



**PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA DE METAIS NO GRUPO SERRA GERAL EM
ENTRE-IJUÍ E BRAGA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**

Porto Alegre, 2014

**PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA DE METAIS NO GRUPO SERRA GERAL EM
ENTRE-IJUÍ E BRAGA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**

LUCAS MACHADO ANTUNES

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador (a): Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

Supervisor (a): Dr. Wilson Wildner

Porto Alegre, 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Antunes, Lucas Machado

Prospecção geoquímica de metais no Grupo Serra Geral em Entre-Ijuís e Braga, Rio Grande do Sul, Brasil. / Lucas Machado Antunes. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.
[128 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2014.

Orientador(es): Léo Afraneo Hartmann
Coorientador(es): Wilson Wildner

1. Grupo Serra Geral. 2. prospecção geoquímica. 3. metalogenia. 4. sedimento ativo de drenagem. I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank CRB 10/571

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA DE METAIS NO GRUPO SERRA GERAL EM ENTRE-IJUÍ E BRAGA, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**”, elaborado por LUCAS MACHADO ANTUNES, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Dr. Ana Maria Ribeiro Althoff

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Prof. Dr. Norberto Dani

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Ana e Jair, por me educarem e me apoiarem em todos os momentos da minha vida, não medindo esforços para que eu tivesse todas as oportunidades de crescer na vida.

Agradeço ao restante dos meus familiares, principalmente minha irmã (Camila), meu primo (Thiago), minhas avós (Neuza e Zulma) e meu avô (José) por serem a base de uma caminhada que ainda colherá muitos frutos.

Sou muito grato aos meus colegas que me proporcionaram momentos de tensão em épocas de provas e descontração depois delas, na qual muitos foram os grandes motivadores em momentos difíceis: Pedro (Coveiro), Diegão, Daniel, Petry, Niemeyer, Ana, Cris, Melissa, Caco, Joãozinho, Jonatinha e Ronei. Desculpas àqueles cujo o nome não foi citado aqui, mas podem ter certeza que em minhas memórias jamais se apagarão. Também agradeço ao Adalto (Mudinho) e ao Chico, por toda ajuda e paciência no trabalho de campo.

Não poderia deixar de agradecer à pessoa que me apoiou com todas as forças e com todo carinho para que o sonho de me formar se tornasse realidade. A pessoa à qual sou muito grato por fazer parte da minha vida: obrigado Fabia por todo respeito, carinho, atenção e amor.

Aos meus amigos(as) que sempre estiveram comigo e que sempre estarão: Tales, Cesar, Filipe, Molero, Cissa, Deby e Buba, o meu “muito obrigado”.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Léo Hartmann, que foi fundamental na minha formação como geólogo nesses 4 anos de convivência e aprendizado. Sou igualmente grato ao grupo de pesquisa que me aturou com toda paciência: Sérgio, Ju, Karine, Sandro, Thales, Pirita e Manara.

Meus profundos agradecimentos à CPRM por financiar todas as análises e a preparação de todas as amostras, além de todo aprendizado que obtive nesses 9 meses de estágio. Agradeço especialmente aos geólogos Wilson Wildner (supervisor), João Angelo Toniolo, José Leonardo Silva Andriotti, Michel Marques Godoy e João Henrique Wustrow Castro. Meus agradecimentos aos técnicos Luiz Alberto Costa Silva (Sapo), Bruno Francisco Bragança Schiehl e Floro de Menezes Filho, que foram indispensáveis para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar essa alegria a mim, meus familiares e a todos aqueles que compartilham desse sentimento de felicidade.

RESUMO

A exploração geoquímica foi conduzida no Grupo Serra Geral em toda a sua extensão de ocorrência no Rio Grande do Sul, com estudo detalhado das anomalias de metais em dois locais. O Grupo Serra Geral constitui a segunda maior província basáltica continental do mundo (917.000 km²), resultado da ruptura do Gondwana e abertura da porção sul do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior (± 135 Ma). O grupo está situado na porção centro-sul do Brasil, abrangendo também partes do Uruguai, Paraguai e Argentina. Esta pesquisa visa definir o potencial prospectivo para Cr e Cu, nos municípios de Entre-Ijuís e Braga, respectivamente, através da análise de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia. Dados geoquímicos de sedimentos de drenagens de 2104 amostras coletadas na Bacia do Paraná foram cedidos pela CPRM/Sureg-PA (Serviço Geológico do Brasil - Superintendência regional de Porto Alegre) para o desenvolvimento do atual projeto. As anomalias de Cr e Cu foram identificadas na região noroeste do Rio Grande do Sul através de cartografia geoquímica. O tratamento estatístico envolveu a classificação das amostras em grupos de acordo com o tipo de rocha mapeado pela CPRM (2008), analisando as unidades nas quais os alvos do estudo de detalhe estão situados: unidade básica Paranapanema (anomalia de Cu) e unidade básica Gramado (anomalia de Cr). Diagramas *Boxplot* determinaram o valor anômalo de 482 ppm de Cu para a unidade Paranapanema e 133 ppm de Cr na unidade Gramado. As correlações geoquímicas apontaram a associação Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn nas duas unidades, sendo o V o elemento com melhor afinidade com os demais elementos metálicos. Na unidade Gramado, o Cr mostrou afinidade significativa com Cu, Fe e Ni (\pm Co e V). As baixas razões Ni/Cu e Cr/Cu descartam a presença de corpos intrusivos ultramáficos nas unidades de interesse. No estudo prospectivo de detalhe, a análise dos concentrados de bateia resultou na ocorrência de pirita e cobre nativo em uma amostra de Entre-Ijuís. A presença de sulfeto pode ser consequência de uma intrusão magmática com contaminação de enxofre, apesar de não haver evidências que indiquem a ocorrência de *sills* ou diques na região. O cobre nativo pode ser resultado de remobilização do Cu e precipitação em fraturas e amígdalas dos basaltos por fluidos hidrotermais de baixa temperatura (< 150 °C). As análises de sedimentos de drenagens não demonstraram consistência com a anomalia de Cr em Entre-Ijuís, com valores variando de 70 a 99 ppm. Já a anomalia de Cu em Braga foi confirmada por duas amostras com teores de 499 e 654 ppm. A assinatura geoquímica das anomalias mantém a associação Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn, o que confere um caráter litófilo ao Cu no Grupo Serra Geral. Apesar da identificação de anomalias de Cu em Braga, os teores e suas características geoquímicas não fornecem indícios de um depósito economicamente viável. Este projeto temático contribuiu para a compreensão do comportamento geoquímico dos sedimentos de drenagem no Grupo Serra Geral no Rio Grande do Sul, enriquecendo o conhecimento sobre exploração de recursos minerais e prospecção geoquímica na província vulcânica Paraná.

Palavras-chave: Grupo Serra Geral, prospecção geoquímica, metalogenia, sedimento ativo de drenagem

ABSTRACT

Geochemical exploration was undertaken in the Serra Geral Group in its entire extension in Rio Grande do Sul, with detailed study of the anomalies of metals in two locations. The Serra Geral Group is the second largest basaltic province (917,000 km²) in the continents, and resulted from the rupture of Gondwana and the opening of the southern portion of the Atlantic Ocean in the Early Cretaceous (± 135 Ma). The group is located in south central Brazil, also covering parts of Uruguay, Paraguay and Argentina. This research aims at the definition of the prospective potential for Cr and Cu, in Entre-Ijuís and Braga, respectively, through the analysis of active stream sediments and panning concentrates. Geochemical analyses of 2104 samples of stream sediments collected in the Paraná Basin were provided by CPRM, Sureg-PA (Geological Survey of Brazil - Regional Superintendency of Porto Alegre) for the development of the present project. The Cr and Cu anomalies were identified in the northwestern of Rio Grande do Sul, through geochemical mapping. The statistical analysis involved the separation of the samples in units according to lithology of provenance, analyzing the units in which the targets of the detailed study are situated: Paranapanema basic unit (Cu anomaly) and Gramado basic unit (Cr anomaly). Boxplot diagrams determined the anomalous value of 482 ppm Cu in the Paranapanema unit and 133 ppm Cr in the Gramado unit. Geochemical correlations indicate the association Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn in both units, with V having a better affinity for the other metallic elements. In the Gramado unit, Cr showed significant affinity for Cu, Fe and Ni (\pm Co and V). The low Ni/Cu and Cr/Cu ratios discard the presence of ultramafic intrusive bodies in the units of interest. In the detailed prospective study, the analysis of panning concentrates resulted in the occurrence of pyrite and native copper in a sample of Entre-Ijuís. The presence of sulfide may be due to a magmatic intrusion with sulfur contamination, although there is no evidence to attribute the occurrence of sills and dykes in the region. The native copper enrichment may be the result of remobilization of Cu and precipitation in fractures and amygdales of the basalts by low temperature (< 150 ° C) hydrothermal fluids. Analyses of active stream sediments showed no consistency for the Cr anomaly in Entre-Ijuís, with values ranging between 70-99 ppm. On the other hand, the anomaly of Cu in Braga was confirmed by two new samples with contents of 499 and 654 ppm. The geochemical signatures of the anomalies supports the Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn association, and this confers a lithophile character to Cu in the Serra Geral Group. In spite of the identification of Cu anomalies in Braga, the contents and their geochemical characteristics do not provide evidence for the occurrence of an economic deposit. This thematic project contributed to the understanding of the geochemical behavior of stream sediments of the Serra Geral Group in Rio Grande do Sul, thus enriching the knowledge about the exploitation of minerals resources and geochemical exploration of the Paraná volcanic province.

Keywords: Serra Geral Group, geochemical prospecting, metallogeny, active stream sediment

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo, Braga e Entre-Ijuís, com as principais estradas de acesso a partir de Porto Alegre, e as principais cidades de referência.18
- Figura 2. Mapa geológico da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul com a localização dos municípios de Braga e Entre-Ijuís (modificado de CPRM, 2008).19
- Figura 3. Mapa de distribuição das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral e de formações sedimentares sobrepostas à província vulcânica Paraná (modificado de Peate *et al.*, 1992).29
- Figura 4. Modelo dos eventos hidrotermais H1, H2 e H3, com o gradiente térmico, pressão de vapor e sequência de processos de alteração, selamento e abertura de cavidades nos basaltos do Grupo Serra Geral (modificado de Hartmann *et al.*, 2012a).34
- Figura 5. Esquema de distribuição normal simétrica e assimétrica, com a identificação da mediana, do 1º e 3º quartis e a representação gráfica do diagrama *Boxplot* (modificado de Andriotti, 2010).39
- Figura 6. Representação gráfica e cálculos matemáticos do diagrama de *Boxplot*, identificando a mediana, 1º e 3º quartis, IQR e outliers altos e anômalos (modificado de Andriotti, 2010).39
- Figura 7. Mapa de amostragem de detalhe na bacia de captação do Lajeado Quebra-dente, em Braga. Os pontos roxos simbolizam as amostras de sedimentos ativos de drenagem (SAD) analisadas e cedidas pela CPRM, enquanto os pontos verdes são as amostras de estudo de detalhe, que envolveram coleta de sedimentos ativos de drenagem (SAD) e concentrado de bateia (CB).43
- Figura 8. Mapa de amostragem de detalhe em parte da bacia de captação do Lajeado do Moinho, em Entre-Ijuís. Os pontos roxos simbolizam as amostras de sedimentos ativos de drenagem (SAD) analisadas e cedidas pela CPRM, enquanto os pontos verdes são as amostras de estudo de detalhe, que envolveu coleta de sedimentos ativos de drenagem (SAD) e concentrado de bateia (CB).44
- Figura 9. Amostragem de sedimento ativo de drenagem em campo usando materiais de plástico para não haver contaminação.44
- Figura 10. Preparação da amostra de sedimento de drenagem em laboratório. a) Fluxograma do processo de preparação das amostras de sedimentos de correntes; b) Processo de desagregação do material, com o uso de gral e pistilo de porcelana. c) Agitador Bertel com material sendo peneirado na fração 80 mesh.45
- Figura 11. Amostragem de concentrado de bateia. a) Peneiramento do material bruto antes de utilizar a bateia; b) separação dos minerais pesados dos leves utilizando bateia de alumínio com auxílio da corrente da drenagem.47
- Figura 12. Preparação e análise das amostras de concentrados de bateia. a) Fluxograma com a sequência de processos de preparação e análise das amostras de concentrados de bateia; b) Concentração de metais pesados pelo método de microbateia; c) Separação da magnetita com ímã de mão; d) Separador magnético Frantz.49

Figura 13. Mapa com a localização das amostras (n = 17) de rocha na área de estudos da região de Braga.	52
Figura 14. Mapa com a localização das amostras (n = 8) de rocha na área de estudos da região de Ente-ljuís. Amostras de sedimentos ativos de drenagens (SAD) preliminares representadas pelos pontos roxos, enquanto as amostras de sedimentos ativos de drenagens (SAD) e concentrados de bateia (CB) do estudo de detalhe estão representadas em verde e as amostras de rocha em marrom.	53
Figura 15. Mapa de localização das amostras preliminares de sedimentos ativos de drenagens na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul (delimitação da Bacia do Paraná: CPRM, 2008).	56
Figura 16. Mapa geoquímico de isotores para o elemento Cu. Evidência de pelo menos seis áreas com altos teores de Cu, em destaque a região de Braga.	57
Figura 17. Mapa geoquímico de isotores de Cu na região de Braga. Em destaque a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.	57
Figura 18. Mapa geoquímico de valores proporcionais de Cu na região de Braga. Em destaque a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.	58
Figura 19. Mapas geoquímicos de isotores da Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul, para os elementos: a) Fe, b) Ti, C) Zn e d) V, evidenciando maiores teores na porção norte do estado.	58
Figura 20. Mapa geoquímico de isotores de Cr na Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul. Destaque para a anomalia na região de Entre-ljuís.	59
Figura 21. Mapa geoquímico de isotores de Cr na região de Entre-ljuís. Em destaque a bacia de captação do Lajeado do Moinho.	60
Figura 22. Mapa geoquímico de valores proporcionais de Cr na região de Entre-ljuís. Em destaque a bacia de captação do Lajeado do Moinho.	60
Figura 23. Mapas geoquímicos de isotores de a) Co e b) Ni na Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul. Uma única anomalia de Co no oeste do estado, enquanto o restante da área apresenta baixos teores de ambos elementos.	61
Figura 24. Mapa da localização das amostras (n = 2104) de sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM-PA, classificadas de acordo com a sua unidade geológica de origem (modificado de CPRM, 2008).	62
Figura 25. Diagrama <i>Boxplot</i> para os teores de a) Cr e b) Cu para o conjunto de amostras das unidades básicas Paranapanema (P, verde escuro) e Gramado (G, verde claro). Círculos cheios = outliers altos e baixos; estrela = outliers anômalos.	65
Figura 26. Diagrama <i>Boxplot</i> para os teores de a) Co, b) Fe, c) Ni, d) Ti, e) V e f) Zn para o conjunto de amostras das unidades básicas Paranapanema (P, verde escuro) e Gramado (G, verde claro). Círculos cheios = outliers altos e baixos; estrela = outliers anômalos.	66

Figura 27. Gráficos de correlação: a) Cu x Fe; b) Ti x Fe; c) V x Fe; e d) Zn x Fe, para a unidade Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.69

Figura 28. Gráficos de correlação: a) Al x Fe; b) Cr x Fe; c) Co x Fe; e d) Ni x Fe, para a unidade Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.70

Figura 29. Gráficos de correlação: a) Cu x Co; b) Cu x Cr; c) Cu x Mn e d) Cu x Ni, na unidade básica Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.71

Figura 30. Gráficos de correlação: a) Cu x V e b) Zn x V, na unidade básica Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.72

Figura 31. Gráfico Al/Ti x Cu, comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (213 amostras representadas pelos pontos de cor azul) e a unidade básica Paranapanema (605 amostras representadas pelos pontos de cor verde escuro).72

Figura 32. Gráficos Cr/Cu x V e Ni/Cu x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Paranapanema (pontos verde escuro). Amostra destacadas por estar representadas fora do campo do gráfico: a) Cr/Cu = 18,9.73

Figura 33. Gráficos de correlação: a) Co x Fe; b) V x Fe; c) Cu x Fe e d) Zn x Fe para as amostras da unidade básica Gramado. Os elementos representados nos eixos das ordenadas estão em ppm, enquanto o Fe em porcentagem do elemento. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: a) 229 ppm Co.76

Figura 34. Gráficos de correlação: a) Al x Fe; b) Ni x Fe; c) Cr x Fe e d) Ti x Fe para as amostras da unidade básica Gramado. Al, Ti e Fe estão em porcentagem do elemento, enquanto Cr e Ni estão em ppm. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: c) 449 ppm Cr.77

Figura 35. Gráficos de correlação: a) Co x V; b) Ti x V; c) Cu x V e d) Zn x V para as amostras da unidade básica Gramado. O Ti está representado em porcentagem do elemento, enquanto os demais elementos estão em ppm. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: a) 299 ppm Co.78

Figura 36. Gráficos a) Cr/Cu x V e b) Ni/Cu x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Gramado (pontos verde claro). Amostra destacadas por estar representadas fora do campo do gráfico: a) Cr/Cu = 18,9.78

Figura 37. Gráficos a) Cr x V e b) Ni x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Gramado (pontos verde claro). Amostras destacadas por estarem representadas fora do campo do gráfico: a) 245 ppm Ni; b) 984 ppm Cr (Complexo Básico Lomba Grande) e 449 ppm Cr (unidade básica Paranapanema).79

- Figura 38. Lâminas petrográficas dos basaltos observados em Braga: a) textura fanerítica fina com alteração para esmectita e hematita; b) fenocristal de augita; c) alteração intensa para esmectita; d) textura glomeroporfírica; e) fenocristais de magnetita; f) textura glomeroporfírica e alteração para hematita; g) amígdala preenchida por zeolita; h) textura hipocristalina.83
- Figura 39. Fotos de campo da região de Braga: a) geodo centimétrico de ágata bandada; b) geodos centimétricos de calcedônia; c) afloramento de brecha hidrotermal; d) bloco de brecha hidrotermal.....84
- Figura 40. Fotomicrografias de lâminas petrográficas da região de Entre-Ijuís: a) fenocristal de plagioclásio; b) fenocristal de augita; c) fenocristais de magnetita com alteração para hematita; d) textura glomeroporfírica; e) brecha hidrotermal com clasto de basalto anguloso, cristal de calcita, arenito silicificado e basalto vesicular; f) brecha hidrotermal com arenito silicificado e clastos de basalto de tamanhos variados (de 3,5 mm a 0,1 mm).85
- Figura 41. Mapa geoquímico de valor proporcional para Cu (ppm) na região de Braga, na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente. Em amarelo estão representadas as amostras do estudo de detalhe e em verdes as amostras do estudo preliminar.86
- Figura 42. Mapa geoquímico de isotores de Cu (ppm) na região de Braga com as análises das amostras do estudo de detalhe.87
- Figura 43. Mapa geoquímico de valor proporcional de Cu (ppm) na região de Braga com as análises das amostras do estudo de detalhe.87
- Figura 44. Gráficos de correlação: a) Cu x Ti e b) Cu x V. As amostras preliminares da unidade Paranapanema estão representadas pelos pontos verde escuro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Braga pelos quadrados vermelhos. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.88
- Figura 45. Gráficos de correlação: a) Cu x Zn, b) Cu x Fe e c) Cu x Ni. As amostras preliminares da unidade Paranapanema estão representadas pelos pontos verde escuro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Braga pelos quadrados vermelhos. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos.89
- Figura 46. Mapa geoquímico de valor proporcional para Cr (ppm) na região de Entre-Ijuís, na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente. Amostras em amarelo representam as amostras do estudo de detalhe e as verdes as amostras do estudo preliminar.90
- Figura 47. Mapa geoquímico de isotores de Cr (ppm) na região de Entre-Ijuís com as análises das amostras do estudo de detalhe.91
- Figura 48. Gráficos de correlação: a) Cr x Cu, b) Cr x Fe e c) V x Cu. As amostras preliminares da unidade Gramado estão representadas pelos pontos verde claro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Entre-Ijuís pelos triângulos laranjas. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos outliers altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos outliers anômalos. Amostras destacadas por estarem representadas fora do campo do gráfico: a) e b) 449 ppm Cr.92

Figura 49. Esquema hipotético de teores de Cu (em ppm) em amostras de sedimentos ativos de drenagens, envolvendo as duas hipóteses de concentração de Cu no Grupo Serra Geral: derrame basáltico com minerais alto-Cu e intrusões (*sill*) com presença de sulfetos de Cu. A amostra com material proveniente diretamente do derrame alto-Cu (550 ppm) possui anomalia pouco discrepante em relação a uma anomalia de um *sill* com sulfetos de Cu (950 ppm, valor hipotético). Isso deve-se a concentração maciça de Cu no *sill* em comparação à concentração disseminada de Cu nos minerais do derrame.97

Figura 50. Gráficos Ni (ppm) x V (ppm) e Cr (ppm) x V (ppm) com a interpretação da figura 37. Em cinza escuro, o campo com a assinatura geoquímica da intrusão máfica-ultramáfica, baseada na resposta das amostras do Complexo Básico Lomba Grande. Em cinza a assinatura dos basaltos da unidade Gramado. Em cinza claro, a assinatura de diques e *sills* da borda sul da Bacia do Paraná.99

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Classificação das unidades de captação das amostras de sedimentos ativos de drenagens a partir da litologia de proveniência e de alvos prospectivos.62
- Tabela 2. Matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson de elementos selecionados das análises químicas das amostras de sedimentos ativos de drenagens da região mapeada como basalto Paranapanema. Total de 605 amostras. Em vermelho os resultados iguais ou maiores que 0,8 (correlação muito forte), e em laranja os resultados entre 0,6 e 0,79 (correlação forte).68
- Tabela 3. Matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson de elementos selecionados das análises químicas das amostras de sedimentos ativos de drenagens da região mapeada como basalto Gramado. Total de 647 amostras. Em vermelho os resultados iguais ou maiores que 0,8 (correlação muito forte), e em laranja os resultados entre 0,6 e 0,79 (correlação forte).75
- Tabela 4. Ocorrência de minerais pesados de interesse nos concentrados de bateia das regiões de Braga e Entre-Ijuís. Simbologia: ✓ (nº de amostras) = ocorrência; X = sem ocorrência.81
- Tabela 5. Intervalo de porcentagens (análise semiquantitativa) de magnetita, hematita, limonita e fragmentos de rocha nas amostras de concentrados de bateia na região de Braga.81
- Tabela 6. Intervalo de porcentagens (análise semiquantitativa) de magnetita, hematita, limonita e fragmentos de rocha nas amostras de concentrados de bateia na região de Entre-Ijuís.82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Mobilidade de alguns elementos em relação às condições ambientais. (Rose <i>et al.</i> , 1979; modificado por Licht, 1998).	26
Quadro 2. Limites de detecção de alguns elementos pelo método ICP-MS (<i>ACME Analytical Laboratories LTD.</i> , Canadá).	51

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE QUADROS	XIV
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Localização das áreas de estudo	18
1.2. Justificativa	19
1.3. Caracterização do problema	20
1.4. Objetivos e metas	20
1.5. Premissas	21
1.6. Hipóteses	22
2. REVISÃO CONCEITUAL	24
2.1. Prospecção geoquímica pela análise de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia	24
2.2. Grupo Serra Geral	28
2.3. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo de Noril'sk - Talnakh (Sibéria)	30
2.4. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo de Skaergaard (Groenlândia)	32
2.5. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo hidrotermal	33
3. METODOLOGIA	36
3.1. Cartografia geoquímica	36
3.2. Tratamento estatístico e análise de correlação	37
3.3. Sedimento ativo de drenagem	41
3.3.1. Amostragem em campo	42
3.3.2. Preparação das amostras em laboratório	45
3.4. Concentrados de bateia	46
3.4.1. Amostragem em campo	47

3.4.2. Preparação das amostras em laboratório	48
3.5. ICP-MS	50
3.6. Petrografia	51
4. RESULTADOS	54
4.1. Cartografia geoquímica da Bacia do Paraná	55
4.2. Tratamento estatístico das análises no Grupo Serra Geral	61
4.3. Determinação do valor anômalo nas unidades básicas Paranapanema e Gramado	64
4.4. Geoquímica dos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Paranapanema	67
4.5. Geoquímica dos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Gramado	74
4.6. Estudos de detalhe	80
4.6.1. Concentrados de bateia e petrografia	80
4.6.2. Geoquímica de sedimentos ativos de drenagens da anomalia de Cu em Braga	86
4.6.3. Geoquímica de sedimentos ativos de drenagens da anomalia de Cr em Entre-Ijuís	90
5. DISCUSSÕES	93
5.1. Geoquímica do Cu nos sedimentos ativos de drenagens do Grupo Serra Geral	94
5.2. Gênese das anomalias de Cu nos sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia do Grupo Serra Geral	95
5.3. Gênese da anomalia de Cr nos sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia do Grupo Serra Geral	98
5.4. Potencial metalogenético das anomalias de Braga (Cu) e Entre-Ijuís (Cr) ...	100
6. CONCLUSÕES	103
7. REFERÊNCIAS	105
ANEXOS	118

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo identificar as fontes de anomalias de metais (Cu e Cr) observados em análises químicas de sedimentos ativos de drenagens provenientes das rochas da província vulcânica Paraná. O estudo enfoca os municípios de Braga e Entre-Ijuís, noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Aqui serão apresentados dados e interpretações do atual projeto da CPRM, Sureg-PA, sobre o potencial metalogenético do Rio Grande do Sul.

O tratamento estatístico de 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens, cedidas pela CPRM, possibilitou a definição dos valores anômalos dos metais no Grupo Serra Geral, assim como as associações geoquímicas que auxiliaram na interpretação dos possíveis processos metalogenéticos. Análises de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia em escala de detalhe possibilitaram a definição do potencial metalogenético das anomalias de Cu em Braga e de Cr em Entre-Ijuís.

As anomalias de Cr podem estar associadas a intrusões de rochas ultramáficas no Grupo Serra Geral (Wildner *et al.*, 2006), enquanto as anomalias de Cu podem ser consequência de intrusões sulfetadas, comparada ao modelo do depósito de Noril'sk-Talnakh (Romanini & Albuquerque, 2000), ou de derrames basálticos com concentrações de Cu nos minerais opacos, análogo ao que ocorre no depósito metálico de Skaergaard (Arioli, 2008; Pinto *et al.*, 2011a).

Este estudo traz importante contribuição para o conhecimento metalogenético da província vulcânica Paraná, definindo o potencial prospectivo das regiões de Braga e Entre-Ijuís.

1.1. Localização das áreas de estudo

A área estudada está situada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, nos municípios de Entre-Ijuís e Braga, a 464 e 455 km de distância de Porto Alegre, respectivamente (Fig. 1). A principal via de acesso para Entre-Ijuís, a partir de Porto Alegre, é a rodovia BR-386 até o município de Carazinho, seguindo para oeste pela rodovia BR-285. Para o município de Braga, o acesso, a partir de Porto Alegre, é a rodovia BR-386 até o município de Sarandi, seguindo a oeste pela RS-569 até a cidade de Palmeira das Missões, e seguir pela BR-468, acessando a RS-518 e passando pelo município de Campo Novo.

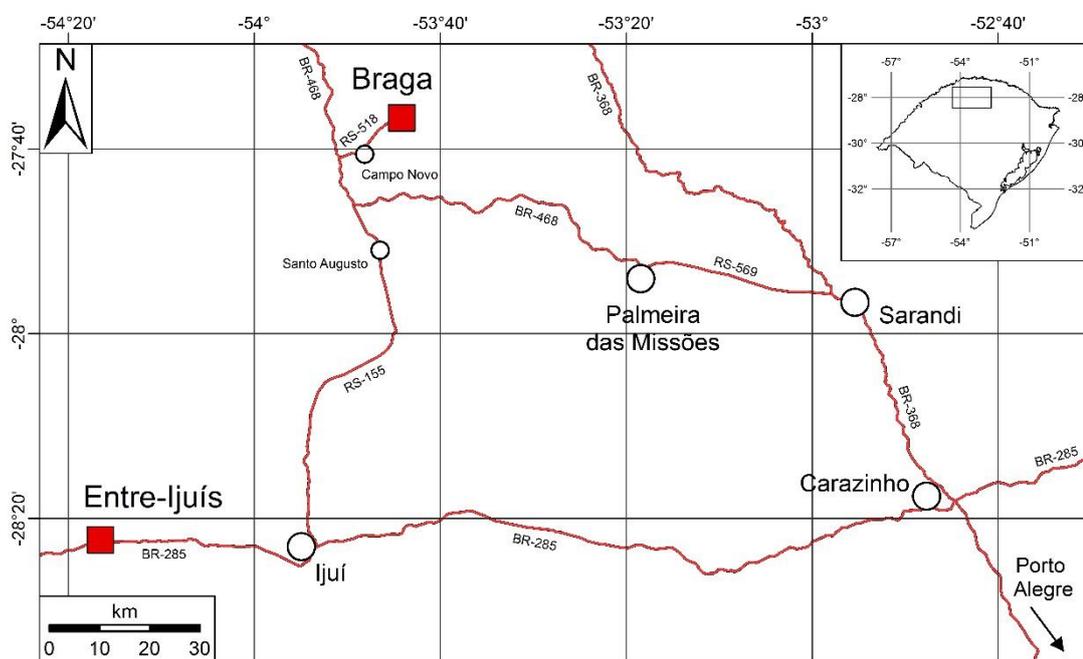


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo, Braga e Entre-Ijuís, com as principais estradas de acesso a partir de Porto Alegre, e as principais cidades de referência (base vetorial: Hasenack & Webber, 2010).

