									
Rb (PPM)	0,40	0,34	0,67	0,24	0,32	0,23	0,12	0,75	0,19	0,06	0,43	0,20	0,76	0,71	0,34	0,66	0,13	0,01	0,16	0,17	1,00								
Sc (PPM)	0,66	0,44	0,64	0,37	0,21	0,76	0,76	0,45	0,65	0,59	0,75	0,28	0,25	0,02	0,57	0,48	0,48	0,48	0,72	0,63	0,33	1,00							
Se (PPM)	0,44	0,24	0,35	0,19	0,23	0,36	0,39	0,27	0,35	0,46	0,22	0,10	0,09	0,34	0,18	0,25	0,26	0,33	0,18	0,43	1,00								
Sn (PPM)	0,70	0,17	0,73	0,18	0,34	0,36	0,39	0,67	0,39	0,41	0,76	0,44	0,35	0,15	0,61	0,26	0,28	0,40	0,35	0,40	0,55	0,38	1,00						
Sr (PPM)	0,25	0,76	0,14	0,83	0,15	0,29	0,11	-0,03	0,21	0,09	0,18	-0,20	0,32	0,20	0,27	0,45	0,34	-0,11	0,22	0,43	0,14	0,16	0,08	-0,04	1,00				
Tl (PPM)	0,27	-0,02	0,24	0,03	0,88	0,01	0,08	0,21	0,01	-0,02	0,31	0,26	0,22	0,34	0,17	-0,04	-0,05	0,05	0,06	0,39	0,12	0,12	0,38	0,01	1,00				
Ti (%)	0,22	0,11	0,39	0,19	0,27	0,46	0,51	0,29	0,48	0,38	0,26	0,46	0,41	0,26	0,37	0,49	0,28	0,26	0,51	0,23	0,35	0,46	0,14	0,33	0,03	0,30	1,00		
Tl (PPM)	0,46	0,39	0,71	0,24	0,30	0,31	0,14	0,79	0,24	0,12	0,51	0,17	0,58	0,26	0,72	0,57	0,19	0,11	0,17	0,26	0,91	0,40	0,23	0,59	0,13	0,34	1,00		
V (PPM)	0,52	0,37	0,54	0,35	0,14	0,82	0,81	0,35	0,87	0,67	0,63	0,26	0,15	0,45	0,42	0,51	0,53	0,76	0,63	0,44	0,14	0,04	0,52	0,27	1,00				
Zn (PPM)	0,62	0,66	0,67	0,60	0,23	0,72	0,60	0,48	0,67	0,14	0,48	0,15	0,70	0,65	0,48	0,46	0,11	0,39	0,54	0,69	0,72	0,49	0,37	0,48	0,11	0,00	1,00		
Zr (PPM)	0,34	-0,08	0,34	-0,06	0,24	0,25	0,32	0,16	0,27	0,46	0,36	0,57	0,26	0,10	0,18	0,02	0,24	0,35	0,33	0,11	0,19	0,30	0,24	0,15	0,29	0,16	1,00		

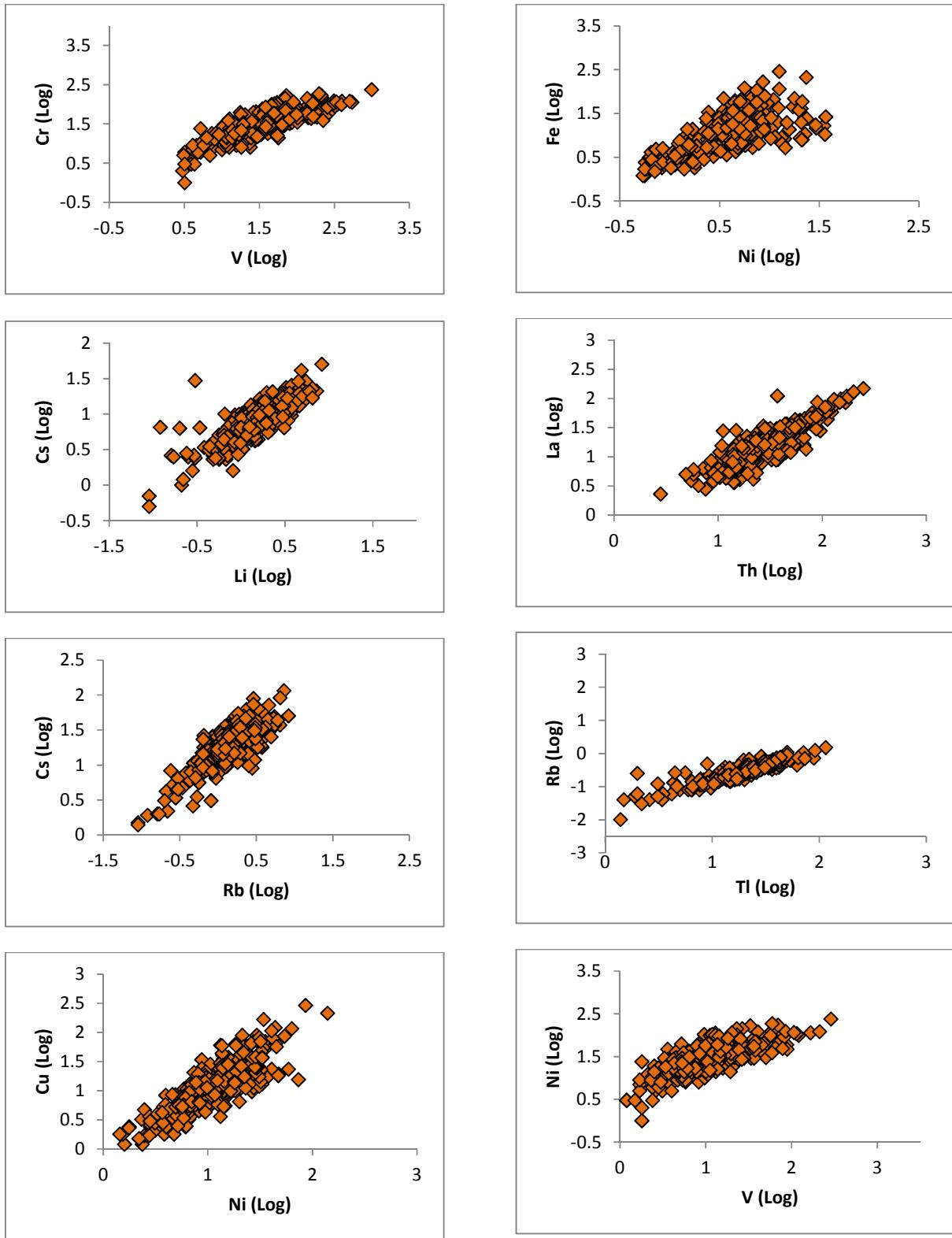
A tabela 4 mostra a matriz com os melhores valores de correlação (em vermelho) entre os 53 elementos analisados para as amostras de sedimentos de corrente. Observam-se na tabela correlações significativas ($\geq 0,70$) entre os elementos Al e Ga e Sn; Ba e Ca e Sr; Be e Cs, Li, Sn e Tl; Ca e Sr; Ce e La e Th; Co e Cr, Cu, Mn, Ni, Sc, V, e Zn; Cr e Cu, Ni, Sc e V; Cs e Li, Rb e Tl; Cu e Ni, Sc, V e Zn; Fe e Mn e Ni; Ga e Sc e Sn; Hf e Zr; K e Rb; La e Th; Li e Rb, Tl e Zn; Ni e Sc e V; P e Zn; Rb e Tl; Sc e V e Zn.