No contexto geológico, as áreas de estudo se localizam no Grupo Serra Geral. O município de Braga está situado sobre basaltos alto-Ti do tipo Paranapanema, enquanto Entre-Ijuís se localiza na área mapeada como basaltos de baixo-Ti do tipo Gramado (Fig. 2).

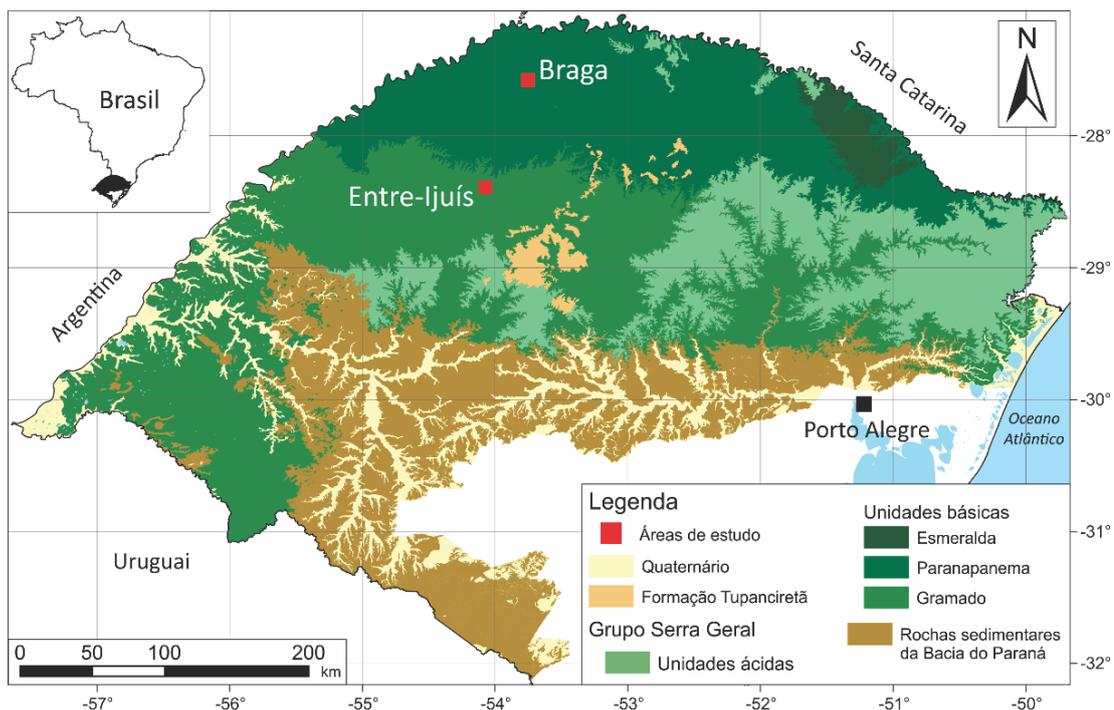


Figura 2. Mapa geológico da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul com a localização dos municípios de Braga e Entre-Ijuís (modificado de CPRM, 2008).

1.2. Justificativa

Cr e Cu são metais de significativa importância no mercado mundial. Por isso, estudos usando a identificação de novas ocorrências destes metais no Grupo Serra Geral são de grande interesse tanto para a comunidade acadêmica quanto para os setores público e privado dos municípios. O interesse ainda é maior devido ao ineditismo de ocorrências economicamente viáveis desses metais nas rochas vulcânicas da Bacia do Paraná.

A principal referência deste trabalho será o modelo de prospecção geoquímica usado pela CPRM/Mineropar no sudoeste do Paraná (Wildner *et al.*, 2006), objetivando definir as fontes de anomalias de cromo e cobre, assim como suas associações geoquímicas. O principal objetivo é a avaliação geológica das anomalias dos levantamentos de campo e dados obtidos por análise de sedimentos ativos de drenagens no noroeste do Rio Grande do Sul, realizados pela CPRM, e os controles geoquímicos dessas mineralizações.

1.3. Caracterização do problema

Até hoje, os trabalhos que tratam do potencial metalogenético em escala local no Grupo Serra Geral focalizaram essencialmente as ocorrências de cobre nativo de origem hidrotermal epigenética (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Arena *et al.*, 2014a, 2014b; Baggio *et al.*, 2014). Pesquisas e modelos de potencial metalogenético em escala regional (Mincato, 1994, 2000; Romanini & Albuquerque, 2000; Wildner *et al.*, 2006; Arioli, 2008) evidenciam uma real possibilidade de depósitos mineralizados em Ni-Cu-EGPs associados com o magmatismo mesozóico da Bacia do Paraná.

A partir das análises químicas de 2104 amostras de sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM-PA, o projeto foi elaborado focando as anomalias de Cr (449 ppm) e Cu (500 ppm), em Entre-Ijuís e Braga, respectivamente.

Sendo assim, este projeto busca enriquecer os estudos em prospecção de metais na província vulcânica Paraná, no estado do Rio Grande do Sul, identificando a gênese de anomalias e possíveis depósitos de cromo e cobre na região do municípios de Entre-Ijuís e Braga, e caracterizando seus controles geoquímicos.

1.4. Objetivos e metas

O objetivo principal do estudo é identificar e caracterizar os controles geológicos e a fonte de anomalias de metais nas rochas vulcânicas básicas do Grupo Serra Geral, no noroeste do Rio Grande do Sul. Como objetivos específicos, pode-se destacar:

I) Identificação de alvos com altos teores de metais através da interpolação dos dados geoquímicos das 2104 amostras sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM;

II) Tratamento estatístico dos dados geoquímicos e definição dos teores anômalos dos metais em cada alvo do estudo;

III) Definição das associações geoquímicas do Cu e do Cr;

IV) Determinação dos processos metalogenéticos a partir das evidências geoquímicas, da análise dos concentrados de bateia e revisão bibliográfica;

V) Definição do potencial metalogenético das anomalias de Cu (Braga) e Cr (Entre-Ijuís), a partir da análise de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia em escala de detalhe.

1.5. Premissas

- Baixos teores de S nas análises de rocha total dos basaltos do Grupo Serra Geral (Romanini & Albuquerque, 2000) e em sedimento ativo de drenagem (Licht *et al.*, 2006) indicam que não houve contaminação do magmatismo da província vulcânica Paraná por parte dos sedimentos carbonosos, ricos em pirita, da Bacia do Paraná (Amaral, 1971; Carelli & Borghi, 2011).

- Em rochas vulcânicas básicas o cromo possui afinidade, tanto com óxidos (cromita e espinélios alto-Cr) quanto com silicatos (olivina e piroxênio). A cristalização da cromita é mais comum em rochas ultramáficas de alta temperatura, geralmente associadas a intrusões máficas-ultramáficas estratiformes, como ocorre no Complexo de Bushveld (Eales & Cawthorn, 1996). Mas a ocorrência de cromita em lavas basálticas também foi registrada na planície de Snake River, na província vulcânica de Columbia River (Thompson, 1973).

- Valores elevados da razão Ni/Cu em sedimentos de drenagens é um indicativo da presença de rochas ultramáficas (Brim, 1985).

- De acordo com o trabalho de Piccirillo *et al.* (1988a), o teor de Cr nas análises de rocha total dos basaltos do Grupo Serra Geral possui média inferior a 200 ppm. Já o trabalho de Licht *et al.* (2006) evidencia que o teor médio das análises químicas realizadas em sedimentos fluviais ativos no sudoeste do Paraná é de 115 ppm de Cr. As intrusões ultramáficas de olivina-gabro do Complexo Básico Lomba Grande possui média de 735 ppm de Cr em análise de rocha total (Viero & Roisenberg, 1992). A anomalia analisada estudada por este projeto mostrou valor de 449 ppm.

- Minério de cobre no Grupo Serra Geral ocorre como cobre nativo (juntamente com crisocola e malaquita) de origem hidrotermal (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Arena *et al.*, 2014a, 2014b; Baggio *et al.*, 2014) ou como sulfetos disseminados (bornita, carrolita e calcopirita) de origem magmática em *sills* (Renner, 2010).

- Uma revisão bibliográfica (Peate & Howksworth, 1996; Peate, 1997; Duarte, 2008; Fernandes et al., 2010; Hartmann et al., 2010, 2012a, 2012b, 2013; Renner, 2010) evidenciou que os teores de Cu são inferiores a 300 ppm nas análises químicas de rocha total dos basaltos do Grupo Serra Geral. A pesquisa realizada por Licht et al. (2006) no sudoeste do Paraná revelou valor médio de 272 ppm de Cu nas análises químicas de sedimentos ativos de drenagens. As anomalias analisadas estudadas por este projeto mostrou valores entre 519 e 654 ppm.

- O processo hidrotermal que remobiliza e precipita o cobre nativo em amígdalas e em fraturas nos basaltos é o mesmo que forma de diques e injetitos de areia, assim como brechas hidrotermais, sendo estes indicadores de eventos hidrotermais com possibilidade de mineralização de cobre nativo (Hartmann *et al.*, 2012a; Arena *et al.*, 2014a, 2014b; Baggio *et al.*, 2014).

1.6. Hipóteses

O uso sistemático do método científico das múltiplas hipóteses conduziu o presente projeto a resultados significativos. As anomalias geoquímicas de sedimentos ativos de drenagens, já conhecidas pelo trabalho da CPRM-PA, são devidas à proximidade de maciços estratiformes máfico-ultramáficos e à alteração hidrotermal das rochas vulcânicas.

Por ser uma das maiores províncias basálticas continentais do mundo, o Grupo Serra Geral tem bom potencial para a ocorrência de depósitos de Cr e Cu. Como a sua evolução tectônica e petrogenética é semelhante à dos depósitos metálicos de Noril'sk-Talnakh, na Sibéria, e aos de Skaergaard, na Groenlândia, pesquisas recentes definiram que o Grupo Serra Geral é potencialmente importante, porém ainda sem ocorrências de depósitos economicamente viáveis para a exploração de metais. O modelo metalogenético baseado em processos hidrotermais resultantes da ascensão de fluidos aquecidos do aquífero Guarani também é proposto para a formação de depósitos de Cu nas rochas da província vulcânica Paraná.

Para testar a procedência das anomalias de metais, este estudo fez uma pesquisa de detalhe na região dos municípios de Entre-Ijuís e Braga, situados no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. Foram buscadas as origens das anomalias de Cr e Cu, detectadas em análises químicas de sedimentos ativos

de drenagens cedidas pela CPRM, Sureg-PA (Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Porto Alegre), além da caracterização dos controles geoquímicos dessas anomalias.

Os modelos (hipóteses) a serem testados neste projeto para a gênese e caracterização de possíveis depósitos metálicos no Grupo Serra Geral são: (1) intrusões máficas-ultramáficas estratiformes com grandes concentrações de cromita; (2) intrusões máficas-ultramáficas com significativa contaminação de S e consequente concentração de sulfetos e (3) concentração dos metais na fase óxido dos derrames basálticos do Grupo Serra Geral. A possibilidade de os três processos terem atuado como agentes mineralizadores na área será testada, já que os dois primeiros modelos podem estar diretamente relacionados, enquanto o terceiro é completamente independente. A partir do tratamento estatístico das 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens, juntamente com a caracterização petrográfica das litologias de cada região e as análises de detalhe de cada alvo, este estudo busca definir associações geoquímicas relacionadas com altos teores de Cu e Cr e avaliar o potencial metalogenético do Grupo Serra Geral nos municípios de Entre-Ijuís e Braga, noroeste do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO CONCEITUAL

2.1. Prospecção geoquímica pela análise de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia

O uso de métodos de prospecção geoquímica para a descoberta de recursos minerais têm crescido desde a década de 1940, com estudos realizados na antiga União Soviética. Os métodos prospectivos, entre eles a análise de sedimentos ativos de drenagens e de concentrados de bateia, proporcionaram um significativo avanço no ramo de exploração mineral: a descoberta de depósitos minerais não aflorantes. Este tipo de análise é bastante utilizado em prospecção geoquímica por seu baixo custo e possibilidade de integração dos dados de ambos materiais (Licht, 1998).

Os sedimentos ativos de drenagens são definidos como materiais não consolidados, que são mecanicamente transportados na corrente do rio por saltação, tração ou suspensão junto com os materiais que são quimicamente precipitados (Brim, 1985). Concentrados de bateia são os minerais resistentes com densidade superior a $2,7 \text{ g/cm}^3$ (densidade média do quartzo e do feldspato), que são amostrados a partir de técnicas de separação gravimétrica. Também chamados de minerais pesados, possuem alta resistência mecânica e aos processos intempéricos (Licht, 1998). Estudos de prospecção por concentrado de bateia consistem em determinar as quantidades relativas de um mineral de valor econômico em sedimento de corrente, e traçar a drenagem à montante da fonte, seguindo o padrão de concentrações crescentes (Hawkes, 1957).

A base para qualquer método de prospecção geoquímica é a compreensão do comportamento de cada elemento químico. Goldshimdt (1937) classifica os elementos em:

- Siderófilos (Ex: Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au): afinidade com ferro, se concentram no núcleo da Terra;

- Calcófilos (Ex: Cu, Ag, Zn, Cd, As, Pb, S, Hg): afinidade com enxofre, se concentram em sulfetos;

- Litófilos (Ex: Na, K, Mg, Ca, Al, Y, ETR, Si, Ti, V, Zr, Cr, Mn): afinidade com a sílica, se concentram na crosta terrestre na forma de silicatos;

- Atmófilos (Ex: H, He, Ar, Xe): se concentram em forma de gás na atmosfera.

O entendimento das afinidades geoquímicas dos elementos é essencial nos estudos de prospecção, pois os depósitos minerais são constituídos por grupos de elementos químicos que se concentram a partir do comportamento semelhante dos mesmos (Brim, 1985).

A prospecção geoquímica referente à análise de sedimentos de drenagens e concentrados de bateia é focada no estudo das interações que ocorrem no ambiente supergênico (também conhecido como ambiente secundário), ou seja, a zona onde se desenvolvem os processos superficiais de intemperismo, pedogênese, erosão, sedimentação, diagênese e atividades biológicas. É no ambiente supergênico que há a liberação e transporte dos elementos a partir da instabilidade e consequente alteração dos minerais formados em condições primárias (ambiente magmático e de metamorfismo) (Brim, 1985).

A redistribuição e redeposição dos elementos nos solos, sedimentos e plantas, após o transporte dos materiais resultantes da lixiviação é o que se define como dispersão secundária, que é controlada por fatores químicos, bioquímicos e mecânicos. Os padrões de dispersão secundária são classificados como singenéticos e epigenéticos. Os padrões singenéticos representam as feições introduzidas e depositadas ao mesmo tempo que a matriz, e são subdivididos em clástico, hidromórfico e biogênico. Os padrões epigenéticos são definidos como feições introduzidas na matriz após a sua formação, e são subdivididos em hidromórfico e biogênico. Em sedimentos ativos de drenagens, o padrão de dispersão mais comum é o epigenético hidromórfico, que resulta do transporte dos elementos em solução. Já nos concentrados de bateia, o principal padrão é singenético clástico, resultado da erosão e do transporte da cobertura de solo (Brim, 1985; Licht, 1998).

Mobilidade geoquímica é a facilidade com a qual um elemento químico se move em um meio natural específico. A mobilidade química dos elementos, principalmente dos metais, no ambiente supergênico é a base da dispersão secundária. Um dos parâmetros utilizados como guia para a mobilidade é dado pelo potencial iônico, que é o quociente da carga iônica pelo raio iônico. Elementos com baixo potencial iônico, como Ca, Na, Mg, K e Fe^{+2} , são solúveis como cátions simples.

Outros elementos com o potencial iônico muito elevado atraem o oxigênio e formam oxianions solúveis, como é o caso do PO_4^{-3} e SO_4^{-2} . Elementos com potencial atômico intermediário, como Al, Ti e Sn, tendem a se precipitar por hidrólise e se concentrar nos resíduos do intemperismo (Brim, 1985; Licht, 1998).

Um fator que interfere diretamente na mobilidade dos elementos é o pH do ambiente estudado. Muitos elementos metálicos são solúveis apenas em condições ácidas (pH < 4), e com o aumento do pH tendem a precipitar como hidróxidos ou como sais básicos. O intemperismo em superfície produz condições neutras a oxidantes, com o pH variando de 5 a 8. Condições ácidas ocorrem nas cercanias de corpos sulfetados oxidados. Locais de pântanos e solos mal drenados e ricos em matéria orgânica geram ambientes de condições redutoras. O quadro 1 mostra a mobilidade de alguns elementos de acordo com o pH do ambiente.

Quadro 1. Mobilidade de alguns elementos em relação às condições ambientais. (Rose *et al.*, 1979; modificado por Licht, 1998).

Mobilidade relativa	Condições Ambientais		
	pH 5 - 8	pH < 4	Redutoras
Altamente móveis	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, Mo, B	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente móveis	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, As, (Sr, Hg, Sb?)	Ca, Na, Mg, Sr, Hg, Cu, Ag, Co, Li, F, Zn, Cd, Ni, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li, Sr, Ba, Ra, F, Mn
Pouco móveis	K, Rb, Ba, Mn, Si, Ge, P, Pb, Cu, Ni, Co, (Cd, Be, Ra, In, W)	K, Rb, Ba, Si, Ge, Ra	K, Rb, P, Si, Fe
Muito pouco móveis ou imóveis	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, (Cr, Nb, Ta, Bi, Cs?)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, As, Mo, Se	Fe, Al, Ga, Ti, Hf, Th, Sn, ETR, Platinóides, Au, Cu, Ag, Pb, Zn, Cd, Hg, Ni, Co, As, Sb, Bi, U, V, Se, Te, Mo, In, Cr, Nb, Ta

Os efeitos do intemperismo na mobilidade dos elementos em basaltos foi estudado por Eggleton *et al.* (1987). Este estudo definiu que elementos como Al, Fe, Ti, Cr, Nb, Zr, N e Ni são muito pouco móveis ou imóveis. O Cu e o Zn possuem baixa a moderada mobilidade. Ca, Na, Mg, K, P, Si, Mn, La, Rb e Sr demonstraram perdas

significativas (mobilidade moderada a alta) em seus teores na rocha alterada em comparação com a rocha sã.

A distância de uma amostra de sedimento de drenagem em relação à área mineralizada é outro fator que influencia nos teores dos elementos. Ao longo do curso da drenagem, o elemento alvo é diluído a jusante, apresentando teores cada vez menores nas amostras mais distantes da área mineralizada (Hawkes, 1976; Brim, 1985). Quando a localização da mineralização e sua continuação lateral são conhecidas, é possível calcular a significância de uma amostra anômala em relação à bacia de captação da drenagem (Hawkes, 1976).

Após a coleta dos dados geoquímicos, é necessário realizar o tratamento analítico dos mesmos para obter consistência científica na interpretação das anomalias. Não há um padrão a se seguir para esse tratamento, mas uma estrutura metodológica é sugerida por Brim (1985). Primeiramente deve-se ilustrar graficamente as informações através de mapas geoquímicos. O segundo passo é a definição de limiares e anomalias por algum método matemático, explicitando o comportamento da distribuição dos valores que não se enquadram aos resultados mais frequentes (*background*). A partir deste tratamento, é possível buscar a gênese das anomalias, avaliando se estas são decorrentes de fatores geológicos simples, variações de condições ambientais ou erro analítico. Caso nenhuma das três hipóteses se confirme, a possibilidade da presença de um corpo mineralizado passa a ser considerada e deve ser estudada integrando-se os dados de exploração geoquímica com outros métodos de investigação, como por exemplo mapeamento geológico e dados geofísicos.

Os teores dos elementos podem ser usados para interpretar possíveis litologias com potencial para mineralizações. Intrusões ultramáficas estéreis, por exemplo, possuem teores elevados de Ni e baixos de Cu. Conseqüentemente apresentarão altas razões Ni/Cu. Já em rochas ultramáficas portadoras de mineralizações de Cu, essa razão diminui sensivelmente tendendo a 1 ou menos, apresentando teores elevados de ambos elementos (Brim, 1985).

O objetivo do estudo de prospecção geoquímica é a identificação de anomalias de um determinado elemento ou associação de elementos. Anomalia geoquímica é definida como um desvio dos padrões geoquímicos considerados normais para um determinado espaço geoquímico (Licht, 1998). Uma anomalia não pode ser identificada antecipadamente no conjunto de dados brutos. Para a avaliação e caracterização de um valor anômalo é necessário o tratamento estatístico do banco

de dados, existindo vários métodos estatísticos para o cálculo do limiar de uma anomalia geoquímica (Andriotti, 2010).

Além da investigação de depósitos minerais, a aplicação dos métodos de exploração geoquímica abrange um extenso campo de estudo e é utilizado em áreas como a geologia médica, ecologia, agropecuária, e auxilia nas pesquisas de diferentes ramos da geologia, como a hidrogeologia, petrologia e mapeamento geológico (Licht, 1998).

2.2. Grupo Serra Geral

O Grupo Serra Geral, conceito usado por Hartmann & Baggio (2014), faz parte da província vulcânica Paraná-Etendeka (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997), a segunda maior província basáltica continental do mundo, e possui uma área de aproximadamente 917.000 km² (sul do Brasil, nordeste da Argentina, leste do Paraguai e oeste do Uruguai; Fig. 3). Considerando toda província Paraná-Etendeka (Brasil e Namíbia), o volume aproximado do magmatismo é de 1.700.000 km³, sendo superada apenas pelas Siberian Traps, na bacia de Tunguska, na Sibéria (Frank *et al.*, 2009). A pilha de derrames vulcânicos atinge uma espessura superior a 1700 m em seu depocentro, no limite leste do estado de São Paulo e norte do estado do Paraná (Gastmans *et al.*, 2012), e recobre a maior parte das rochas sedimentares da Bacia do Paraná (Zalán *et al.*, 1990), tendo como limite inferior os arenitos eólicos da Formação Botucatu (Milani, 1997; Milani *et al.*, 2007). Sedimentos terciários da Supersequência Bauru (Milani *et al.*, 2007) recobrem uma significativa porção das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral no norte da bacia, enquanto formações menores, como a Formação Cachoeirinha (Milani, 1997) e a Formação Tupanciretã (Coulon *et al.*, 1973; Favilla *et al.*, 1995) recobrem os basaltos do estado do Rio Grande do Sul.

O vulcanismo da província Paraná-Etendeka é proveniente de diferentes fontes mantélicas, resultado da abertura da porção sul do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior (ruptura do Gondwana), com a presença da pluma Tristão da Cunha (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997). Datações do vulcanismo do Grupo Serra Geral, pelos métodos Rb-Sr (Mantovani *et al.*, 1985), Ar-Ar (Turner *et al.*, 1994; Renne *et al.*, 1996; Stewart *et al.*, 1996; Ernesto *et al.*, 1999; Mincato, 2000), K-Ar (Rocha-Campos *et al.*, 1988) e U-Pb (Pinto *et al.*, 2011b; Janasi *et al.*, 2011) evidenciam que o momento de maior intensidade vulcânica ocorreu entre 130 e 133 Ma. O período total de vulcanismo ainda é um assunto discutido. Alguns trabalhos estimam um valor de 3

Ma para a extrusão das lavas do Grupo Serra Geral (Renne *et al.* 1992, 1996), enquanto outros autores estendem esse período para 10 Ma (Turner *et al.*, 1994, Stewart *et al.*, 1996). O intervalo de 16 Ma (119 - 135 Ma) para o período total de magmatismo também foi sugerido por Brückmann *et al.* (2014).



Figura 3. Mapa de distribuição das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral e de formações sedimentares sobrepostas à província vulcânica Paraná (modificado de Peate *et al.*, 1992).

A composição das lavas do Grupo Serra Geral é essencialmente bimodal, amplamente dominada por uma sequência toleítica de basaltos e andesitos basálticos (> 90%), com uma fração menor de rochas riolíticas e riodacíticas (Bellieni *et al.*, 1983; Piccirillo *et al.*, 1988a; Peate *et al.*, 1992; Nardy *et al.*, 2008), que recobrem cerca de 64.000 km² e representam cerca de 2,5% do volume total do Grupo Serra Geral (Nardy *et al.*, 2008). Os derrames basálticos foram classificados

em seis diferentes magmas-tipo, através de razões específicas e teores de elementos maiores e traços, e separados em dois grupos: alto-Ti (Pitanga, Urubici e Paranapanema) e baixo-Ti (Esmeralda, Gramado e Ribeira) (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997), com predominância de rochas basálticas alto-Ti na porção norte da Bacia do Paraná e baixo-Ti ao sul (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988; Piccirillo *et al.*, 1988b; Peate *et al.*, 1992).

O arcabouço tectônico da Bacia do Paraná possui significativos lineamentos resultantes de reativação de antigas suturas, resultante do fenômeno de Rifteamento Sul-Americano, que criou novos conjuntos de falhamentos e fraturas, que serviram como condutos para injeções de diabásio e extravasamento dos magmas máficos do Grupo Serra Geral. A partir de interpretação de mapas geofísicos de magnetometria, dados sísmicos e de imagens de satélite LANDSAT, foram identificados lineamentos de escala quilométrica com direção preferencial NW-SE e NE-SW no estado do Paraná, que representariam zonas de fraqueza do embasamento (Wildner *et al.*, 2006). Esse conjunto de falhas foi denominado de Arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982; Quintas *et al.*, 1999). Análogo a essa estrutura, o Arco de Rio Grande (oeste e noroeste do Rio Grande do Sul) também possui lineamentos com direção NW-SE, porém em escala menor e com estudos de pouco detalhe (Quintas *et al.*, 1999).

O Complexo Básico Lomba Grande é uma intrusão máfica-ultramáfica, localizada na região metropolitana de Porto Alegre, composta por diabásios, com idade aproximada de 125 Ma, e olivina-gabros, com idade calculada em aproximadamente 160 Ma. Este corpo é relacionado ao magmatismo da província vulcânica do Paraná e sua gênese é condicionada à ascensão de magmas picríticos através de falhamentos NW-SE; possuem afinidade geoquímica com basaltos de cadeia meso-oceânica (P-MORB). As intrusões de diabásio envolvem os corpos gabróicos e provavelmente provêm do mesmo processo de ascensão de líquido magmático por falhamentos. Este ambiente propicia condições favoráveis à concentração de elementos metálicos compatíveis de afinidade ultramáfica, como Cr, Ni e Co (Viero & Roisenberg, 1992).

2.3. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo de Noril'sk - Talnakh (Sibéria)

O potencial metalogenético de origem magmática do Grupo Serra Geral ainda é pouco conhecido. Os modelos até hoje realizados focalizaram suas pesquisas em possíveis depósitos de Ni-Cu-EGPs e compararam os controles estruturais e

geoquímicos das ocorrências metálicas com outras mineralizações em províncias vulcânicas continentais, como o modelo de Noril'sk – Talnakh, nos *Traps* Siberianos (Mincato 1994, 2000; Romanini & Albuquerque, 2000, Wildner *et al.*, 2006; Abram *et al.*, 2008; Goulart *et al.*, 2011) e o modelo de Skaegaard, na província vulcânica do Atlântico Norte, na Groenlândia (Arioli, 2008).

O magmatismo da província vulcânica de Noril'sk ocorreu durante o Permiano Superior e Triássico Inferior (Kamo *et al.*, 2003), na bacia de Tunguska, na Sibéria, associado a regimes de rifteamento continental com ação de pluma mantélica, similar ao processo de abertura do Atlântico Sul, comportando uma pilha com mais de 2200 m de rochas vulcânicas, dominadas por basaltos continentais de composição toleítica a picrítica (olivina-basalto); subordinadamente há ocorrência de tufo e associações alcalinas, além de intrusões ultramáficas de gabro-doleritos (Naldrett *et al.*, 1992; Lightfoot *et al.*, 1993; Wooden *et al.*, 1993; Mincato, 1994; Romanini & Albuquerque, 2000; Arioli, 2008). Todas as fases magmáticas possuem cumulos de olivina e plagioclásio (Romanini & Albuquerque, 2000).

A mineralização de Ni-Cu-EGPs em Noril'sk é controlada tectonicamente pela falha de Kharaelakh, com intrusões de gabro-doleritos (localmente sofrendo processo de metassomatismo) com altos teores de S (de 0,95% a 2,2%), Se e As. Esses elementos provêm de contaminação crustal por assimilação de espessas camadas de carvão, camadas petrolíferas e evaporitos com sulfatos depositados em unidades sedimentares sob as rochas vulcânicas (Romanini & Albuquerque, 2000; Arioli, 2008).

Análogo a esse ambiente, as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral estão dispostas sobre as unidades sedimentares da Bacia do Paraná, constituída por significativas camadas de carvão (Formação Rio Bonito) e folhelhos carbonosos com pirita disseminada (Formação Irati e Serra Alta). Por essas formações possuírem teores significativos de S e serem intrusionadas por *sills* básicos, os lineamentos do Arco de Ponta Grossa são potenciais alvos geológicos para a presença de depósitos economicamente viáveis de Ni-Cu-EGPs de acordo com o modelo Noril'sk – Talnakh (Romanini & Albuquerque, 2000). A interpretação de dados geoquímicos de sedimentos ativos de drenagens no sudoeste do Paraná mostra fortes anomalias de Ni, Cu e EGP, além de Cr, Co, Pt, Pd, Ti e V diretamente relacionadas com os lineamentos NW-SE associados ao Arco de Ponta Grossa. Porém, as intrusões mapeadas correspondem a diques e *sills* isentos de textura cumulática e diferenciação magmática, que, em conjunto com as interpretações dos dados geofísicos e litogeoquímicos, não favorecem o investimento imediato na exploração

mineral para mineralizações de Ni-Cu-EGP (Abram *et al.*, 2008). Por outro lado, ocorrência de cobre nativo e sulfetos de ferro, cobre, níquel, cobalto e zinco nos *sills* básicos do Grupo Serra Geral mostram boas perspectivas para mineralizações semelhantes às observadas nos *Traps* Siberianos (Renner, 2010).