As correlações desses elementos pode indicar a matriz que formam as rochas da região de estudo, por exemplo, Cr e V e Ni e Co sugerem a presença de rochas maficas; as correlações entre Ba e Sr indicam influência de rochas graníticas e processos hidrotermais, da mesma forma que os ETR La e Ce; boas correlações entre Al e Ga e Sn indicam processos de laterização, assim como podem indicar processos de adsorção destes metais-traços por argilominerais em sedimentos de corrente. Essas correlações ainda podem evidenciar processos supergênicos ou hipogênicos, assim como a influência de minerais e rochas específicas.

Os elementos que apresentaram uma correlação baixa ($< 0,70$) foram excluídos da análise multivariada, com o intuito de obter uma análise fatorial mais robusta. A figura 28 mostra alguns dos elementos com maiores valores significativos de correlação nos cinco agrupamentos geológicos da área de estudo.

Figura 28: Gráficos representando as melhores correlações entre os elementos para as amostras de sedimentos de corrente.





4.1.2 Transformação dos dados para as análises multivariadas

Neste trabalho, os dados originais foram pré-processados antes da sua utilização, pois desta forma, pode-se gerar fatores com informações mais robustas sobre os processos que controlam a distribuição geoquímica nos sedimentos de corrente. De acordo com Aitchison (1986), os dados geoquímicos de análise multi-elementar podem ser considerados como dados compostionais onde os elementos analisados são porcentagens de um todo, ou seja, a soma dos valores de todos os elementos analisados se torna uma constante. Neste caso, em se tratando de unidades em parte por milhão (ppm), o valor constante seria 1.000.000 ppm, equivalente a 100%. No entanto, os elementos analisados possuem diferentes distribuições e variabilidades. Para isso, e com base no mesmo autor, os dados foram transformados pela razão-log centralizada (*centred log-ratio*, CLR) com o uso do programa CoDaPack.

4.1.3 Análise estatística multivariada (análise de principais fatores)

O método utilizado para a obtenção das novas variáveis transformadas foi a Varimax normalizado, o qual apresenta as melhores correlações das variáveis (no caso, os elementos) em relação aos fatores (Reimann et al., 2008).

Para selecionar a quantidade dos fatores que são relevantes para esta análise, foi utilizado a ferramenta de teste *Scree* (Figura 29), onde se gera um gráfico com os autovalores (*eigenvalues* – valor representativo da variância) de cada valor gerado. A partir deste gráfico, foi utilizado o critério de Kaiser, onde este considera os autovalores relevantes aqueles que apresentam peso igual ou maior que o valor 1. No caso, aplicando este critério, são escolhidos os primeiros cinco autovalores com peso maior que 1, para representar a composição geoquímica da área como um todo.

A Tabela a seguir (tabela 5) mostra a segregação dos elementos pela análise de principais fatores, mostrando fatores responsáveis pela variância do agrupamento dos elementos analisados nas amostras de sedimentos de corrente.