2.4. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo de Skaergaard (Groenlândia)

O outro modelo exploratório proposto para o estudo de possíveis mineralizações metálicas no Grupo Serra Geral é o de Skaergaard, no leste da Groenlândia, que faz parte da província ígnea do Atlântico Norte e possui significativos depósitos de Ni-Cu-EGP, além de mineralizações de Au.

O vulcanismo ocorreu em um único pulso magmático no Terciário Inferior, resultado de processos extensionais, com ação de pluma mantélica, associados com o rifteamento do Atlântico Norte (Brooks & Gleadow, 1977; Larsen & Watt, 1985; Manning & Bird, 1991; Nielsen & Brooks, 1995; Brooks *et al.*, 1999; Miller & Andersen, 2002). A associação vulcânica possui uma espessura superior a 3600 m dominada por basaltos toleíticos no topo e picríticos na base, com intrusões de gabro, leucogabro, ferro-gabro, anortositos e troctolitos. Diferentemente de Noril'sk, em Skaergaard há diferenciação magmática em sistema fechado nas intrusões ultramáficas, resultando em horizontes cumuláticos de ligas metálicas e sulfetos disseminados de Au, Pd, Ti, Pt e V, em óxidos como a ilmenita, magnetita e cromita. Além disso não há depleção de EGP, Ni, Cu e Cr na sequência estratigráfica nem controles estruturais por falhamentos profundos, o que ocorre em Noril'sk. Outra diferença com os depósitos dos *Traps* Siberianos é o baixo teor de Pt e Pd no sistema magmático (5 a 50 ppb em Skaergaard e em torno de 500 ppb em Noril'sk) e os baixos valores de enxofre (< 0,01% em Skaergaard e até 2,2% em Noril'sk; Romanini & Albuquerque, 2000; Arioli, 2008). Juntamente com a interpretação de dados isotópicos de ^{34}S , a assinatura geoquímica da associação vulcânica de Skaergaard mostra que não houve contaminação crustal nos basaltos (Arioli, 2008).

O Grupo Serra Geral é amplamente dominado por basaltos toleíticos subsaturados em S, e conseqüentemente não há magmatismo picrítico em volume significativo. Pesquisas evidenciam que as concentrações de EGP são controladas pelo Fe em condições de máxima fugacidade de oxigênio, condicionando esses elementos a se concentrarem na magnetita, mineral comum nos derrames de ferro-basaltos (> 15% FeO_t) do Grupo Serra Geral (Arioli, 2008). O mesmo trabalho

desconsidera uma significativa contaminação crustal nas lavas basálticas devido aos baixos teores de Pd e Pt, mesmo contendo importantes fontes de S nas formações carboníferas da Bacia do Paraná e essas estarem intrudidas por *sills* e diques básicos.

Por possuir a mineralização na base de óxidos em magmas subsaturados em S, sem relação direta com falhas e com domínio litológico de basaltos toleíticos, o modelo de Skaergaard para mineralizações de Ni-Cu-EGP-Au também foi proposto como uma possibilidade para a exploração de metais na província vulcânica Paraná (Arioli, 2008).

2.5. Potencial metalogenético do Grupo Serra Geral pelo modelo hidrotermal

O modelo metalogenético por processos hidrotermais leva em consideração o fato do Grupo Serra Geral estar disposto sobre o Aquífero Guarani (Araújo *et al.*, 1999) e este ter sido aquecido por intrusões (*sills*) relacionadas ao magmatismo Serra Geral, causando a ascensão de água quente e vapor (Hartmann, 2014).

Durante o vulcanismo da Bacia do Paraná, a ascensão de vapor d'água por aquecimento do Aquífero Guarani, devido ao calor residual gerado pelo rifteamento do Atlântico Sul e intrusões magmáticas na forma de *sills* nas formações sedimentares da Bacia do Paraná, gerou uma série de eventos hidrotermais de baixa temperatura (< 150 °C, Duarte *et al.*, 2009, 2014; Hartmann *et al.*, 2012a; Hartmann, 2014) que remobilizaram elementos como Si (geodos de ametista e ágata) e Cu (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Baggio *et al.*, 2014). Pinto *et al.* (2011a) sugerem que o Cu é remobilizado principalmente dos minerais opacos e clinopiroxênios pelo fluido hidrotermal. Em outros locais da província vulcânica Paraná, os eventos hidrotermais geraram temperaturas superiores a 150 °C, capazes de remobilizar Cu, Au e Ag e precipitar estes metais em extruditos de areia e brechas hidrotermais (Arena *et al.*, 2014a, 2014b).

Os eventos hidrotermais foram denominados H1, H2 e H3 (Figura 4, Hartmann *et al.*, 2012a) e envolvem:

- H1 - argilização dos basaltos, selamento do derrame com preenchimento das vesículas com minerais do grupo da sílica (principalmente zeolitas e celadonita) e remobilização e precipitação de Cu nativo em disjunções colunares e preenchendo vesículas (Pinto *et al.*, 2011a; Pinto & Hartmann, 2014; Baggio *et al.*, 2014; Arena *et al.*, 2014a, 2014b).

- H2 - preenchimento de fraturas formando diques e extruditos (Hartmann *et al.*, 2012b, 2013; Duarte & Hartmann, 2014) com areia silicificada (resíduo do fluido hidrotermal supersaturado em sílica), e remobilização e precipitação de ouro nativo e prata nos extruditos (Arena *et al.*, 2014a, 2014b).

- H3 - evento explosivo gerador de brecha hidrotermal e da abertura e preenchimento de cavidades no horizonte maciço do basalto, formando os grandes geodos de ametista e ágata (Duarte *et al.*, 2009, 2014; Hartmann *et al.*, 2012a).

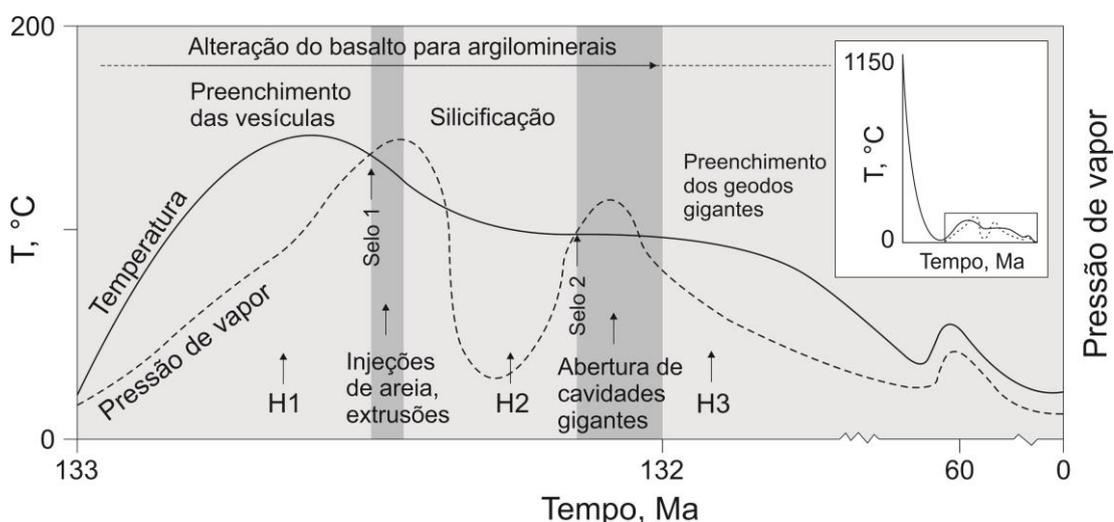


Figura 4. Modelo dos eventos hidrotermais H1, H2 e H3, com o gradiente térmico, pressão de vapor e sequência de processos de alteração, selamento e abertura de cavidades nos basaltos do Grupo Serra Geral (modificado de Hartmann *et al.* 2012a).

Análises isotópicas de oxigênio em inclusões fluídas nas ametistas do distrito mineiro de Los Catalanes (Uruguai) mostrou que esse fluido possui origem meteórica (28 - 78 °C, Duarte *et al.*, 2011).

A ocorrência de metais nobres (ouro e prata) e cobre está associada aos arenitos silicificados e brechas hidrotermais cimentadas por crisocola e malaquita (Arena *et al.*, 2014a, 2014b).

Através de perfis geofísicos de gamaespectrometria e interpretação de imagens de satélite, estruturas denominadas silica gossans (Pertille *et al.*, 2013; Baggio *et al.*, 2014) foram caracterizadas como importantes guias prospectivos para Cu, Au e Ag (Baggio *et al.*, 2014). Essa estrutura é evidenciada por regiões úmidas, geralmente nos basaltos de topo dos morros, com alta silicificação e ferrificação, de coloração ocre, e possuem como principal característica uma forte anomalia na resposta gamaespectrométrica (atividade radiotiva do K, U e Th). Em ocorrências exclusivas de Cu nativo, como em Taquaruçu do Sul, no noroeste do estado do Rio

Grande do Sul a anomalia é negativa e o processo hidrotermal é de mais baixa temperatura ($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), devido à alteração para esmectita e consequente lixiviação do K (Baggio *et al.*, 2014). Nos locais com ocorrências de Cu-Au-Ag nos extruditos de areia e brechas hidrotermais (Arena *et al.*, 2014a, 2014b), a anomalia é positiva e o processo hidrotermal é de mais alta temperatura ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), devido à argilização do basalto para illita e consequente retenção de K (Baggio *et al.*, 2014).

3. METODOLOGIA

A maioria dos estudos relacionados ao potencial metalogenético do Grupo Serra Geral, até o momento, usam geoquímica de rocha e química mineral como principal metodologia de trabalho. O trabalho de Wildner *et al.* (2006) é o estudo mais significativo sobre recursos minerais metálicos da província vulcânica Paraná através da análise geoquímica de sedimentos ativos de drenagens, na qual coletaram mais de 700 amostras no sudoeste do estado do Paraná. Este estudo serviu como base para o atual projeto, que objetiva a avaliação do potencial metalogenética do Grupo Serra Geral para Cu e Cr, respectivamente nos municípios de Braga e Entre-Ijuís, noroeste do Rio Grande do Sul.

A metodologia deste estudo envolveu a análise prévia de 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens, cobrindo a área da Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul. Esta análise envolveu a confecção de mapas geoquímicos regionais e o cálculo de parâmetros estatísticos para a determinação dos valores anômalos. Esse processo auxiliou na determinação dos alvos (Braga e Entre-Ijuís) do estudo de detalhe, que envolveu coleta, preparação e análise de amostras de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia de pontos estratégicos da bacia de captação da amostra anômala previamente analisada. Para a representação dos resultados, foram confeccionados mapas geoquímicos de detalhe de cada alvo e análises de correlação bivariada e multivariada dos elementos de interesse.

3.1. Cartografia geoquímica

Para a visualização regional de altos teores de metais e seleção dos alvos de estudo (Braga e Entre-Ijuís), foram confeccionados mapas geoquímicos de isotores da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, através do *software* ArcGIS 10®, usando o cálculo IDW (*Inverse Distance Weighting* ou Inverso da Distância Ponderada) para

interpolação de pontos. Este método de interpolação é relativamente eficiente em prospecção geoquímica por minimizar a área de influência da amostra, já que o valor do dado geoquímico de sedimento de corrente representa uma característica pontual e não espacial. O método de interpolação IDW possui certas limitações, sendo a mais prejudicial no caso de malhas densas de amostragem. Nesse caso, alguns valores anômalos podem não ser representados no mapa devido à influência das amostras adjacentes de baixo valor. Para os mapas geoquímicos de isotores em escala regional, não foram utilizados os parâmetros estatísticos referentes aos valores anômalos na escala de cores devido aos valores com teores muito superiores aos definidos pelos *outliers*, o que resultaria em uma extrapolação significativa na área de influência das amostras anômalas. Sendo assim, os valores da escala de cor foram determinados empiricamente de acordo com a melhor representação visual da anomalia.

Para a visualização de detalhe das anomalias nos alvos selecionados, foram confeccionados mapas geoquímicos de simbologia proporcional ao teor do elemento de interesse, com auxílio do *software* ArcGIS 10®, usando a base cartográfica em SIG na escala 1:50.000 (Hazenack & Weber, 2010). A simbologia foi dividida em cinco classes: valores menores que o 1º quartil; valores entre o 1º e o 3º quartil; valores entre o 3º quartil e o limite inferior de *outlier* alto; valores dentro do campo de *outlier* altos; e valores acima do mínimo determinado como *outlier* anômalo. Em casos que a malha de amostragem não possuía valores menores que o 1º quartil, esta classe foi ignorada. Em casos que a anomalia de interesse possuía valor superior a duas vezes o *outlier* anômalo, mais uma classe era adicionada para dar ênfase na representação do dado. Este tipo de mapa é muito utilizado em pesquisas de prospecção geoquímica por haver independência na representação gráfica de cada amostra, não influenciando o adensamento da malha de amostragem.

3.2. Tratamento estatístico e análise de correlação

A CPRM-PA cedeu para o atual estudo um banco de dados com 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens na Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul, com ênfase nos derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral, para a pesquisa de recursos minerais, principalmente metálicos. O tratamento estatístico dos dados geoquímicos é fundamental para a compreensão do comportamento dos elementos em cada ambiente geológico.

Inicialmente, foi necessário separar conjuntos de amostras de acordo com os tipos de rocha predominante na área de captação da drenagem na qual o sedimento foi coletado, para compreender a assinatura geoquímica do sedimento erodido de cada unidade geológica. Para a determinação das unidades, foi usado como base o mapa geológico do Rio Grande do Sul da CPRM, desenvolvido por Wildner *et al.* (2006). Os conjuntos de amostras foram separados em: Formação Tupanciretã, Grupo Serra Geral (dividido em unidades ácidas e básicas, sendo esta subdividida em Esmeralda, Paranapanema e Gramado), rochas sedimentares da Bacia do Paraná e Complexo Básico Lomba Grande.

Após a classificação das amostras pela sua área de amostragem, foram calculados parâmetros estatísticos como média, mediana, valor mínimo, valor máximo e desvio padrão para o entendimento do comportamento geoquímico de elementos de interesse em cada unidade. Pelo fato deste estudo ter como objetivo a avaliação de anomalias de metais no Grupo Serra Geral, foram calculados somente os parâmetros estatísticos das rochas vulcânicas da Província do Paraná.

Para a determinação do valor anômalo de um elemento, foi adotado o método do diagrama de *Boxplot*, amplamente usado para tratamento estatístico em prospecção geoquímica por se tratar de um método robusto, com representação gráfica simples, que não assume nenhum modelo estatístico particular para ajuste de dados, evitando a necessidade de transformação dos mesmos (Andriotti, 2010). Este método parte da hipótese que os teores de cada elemento possuem uma distribuição normal (simétrica ou assimétrica), e para provar isso, foram feitos histogramas de frequência dos elementos de interesse nas amostras coletadas nos basaltos Paranapanema e Gramado. O primeiro passo foi determinar o 1º e 3º quartis, que representam o valor máximo de 25% e 75% da população de amostras (Fig. 5). Esses valores são os limites inferior e superior da caixa central do diagrama, que representa 50% das amostras. A diferença desses valores é chamado de IQR (*Inter Quartile Range*) ou valor de interquartil. Os teores extremos são chamados de *outliers*, e foram divididos neste estudo em *outliers* altos (teores significativos não anômalos) e *outliers* anômalos. O valor mínimo dos *outliers* altos foi determinado a partir da soma do 3º quartil com o valor do IQR multiplicado por 1,5, enquanto o valor mínimo dos *outliers* anômalos foi determinado pela soma do 3º quartil com o valor do IQR multiplicado por 3. O esquema do diagrama *Boxplot* está representado na figura 6.

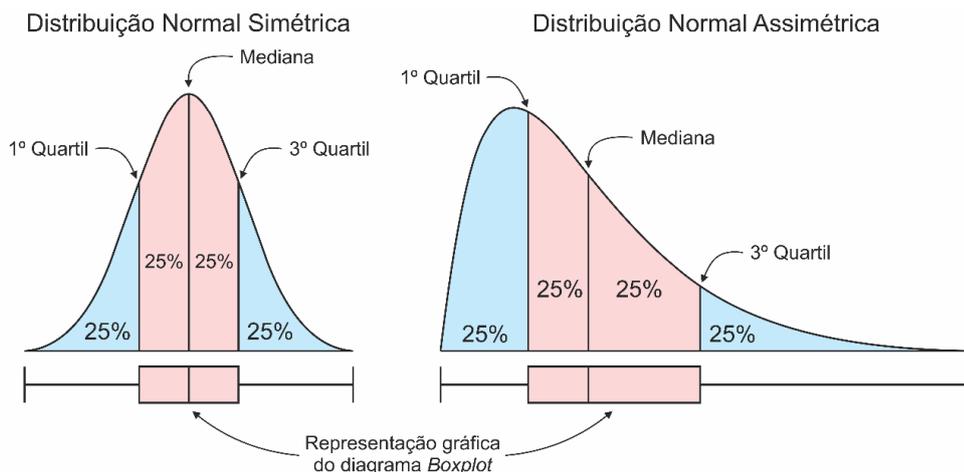


Figura 5. Esquema de distribuição normal simétrica e assimétrica, com a identificação da mediana, do 1º e 3º quartis e a representação gráfica do diagrama *Boxplot* (modificado de Andriotti, 2010).

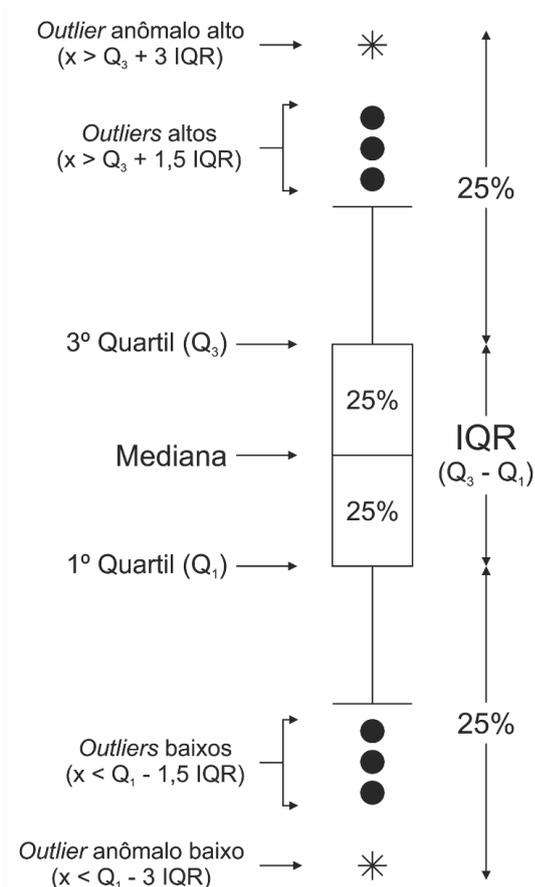


Figura 6. Representação gráfica e cálculos matemáticos do diagrama de *Boxplot*, identificando a mediana, 1º e 3º quartis, IQR e *outliers* altos e anômalos (modificado de Andriotti, 2010).

Os parâmetros estatísticos deste método foram calculados para todas as unidades do Grupo Serra Geral, com excessão dos *outliers* baixos, por não interessarem no presente estudo. Os diagramas foram feitos somente para as

unidades básicas Paranapanema e Gramado, na qual estão localizadas as anomalias de interesse do projeto. Todos os cálculos foram realizados com o auxílio do *software* Microsoft Office Excel 2013®, enquanto os diagramas e histogramas de frequência foram confeccionados no *software* ArcGIS 10®, com a extensão Geochemistry for ArcGIS®, da Geosoft, e editados no CorelDraw X7®.

A análise de correlação entre os elementos foi realizada com método bivariado e multivariado. O método bivariado envolveu gráficos que relaciona os teores de dois elementos químicos e facilita a determinação de *trends* com significados geoquímicos que auxiliam na interpretação dos dados. O fato de analisar somente dois elementos por gráfico é a principal limitação do método.

Já o método multivariado utilizado foi a matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson, que resulta em um valor adimensional que varia de -1 a 1, sendo -1 significando uma correlação negativa perfeita, 0 uma independência entre os elementos e 1 uma correlação positiva perfeita (Filho & Júnior, 2009). A limitação do método envolve a dificuldade de interpretações por não poder analisar os *trends* característicos de assinaturas geoquímicas, além da possibilidade de distorção do valor por teores aberrantes (Licht *et al.*, 2006). A equação para o cálculo do coeficiente de Pearson é:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{Sx} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{Sy} \right)$$

r = coeficiente de Pearson

n = nº de amostras

x_i = teor do elemento x

y_i = teor do elemento y

\bar{X} = média aritmética dos teores do elemento x

\bar{Y} = média aritmética dos teores do elemento y

Sx = desvio padrão do elemento x

Sy = desvio padrão do elemento y

Para interpretação dos resultados da matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson, foram definidos os seguintes intervalos para cada correlação:

- 0 a 0,19: correlação muito fraca
- 0,20 a 0,39: correlação fraca
- 0,4 a 0,59: correlação moderada
- 0,6 a 0,79: correlação forte
- 0,8 a 1: correlação muito forte

Os elementos analisados foram definidos por sua mobilidade geoquímica em relação ao intemperismo. Elementos importante em análises de rocha total, como K e P, possuem mobilidade alta em ambiente secundário (Eggleton *et al.*, 1987; Licht 1998), e por isso não foram incluídos nas análises de correlação. O Mg, mesmo possuindo mobilidade alta, foi analisado por ter boa correlação com elementos identificados com ambiente ultramáfico. Os demais elementos utilizados para a caracterização geoquímica foram os considerados imóveis, de baixa mobilidade ou baixa a moderada, sendo eles: Al, Fe, Ti (Rose *et al.*, 1979; Eggleton *et al.*, 1987; Licht, 1998), Cr, Cu, Ni, V e Zn (Eggleton *et al.*, 1987).

Os gráficos de análise bivariada foram confeccionados no *software* ArcGIS 10® e editados no CorelDraw X7®. Já a matriz de correlação foi feita com o auxílio do *software* Microsoft Office Excel 2013®.

3.3. Sedimento ativo de drenagem

A análise de sedimento ativo de drenagem é capaz de identificar ou estimar o potencial para a ocorrência de corpos mineralizados através do processamento estatístico dos dados geoquímicos adquiridos das amostras coletadas em campo. Através de valores anômalos de um dado elemento em relação às amostras adjacentes ou em relação à litologia regional previamente estudada, é possível direcionar o estudo a uma determinada área e adensar a malha de amostragem para definir o potencial metalogenético da região.

O conceito de sedimento de corrente determinado por Brim (1985) separa dois grupos:

- Sedimento ativo de drenagem: conjunto de material não consolidado que foi ou está sendo mecanicamente transportado na corrente do rio por saltação, tração ou suspensão junto com o material que foi quimicamente precipitado. Este material é constantemente movimentado e misturado na zona de maior turbulência de corrente, o que promove uma adequada homogeneização do material resultante dos processos de alteração das rochas de toda bacia drenada pelo rio.
- Sedimento inativo de drenagem: conjunto de material depositado marginalmente no trecho de maior velocidade da corrente durante ou logo após o período de enchentes.

Este trabalho procurou coletar e analisar o material mais coerente possível com a definição de sedimento ativo de drenagem para definir o potencial metalogenético do Grupo Serra Geral para Cu e Cr em Braga e Entre-Ijuís, respectivamente, no noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

3.3.1 Amostragem em campo

Após a análise das 2104 amostras de sedimentos ativos de drenagens realizadas pela CPRM-PA e a definição dos alvos nos municípios de Entre-Ijuís e Braga, noroeste do Rio Grande do Sul, foram determinados alvos para a coleta de amostras de sedimentos de correntes para o estudo de detalhe (Fig. 7 e 8). Esses alvos consistiram em drenagens de segunda, terceira e quarta ordem à montante da amostra anômala previamente coletada. A coleta foi realizada em trabalho de campo no período de 23/05/2014 a 27/05/2014.

A amostra foi transportada em um saco plástico impermeável e catalogada de acordo com o padrão de nomenclatura usada pela CPRM. Notas importantes sobre a geologia local, poluição, dimensões da drenagem e localização da amostra em relação ao curso d'água (acima ou abaixo do nível d'água) foram devidamente registradas em tabela padrão.

Em campo foram utilizados materiais de coletas de plástico para não ocorrer contaminação de metais na amostra (Fig. 9). O material foi coletado em zonas onde a energia de fluxo da drenagem era menor, geralmente devido a algum obstáculo natural, e foi peneirado, quando necessário, para amostrar somente a fração areia até a fração argila. Não há um volume definido de material, pois após a preparação da amostra no laboratório apenas cerca de 60 ml de material na fração argila foi enviado para análise, porém, por questões de logística, foi amostrado cerca 3 a 4 kg por alvo.

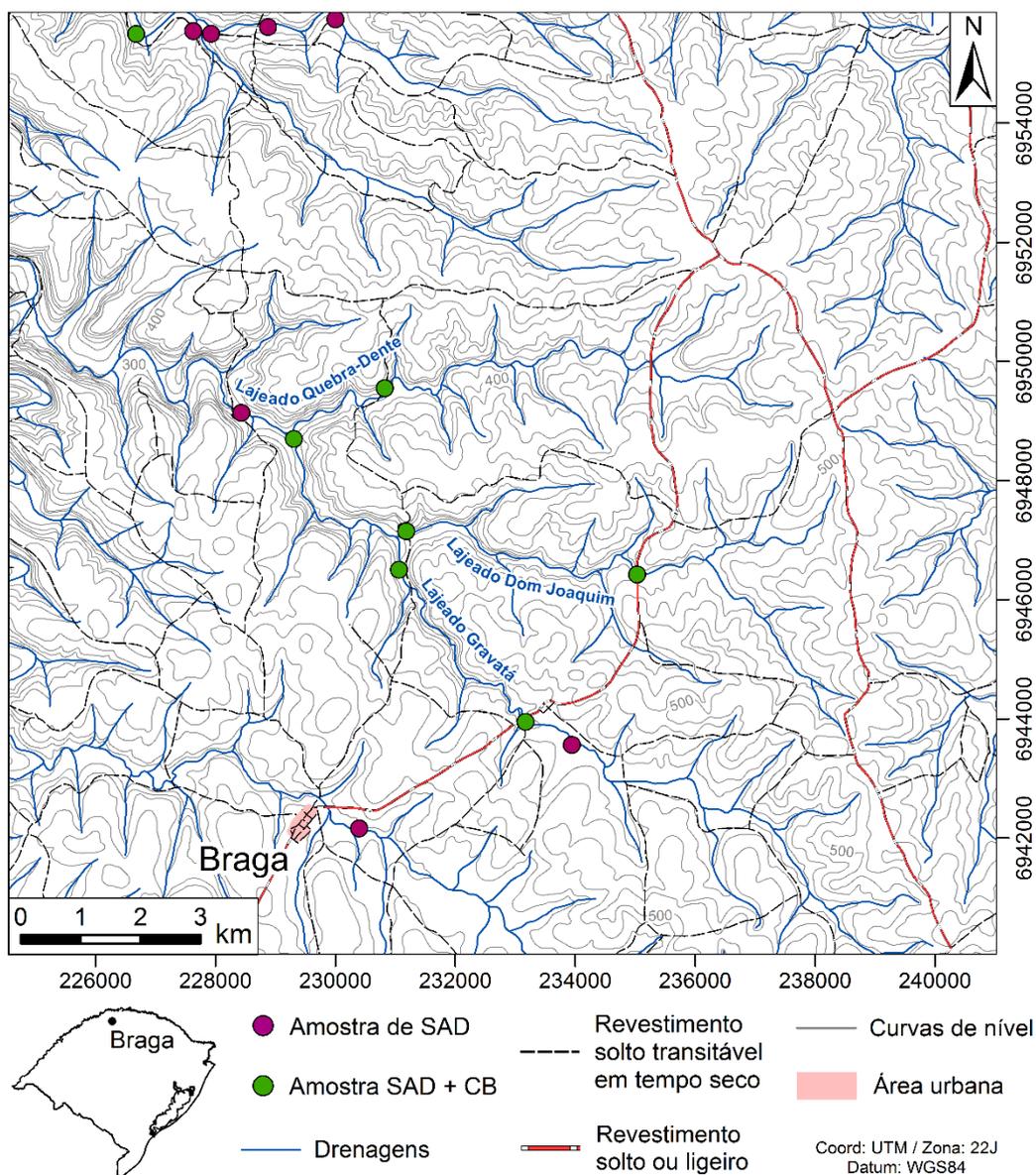


Figura 7. Mapa de amostragem de detalhe na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente, em Braga. Os pontos roxos simbolizam as amostras de sedimentos ativos de drenagem (SAD) analisadas e cedidas pela CPRM, enquanto os pontos verdes são as amostras de estudo de detalhe, que envolveram coleta de sedimentos ativos de drenagem (SAD) e concentrado de bateia (CB).

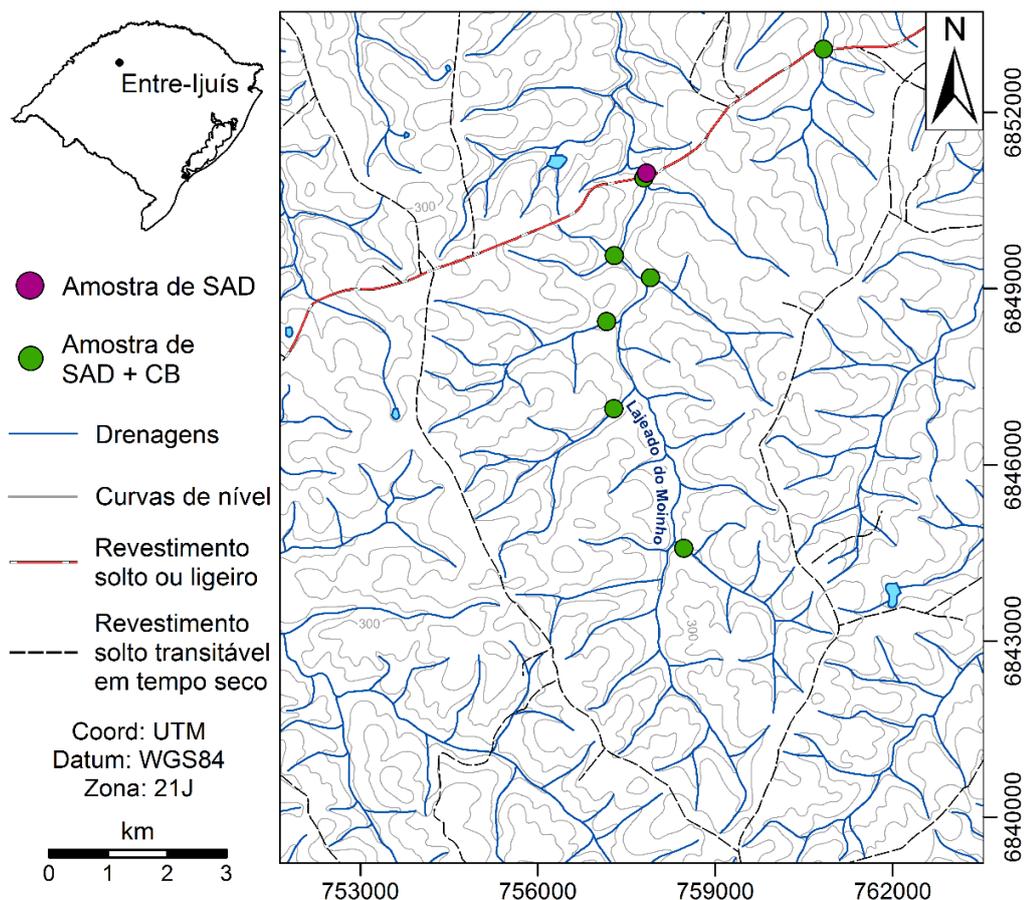


Figura 8. Mapa de amostragem de detalhe em parte da bacia de captação do Lajeado do Moinho, em Entre-Ijuís. Os pontos roxos simbolizam as amostras de sedimentos ativos de drenagem (SAD) analisadas e cedidas pela CPRM, enquanto os pontos verdes são as amostras de estudo de detalhe, que envolveu coleta de sedimentos ativos de drenagem (SAD) e concentrado de bateia (CB).



Figura 9. Amostragem de sedimento ativo de drenagem em campo usando materiais de plástico para não haver contaminação.

3.3.2 Preparação das amostras em laboratório

As amostras de sedimentos ativos de drenagens necessitam de tratamento em laboratório antes de serem enviadas para análise química. Esse processo (Fig. 10a) é padrão em todas as amostras e é necessário para analisar somente a fração argila transportada pela drenagem, que contém os elementos das rochas erodidas e intemperizadas. A análise do material bruto vindo do campo acarreta alta probabilidade de contaminação. As amostras de sedimentos ativos de drenagens foram preparadas no Laboratório de Sedimentologia da CPRM-PA, pelo técnico Floro de Menezes Filho.

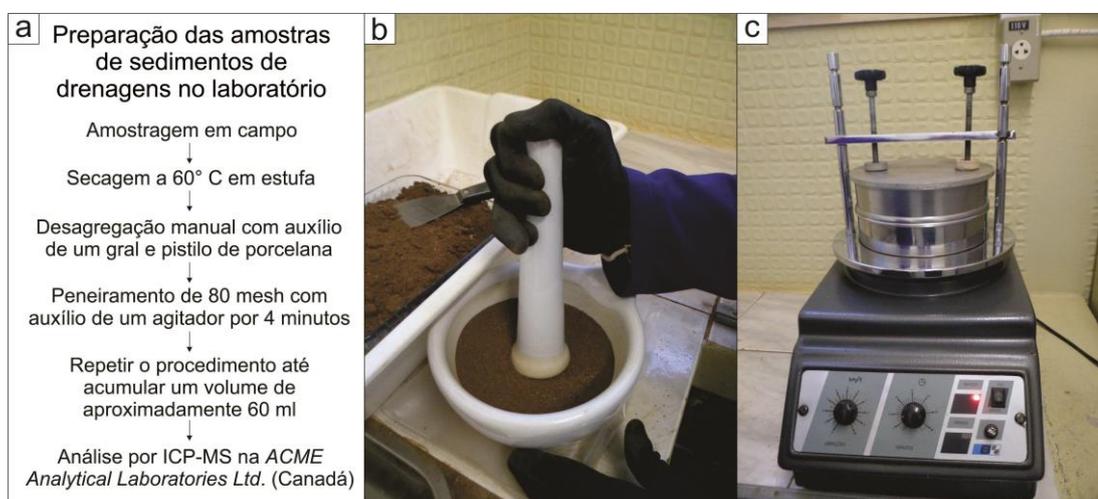


Figura 10. Preparação da amostra de sedimento de drenagem em laboratório. a) Fluxograma do processo de preparação das amostras de sedimentos de correntes; b) Processo de desagregação do material, com o uso de gral e pistilo de porcelana. c) Agitador Bertel com material sendo peneirado na fração 80 mesh.

Após a coleta das amostras de sedimentos de drenagens em campo, elas foram verificadas uma a uma em relação à sua nomenclatura e localização. O material foi levado a uma estufa da marca Solab, modelo SL 102/480, a uma temperatura de 60 °C para secagem. A retirada de umidade da amostra provoca a formação de agregados que dificultam no processo de peneiramento, por isso foi realizado o processo de desagregação desse material com o auxílio de um gral e um pistilo de porcelana (Fig. 10b). Após a desagregação, o material passou pelo processo de peneiramento na fração 80 *mesh* (0,177 mm) em um agitador Bertel por quatro minutos (Fig. 10c). Após o processamento de cada amostra, todo material foi limpo com jato de ar comprimido e lavado para minimizar a possibilidade de contaminação da amostra a ser processada posteriormente.

O método foi repetido até acumular dois recipientes com volume aproximado de 60 ml de material, na qual um é enviado para *ACME Analytical Laboratories LTD.* (Vancouver, Canadá) para análise multielementar em ICP-MS (código AQ250-EXT), e outro é armazenado nos aposentos da CPRM para material de contraprova.

3.4. Concentrados de bateia

A análise do concentrado de bateia é uma das técnicas mais utilizadas em prospecção geoquímica devido ao baixo custo e à integração com as amostras de sedimentos ativos de drenagens, já que ambos materiais costumam ser coletados no mesmo local ou muito próximos, visando salientar contrastes e discriminar áreas mineralizadas do panorama geoquímico e geológico regional (Licht, 1998).

Os minerais de interesse no concentrado de bateia são os minerais resistentes com densidade superior a $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Licht, 1998). Também chamados de minerais pesados, possuem alta resistência mecânica e aos processos intempéricos, e a partir da separação de frações características é possível determinar uma assembleia mineralógica capaz de determinar a possível rocha fonte e auxilia para a avaliação do potencial metalogenético regional.

Muitos desses minerais possuem altos teores de elementos metálicos, como a cromita, magnetita, pirita e ouro nativo, sendo uma técnica útil para a prospecção de elementos e minerais desta natureza. O interesse na geocronologia de uma determinada área também pode usar a técnica de concentrados de bateia para separar zircões, já que este mineral também possui características físico-químicas apropriadas para este método (Licht, 1998).

A análise do material coletado pelo concentrado de bateia depende da finalidade do estudo. Uma pesquisa com o foco na identificação de minerais valiosos, como ouro e diamante, pode restringir o trabalho na observação dos minerais através das suas características cristalográficas e proporções de ocorrência na amostra (Licht, 1998). Como o atual trabalho visa a integração dos dados geoquímicos de sedimentos ativos de drenagens com o resultado da análise dos concentrados de bateia, o objetivo foi identificar minerais característicos com altos teores dos elementos alvos, ou seja, minerais ricos em Cr e Cu.

3.4.1 Amostragem em campo

A amostragem em campo do concentrado de bateia é a etapa mais importante do método, já que é necessária uma técnica apurada para fazer uso da correnteza da drenagem para separar os minerais pesados dos leves usando uma bateia. Para as amostragens serem confiáveis, elas foram realizadas pelos técnicos prospectores da CPRM, Luiz Alberto Costa Silva e Bruno Francisco Bragança Schiehl.

Os pontos de amostragem dos concentrados de bateia foram os mesmos das amostras de sedimentos ativos de drenagens, buscando zonas de diminuição brusca na energia de transporte da drenagem para que haja deposição e concentração de minerais pesados no local. A presença de cascalho foi usada como base para a coleta dos concentrados.

O primeiro passo foi coletar 20 l de material bruto, retirando somente a fração matacão (> 256 mm). Após a coleta do material bruto, o mesmo foi peneirado na fração areia (< 2 mm) antes de passar pelo processo de separação por bateia (Fig. 11a). A bateia utilizada é de alumínio sem emendas salientes e o fluido separador foi a água corrente da drenagem (Fig. 11b). A umidade excessiva da amostra é retirada ainda em campo e as amostras foram transportadas em sacos plásticos impermeáveis e catalogadas de acordo com o padrão de nomenclatura usado pela CPRM.

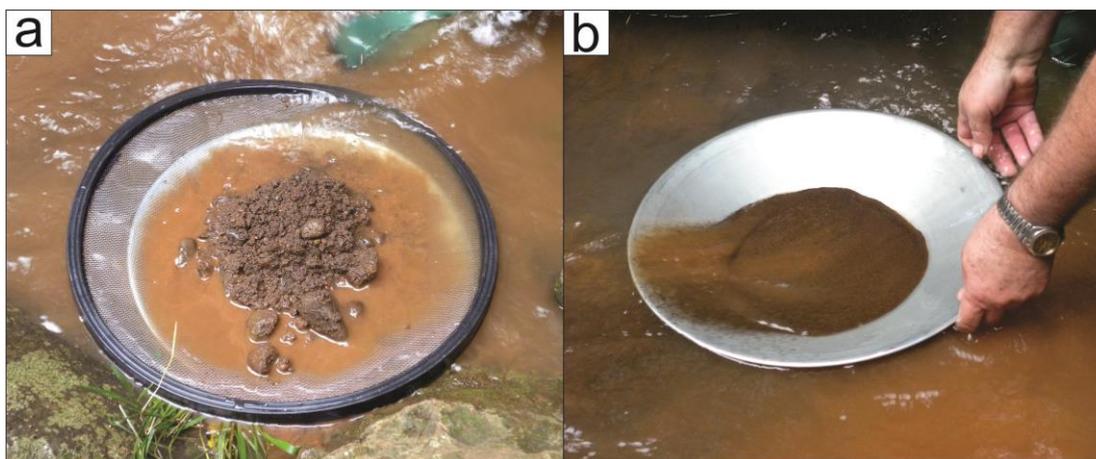


Figura 11. Amostragem de concentrado de bateia. a) Peneiramento do material bruto antes de utilizar a bateia; b) separação dos minerais pesados dos leves utilizando bateia de alumínio com auxílio da corrente da drenagem.

3.4.2 Preparação e análise em laboratório

As amostras de concentrados de bateia possuem grande importância no ramo de prospecção geoquímica por oferecerem informações sobre a litologia erodida pela drenagem, a partir da identificação de uma associação mineralógica característica. O volume desse material varia de acordo com a litologia da área amostrada. No Grupo Serra Geral, as amostras localizadas em drenagens que erodem basaltos possuem grande volume de material (entre 3 kg a 4 kg, sendo a maioria composta por magnetita, hematita e ilmenita), enquanto as amostras localizadas em regiões de rochas ácidas possuem um volume menor (geralmente menos de 0,3 kg). As amostras de concentrados de bateia foram preparadas e analisadas visualmente no Laboratório de Sedimentologia da CPRM-PA, pelo geólogo João Henrique Wustrow Castro, com o auxílio do técnico Floro de Menezes Filho.

Em laboratório, as amostras foram verificadas em relação a sua nomenclatura e localização, assim como as de sedimentos de correntes, para posteriormente serem preparadas e analisadas de acordo com um padrão de processos (Fig. 12a). O primeiro passo foi concentrar os minerais pesados, principalmente metálicos, em uma microbateia de porcelana (Fig. 12b). O material concentrado no fundo da microbateia foi analisado em lupa binocular para a contagem de pontos de metais como ouro, prata e platina, que foram classificados pelo seu tamanho determinado de forma empírica pelo técnico. No processo de microbateia, o volume total da amostra é analisado e nenhum material é descartado.

Após a análise de microbateia, o material foi colocado em uma estufa da marca Solab, modelo SL 102/480, a uma temperatura de cerca de 100 °C para secagem e então pesado em uma balança de precisão, para posteriormente serem peneirados na fração 16 mesh. Após esse procedimento, as partículas ferromagnéticas foram separadas através de um ímã de mão (Fig. 12c) para que esses grãos não dificultassem o trabalho do separador magnético Frantz. A verificação de minerais radioativos, principalmente a scheelita, foi realizada com o auxílio de raios ultravioleta, para então a amostra ser preparada para ser separada no Frantz. O preparo dessas amostras envolveu o quarteamento e homogeneização da amostra, e o uso de 30 g a 60 g de material, dependendo da finalidade do estudo de cada amostra. Não foi utilizado o volume total do material pelo fato do separador Frantz não ser ágil o suficiente para separar o número de amostras estudadas, principalmente por se tratar de material proveniente de rochas vulcânicas básicas, que acumula cerca de 3 kg de minerais pesados.

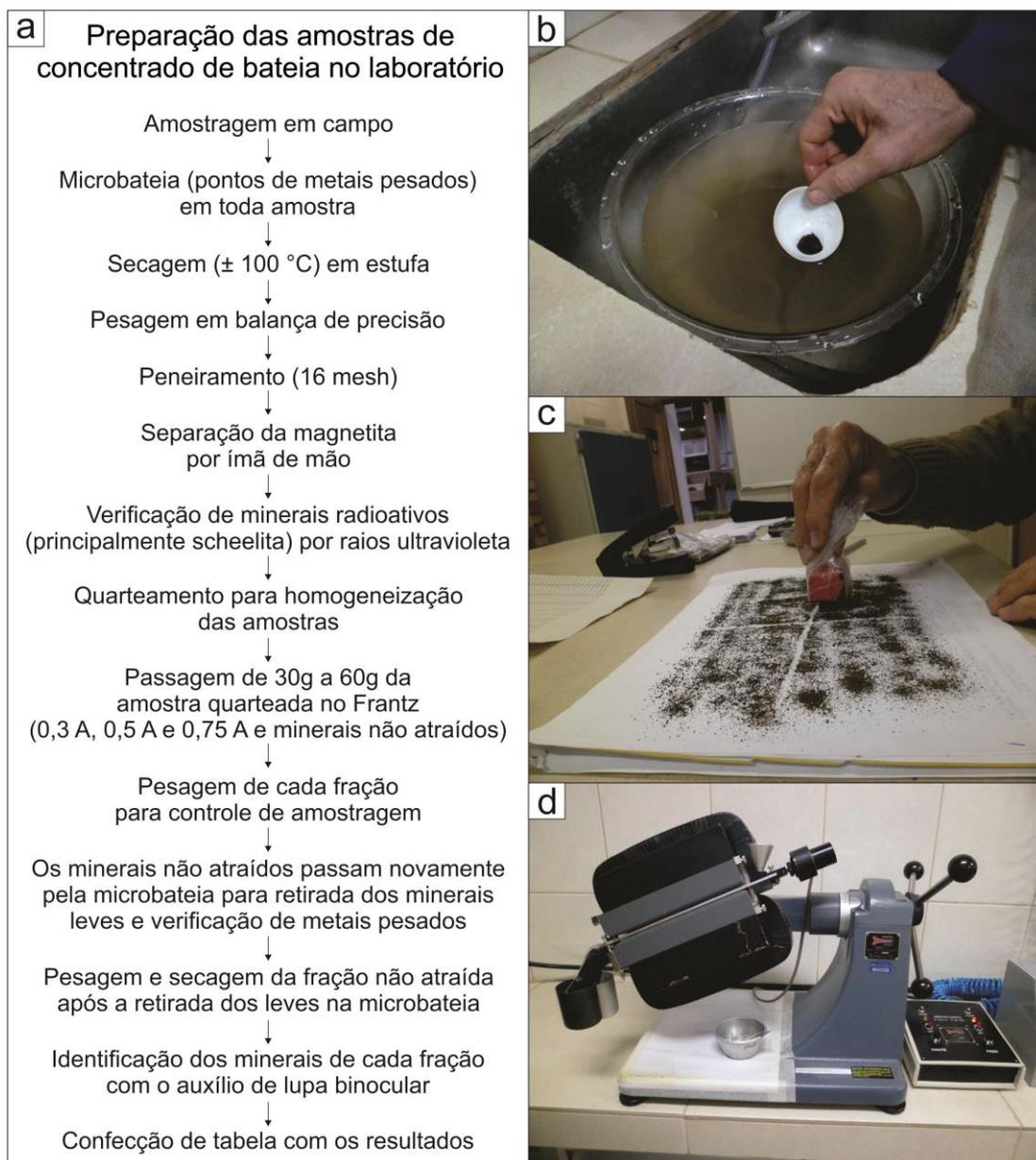


Figura 12. Preparação e análise das amostras de concentrados de bateia. a) Fluxograma com a sequência de processos de preparação e análise das amostras de concentrados de bateia; b) Concentração de metais pesados pelo método de microbateria; c) Separação da magnetita com ímã de mão; d) Separador magnético Frantz.

O separador magnético utilizado foi um modelo Frantz Isodinâmico L-1 (Fig. 12d), que se baseia no princípio do dínamo, com uma corrente elétrica gerando um campo eletromagnético e atraindo minerais de acordo com sua natureza magnética, ou seja, cada mineral é atraído de acordo com a intensidade da corrente. A inclinação longitudinal usada no aparelho foi de 15°, enquanto a inclinação frontal foi de 23°. As correntes elétricas (medidas em ampéres) usadas para separação dos minerais foram de 0,3 A, 0,5 A e 0,75 A, além da fração não atraída. Após passar pelo Frantz,

cada fração foi pesada e catalogada, sendo que a fração dos minerais não atraídos passou novamente pelo procedimento de microbateria, para retirada de minerais leves, e nova análise de metais pesados por lupa binocular, e então foi seca em estufa e pesada.

Os procedimentos até então citados são realizados para tornar a amostra o mais significativa possível do volume total coletado, além de informar as características magnéticas de cada fração, o que facilita no processo de identificação mineral, que é realizado com o auxílio de lupa binocular.

O resultado da identificação dos minerais é uma tabela que possui a contagem de pontos de metais pesados (se houver), como Au, Pt e Pb, e porcentagem de cada fração mineral calculada de forma empírica pelo técnico do Laboratório de Sedimentologia da CPRM-PA.

3.5. ICP-MS

A análise química multielementar dos sedimentos ativos de drenagens foram feitas na *ACME Analytical Laboratories LTD.* (Canadá) pelo método ICP-MS, ou Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente, de código AQ250-EXT, que envolve pulverização e digestão da amostra com água régia. Foram analisados os seguintes elementos: Au, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pd, Pt, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

O ICP-MS se baseia na leitura de íons carregados gerados por um maçarico de plasma após a pulverização e preparação da amostra. Esses íons são transformados em sinais elétricos por um detector de íons e então processados para a conversão em teores de análise. Este método possui baixo limite de detecção, capaz de analisar elementos com níveis de parte por trilhão (ppt), se necessário.

As amostras foram enviadas em recipientes de plástico contendo cerca de 60 ml de material, na qual cerca de 0,5 g é analisado, e foram preparadas no Laboratório de Sedimentologia da CPRM-PA.

Este método foi escolhido pelo poder de análise de elementos traço (Quadro 2) de interesse para o projeto, e pelo fato de analisar, no caso dos elementos maiores, o teor do elemento, não do óxido. Com isso, é possível verificar o teor total do elemento sem a necessidade de transformação do dado.

Quadro 2. Limites de detecção de alguns elementos pelo método ICP-MS (*ACME Analytical Laboratories LDT.*, Canadá).

Elemento	Limite de detecção						
Ag	2 ppb	Ca	0,01%	K	0,01%	Pt	2 ppb
Al	0,01%	Co	0,1 ppm	Mg	0,01%	Sr	0,5 ppm
Au	0,2 ppb	Cr	0,5 ppm	Mn	1 ppm	Ti	0,001%
As	0,1 ppm	Cu	0,01 ppm	Ni	0,1 ppm	V	2 ppm
Ba	0,5 ppm	Fe	0,01%	Pd	10 ppb	Zn	0,1 ppm

3.6 PETROGRAFIA

A análise petrográfica foi realizada a partir da observação de lâminas delgadas em microscópio binocular, com o objetivo de caracterizar as rochas encontradas nas regiões de Braga e Entre-Ijuís.

A amostragem foi realizada em trabalhos de campo realizados nos períodos de 20/01/2014 a 23/01/2014 e 31/03/2014 a 03/04/2014. Foram coletadas amostras a partir de perfis pré-determinados (Figs. 13 e 14) buscando obter amostras de todos os derrames da estratigrafia local. Na região de Entre-Ijuís, por impossibilidade imposta pelos proprietários das áreas de interesse, não foi possível coletar amostras de rocha no perfil pré-determinado, prejudicando a significância da amostragem.

As lâminas petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Petrografia e Petrologia da CPRM e descritas com auxílio do microscópio Olympus BX51. As fotomicrografias foram registradas por câmera acoplada ao microscópio modelo Moticam 2300.

A descrição petrográfica constou na descrição da textura predominante da rocha, descrição de alterações e identificação da mineralogia, comparando com os resultados encontrados na observação dos concentrados de bateia.

A descrição das texturas microscópicas e das associações mineralógicas auxilia em uma distinção de derrames, classificando os basaltos petrograficamente, mas não é possível definir o número exatos de derrames e a textura de cada um, pois uma mesma textura pode ocorrer em mais de um derrame basáltico. Devido à falta de afloramentos com estruturas magmáticas preservadas que auxiliariam na distinção de cada derrame, não foi possível definir a estratigrafia local de cada alvo.

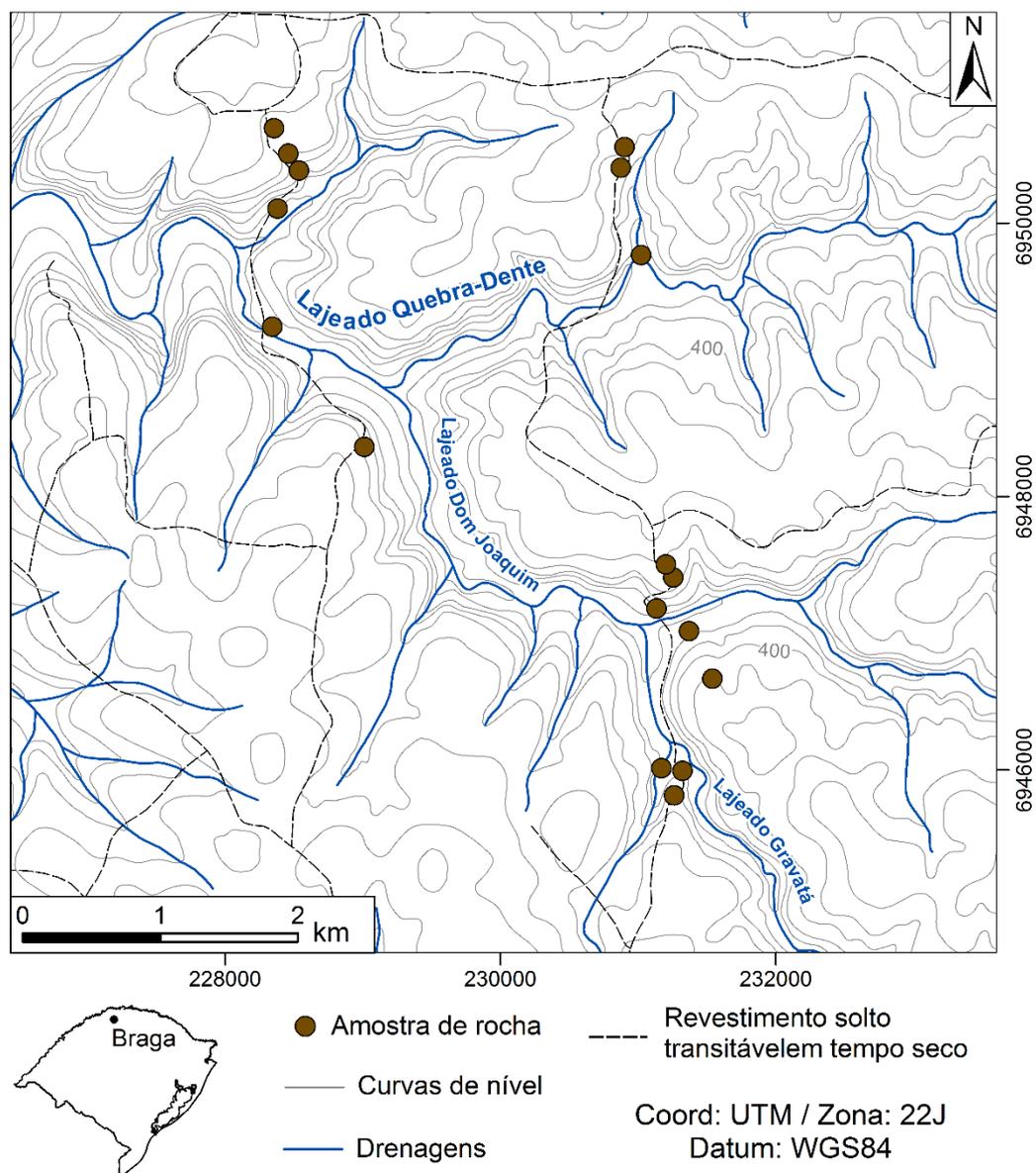


Figura 13. Mapa com a localização das amostras (n = 17) de rocha na área de estudos da região de Braga.

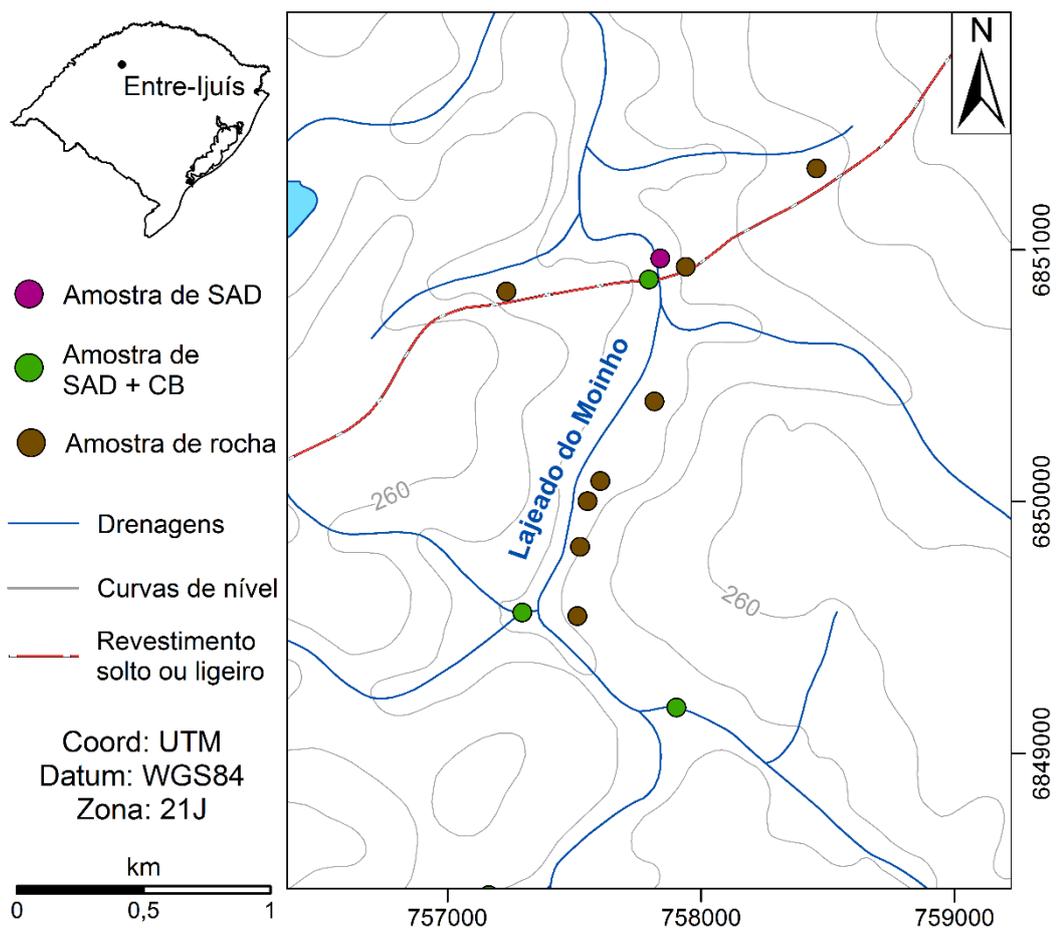


Figura 14. Mapa com a localização das amostras (n = 8) de rocha na área de estudos da região de Entre-Ijuís. Amostras de sedimentos ativos de drenagens (SAD) preliminares representadas pelos pontos roxos, enquanto as amostras de sedimentos ativos de drenagens (SAD) e concentrados de bateia (CB) do estudo de detalhe estão representadas em verde e as amostras de rocha em marrom.