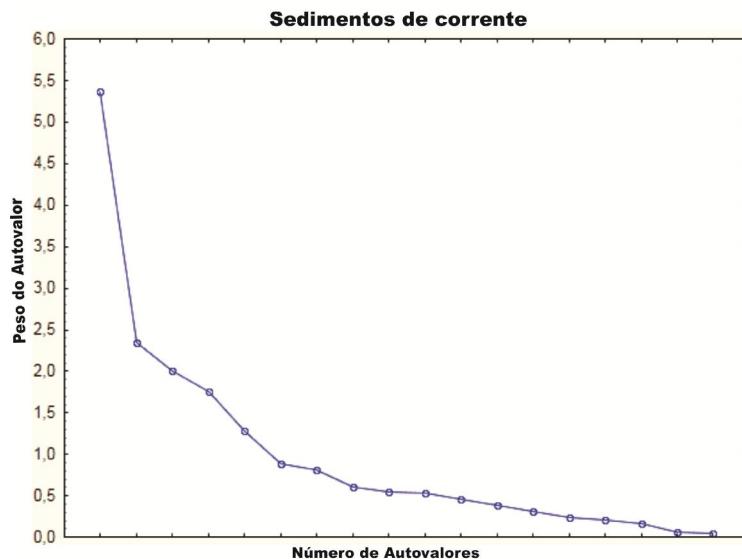


Figura 29: Gráfico do tipo Scree para a determinação da quantidade de fatores relevantes para a análise (critério de Kaiser) para as amostras de sedimentos de corrente.

Tabela 5: Segregação dos cinco primeiros fatores pela análise de principais fatores para amostras de sedimentos de corrente.

Elemento	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Al (%)	-0,0326	0,0008	0,0229	-0,0891	0,8524
Fe (%)	0,4873	-0,2516	-0,4477	-0,0251	-0,2690
Ca (%)	-0,1379	-0,0462	0,0266	-0,8176	-0,0353
Mg (%)	-0,8244	-0,1520	0,2138	-0,2877	-0,0341
Au (PPB)	0,2492	0,0093	-0,4917	0,0518	0,0061
As (PPM)	0,2751	-0,0764	-0,5683	0,3469	-0,1468
Sb (PPM)	0,3199	0,0990	-0,4570	0,1395	-0,6225
Pb (PPM)	0,0346	0,2448	0,6845	0,0252	0,4347
Cu (PPM)	0,1517	-0,8615	-0,1646	-0,0983	-0,0188
P (%)	0,4448	-0,1130	-0,1013	-0,6183	0,1744
Rb (PPM)	-0,7859	0,3271	0,1889	0,0382	0,3266
Ni (PPM)	0,1173	-0,7787	-0,2033	0,0390	-0,2579
Cs (PPM)	-0,5989	0,2506	-0,0966	0,3416	0,4978
Ba (PPM)	-0,2082	0,0871	0,1007	-0,7863	0,0542
K (%)	-0,7430	0,3242	0,1112	-0,2255	-0,0021
Ce (PPM)	0,0339	0,1885	0,9290	0,0591	0,0397
La (PPM)	-0,1195	0,2250	0,9016	-0,0054	-0,0707
V (PPM)	0,1221	-0,8738	-0,1275	0,0279	0,1908

As amostras de sedimentos de corrente analisadas apresentam cinco fatores que concentram 70,79% do total da variância do sistema. Foram levados em consideração os fatores acima de 0,50 ou abaixo de -0,50 dos valores de correlação dos elementos químicos das amostras de sedimentos de corrente mostrados pela análise multivariada (Tabela 5). Com isso os principais componentes geoquímicos dentro de cada fator foi estipulado, como mostrado na tabela 6.

Tabela 6: Autovalores e suas respectivas porcentagens de variância para cada fator segregado da análises de principais fatores em amostras de sedimentos de corrente.

Fatores	Associações Geoquímicas	Autovalores	Variancia %
Fator 1	K Cs Rb Mg (-)	5,3673	29,8184
Fator 2	Cu Ni V (-)	2,3388	12,9937
Fator 3	As (-)/Pb Ce La (+)	2,0095	11,1643
Fator 4	Ca P Ba (-)	1,7495	9,7195
Fator 5	Sb (-)/ Al (+)	1,2774	7,0967
Total		12,7425	70,7926

Lembrando que a interpretação desses mapas segue o mesmo raciocínio dos mapas de localização da distribuição dos elementos químicos, com a ressalva de que as anomalias positivas são representadas pelos quadrados pretos maiores, os quadrados pretos menores representam a faixa do *whisker* superior, as bolinhas pequenas representam a faixa de *background*, as bolinhas intermediárias representam os valores da faixa do *whisker* inferior, e as bolinhas maiores representam as anomalias negativas.

Para o fator 1, responsável por 29,81% da variância do sistema, foi observada uma correlação de *loadings* negativos entre K, Cs, Rb e Mg. Essa associação de elementos químicos reflete provavelmente a influência de rochas félsicas e imaturidade dos sedimentos. O Rb e Cs são indicadores de áreas com pegmatitos e junto com o K, podem indicar rochas intrusivas félsicas, inclusive as portadoras de ETR. como o U e Th. O Mg está associado a rochas maficas/ultramáficas ou carbonática, e secundariamente, com determinadas micas (figura 30).