4. RESULTADOS

O Grupo Serra Geral, conforme conceituação expressa por Hartmann & Baggio (2014), corresponde a segunda maior província basáltica continental do planeta (Frank *et al.*, 2009), possuindo especial importância científica quando comparada a outras províncias basálticas continentais, como Noril'sk-Talnakh (Sibéria), Muskox (Canadá) e Skaergaard (Groenlândia). Uma das principais questões relacionadas a este Grupo está voltada para a exploração de recursos minerais metálicos, considerando-se a potencialidade metalogenética comparando a modelos correlatos, como as províncias basálticas continentais de grande produção mundial de elementos metálicos (Mincato, 1994, 2000; Romanini & Albuquerque 2000; Wildner *et al.*, 2006; Abram *et al.*, 2008; Arioli, 2008; Goulart *et al.*, 2011). Até este momento, uma das únicas pesquisas, em escala regional, voltada para a prospecção de elementos metálicos neste Grupo Serra Geral, foi a que levantou o potencial metalogenético do sudoeste do Paraná utilizando análise geoquímica de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia, associadas a geoquímica de rocha (Wildner *et al.*, 2006), estudo este que serviu como base para o atual projeto da CPRM, Sureg-PA, parcialmente apresentado neste estudo.

O projeto está voltado à investigação do potencial metalogenético de uma das maiores províncias ígneas do planeta, o Grupo Serra Geral, composto por um vasto pacote de derrames basálticos e de intrusões máfico-ultramáficas, geradas por fusões mantélicas em um ambiente de rifte intracontinental, semelhante aos traps Siberianos, que hospedam o maior depósito de sulfetos de níquel do mundo e fonte de extração de elementos do grupo da platina (EGP), na província de Noril'sk - Talnakh.

A atual pesquisa contou com 2104 análises de sedimentos de drenagens, cedidas pelas CPRM-PA, distribuídas nas áreas da Bacia do Paraná do Rio Grande do Sul, com ênfase no Grupo Serra Geral. A análise estatística destes dados auxiliou na compreensão do comportamento geoquímico dos principais elementos químicos

indicadores de mineralizações metálicas presentes, nas distintas regiões distribuídas ao longo da Bacia.

Após o tratamento dos dados em escala regional, foram definidos os alvos com anomalias de Cu, no município de Braga, e de Cr, no município de Entre-Ijuís, ambos no noroeste do Rio Grande do Sul. O estudo de detalhe envolveu a coleta de um número adicional de 14 (7 em cada alvo) amostras de sedimentos ativos de correntes (analisados na *ACME Analytical Laboratories LTD.*, Canadá) e concentrados de bateia.

Após a avaliação geoquímica do total das análises e a definição dos alvos de pesquisa, cada unidade básica onde estão localizadas as anomalias de interesse foi estudada separadamente. A anomalia de Cu em Braga está localizada em uma área mapeada como basalto do tipo químico Paranapanema, enquanto a anomalia de Cr em Entre-Ijuís é proveniente de sedimentos dos basaltos do tipo Gramado. As correlações geoquímicas de cada unidade foram definidas por métodos de análise bivariada e multivariada.

Os concentrados de bateia mostraram ocorrências de sulfeto, cobre nativo e cromita. As proporções de óxidos de Fe-Ti mostram pequenas distinções nos sedimentos coletados em Braga e Entre-Ijuís. As amostras de rocha e análise petrográfica de lâminas delgadas não indicam a presença de intrusões máficas/ultramáficas. As análises químicas de sedimentos ativos de correntes de detalhe resultaram em duas anomalias de Cu em Braga e nenhuma anomalia de Cr em Entre-Ijuís.

Estes resultados contribuem para a compreensão do potencial metalogenético do Grupo Serra Geral, assim como para o entendimento da geoquímica dos sedimentos ativos de drenagens na província vulcânica Paraná.

4.1. Cartografia geoquímica da Bacia do Paraná

O conjunto de amostras preliminares cedido pela CPRM-PA foi, primeiramente, analisado como um todo (Fig. 15), através da observação de mapas geoquímicos da Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, para avaliação do panorama geoquímico indicativo de mineralizações metálicas de Cu, Ni, Co, Cr, Ti, V, Au e Ag.

O mapa geoquímico de isotores para Cu (Fig. 16) mostra valores medianos na porção norte do Rio Grande do Sul (basaltos Paranapanema, Grupo Serra Geral) e baixos na porção sul da Bacia do Paraná, representado principalmente por rochas

sedimentares. Na área com valores mais alto (> 450 ppm), destacam-se pelo menos seis regiões, todas na porção norte do estado, onde predominam os basaltos do tipo Paranapanema (Wildner *et al.*, 2006). Dentre estas, a que apresentou maior consistência foi a anomalia da região de Braga: um conjunto de três amostras com teores significativos de Cu, variando de 439 a 519 ppm, configurando uma anomalia preliminarmente definida de forma empírica. A amostra com maior teor de Cu foi coletada no Rio Turvo enquanto as outras duas foram coletadas ao longo da drenagem chamada Lajeado Quebra-Dente (Figs. 17 e 18). Outras áreas de destaque são as regiões de Catuípe, Itatiba do Sul, Seberi e Ametista do Sul.

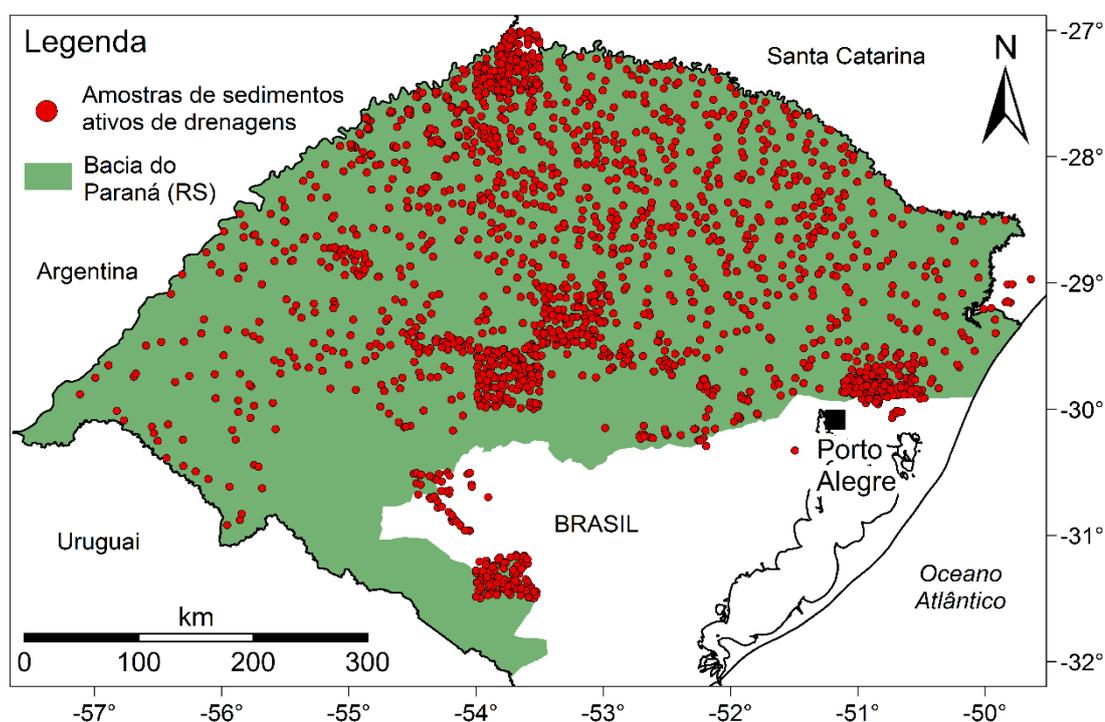


Figura 15. Mapa de localização das amostras preliminares de sedimentos ativos de drenagens na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul (delimitação da Bacia do Paraná: CPRM, 2008).

O norte do Rio Grande do Sul possui teores de elementos metálicos em sedimentos de corrente elevados em relação às outras porções da Bacia do Paraná no estado, como mostram os mapas geoquímicos de isoteores de Fe, Ti, V e Zn (Fig. 19).

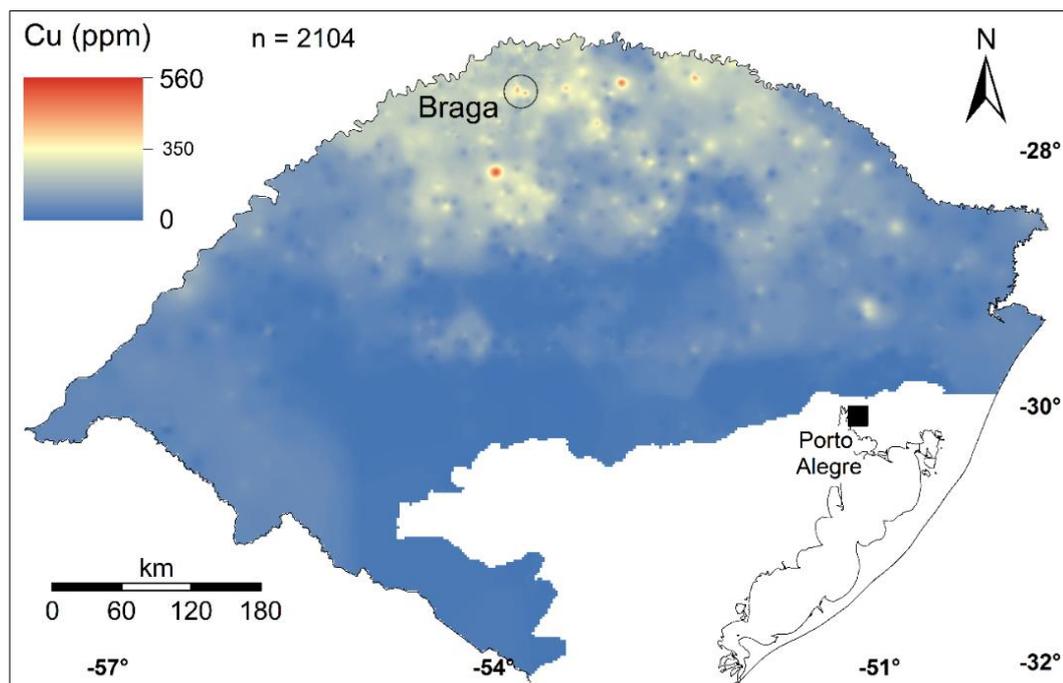


Figura 16. Mapa geoquímico de isotores para o elemento Cu. Evidência de pelo menos seis áreas com altos teores de Cu, em destaque a região de Braga.

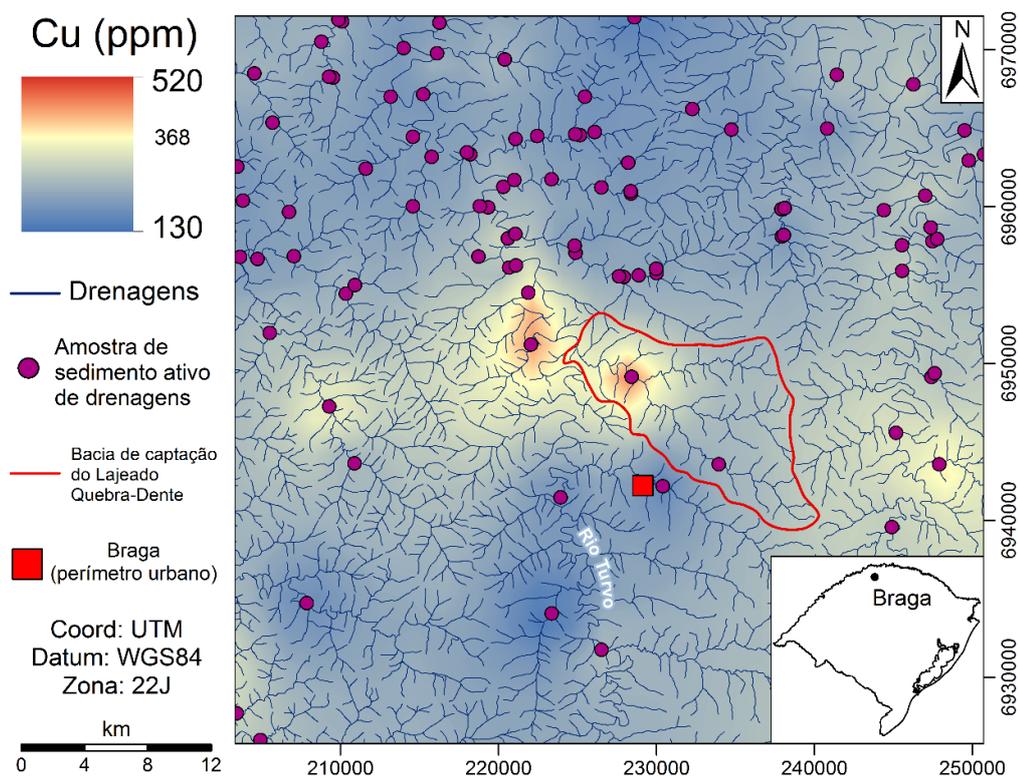


Figura 17. Mapa geoquímico de isotores de Cu na região de Braga. Em destaque a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.

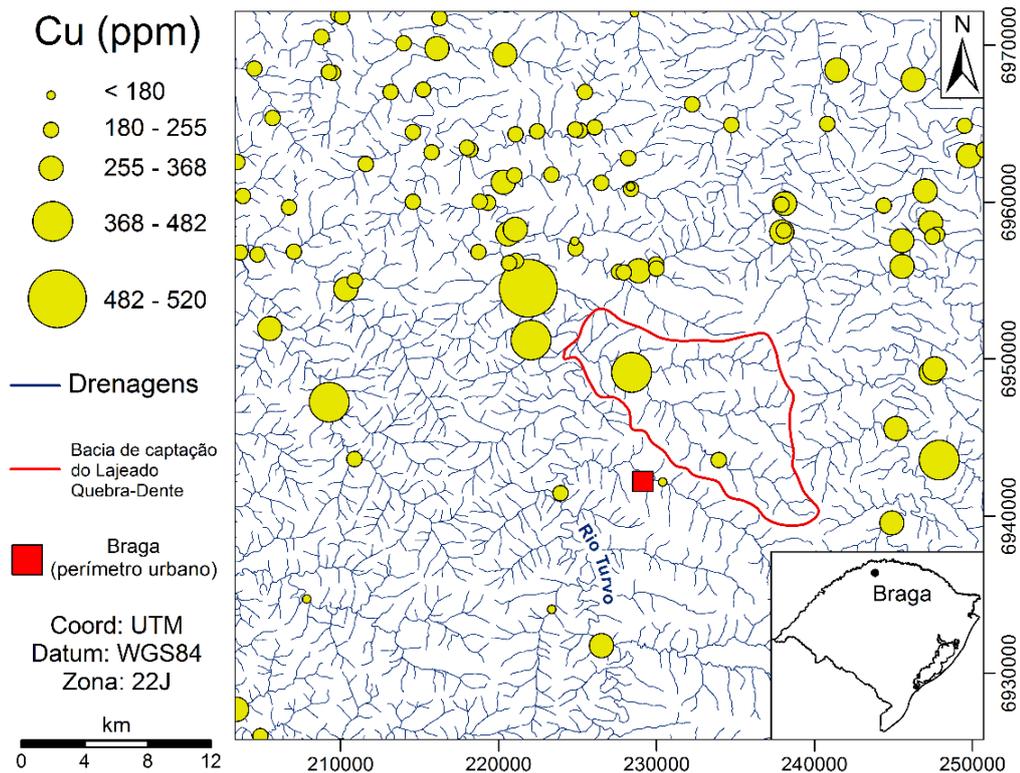


Figura 18. Mapa geoquímico de valores proporcionais de Cu na região de Braga. Em destaque a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.

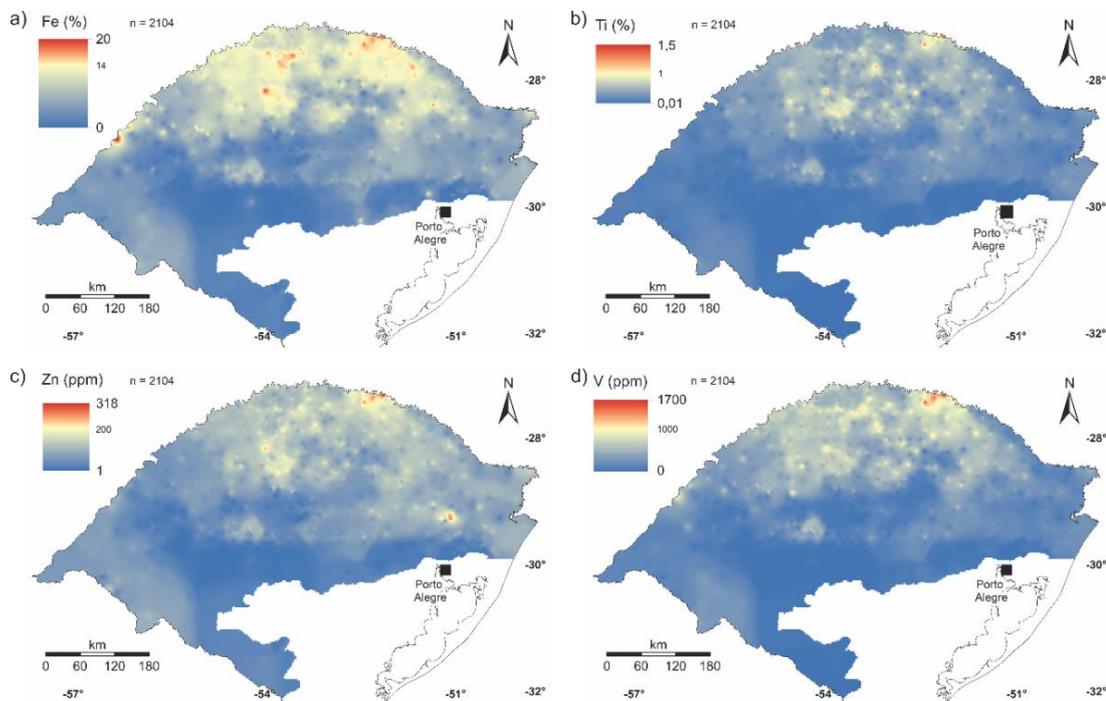


Figura 19. Mapas geoquímicos de isotopos da Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul, para os elementos: a) Fe, b) Ti, c) Zn e d) V, evidenciando maiores teores na porção norte do estado.

O mapa geoquímico de isoteores de Cr (Fig. 20) mostra que nesta porção da Bacia do Paraná, os teores de Cr dificilmente atingem o valor de 100 ppm, mas evidencia uma forte anomalia na região de Entre-Ijuís, com valor muito superior (449 ppm) ao restante da área amostrada. A região anômala tem duas amostras com valores altos em comparação ao restante da população de análises (166 e 449 ppm de Cr), o que justificou a pesquisa em detalhe na região. As amostras com altos valores foram coletadas em drenagens com diferentes bacias de captação, sendo a amostra de maior valor coletada na drenagem chamada Lajeado do Moinho (Fig. 21 e 22).

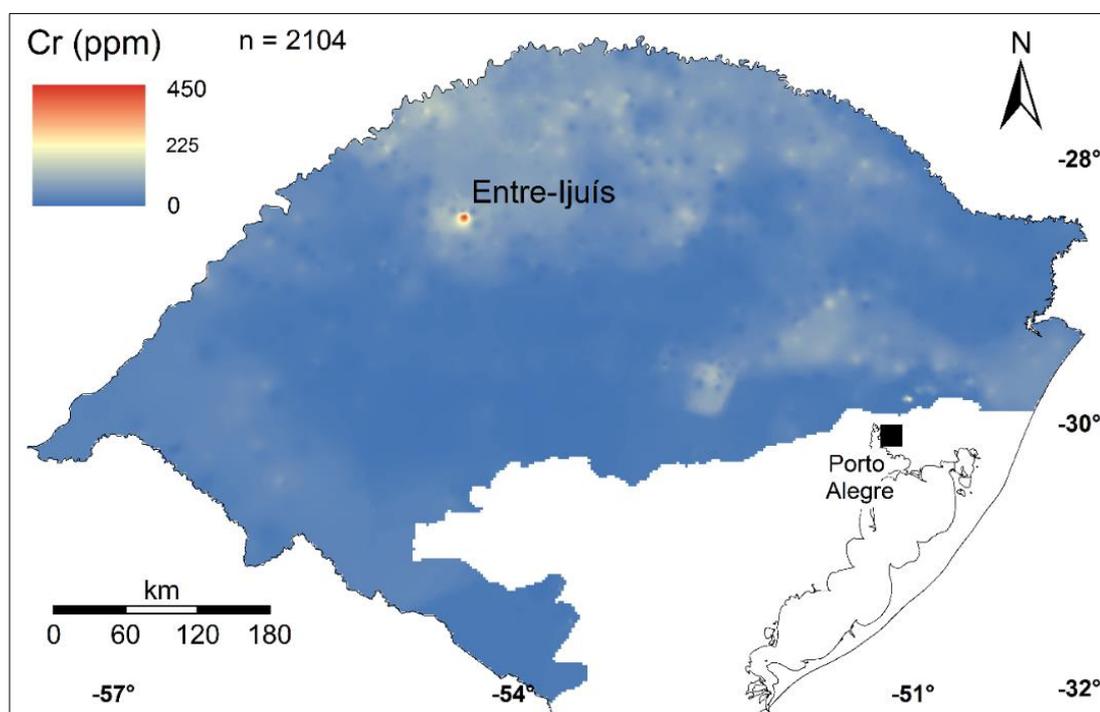


Figura 20. Mapa geoquímico de isoteores de Cr na Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul. Destaque para a anomalia na região de Entre-Ijuís.

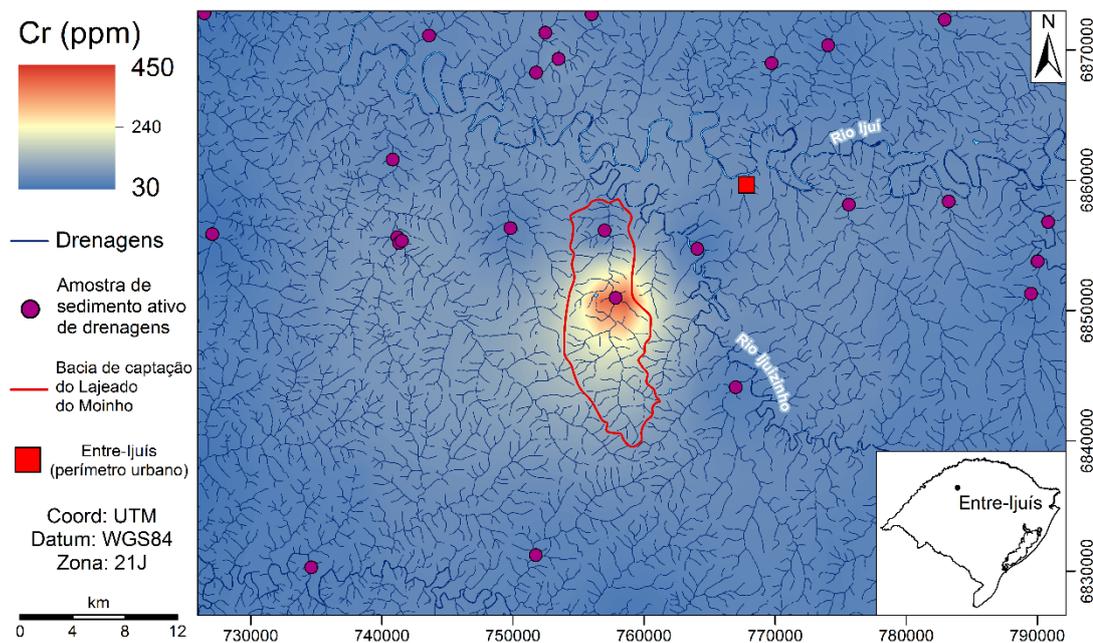


Figura 21. Mapa geoquímico de isotores de Cr na região de Entre-Ijuís. Em destaque a bacia de captação do Lajeado do Moinho.

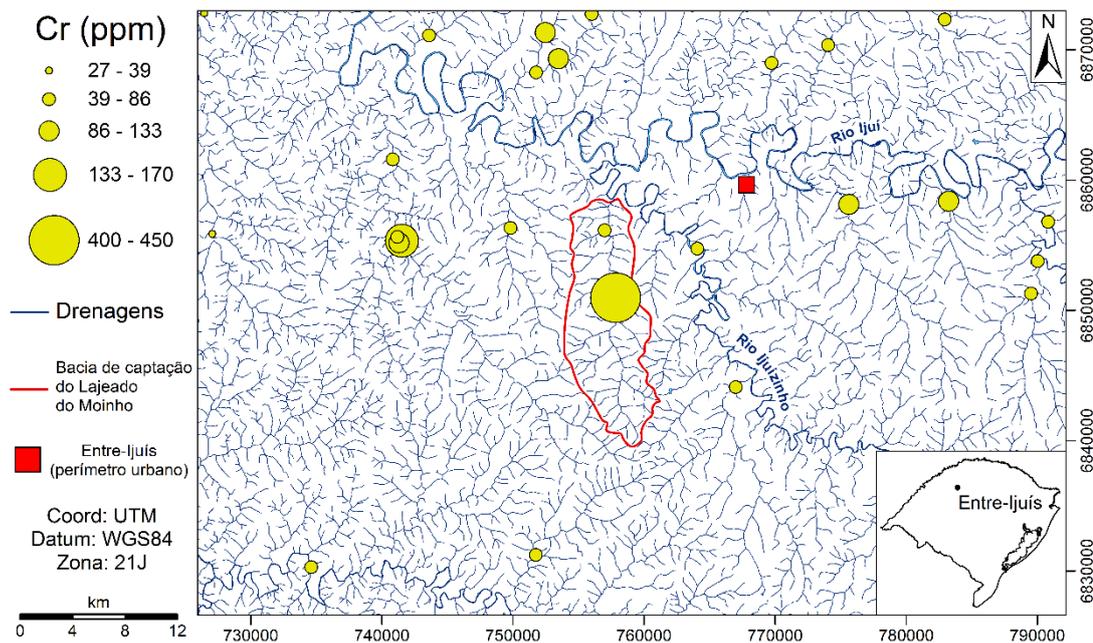


Figura 22. Mapa geoquímico de valores proporcionais de Cr na região de Entre-Ijuís. Em destaque a bacia de captação do Lajeado do Moinho.

Ainda que não apresente valores discrepantes em Cr em toda área amostrada, a porção norte do estado possui valores superiores aos da porção sul, como ocorre nos mapas geoquímicos dos outros elementos metálicos.

Outros elementos de afinidade ultramáfica, como Co e Ni, não apresentam valores significativos na Bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul (Fig. 23), com exceção da anomalia de Co na região do município de Alegrete. Na região de Lomba Grande uma amostra apresentou teores anômalos de Cr e Ni, porém sua representação no mapa foi prejudicada pela limitação do método de interpolação dos dados.

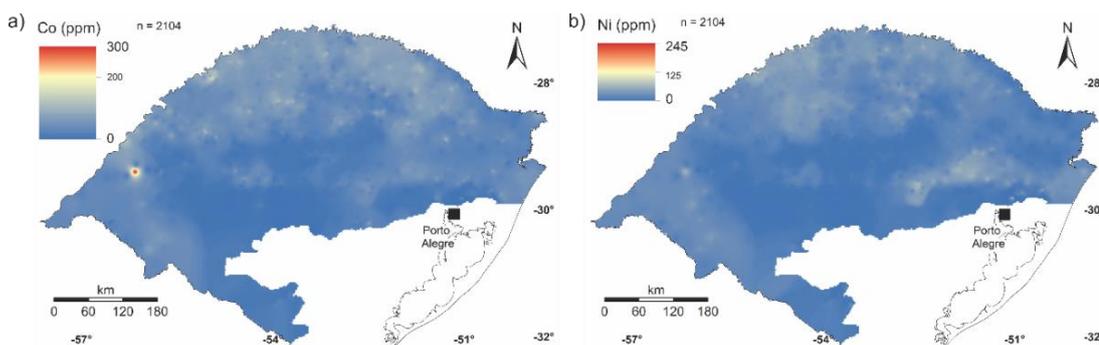


Figura 23. Mapas geoquímicos de isotores de a) Co e b) Ni na Bacia do Paraná, estado do Rio Grande do Sul. Uma única anomalia de Co no oeste do estado, enquanto o restante da área apresenta baixos teores de ambos elementos.

Os mapas geoquímicos de isotores mostram baixos valores de elementos metálicos nos sedimentos provenientes do Grupo Serra Geral e das rochas sedimentares da Bacia do Paraná, porém algumas amostras mostram valores anômalos, como as amostras com altos teores de Cu e Cr em Braga e Entre-Ijuís, respectivamente. O fato das anomalias estarem localizadas em áreas mapeadas como basaltos quimicamente diferentes (basalto tipo Paranapanema em Braga e tipo Gramado em Entre-Ijuís) exige um estudo detalhado de cada unidade para compreender a diferença de comportamento dos elementos químicos nesses basaltos e a determinação estatística do valor anômalo dos metais.

4.2. Tratamento estatístico das análises no Grupo Serra Geral

Uma população de 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens foi analisada inicialmente como um conjunto único, para determinação dos grandes traços no comportamento geoquímico e na definição de alvos para o estudo de detalhe. A partir deste passo, observando-se a distribuição dos elementos, optou-se por tratar as amostras em conjuntos separados, classificados de acordo com a proveniência dos sedimentos, ou seja, a litologia predominante erodida na região da coleta da amostra.