Fator 1

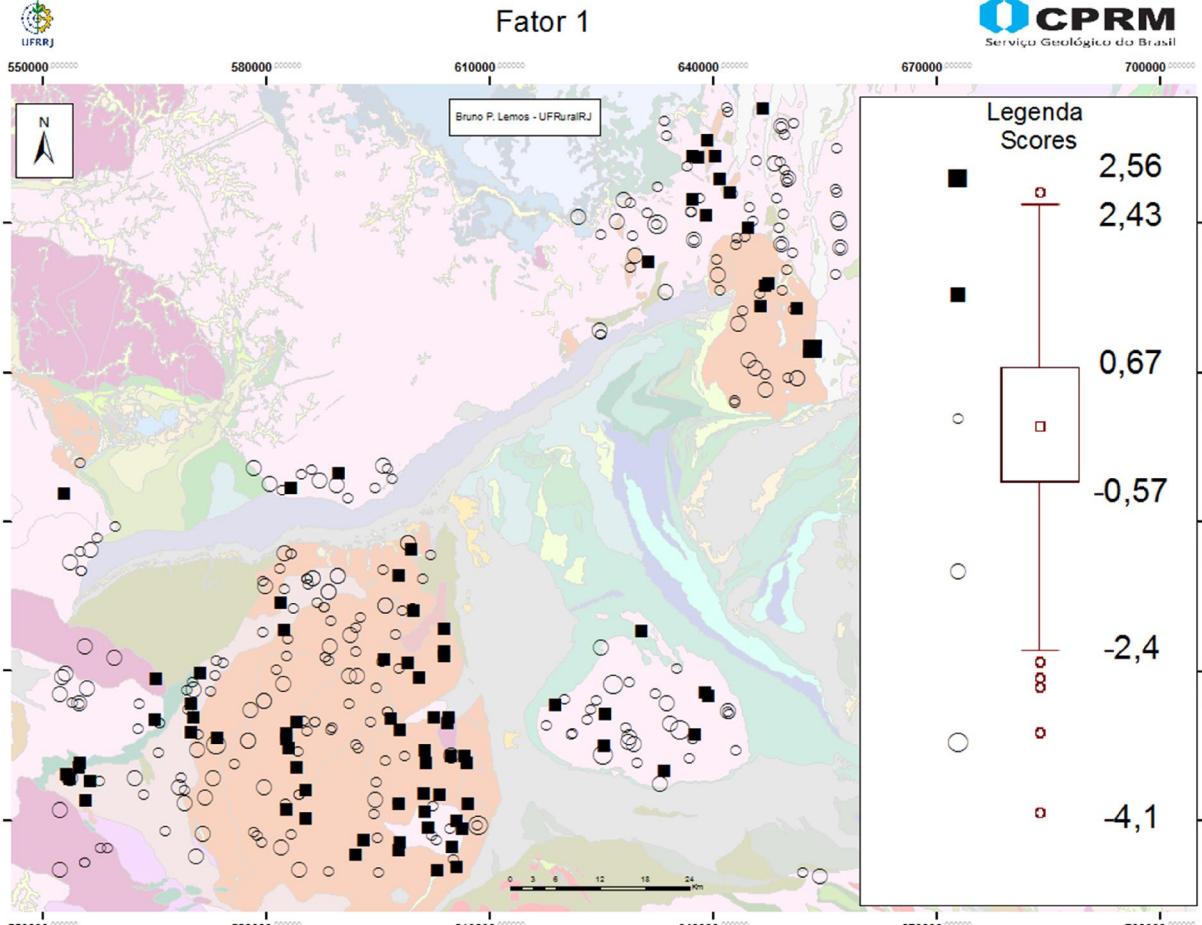


Figura 30: Mapa da associação química entre Rb, Cs, K e Mg correspondente ao fator 1.

O fator 2, responsável por 12,99% da variância do sistema, apresenta uma correlação geoquímica de coeficientes negativos entre Cu, Ni e V. Essa associação é característica de rochas maficas/ultramáficas e/ou minerais de minério(sulfetos e óxidos). O Cu é um indicador de mineralizações diversas na área, assim como um importante farejador para mineralizações auríferas (figura 31).