As amostras foram classificadas em conjuntos de acordo com a sua área de proveniência (Fig. 24), usando como base o mapa geológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2008). A classificação e o número total de amostras estão apresentados na tabela 1. A unidade classificada como Complexo Básico Lomba Grande não possui área mapeada, porém as amostras desta unidade foram coletadas para o estudo de prospecção de elementos metálicos de filiação máfico-ultramáfica, buscando a análise de sedimentos provenientes das intrusões relacionadas ao magmatismo Serra Geral (Viero & Roisenberg, 1992).

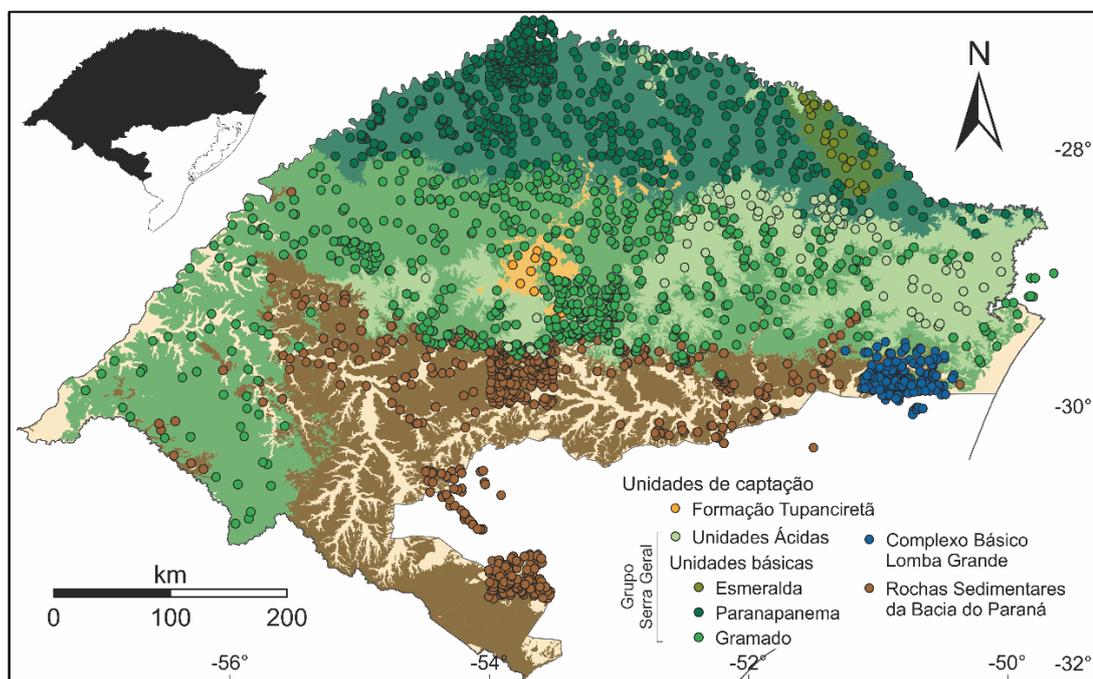


Figura 24. Mapa da localização das amostras (n = 2104) de sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM-PA, classificadas de acordo com a sua unidade geológica de origem (modificado de CPRM, 2008).

Tabela 1. Classificação das unidades de captação das amostras de sedimentos ativos de drenagens a partir da litologia de proveniência e de alvos prospectivos.

	Unidade de captação	Total de amostras
Grupo Serra Geral	Formação Tupanciretã	9
	Unidades Ácidas	75
	Unidade básica Esmeralda	23
	Unidade básica Paranapanema	605
	Unidade básica Gramado	647
	Complexo Básico Lomba Grande	216
	Rochas sedimentares da Bacia do Paraná	529

Os parâmetros estatísticos das análises foram calculados para todas as unidades que envolvem o Grupo Serra Geral, alvo deste estudo, variando entre as intrusivas dentro dos sedimentos Gondwânicos que contornam os contrafortes do Serra Geral, as variações composicionais relacionadas à este magmatismo, ou algumas de suas coberturas sedimentares. As tabelas I, II, III e IV do Anexo I mostram os resultados desse tratamento para as unidades Ácidas, básicas Esmeralda, Paranapanema e Gramado, respectivamente. É importante salientar que, como em qualquer cálculo estatístico, quanto maior o número de amostras, mais confiáveis serão os resultados. Assim, os valores das unidades básicas Gramado e Paranapanema possuem maior grau de confiança que a unidade básica Esmeralda e as unidades Ácidas.

Analisando os parâmetros estatísticos é possível observar que os valores de média e mediana da unidade Paranapanema, em relação às outras unidades, são mais elevados na maioria dos elementos, principalmente Cu, Cr, Co, Fe, Ti, V e Zn. Já a unidade Esmeralda possui valores mais elevados em Al.

Em relação às unidades básicas, as unidades Ácidas possuem valores inferiores de praticamente todos elementos de interesse, com exceção da Ag e do Pd, na qual a Ag possui valores de média e mediana superiores à unidade Gramado, e o Pd valores superiores às unidades Gramado e Esmeralda. Cu, Ni, Co, Cr, Ti e V possuem valores inferiores nos sedimentos provenientes das rochas ácidas em relação aos sedimentos das rochas básicas.

A unidade Esmeralda chama atenção pelos valores relativamente superiores de Ag e Al. Porém seus valores estatísticos são prejudicados pelo baixo número de amostragens (23 amostras).

Os teores de S são baixos em todas as unidades, com média de 0,013% nas 2104 amostras cedidas pela CPRM. Somente duas amostras tem mais de 0,1%, e estão localizadas na área das rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

Os altos valores de Cu na região do município de Braga estão localizados na unidade Paranapanema, enquanto que os de Cr, em Entre-Ijuís, estão na unidade Gramado. Para determinar o valor de anomalia em cada alvo, é necessário o estudo estatístico relacionado à prospecção geoquímica de cada uma dessas unidades para a definição do potencial metalogenético das áreas estudadas.

4.3. Determinação do valor anômalo nas unidades básicas Paranapanema e Gramado

O maior desafio na pesquisa em prospecção geoquímica é a definição do valor de anomalia, sendo o método estatístico fundamental para a confiabilidade do cálculo. Este estudo se baseou no diagrama *Boxplot*, um robusto método que envolve cálculos a partir dos dados brutos, sem a necessidade de transformação dos mesmos. Os parâmetros estatísticos utilizados para o cálculo do valor de anomalia, o *outlier* anômalo, são o 1º e 3º quartil, e o IQR (interquartil).

O primeiro passo foi verificar se as distribuições dos elementos nas unidade possuem uma distribuição normal. Comparando-se os histogramas de frequência de elementos selecionados das amostras da unidade básica Paranapanema, com os histogramas da unidade Gramado, evidencia-se uma distribuição normal de boa simetria para o Paranapanema (Fig. I, Anexo II), enquanto que a unidade Gramado mostra uma distribuição normal assimétrica, com a mediana mais próxima dos valores mais baixos, com exceção do Zn, que mostra distribuição de boa simetria (Fig. II, Anexo II).

A tabela V, no Anexo III, mostra os resultados dos parâmetros estatísticos utilizados para o cálculo dos *outliers* para a unidade Paranapanema. Os valores de *outliers* para o Cu são de 368 ppm para o *outlier* alto e 482 ppm para o anômalo. Esses valores foram a base para o estudo de detalhe da região de Braga.

Os valores de *outliers* anômalos das amostras da unidade Gramado (Tab. VI, Anexo III) mostram valores inferiores aos valores da unidade Paranapanema na maioria dos elementos, com exceção do Al, Ca, Fe, K e Sr, devido ao maior intervalo entre o 1º e o 3º quartis, ou IQR, o que determina uma variação mais espaçada dos teores desses elementos a partir da mediana.

A partir do cálculo da mediana, 1º e 3º quartis e dos *outliers* (altos e anômalos), é possível analisar a distribuição dos elementos e a quantidade de *outliers* a partir do diagrama de *Boxplot*.

O *Boxplot* de Cr (Fig. 25a) evidencia o valor de mediana da unidade Paranapanema superior ao da unidade Gramado, como já foi citado, e a distribuição simétrica da primeira e assimétrica da segunda, corroborando com os histogramas de frequência. Foram identificados dois valores anômalos na unidade Paranapanema e quatro na Gramado, sendo os dois mais elevados desta na região de Entre-Ijuís. Já o diagrama *Boxplot* de Cu (Fig. 25b) evidencia seis valores anômalos (acima de 482 ppm) na unidade Paranapanema, sendo um deles na região de Braga. Na

unidade básica Gramado, apenas uma anomalia foi identificada, porém esta amostra foi coletada em uma drenagem com parte da bacia de captação na unidade Paranapanema, o que pode ter influenciado no resultado, já que o teor considerado anômalo na unidade Gramado estaria disposto no conjunto de *outliers* altos na Paranapanema.

Os diagramas *Boxplot* dos demais elementos metálicos de interesse identificaram sete anomalias de Co (Fig. 26a), quatro de Ti (Fig. 26d), quatro de V (Fig. 26e) e três de Zn (Fig. 26f) na unidade Paranapanema, enquanto que uma anomalia de Co (fig. 26a), uma de Ni (Fig. 26c), quatro de Ti (Fig. 26d) e quatro de Zn (Fig. 14f) foram identificados na unidade Gramado. Uma anomalia negativa de Fe foi identificada na unidade Paranapanema (Fig. 26b), porém este resultado não possui significância para o atual estudo, sendo interessante somente as anomalias positivas. Não foram identificadas anomalias positivas de Fe em nenhuma das duas unidades, assim como não foram identificadas anomalias de Ni na unidade Paranapanema e de V na unidade Gramado.

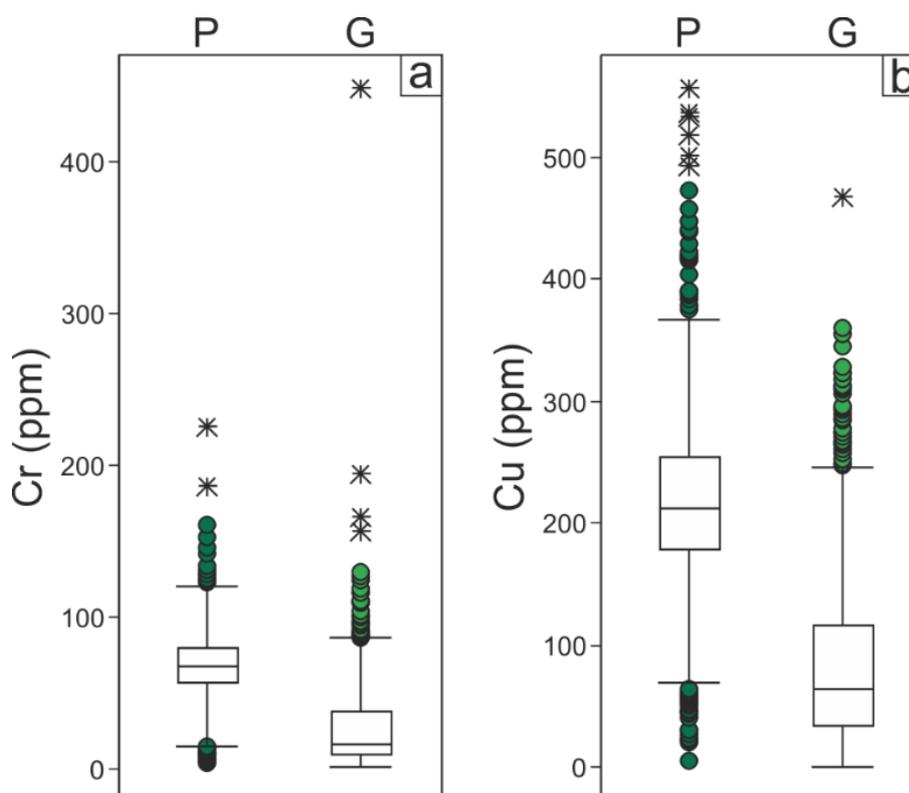


Figura 25. Diagrama *Boxplot* para os teores de a) Cr e b) Cu para o conjunto de amostras das unidades básicas Paranapanema (P, verde escuro) e Gramado (G, verde claro). Círculos cheios = *outliers* altos e baixos; estrela = *outliers* anômalos.

A partir da determinação do valor anômalo de cada elemento de interesse, é possível determinar, em parte, o potencial metalogenético das áreas de detalhe estudadas. Porém, para que uma anomalia tenha o máximo de significado geológico e o mínimo de contaminação antrópica, é preciso compreender as correlações geoquímicas das unidades Paranapanema e Gramado, e verificar se essas correlações em escala regional corroboram os resultados em escala de detalhe.

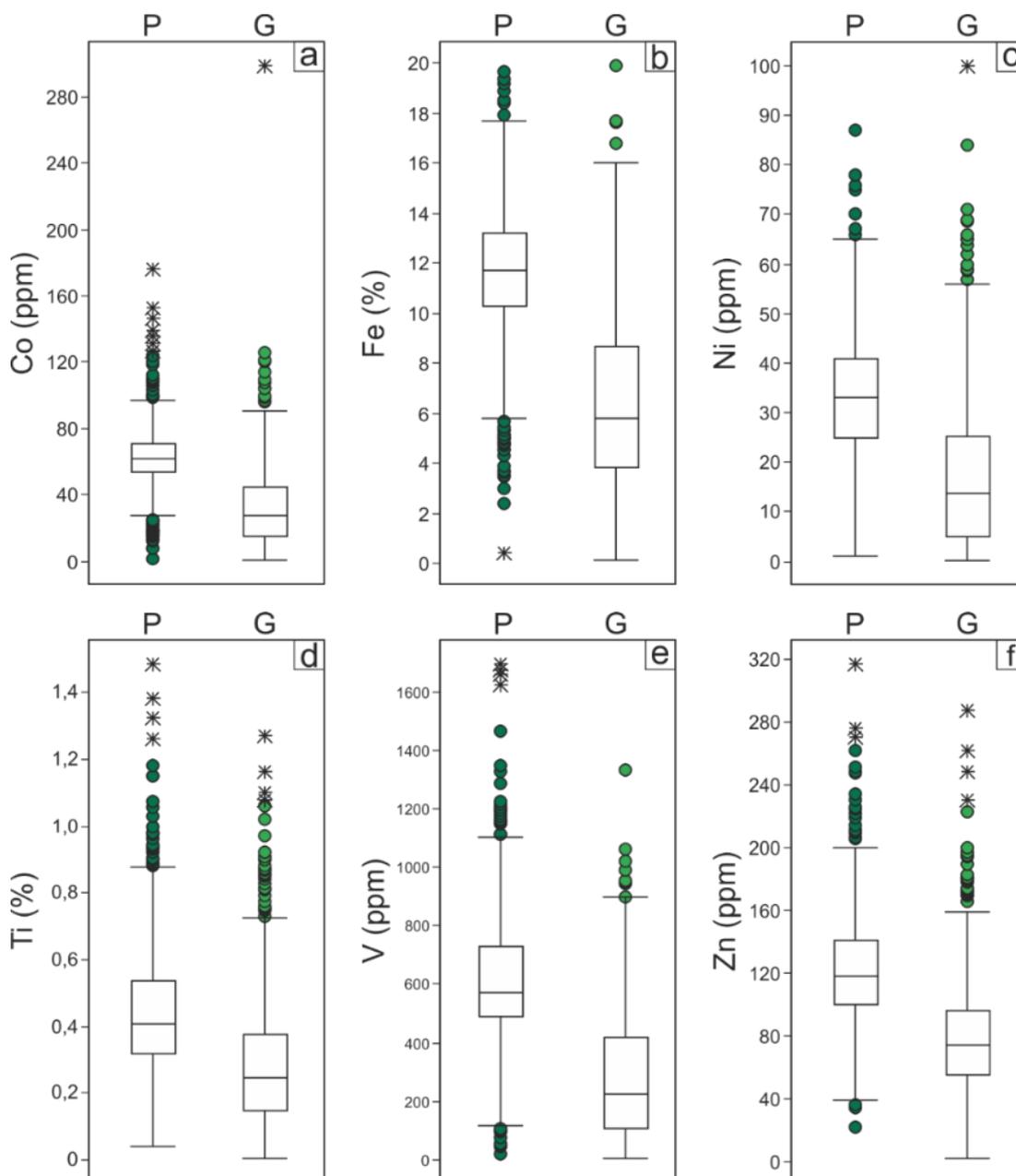


Figura 26. Diagrama *Boxplot* para os teores de a) Co, b) Fe, c) Ni, d) Ti, e) V e f) Zn para o conjunto de amostras das unidades básicas Paranapanema (P, verde escuro) e Gramado (G, verde claro). Círculos cheios = *outliers* altos e baixos; estrela = *outliers* anômalos.

4.4. Geoquímica dos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Paranapanema

A unidade básica Paranapanema está localizada na porção norte do estado do Rio Grande do Sul, onde ocorre o conjunto de amostras com maiores valores de média e mediana dos metais de interesse. Nesta unidade é observada a anomalia de Cu em Braga, com uma amostra acima de 482 ppm (*outlier* anômalo) e duas acima de 368 ppm (*outliers* altos). O estudo de correlação geoquímica possui fundamental importância para determinar associações de elementos com afinidade entre si, além de definir a assinatura dos sedimentos provenientes das rochas da unidade Paranapanema e comparar esses dados com a resposta das análises do estudo de detalhe, sendo assim possível interpretar se as anomalias possuem afinidade com a assinatura basáltica, ultramáfica ou se pode ter havido erro na obtenção do dado.

A matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson é utilizada em prospecção geoquímica para verificar o grau de afinidade entre os elementos. Esse coeficiente varia de -1 a 1, sendo -1 uma correlação negativa perfeita, 1 representando uma correlação positiva perfeita, e 0 consistindo em independência entre os elementos.

A matriz de correlação da unidade Paranapanema (Tab. 2) mostra correlação positiva muito forte (valores acima de 0,8) de Cu com o V, e forte com Fe, Ni, Ti e Zn. Em relação ao Cr e Co, as correlações são moderadas (0,4 a 0,59). A associação Ti, V e Zn é muito clara, apresentando correlações entre esses elementos com valores acima de 0,8 (muito forte). O Ni, além da afinidade com Cu, Fe, Ti, V e Zn, também apresenta correlação forte com o Cr, que apresenta baixas correlações com a maioria dos elementos, com exceção de Cu, Co (correlação moderada) e Fe (forte correlação).

O elemento metálico que possui a associação geoquímica distinta dos demais é o Co, apresentando forte correlação com Ba (0,66) e muito forte com Mn (0,81), que possuem correlações fracas a muito fracas com Cu, Fe, Ni, Ti, V e Zn.

Elementos metálicos de grande interesse econômico, como Ag, Au, Pd e Pt, não possuem correlação significativa com qualquer outro elemento.

Tabela 2. Matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson de elementos selecionados das análises químicas das amostras de sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Paranapanema. Total de 605 amostras. Em vermelho os resultados iguais ou maiores que 0,8 (correlação muito forte), e em laranja os resultados entre 0,6 e 0,79 (correlação forte).

	Ag	Al	Au	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pd	Pt	Ti	V
Al	-0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Au	0,13	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba	-0,09	0,54	-0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	0,01	0,36	0,08	0,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-0,09	0,32	0,03	0,27	0,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-0,04	-0,05	-0,01	0,04	0,40	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-0,01	0,15	0,04	0,13	0,57	0,60	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-0,02	0,43	0,01	0,51	0,43	0,24	0,29	0,06	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0,05	0,35	0,10	0,68	0,81	0,31	0,14	0,31	0,30	-	-	-	-	-	-
Ni	-0,13	0,26	-0,06	0,35	0,47	0,71	0,74	0,61	0,46	0,18	-	-	-	-	-
Pd	0,07	-0,18	0,08	-0,10	0,16	0,07	0,22	0,18	0,11	0,08	-0,04	-	-	-	-
Pt	0,02	0,19	0,16	0,07	0,24	0,25	0,15	0,13	0,25	0,18	0,11	0,16	-	-	-
Ti	-0,09	-0,26	-0,06	-0,15	0,21	0,39	0,76	0,67	-0,02	-0,08	0,60	0,13	0,05	-	-
V	-0,04	-0,18	-0,04	-0,07	0,35	0,51	0,83	0,85	0,03	0,06	0,70	0,13	0,04	0,88	-
Zn	0,09	-0,19	0,02	-0,03	0,33	0,37	0,77	0,73	0,11	0,08	0,60	0,14	0,03	0,82	0,87

Os gráficos de correlação dos elementos (análise bivariada) evidenciam um comportamento geoquímico semelhante do Cu com V, Ti e Zn, em relação ao Fe (Fig. 27). O maior número de amostras se encontra no intervalo de 9% a 15% de Fe. Há seis amostras com valores considerados anômalos de Cu, quatro anômalas em V e Ti, e três em Zn.

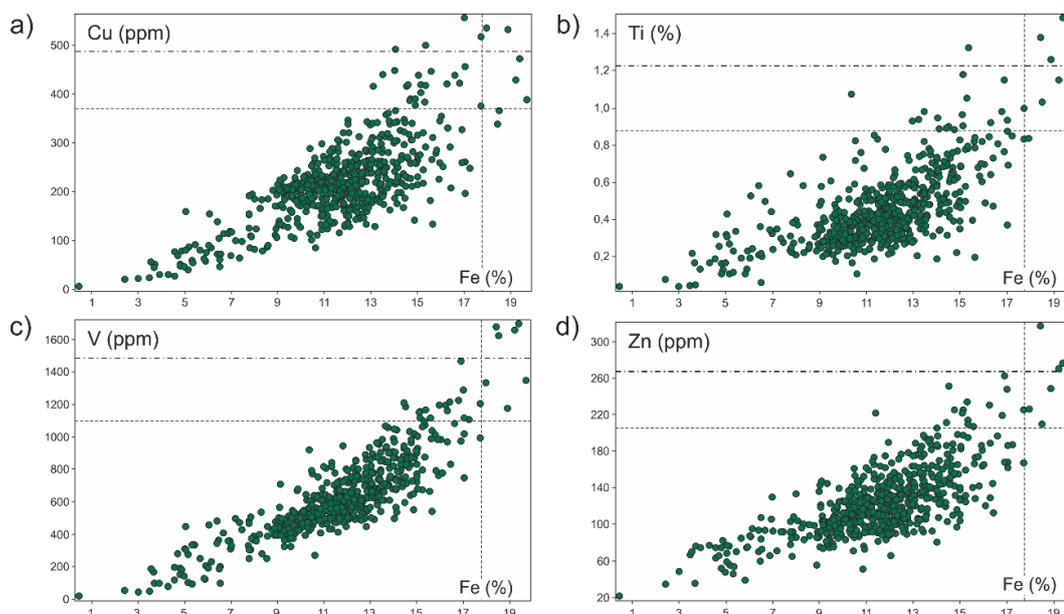


Figura 27. Gráficos de correlação: a) Cu x Fe; b) Ti x Fe; c) V x Fe; e d) Zn x Fe, para a unidade Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

O gráfico Al x Fe (Fig. 28a) mostra o *background* nos intervalos de 1,8% a 3,2% de Al e 9% a 15% de Fe, com dois *trends* evoluindo a partir desses intervalos, sendo um desses com altos valores de Al no intervalo de 11% a 13% de Fe e outro enriquecido em Fe no intervalo de 1% a 2% de Al. O comportamento geoquímico do Co e Cr, na unidade básica Paranapanema, possuem uma tendência geral (*background*) e outra discrepante com valores altos desses elementos no intervalo entre 13% e 15% de Fe (Fig. 28b e 28c). O Ni possui comportamento semelhante ao Cu, porém com uma dispersão pouco maior das amostras no gráfico Ni x Fe (Fig. 28d).

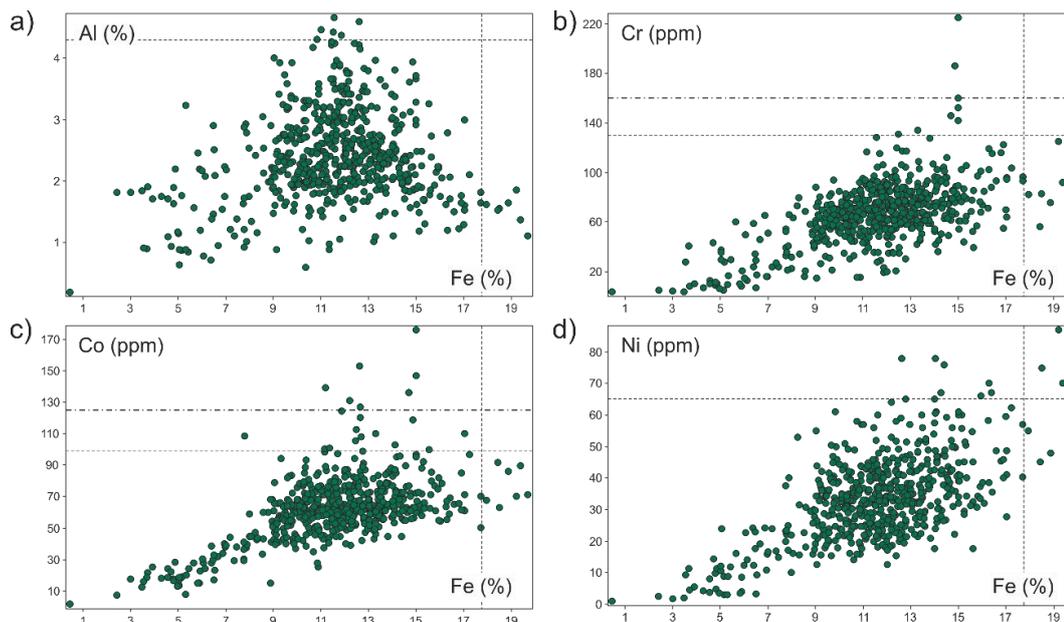


Figura 28. Gráficos de correlação: a) Al x Fe; b) Cr x Fe; c) Co x Fe; e d) Ni x Fe, para a unidade Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

Na unidade básica Paranapanema, o Cu possui ótima correlação positiva com V, Ti, Zn e Fe, evidenciando uma única tendência aparente na relação entre esses elementos, sendo, em sua maioria, as amostras com os maiores valores de Cu aquelas que também possuem os maiores valores de V, Ti, Zn e Fe. Já elementos como Co (Fig. 29a), Cr (Fig. 29b), Mn (Fig. 29c) e Ni (Fig. 29d) mostram dois *trends* quando correlacionados com Cu. Na correlação do Cu com Co, Cr e Mn, as amostras com altos valores de Cu estão em um *trend* no intervalo de 50 a cerca de 70 ppm de Co, de 60 a 100 ppm de Cr e de aproximadamente 1500 a 2500 ppm de Mn. Já os altos teores de Cr e Co estão no intervalo de 200 a 300 ppm de Cu, enquanto os de Mn estão ente 100 e 300 ppm. O Ni apresenta melhor correlação com o Cu se comparado aos elementos citados, e seus altos valores se encontram em um intervalo maior dos teores de Cu (de 100 a 480 ppm). Os valores anômalos em Cu estão no intervalo de 45 a 60 ppm de Ni.

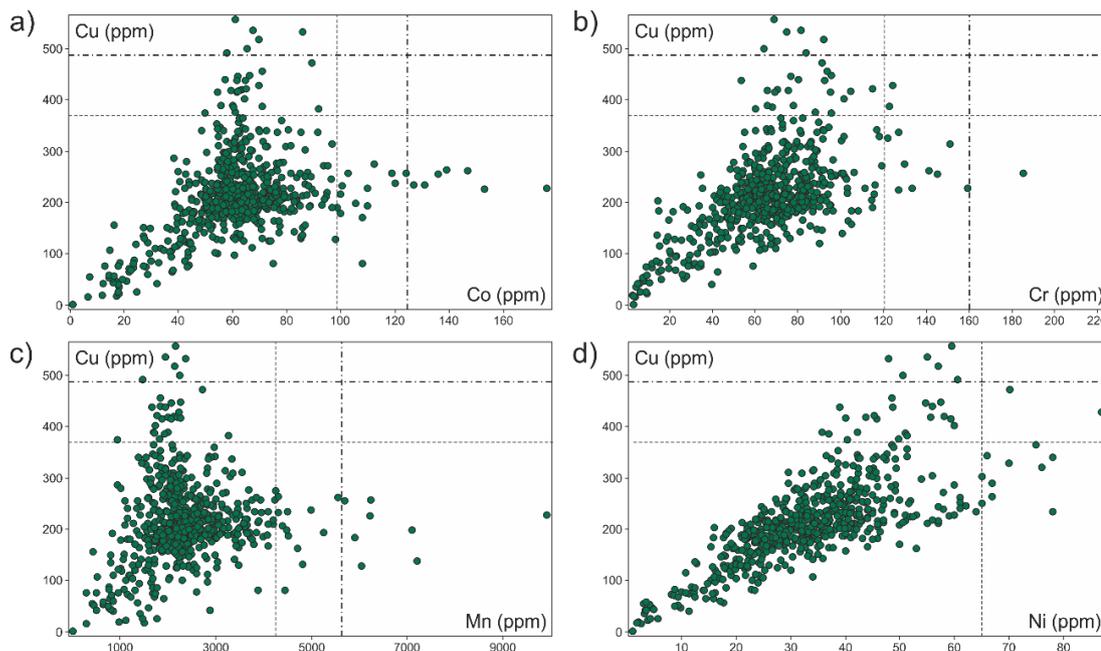


Figura 29. Gráficos de correlação: a) Cu x Co; b) Cu x Cr; c) Cu x Mn e d) Cu x Ni, na unidade básica Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

O V é o elemento que possui maior correlação com o Cu e Zn, de acordo com a matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson (Tabela 8). Os gráficos de correlações entre esses elementos (Fig. 30a e 30b) corroboram esse cálculo e apresenta uma ótima correlação positiva com uma única tendência geoquímica.