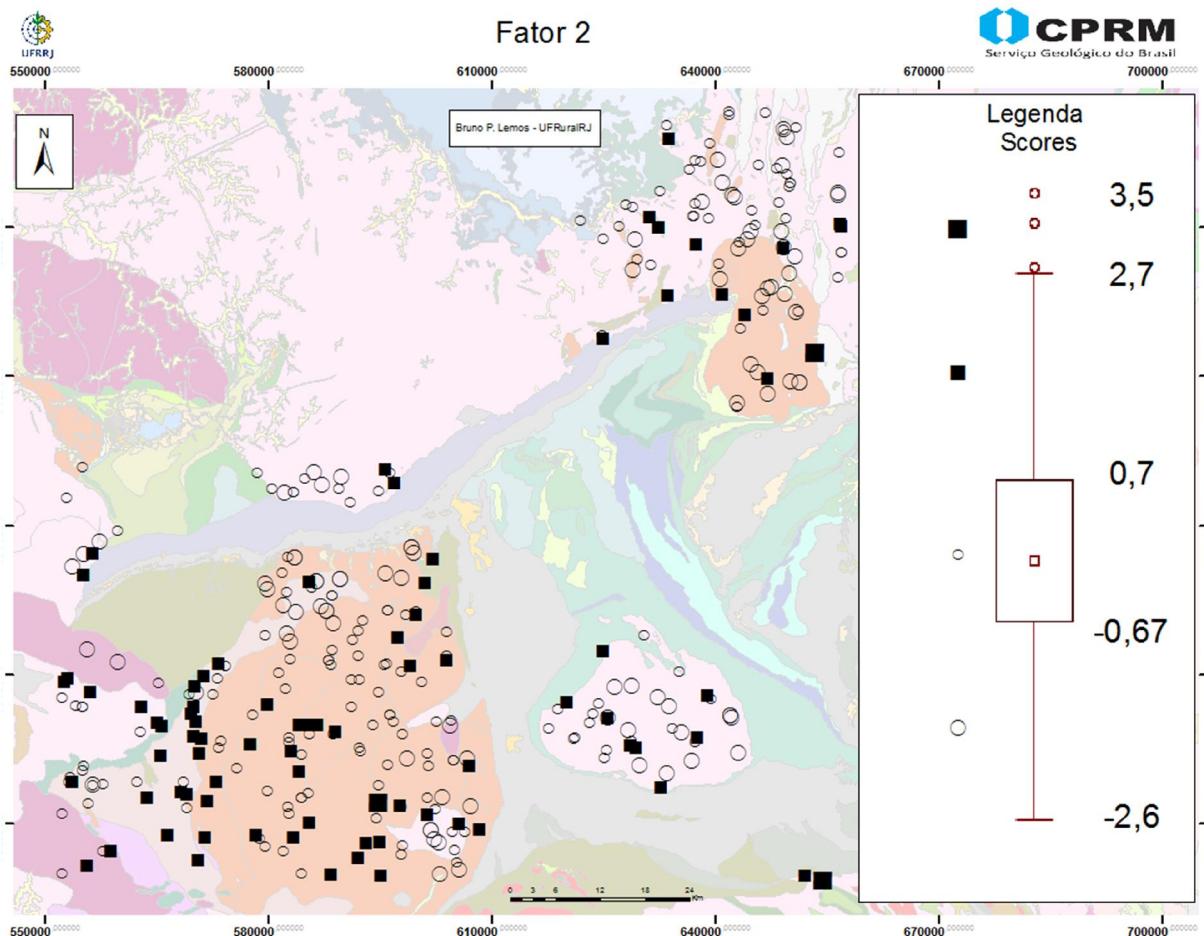


Figura 31: Mapa da associação química entre Cu, Ni e V correspondente ao fator 2.

O fator 3, que explica 11,16% da variância do sistema, apresenta um *loading* negativo para As, que é um importante elemento farejador de depósitos de ouro, assim como está associado a fases sulfetadas e minerais acessórios nas rochas. A interpretação desse mapa junto com o mapa do fator 2, pode ser interessante para a prospecção de ouro na área. A presença de *loadings* positivos entre os elementos Pb, Ce e La indicam a presença de rochas ácidas a intermediárias, especialmente intrusivas. O Pb está relacionado com a presença de sulfetos em geral (figura 32).

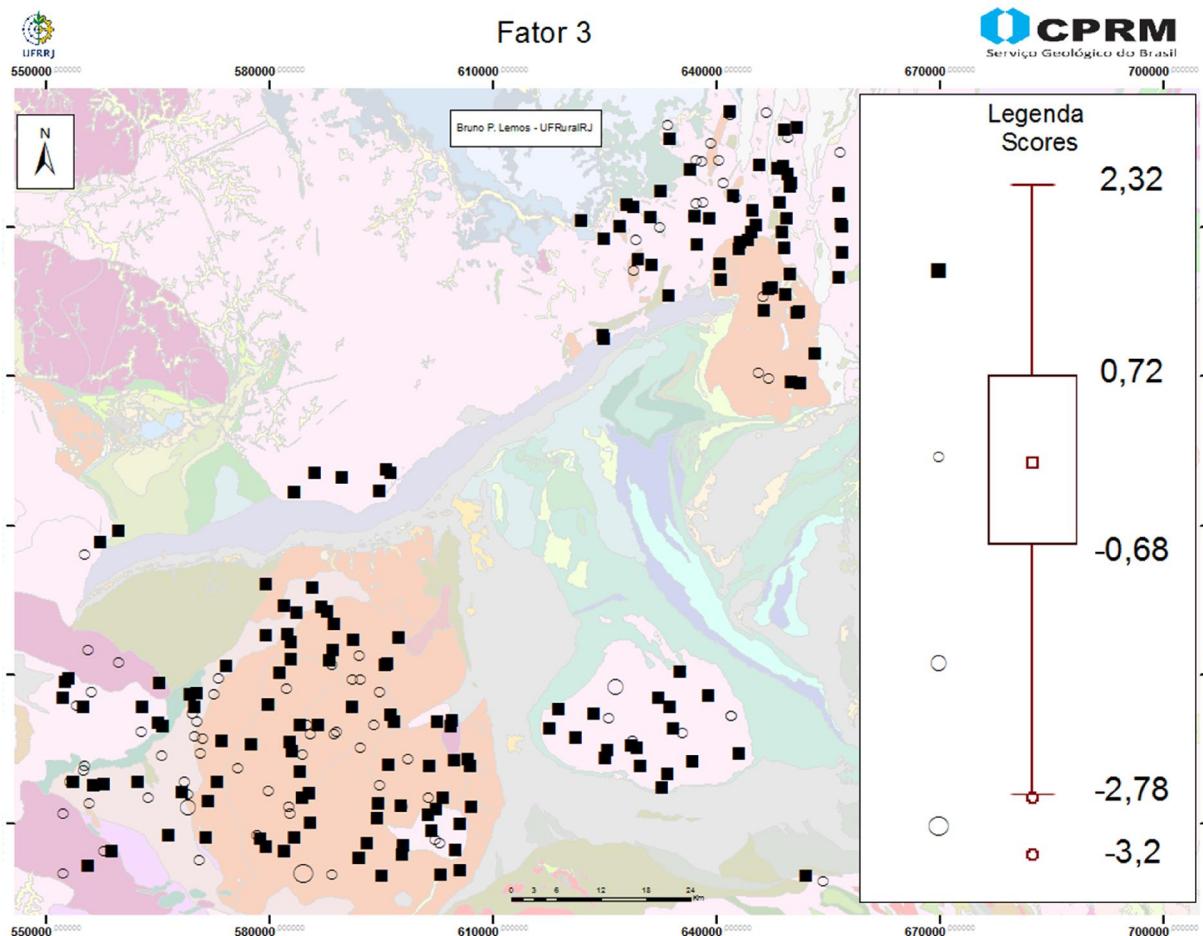


Figura 32: Mapa da associação química entre As, Pb, Ce e La correspondente ao fator 3.

O fator 4, que corresponde a 9,71% da variância do sistema, apresenta uma associação química negativa entre Ca, P e Ba. Esta associação está, provavelmente, ligada a ortognaisse, mais especificamente com o mineral acessório apatita, que pode apresentar em sua fórmula tanto o Ca quanto o P. O Ba é geralmente indicativo de rocha félsicas, em especial feldspatos alcalinos (figura 33).

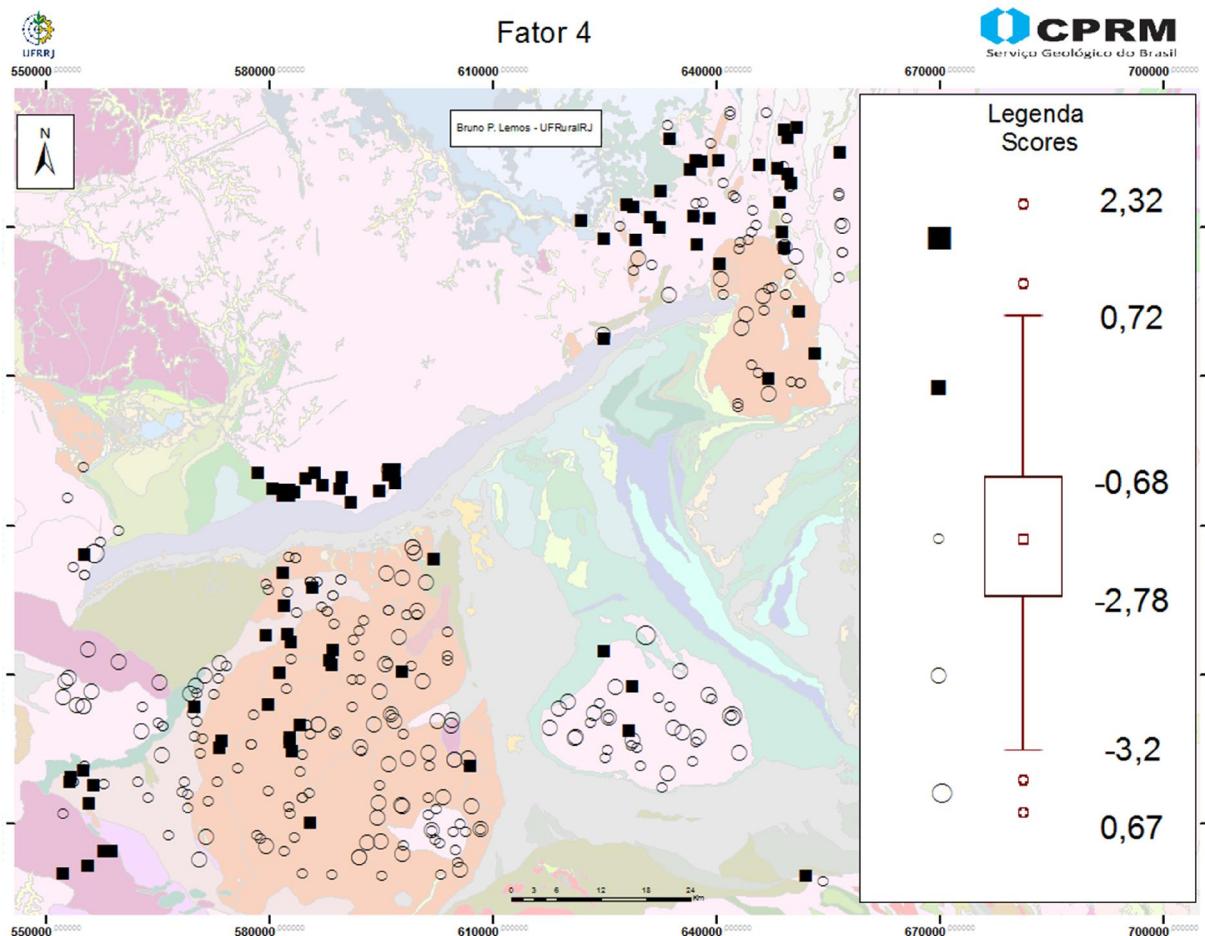


Figura 33: Mapa da associação química entre Ca, P e Ba correspondente ao fator 4.

O fator 5, que explica 7,09% da variância do sistema, apresenta um coeficiente negativo para Sb e um positivo para Al. O Al está relacionado com rochas félsicas e fases residuais como coberturas lateríticas. O Sb é um importante indicador de depósitos auríferos que deve ser estudado junto com os fatores 2 e 3 (figura 34).