A unidade Paranapanema possui baixas razões Al/Ti e altos teores de Cu (valor máximo de 557 ppm, mediana = 213 ppm, média = 218 ppm) (Fig. 31) em comparação com o Complexo Básico Lomba Grande possui altas razões Al/Ti e baixos valores de Cu (valor máximo < 75 ppm, mediana = 4 ppm, média = 10 ppm), evidenciando a diferença na geoquímica dos sedimentos provenientes dessas unidades. As amostras da unidade Paranapanema que apresentam altas razões Al/Ti (e baixos teores de Cu) possuem influência de sedimentos de rochas vulcânicas ácidas do noroeste do Rio Grande do Sul.

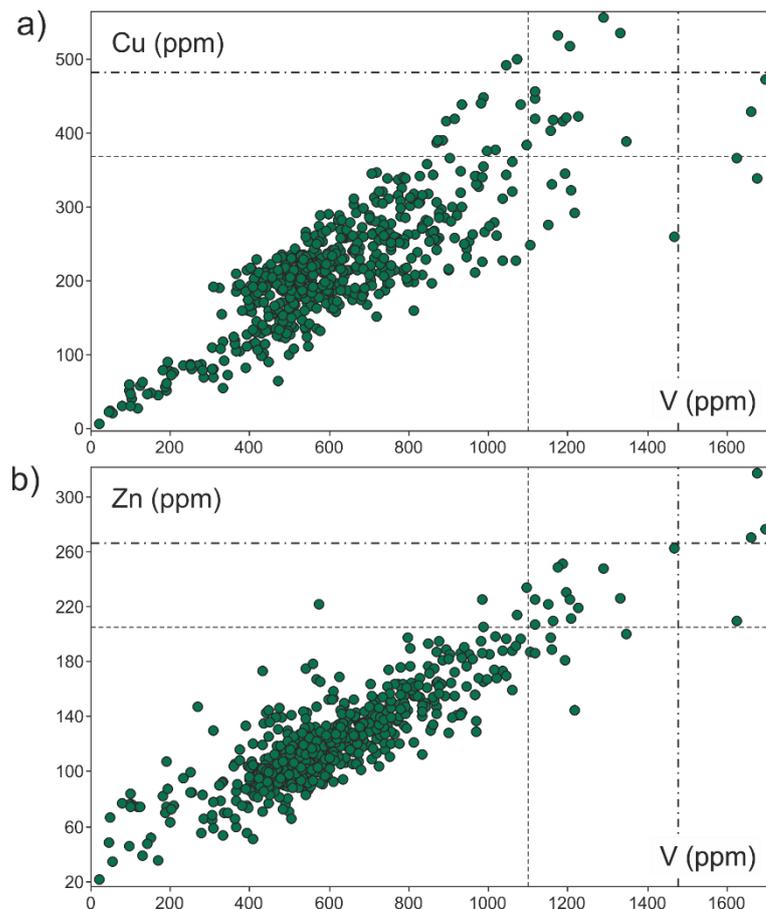


Figura 30. Gráficos de correlação: a) Cu x V e b) Zn x V, na unidade básica Paranapanema (605 amostras). As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

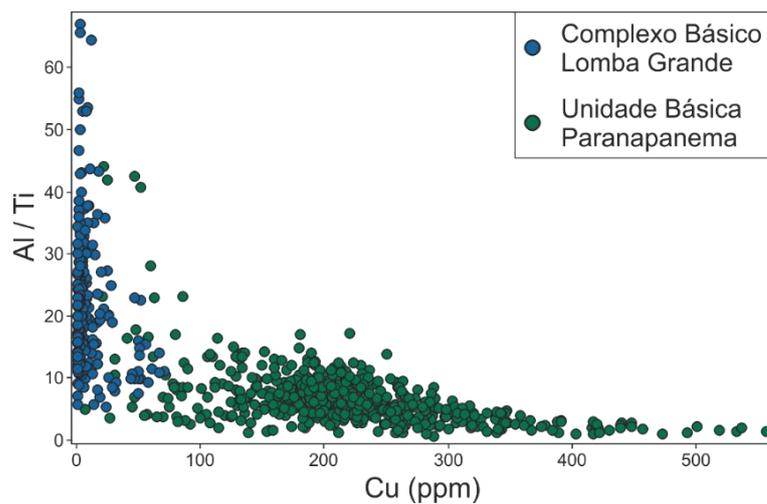


Figura 31. Gráfico Al/Ti x Cu, comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (213 amostras representadas pelos pontos de cor azul) e a unidade básica Paranapanema (605 amostras representadas pelos pontos de cor verde escuro).

Os gráficos da Figura 20 evidenciam que os sedimentos do complexo máfico-ultramáfico possuem altas razões Cr/Cu (Fig. 32a) e Ni/Cu (Fig. 32b), enquanto que a unidade Paranapanema possui valores abaixo dessas razões. O teor de V é discrepante entre as unidades, sendo o Complexo Básico Lomba Grande empobrecido em V (valor máximo < 300 ppm, mediana = 16 ppm, média = 40 ppm) e o Paranapanema enriquecido (valor máximo superior a 1650 ppm, mediana = 573 ppm, média = 617 ppm) para esse elemento.

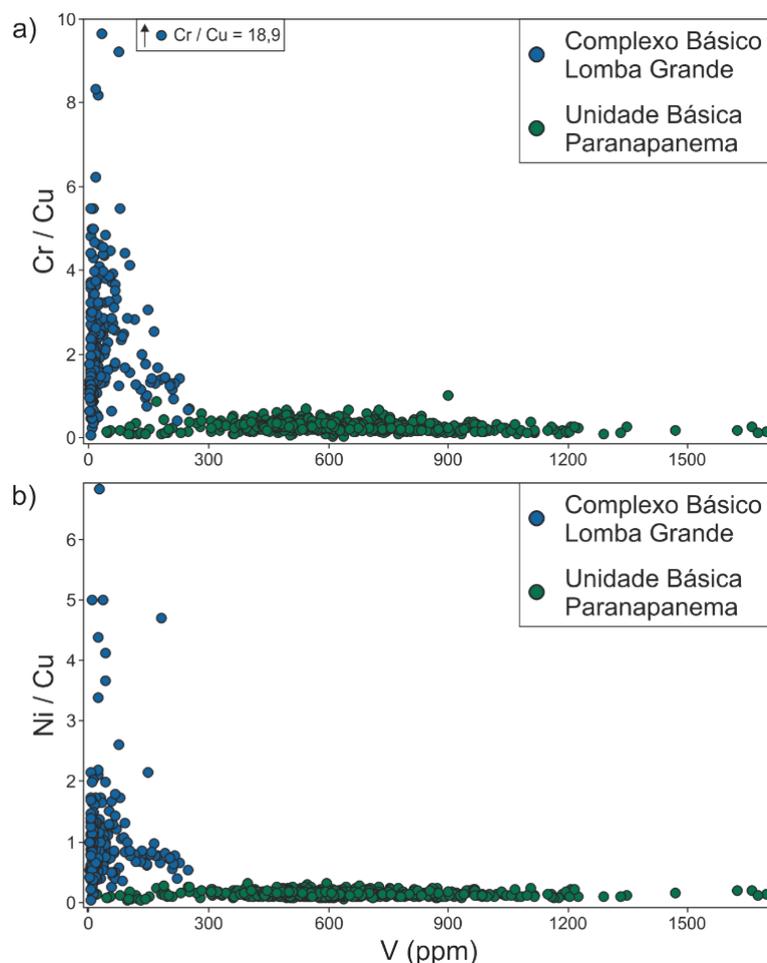


Figura 32. Gráficos Cr/Cu x V e Ni/Cu x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Paranapanema (pontos verde escuro). Amostra destacadas por estar representadas fora do campo do gráfico: a) Cr/Cu = 18,9.

A avaliação preliminar das 2104 análises geoquímicas de sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM evidenciou que a região de Braga possui uma amostra dentro do grupo de *outliers* anômalos em Cu e duas entre os *outliers* altos. As assinaturas geoquímicas da unidade básica Paranapanema são distintas das do Complexo Básico Lomba Grande, principalmente em relação aos teores de Cu e V e às razões Al/Ti, Cr/Cu e Ni/Cu. Este tratamento dos dados, além de possibilitar

interpretações fundamentais para a prospecção geoquímica do Grupo Serra Geral, serve de base para qualquer estudo prospectivo de detalhe na unidade básica Paranapanema.

4.5. Geoquímica dos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Gramado

A unidade básica Gramado está disposta na porção centro-norte e oeste do Rio Grande do Sul, na borda sul do Grupo Serra Geral. Com um total de 647 amostras coletadas nessa unidade, foi possível identificar associações geoquímicas de metais distintas daquelas estudadas na unidade Paranapanema.

A matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson da unidade Gramado (Tab. 3) evidencia a associação de Cr, Cu, Fe e Ni (\pm Al, Co, Ti, V, Zn), com correlações positivas fortes (0,6 a 0,79) para o principal grupo de elementos e moderadas (0,4 a 0,59) para o grupo secundário. O Cr possui fraca correlação com Pd, Pt e Mg e muito fraca com Ag, Au e Ba. Em comparação com os resultados da unidade Paranapanema, o elemento que possui correlações geoquímicas mais contrastante é o Co. Este elemento possui duas associações bem definidas, sendo uma Co, Mn e Ba (\pm Al e Ni) e a outra Co, Cu, Fe, Ni e V (\pm Cr, Pt, Ti e Zn). As únicas correlações fracas e muito fracas do Co são com Ag, Au e Pd.

A associação do Cu no Gramado é semelhante à identificada na unidade Paranapanema (Cu, Fe, Ni, Ti, V e Zn \pm Cr), com a diferença que nesta unidade o Cu possui correlação forte com Co e moderada com Pt.

A Pt é um elemento que possui afinidades distintas nas unidades Paranapanema e Gramado. As correlações deste elemento na unidade Paranapanema são todas fracas a muito fracas, enquanto que na unidade Gramado, a Pt possui correlação forte com Pd e moderada com Co, Cu, Fe, Ti, V e Zn.

Tabela 3. Matriz de correlação pelo coeficiente de Pearson de elementos selecionados das análises químicas das amostras de sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Gramado. Total de 647 amostras. Em vermelho os resultados iguais ou maiores que 0,8 (correlação muito forte), e em laranja os resultados entre 0,6 e 0,79 (correlação forte).

	Ag	Al	Au	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pd	Pt	Ti	V
Al	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Au	0,55	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba	0,00	0,44	-0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	-0,02	0,58	0,01	0,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	0,04	0,46	0,08	0,10	0,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0,13	0,41	0,06	0,15	0,69	0,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-0,01	0,59	0,02	0,31	0,80	0,61	0,88	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	0,02	0,69	0,01	0,38	0,42	0,35	0,14	0,26	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-0,04	0,52	-0,01	0,73	0,90	0,40	0,53	0,66	0,35	-	-	-	-	-	-
Ni	0,07	0,66	0,10	0,29	0,70	0,78	0,67	0,66	0,60	0,52	-	-	-	-	-
Pd	0,09	0,06	0,11	-0,10	0,19	0,18	0,29	0,28	0,05	0,15	0,09	-	-	-	-
Pt	0,06	0,24	0,09	-0,04	0,41	0,39	0,55	0,49	0,14	0,31	0,28	0,63	-	-	-
Ti	-0,01	0,20	0,01	-0,02	0,47	0,48	0,82	0,73	0,01	0,30	0,48	0,37	0,49	-	-
V	-0,03	0,36	0,00	0,17	0,71	0,59	0,92	0,92	0,09	0,54	0,63	0,23	0,44	0,84	-
Zn	0,28	0,41	0,17	0,14	0,54	0,52	0,81	0,76	0,24	0,42	0,54	0,42	0,53	0,81	0,75

Os gráficos de correlações (análise bivariada) evidenciam correlações bem definidas, como as de Co, Cu, V e Zn com o Fe (Fig. 33). Nos casos do Co e V, há um único *trend* de correlação praticamente linear. Nos gráficos Cu x Fe e Zn x Fe, há uma tendência principal de correlação positiva e outros dois *trends* evidenciados por conjuntos de poucas amostras enriquecidas em Cu e Zn no intervalo de 4% a 6% em Fe e outro enriquecido em Fe nos intervalos de 100 a 200 ppm de Cu e 60 a 100 ppm de Zn. Através desses gráficos, é possível identificar somente uma anomalia de Co, uma de Cu e quatro de Zn.

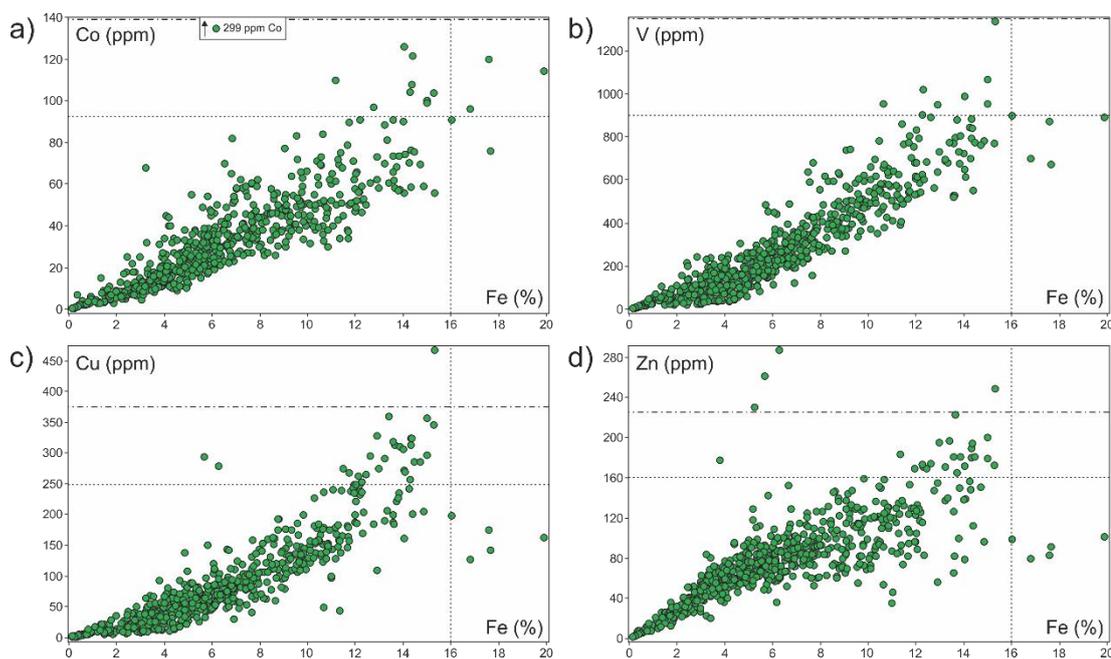


Figura 33. Gráficos de correlação: a) Co x Fe; b) V x Fe; c) Cu x Fe e d) Zn x Fe para as amostras da unidade básica Gramado. Os elementos representados nos eixos das ordenadas estão em ppm, enquanto o Fe em porcentagem do elemento. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: a) 299 ppm Co.

O gráfico Al x Fe (Fig. 34a) evidencia correlação positiva com uma dispersão significativa. O Ni e o Cr (Fig. 34b e 34c), quando relacionados com o Fe, possuem três *trends* destacados: um principal que envolve a maior parte das amostras com uma assinatura semelhante ao Co, Cu, V e Zn; outra empobrecida em Ni (20 a 30 ppm) e Cr (40 a 80 ppm) e enriquecida em Fe; e uma terceira tendência com enriquecimento em Ni e Cr no intervalo de 5% a 9% de Fe. O Ti (Fig. 34d) possui assinatura semelhante ao Co, Cu, V e Zn, quando relacionado com o Fe. Os gráficos evidenciam quatro anomalias de Cr (sendo duas na região de Entre-Ijuís), uma de Ni e seis de Ti.

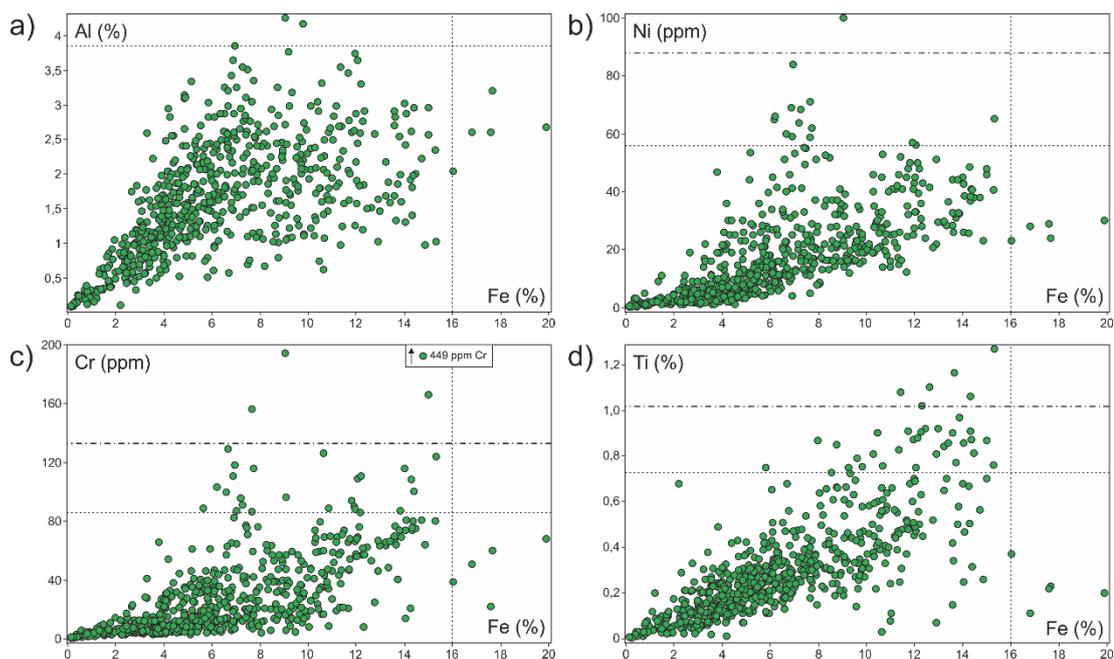


Figura 34. Gráficos de correlação: a) Al x Fe; b) Ni x Fe; c) Cr x Fe e d) Ti x Fe para as amostras da unidade básica Gramado. Al, Ti e Fe estão em porcentagem do elemento, enquanto Cr e Ni estão em ppm. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: c) 449 ppm Cr.

Assim como na unidade Paranapanema, o V possui correlações muito forte com metais de interesse na unidade Gramado, como Cu, Co, Ti e Zn (Fig. 35). Destaca-se o fato da amostra com o maior teor de V (> 1300 ppm) ser a amostra com os maiores teores de Ti e Cu, além de ser anômala em Zn. Em contrapartida, essa amostra possui teor de Co dentro do intervalo de *background*.

A unidade Gramado possui baixas razões Cr/Cu (< 3) e Ni/Cu (< 1,5) em comparação com o Complexo Básico Lomba Grande (Fig. 36), que possui valores elevados para essas razões (até aproximadamente 19 para Cr/Cu e aproximadamente 7 para Ni/Cu). Já os valores de V na unidade Gramado (287 ppm de média e máximo de 1335 ppm) são muito elevados em comparação às amostras relacionadas ao Complexo Básico Lomba Grande (40 ppm de média e máximo de 247 ppm). Um conjunto de amostras da unidade Gramado, no intervalo de 100 a 300 ppm, mostra razões de Cr/Cu e Ni/Cu elevadas em comparação com as demais amostras desta unidade, e possuem assinatura semelhante a outro conjunto de amostras do Complexo Básico Lomba Grande, representado no intervalo de 0,5 a 2 para Cr/Cu e 0,5 a 1 para Ni/Cu.

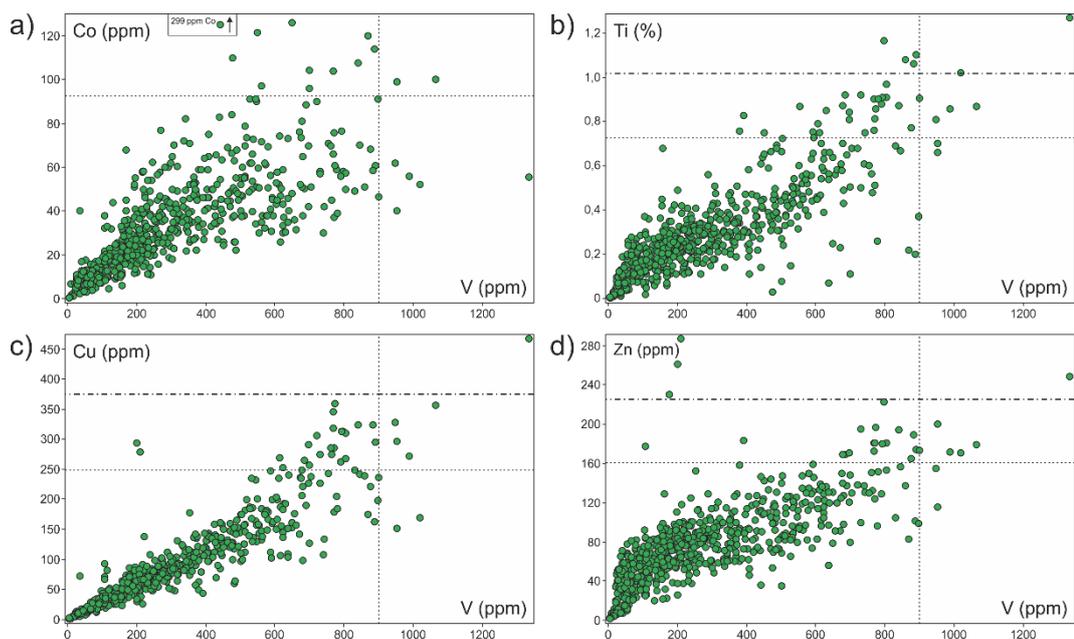


Figura 35. Gráficos de correlação: a) Co x V; b) Ti x V; c) Cu x V e d) Zn x V para as amostras da unidade básica Gramado. O Ti está representado em porcentagem do elemento, enquanto os demais elementos estão em ppm. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos. Amostra destacada por estar representada fora do campo do gráfico: a) 299 ppm Co.

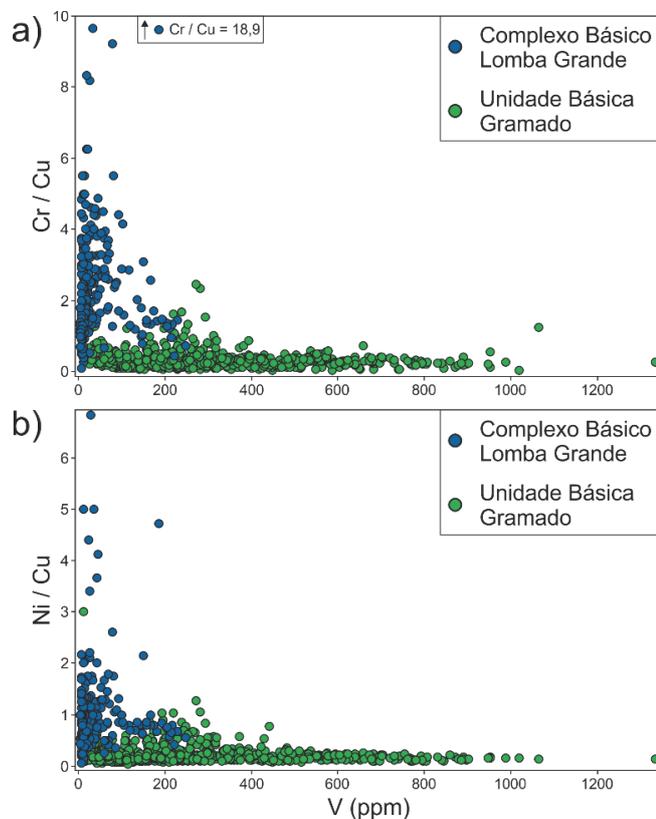


Figura 36. Gráficos a) Cr/Cu x V e b) Ni/Cu x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Gramado (pontos verde claro). Amostras destacadas por estar representadas fora do campo do gráfico: a) Cr/Cu = 18,9.

Os gráficos Cr x V e Ni x V, comparando os sedimentos provenientes da unidade Gramado com os do Complexo Básico Lomba Grande (Fig. 37), evidencia um *trend* com assinatura semelhante para as duas unidades em um conjunto de amostras com até aproximadamente 400 ppm de V. Esse conjunto possui uma tendência de enriquecimento em Ni e Cr tanto na unidade Gramado quanto no Complexo Básico Lomba Grande. Vale salientar que as duas amostras anômalas em Cr identificadas em Entre-Ijuís estão fora desse conjunto, possuindo valores de V entre 900 e 1100 ppm.

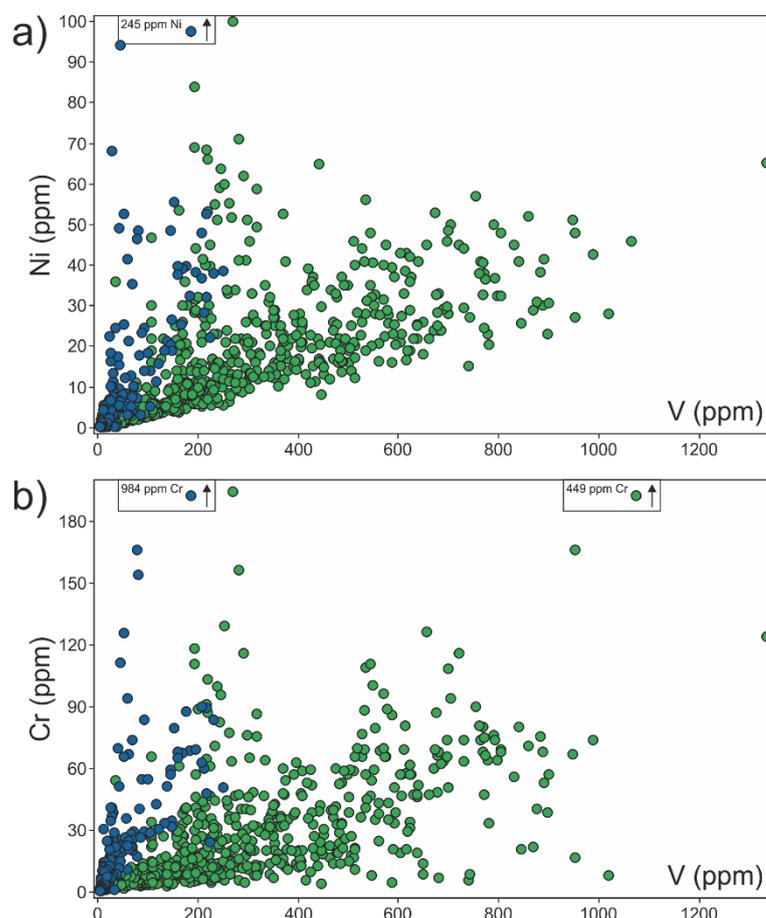


Figura 37. Gráficos a) Cr x V e b) Ni x V comparando a unidade Complexo Básico Lomba Grande (pontos azuis) com a unidade básica Gramado (pontos verde claro). Amostras destacadas por estarem representadas fora do campo do gráfico: a) 245 ppm Ni; b) 984 ppm Cr (Complexo Básico Lomba Grande) e 449 ppm Cr (unidade básica Paranapanema).

O tratamento dos dados da unidade básica Gramado mostrou resultados semelhantes aos da unidade Paranapanema, porém a diferença entre eles é de grande importância para prospecção de metais como Co e Cr, já que esses possuem correlações e assinaturas geoquímicas distintas das análises da unidade

Paranapanema. Em relação à unidade do Complexo Básico Lomba Grande, o tratamento dos dados ressaltou a diferença da geoquímica dos sedimentos de correntes provenientes das intrusões máficas-ultramáficas e dos basaltos da unidade Gramado, além de evidenciar que as amostras anômalas em Cr de Entre-Ijuís possuem comportamento geoquímico distinto dos sedimentos do Complexo Básico Lomba Grande.

Este tratamento de dados através da análise bivariada e multivariada tem grande importância científica para a compreensão da geoquímica do Grupo Serra Geral e para a pesquisa em prospecção geoquímica de metais no Rio Grande do Sul.

4.6. Estudos de detalhe

O estudo de detalhe enfatizou a anomalia de Cu situada no Lajeado Quebradente, no município de Braga, localizado na unidade básica Paranapanema, e na anomalia de Cr no Lajeado do Moinho, no município de Entre-Ijuís, na unidade básica Gramado. Através da análise de concentrados de bateia e descrição petrográfica de lâminas delgadas, foi possível identificar diferenças entre os minerais encontrados nos concentrados de minerais pesados e nas lâminas petrográficas de rocha.

As análises químicas de sedimentos ativos de drenagens das amostras coletadas para o estudo de detalhe (7 amostras para cada alvo) confirmou a anomalia de Cu em Braga com duas amostras anômalas e uma dentro do grupo dos *outliers* altos. Já em Entre-Ijuís não foi observada nenhuma amostra acima do valor anômalo (133 ppm), resultando em duas amostras com teores acima do *outlier* alto e duas dentro do intervalo de *background*.

4.6.1. Concentrados de bateia e petrografia

A observação dos concentrados de bateia mostrou a ocorrência de pirita (uma amostra) e cobre nativo (uma amostra) na região de Entre-Ijuís (anomalia de Cr) e de cromita em Braga (anomalia de Cu) (Tab. 4). Epidoto foi encontrado no material coletado em Braga em uma amostra. Turmalina, zircão, apatita e celadonita ocorrem em ambas regiões. Todos minerais ocorrem em proporções inferiores a 1% do total da amostra.