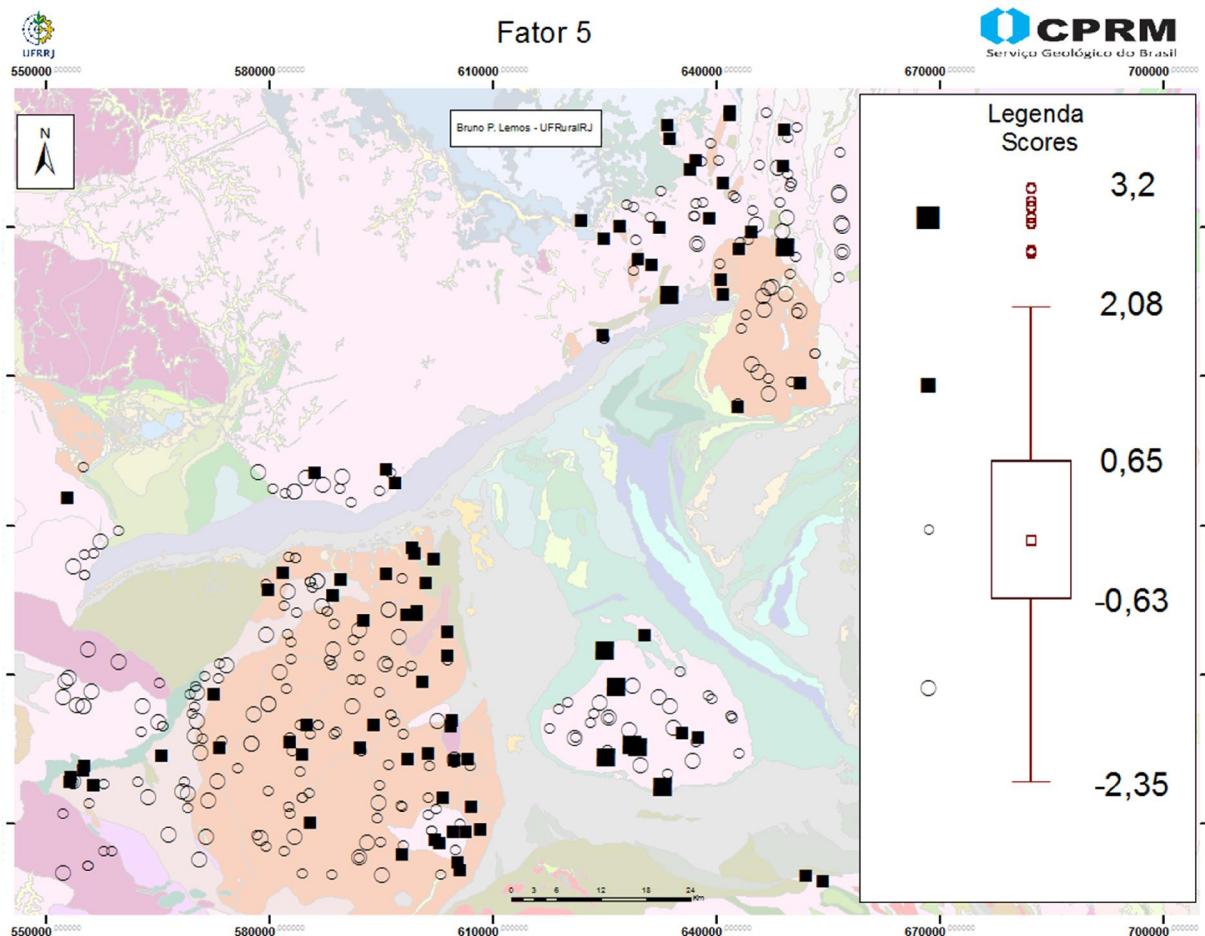


Figura 34: Mapa da associação química entre Sb e Al e correspondente ao fator 5.

Capítulo 5

5.1 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a metodologia empregada para a coleta de amostras, obtenção, tratamento e representação dos dados, mostrou-se eficiente na espacialização da distribuição de elementos químicos e na interpretação dos relacionamentos destes com o ambiente natural e, talvez, com processos antrópicos.

Os dados obtidos podem ser usados para uma melhor determinação de áreas mais favoráveis a concentração mineral, ajudando na prospecção e pesquisa de depósitos na região, e a entender a dispersão geoquímica de modo geral nas folhas estudadas. Os mapas de fatores parecem indicar concentrações de elementos químicos que estão associados a depósitos minerais, podendo ser material de estudos mais aprofundados no futuro.

Mas, em função da natureza regional dos sedimentos de corrente analisados, os resultados apresentados não necessariamente apresentam informações específicas sobre anomalias geoquímicas ou depósitos minerais isolados. É preciso verificar de maneira mais detalhada tendo em consideração os processos secundários pelos quais passaram os meios amostrais e seus locais de origem, bem como a influência antropológica na região.

Com esses dados pode-se elaborar estudos de modo mais integrado entre vários campos da ciência e outras áreas como, geologia, agronomia, medicina, meio ambiente e planejamento urbano, visando a implantação de políticas públicas e gerenciamento do uso e ocupação do solo de maneira mais sustentável e saudável à população.

Capítulo 6

6.1 Referencias Bibliográficas

- Alkmim F.F. e Marshak S. 1998.** - Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Cratonregion, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Res.*, 90:29-58.
- Alkmim, F.F. 1987.** - Modelo deposicional para a sequência de metassedimentos da Serra de Ouro Branco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Boletim Soc.Bras.Geo./Nucleo MG*, 6:47-68.
- Alkmim, F.F. Quade, H. & Evangelista, M.T.1988.** – Sobre a história da deformação dos metassedimentos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Ouro Preto. Departamento de Geologia-Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Mg. 45p.
- Almeida, F.F.M. 1977.** – O Cráton São Francisco. Ver. Bras. Geoc. v.7. p. 349-364.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Bongiolo, E.M. & Dussin, I.A. 2014.** - Magmatismo sideriano e riaciano associado à evolução geológica do Cinturão Mineiro, bordo meridional do Craton do São Francisco. Laboratório Nacional de Energia e Geologia – Lneg. Comunicações Geológicas (2014) 101, Especial I, 41-43.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Vasques, F.S.G., Dussin, I.A. & Mendes, J.C. 2012.** - Geoquímica e idade U-Pb (LA-ICPMS) da crosta oceânica Riaciana do Cinturão Mineiro, borda meridional do Cráton São Francisco. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 46, 2012, Santos, *Bol. Resumos...*, SBG.
- Campos, J.C.S., Carneiro, M.A., Basei, M.A.S. 2003.** - U-Pb evidence for Late Neoarchean crustal reworking in the southern São Francisco Craton (Minas Gerais, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 75:497-511.
- Carneiro, M.A. 1992.** – O complexo Metamórfico Bonfim Setentrional – Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano. São Paulo. Tese de Doutoramento. 233p.
- Carneiro, M.A.; Noce, C.M. & Teixeira, W. 1995.** – Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia. Ver. Esc. Minas de Ouro Preto- REM. v. 48. P.264-274.
- Cordani, U.G.; Kawashita, K; Muller, G.; Quade, H.; Reimer ,V. & Roeser , H. 1980.** – Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero-Minas Gerais. An. Acad. Bras. Cienc. v. 52. p. 785-799.
- Derby, O.A. 1906.** – The Serra of Espinhaço. Journ. Geol. v. 14. P.374-401.
- Dorr, J.V.N. 1958a.** – The Cauê Itabirite. In: SBG, Bol. Soc. Bras. Geoc. São Paulo. V.7. p.61-62.
- Dorr, J.V.N. 1958b.** – The Gandarela Formation. In: SBG, Bol. Soc. Bras. Geoc. São Paulo. V.7. p.63-64.
- Dorr, J.V.N. 1969.** – Physiografic stratygraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, DNPM/USGS/109p.

- Dorr, J.V.N.; Gair, J.E.; Pomerese, J.B. & REynearson, G.A. 1957.** – Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Trad. A.L.M. Barbosa. Rio de Janeiro. DNPM/DFPM. 33p.
- Endo, I. 1988.** – Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes, na mina de Timpopeba-Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana- MG. Ouro Preto. Dep. de Geologia/EM, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 73p.
- Gair, J.E. 1962.** – Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Washington, DNPM/USGS. 67p.
- GIÖCKNER, K. J. 1981.** - *Lithostratigraphie, sedimentologie, tektonik und metamorphose der proterozoischen Itacolomi serie bei Ouro Preto, Minas Gerais*. Alemanha: Clausthal-Zellerfeld, 221p.
- GUIMARÃES D. 1931.** - Contribuição à geologia do Estado de Minas Gerais, Brasil. Dept. P.M., Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Bol., 55: 36p.
- Herz, N. 1970.** – Gneissic and igneous rock of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, DNPM/USGS. 58p.
- Ladeira, E.A. 1980.** – Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ontário. Universidade Ontário, Canadá. Tese de Doutoramento. 272p.
- Lana, C.; Alkmin, F.; Armstrong, R.; Scholz, R.; Romano, R. & Nalini Jr., H.A. 2013.** – The ancestry and magmatic evolution of TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil, Precambrian Research, 231: 157-173.
- Maxwell, C.H. 1958.** – The Batatal Formation. In: SBG, Bol. Soc. Geoc. São Paulo. v. 7. p. 60-61.
- Meert, J.G., Powell, C. McA., 2001.** - Introduction to the special volume on the assembly and breakup of Rodinia. Precambrian Res. 110, 1-8.
- Moraes, M.A.S. 1985.** – Reconhecimento de fácies sedimentares em rochas metamórficas da região de Ouro Preto, Minas Gerais. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 3. Belo Horizonte. Anais. p. 84-93.
- Noce, C.M. 1995.** - Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero ferrífero, Minas Gerais. Tese Doutorado (*inédito*), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 128p.
- Pinto, C.P. 1995.** - Petrologia de rochas alcalinas, cálcioalcalinas e toleíticas da Serra da Mantiqueira em Minas Gerais. IGC-UFMG, dissertação de mestrado. Belo Horizonte, MG.
- Pires, F.R.M. 1983.** – Greenstones as a part of the Minas Supergroup in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Rev. Bras. Geoc., v.13. p. 106-112.
- PLANT, J.A.; RAISWELL, R. 1983.** - Principles of environmental geochemistry. In : THORNTON, I. (ed) Applied Environmental Geochemistry. London : Academic Press, p. 1-38. (Geology Series).
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F.F., Stevens, G. & Armstrong, R. 2013.** - Stabilization of the southern portion of the São Francisco craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224:143-159.

- Silva, L.C. da, Armstrong, R., Noce, C.M., Carneiro, M.A., Pimentel, M., Pedrosa-Soares, A.C., Leite, C.A., Vieira, V.S., Silva, M.A., Paes, V.J.C. & Cardoso-Filho, J.M. 2002.** - Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, Parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4):513-528.
- Simmons, G.G. & Maxwell, C.H. 1958.** - O Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas, Brasil. DNPM/DGM, bol. 211, 30p, Rio de Janeiro.
- Teixeira, W., Sabaté, P., Barbosa, J., Noce, C.M. & Carneiro, M.A. 2000.** - Archean and paleoproterozoic evolution of the São Francisco Craton, Brazil In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds.). TECTONIC EVOLUTION OF SOUTH AMERICA. International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, SBG, p. 101-137.
- VILLAÇA, J.N. 1981.** - Algums aspectos sedimentares da Formação Moeda. Belo Horizonte, SBG-MG. p. 93-137 (Boletim 2).
- Wallace, R. M. (1958).** - The Moeda Formation. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 2(7), 59-60.