Tabela 4. Ocorrência de minerais pesados de interesse nos concentrados de bateia das regiões de Braga e Entre-ljuís. Simbologia: ✓ (nº de amostras) = ocorrência; X = sem ocorrência.

Mineral	Braga	Entre-ljuís
Pirita	X	✓ (1)
Cromita	✓ (2)	X
Cobre Nativo	X	✓ (1)
Turmalina	✓ (3)	✓ (1)
Epidoto	✓ (2)	X
Zircão	✓ (2)	✓ (3)
Apatita	✓ (4)	✓ (5)
Celadonita	✓ (5)	✓ (4)

As proporções de magnetita, hematita, limonita e fragmentos correspondem à cerca de 99% das amostras de concentrados de bateia (Tabs. 5 e 6). As amostras da região de Braga possuem maiores porcentagens de hematita e fragmentos de rocha, enquanto em Entre-ljuís os concentrados de bateia apresentam maiores porcentagens de magnetita e limonita.

Tabela 5. Intervalo de porcentagens (análise semiquantitativa) de magnetita, hematita, limonita e fragmentos de rocha nas amostras de concentrados de bateia na região de Braga.

Amostra	Magnetita	Hematita	Limonita	Frag. de rocha
JCO316	50 - 75	25 - 50	1 - 5	1 - 5
JCO317	50 - 75	25 - 50	1 - 5	5 - 25
JCO318	75 - 100	5 - 25	1 - 5	1 - 5
JCO319	75 - 100	5 - 25	5 - 25	5 - 25
JCO320	50 - 75	25 - 50	1 - 5	5 - 25
JCO321	50 - 75	25 - 50	25 - 50	1 - 5
JCO350	50 - 75	1 - 5	1 - 5	5 - 25

Tabela 6. Intervalo de porcentagens (análise semiquantitativa) de magnetita, hematita, limonita e fragmentos de rocha nas amostras de concentrados de bateia na região de Entre-Ijuís.

Amostra	Magnetita	Hematita	Limonita	Frag. de rocha
JCO322	75 - 100	5 - 25	1 - 5	1 - 5
JCO323	75 - 100	1 - 5	5 - 25	1 - 5
JCO324	75 - 100	1 - 5	5 - 25	1 - 5
JCO325	50 - 75	5 - 25	5 - 25	1 - 5
JCO326	75 - 100	5 - 25	5 - 25	< 1
JCO327	75 - 100	5 - 25	5 - 25	< 1
JCO328	75 - 100	5 - 25	5 - 25	1 - 5

As únicas rochas descritas em campo e em lâminas petrográficas, tanto em Braga como em Entre-Ijuís, foram basaltos e brechas hidrotermais.

Em Braga, os basaltos possuem textura holocristalina (Fig. 38a) a hipocristalina (Fig. 38h), afanítica a fanerítica fina, por vezes porfírica (Fig. 38b e 38e) a glomeroporfírica (Fig. 38d). A matriz intergranular é composta por plagioclásio, magnetita (em agregados ou em hábito acicular) e clinopiroxênios (augita ± pigeonita, Fig. 38b). As alterações são predominantemente para argilominerais do grupo da esmectita (Fig. 38c) e subordinadamente para hematita. Ocasionalmente, em lâmina, é possível observar amígdalas preenchidas por zeolitas (Fig. 38g). Em campo, ocorrência de geodos de ágata bandada (Fig. 39a) e calcedônia (Fig. 39b) são comuns nas estradas sem revestimento e no solo. Brecha hidrotermal com clastos angulosos de basalto amigdalóide com matriz de arenito silicificado são observados tanto *in situ* (Fig. 39c) quanto em blocos removidos da área de origem (Fig. 39d). As amígdalas dos clastos são preenchidas predominantemente com calcita. Não foram observados sulfetos em campo ou nas lâminas.

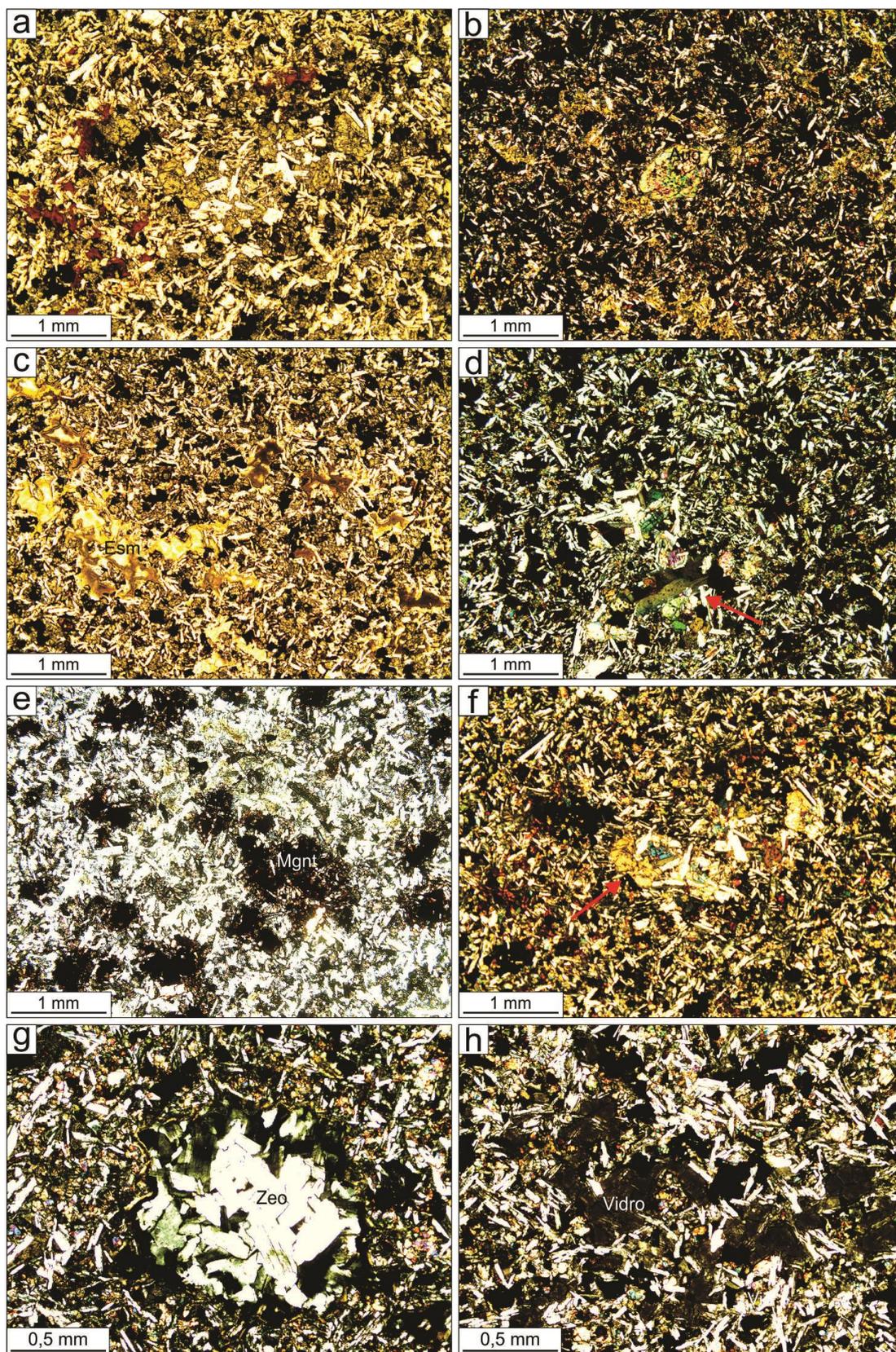


Figura 38. Lâminas petrográficas dos basaltos observados em Braga: a) textura fanerítica fina com alteração para esmectita e hematita; b) fenocristal de augita; c) alteração intensa para esmectita; d) textura glomeroporfírica; e) fenocristais de magnetita; f) textura glomeroporfírica e alteração para hematita; g) amígdala preenchida por zeolita; h) textura hipocristalina.

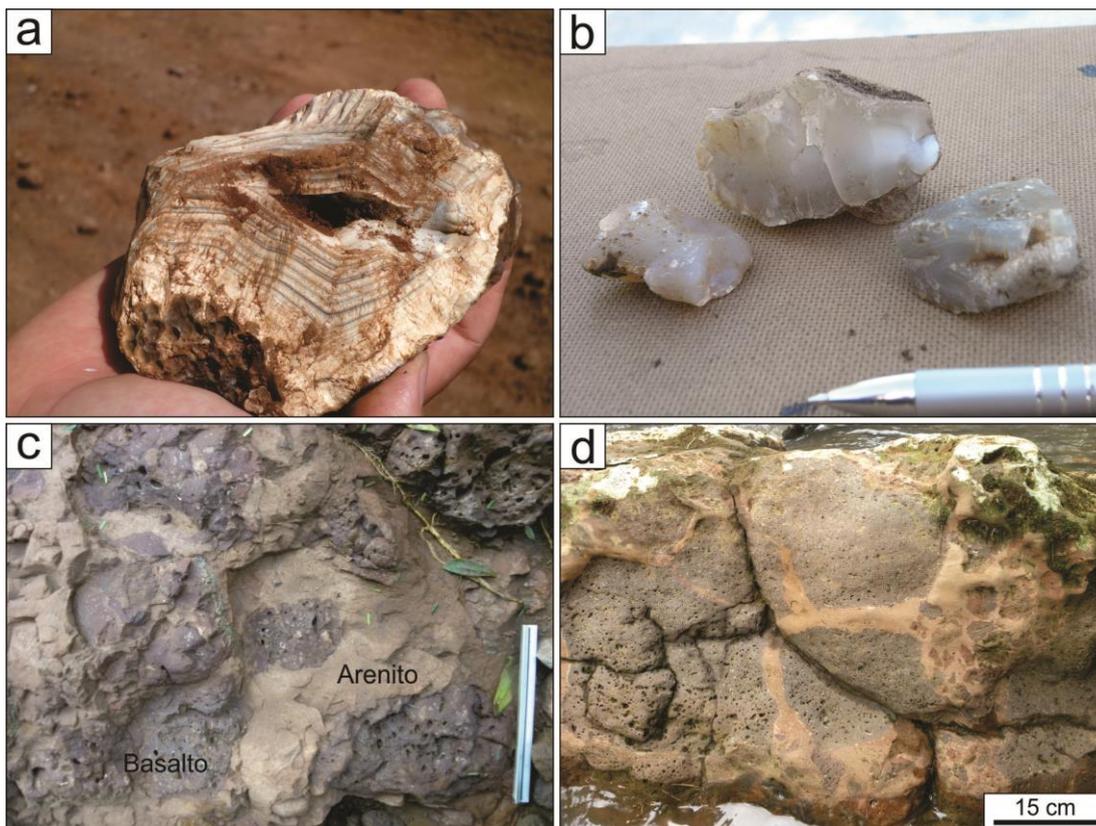


Figura 39. Fotos de campo da região de Braga: a) geodo centimétrico de ágata bandada; b) geodos centimétricos de calcedônia; c) afloramento de brecha hidrotermal; d) bloco de brecha hidrotermal.

Em Entre-Ijuís há ocorrência de basalto e brecha hidrotermal semelhantes ao que ocorre em Braga. Os basaltos possuem textura holocristalina, afanítica a fanerítica fina, localmente porfírica, com fenocristais de plagioclásio (Fig. 40a), clinopiroxênio (Fig. 40b) e magnetita (Fig. 40c), a glomeroporfírica (Fig. 40d). Ocorre alteração para esmectita em grande escala e para hematita em menor proporção nas bordas dos minerais com maior teor de Fe (magnetita e clinopiroxênio). Todas as amostras foram coletadas na mesma cota (cerca de 240 m) devido à dificuldade de acesso às propriedades rurais.

Há ocorrência de brecha hidrotermal com clastos de basalto amigdalóide angulosos (Fig. 40e), com as amígdalas preenchidas predominantemente com calcita (subordinadamente por minerais de sílica), e matriz de arenito silicificado. Em lâmina é possível observar pequenos fragmentos de basalto (< 0,5 mm) na matriz de arenito (Fig. 40f).

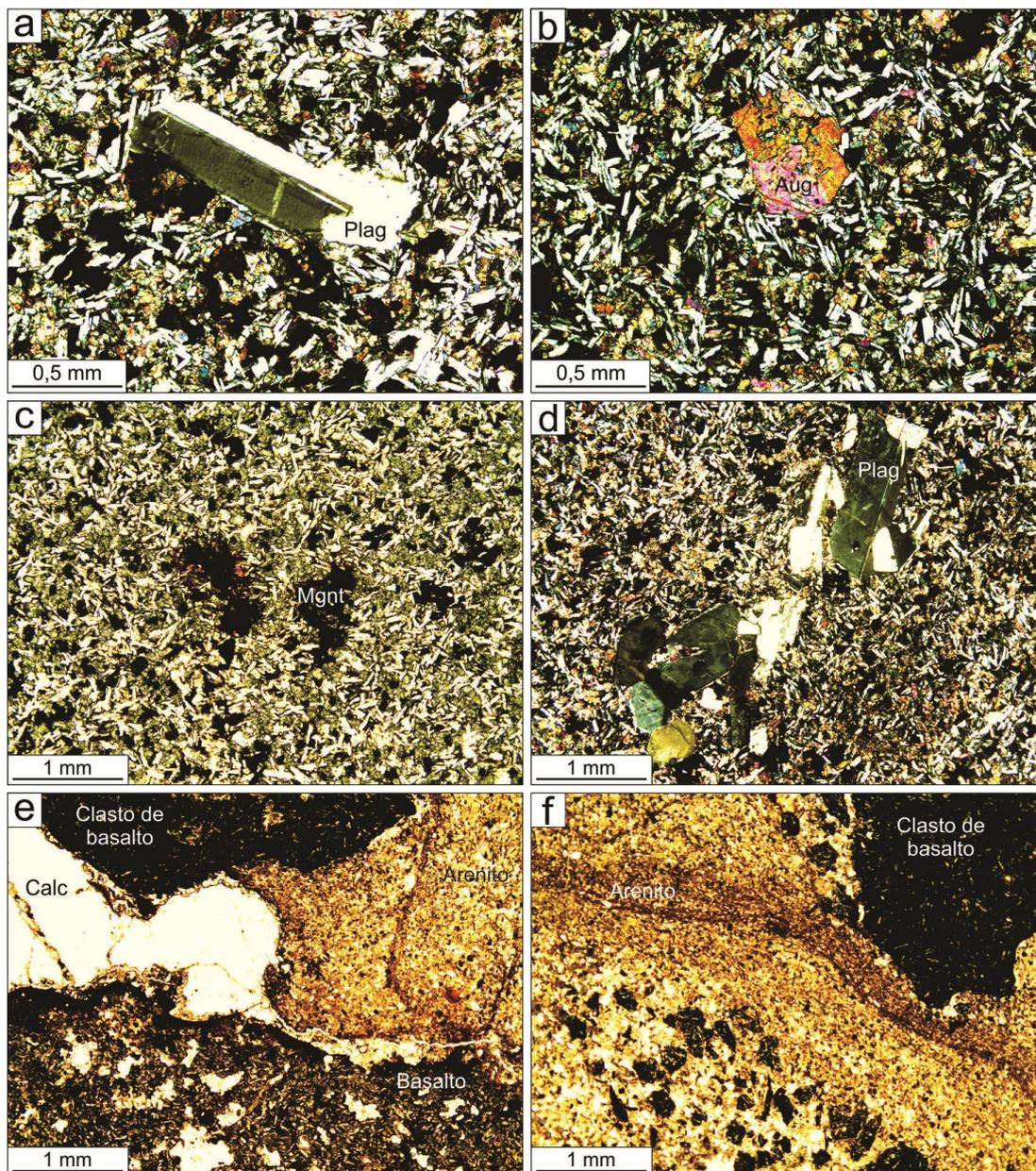


Figura 40. Fotomicrografias de lâminas petrográficas da região de Entre-Ijuís: a) fenocristal de plagioclásio; b) fenocristal de augita; c) fenocristais de magnetita com alteração para hematita; d) textura glomeroporfírica; e) brecha hidrotermal com clasto de basalto anguloso, cristal de calcita, arenito silicificado e basalto vesicular; f) brecha hidrotermal com arenito silicificado e clastos de basalto de tamanhos variados (de 3,5 mm a 0,1 mm).

As análises de concentrado de bateia e descrições da petrografia dos derrames vulcânicos de cada região são essenciais para definir o processo metalogenético através da ocorrência, ou ausência, de minerais indicadores de rochas com altos teores de metais ou de processos capazes de mobilizar e precipitar minério em zonas favoráveis para exploração.

4.6.2. Geoquímica de sedimentos ativos de drenagens da anomalia de Cu em Braga

As análises químicas de sedimentos ativos de drenagens na região de Braga apontam para resultados significativos nos teores de Cu. Das sete amostras coletadas, duas resultaram em teores acima do calculado como anomalia (499 e 654 ppm) e uma acima do limite de *outlier* alto (399 ppm) (Fig. 41).

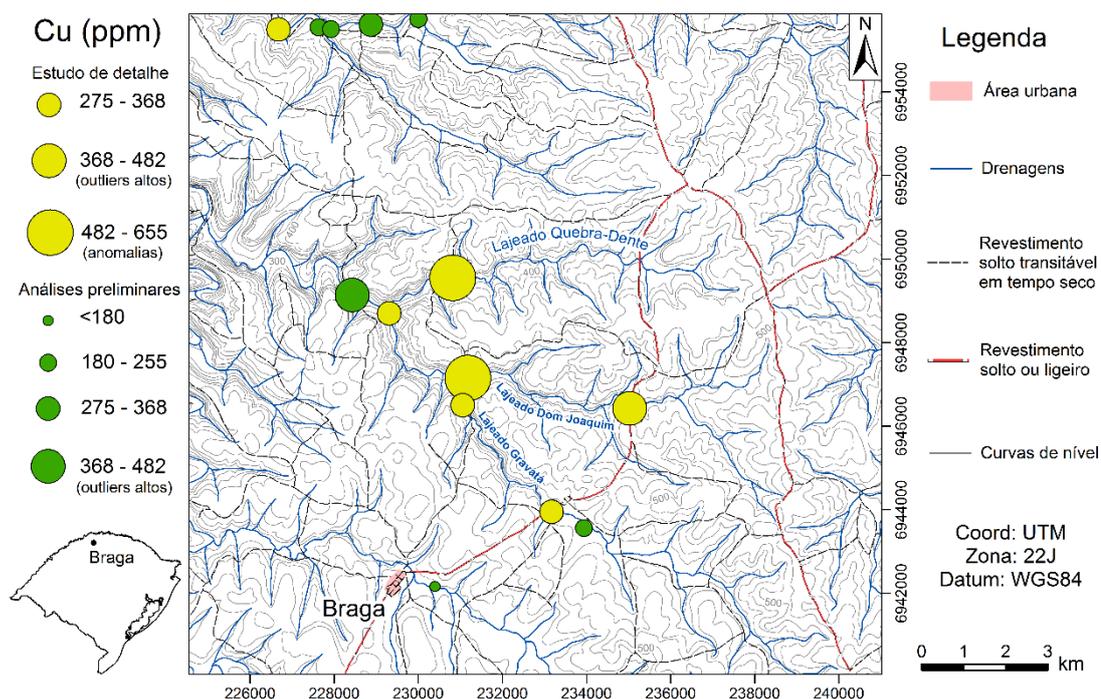


Figura 41. Mapa geoquímico de valor proporcional para Cu (ppm) na região de Braga, na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente. Em amarelo estão representadas as amostras do estudo de detalhe e em verdes as amostras do estudo preliminar.

As amostras consideradas anômalas possuem teores de 499 e 654 ppm de Cu, e foram coletadas no Lajeado Quebra-Dente e Lajeado Dom Joaquim, ambas na cota de aproximadamente 340 m.

Adicionando as amostras de detalhe aos mapas geoquímicos de isótopos da figura 17 e de valor proporcional da figura 18, a mudança no foco da anomalia é evidenciado pelas duas amostras anômalas no Lajeado Quebra-Dente e Dom Joaquim (Figs. 42 e 43). Os mapas de isótopos de Ag, Fe, Ni, Ti, V e Zn mostram valores significativos na área do estudo de detalhe em Braga (Fig. III, Anexo IV).

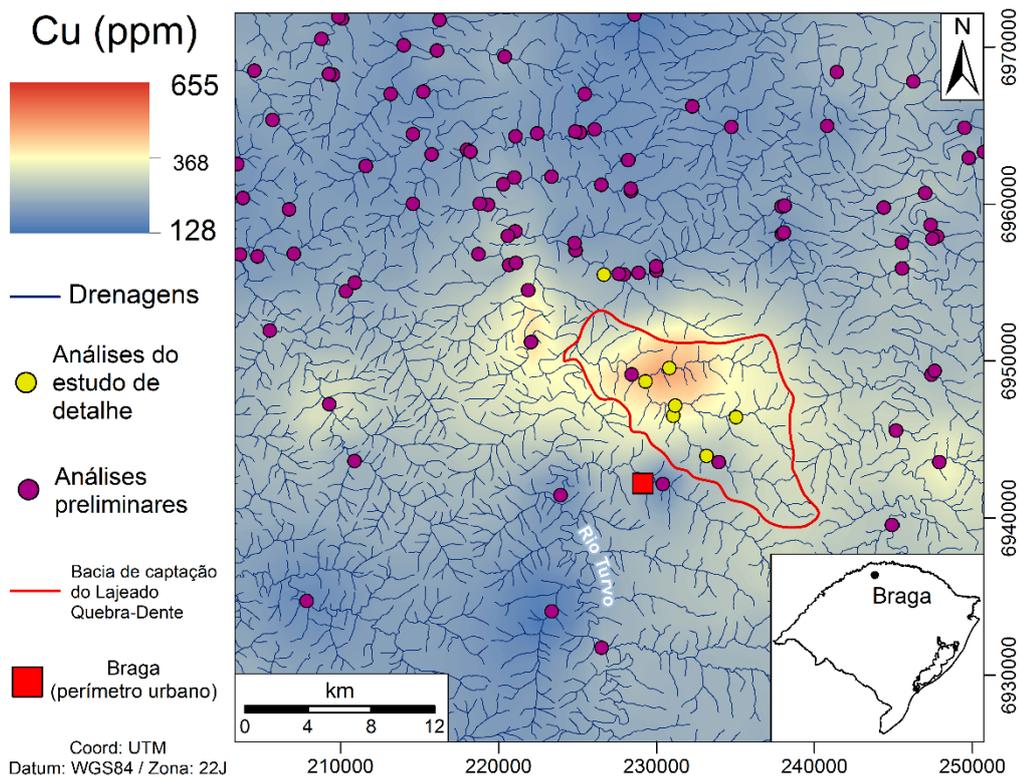


Figura 42. Mapa geoquímico de isotores de Cu (ppm) na região de Braga com as análises das amostras do estudo de detalhe.

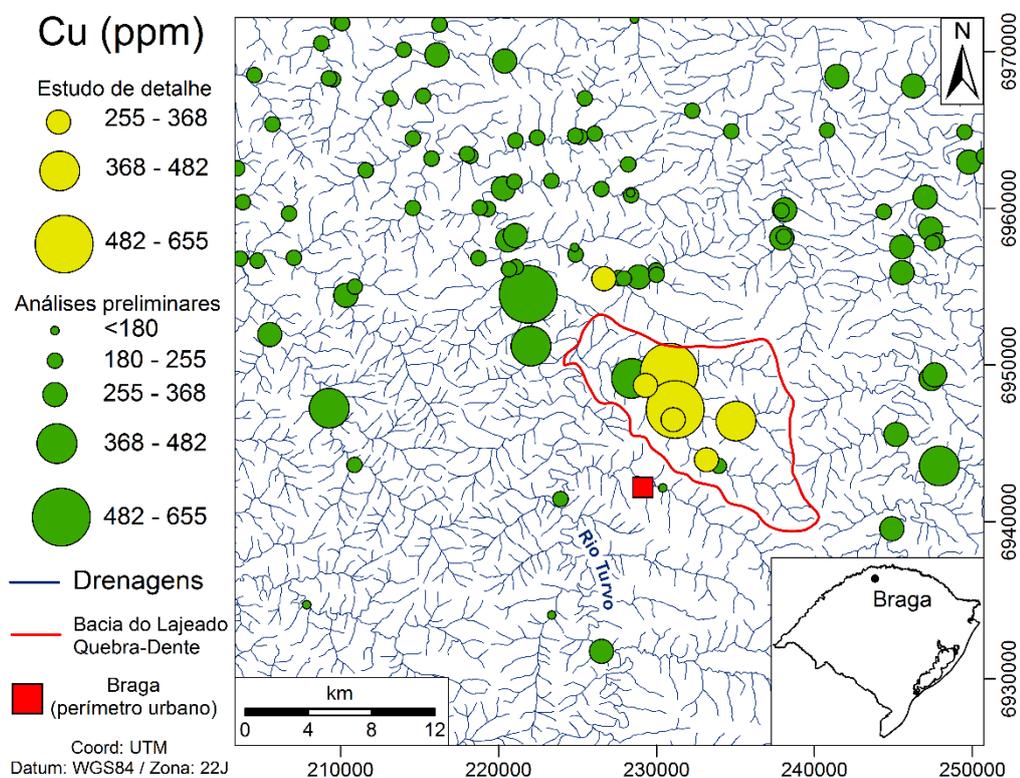


Figura 43. Mapa geoquímico de valor proporcional de Cu (ppm) na região de Braga com as análises das amostras do estudo de detalhe.

As amostras de detalhe mostram as mesmas correlações das amostras preliminares da unidade Paranapanema: Cu, Fe, V, Ti e Zn. Das duas amostras anômalas, a que possui maior teor de Cu (654 ppm) também é anômala em Ti (1,43%) e V (1553 ppm) (Fig. 44), além de ser anômala em Zn (277 ppm) (Fig. 45a) e ter o maior teor de Fe (20,73%; Fig. 45b) entre todas as amostras estudadas neste projeto. A correlação do Cu com Ni das amostras de detalhe seguem a mesma assinatura das amostras alto-Cu da análise preliminar da unidade Paranapanema (Fig. 45c). É possível observar que as amostras de detalhe seguem um *trend* praticamente linear.

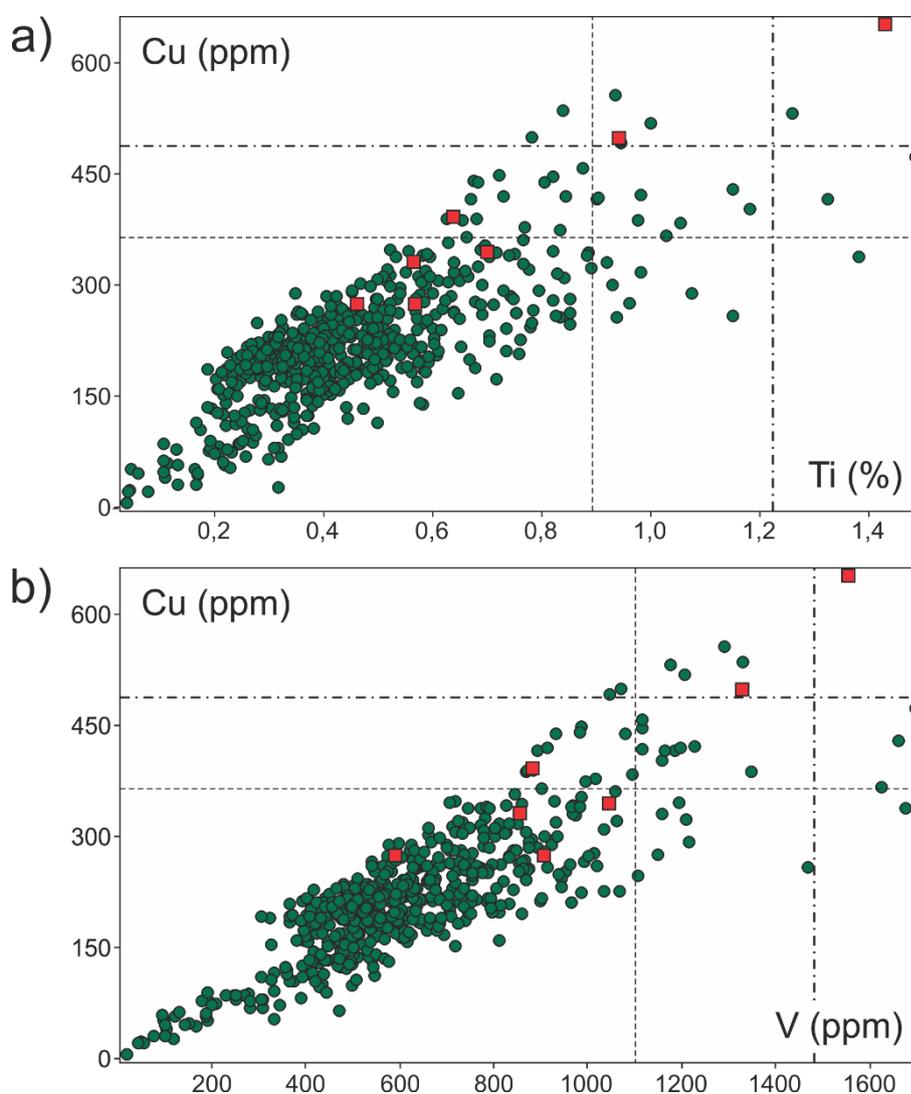


Figura 44. Gráficos de correlação: a) Cu x Ti e b) Cu x V. As amostras preliminares da unidade Paranapanema estão representadas pelos pontos verde escuro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Braga pelos quadrados vermelhos. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

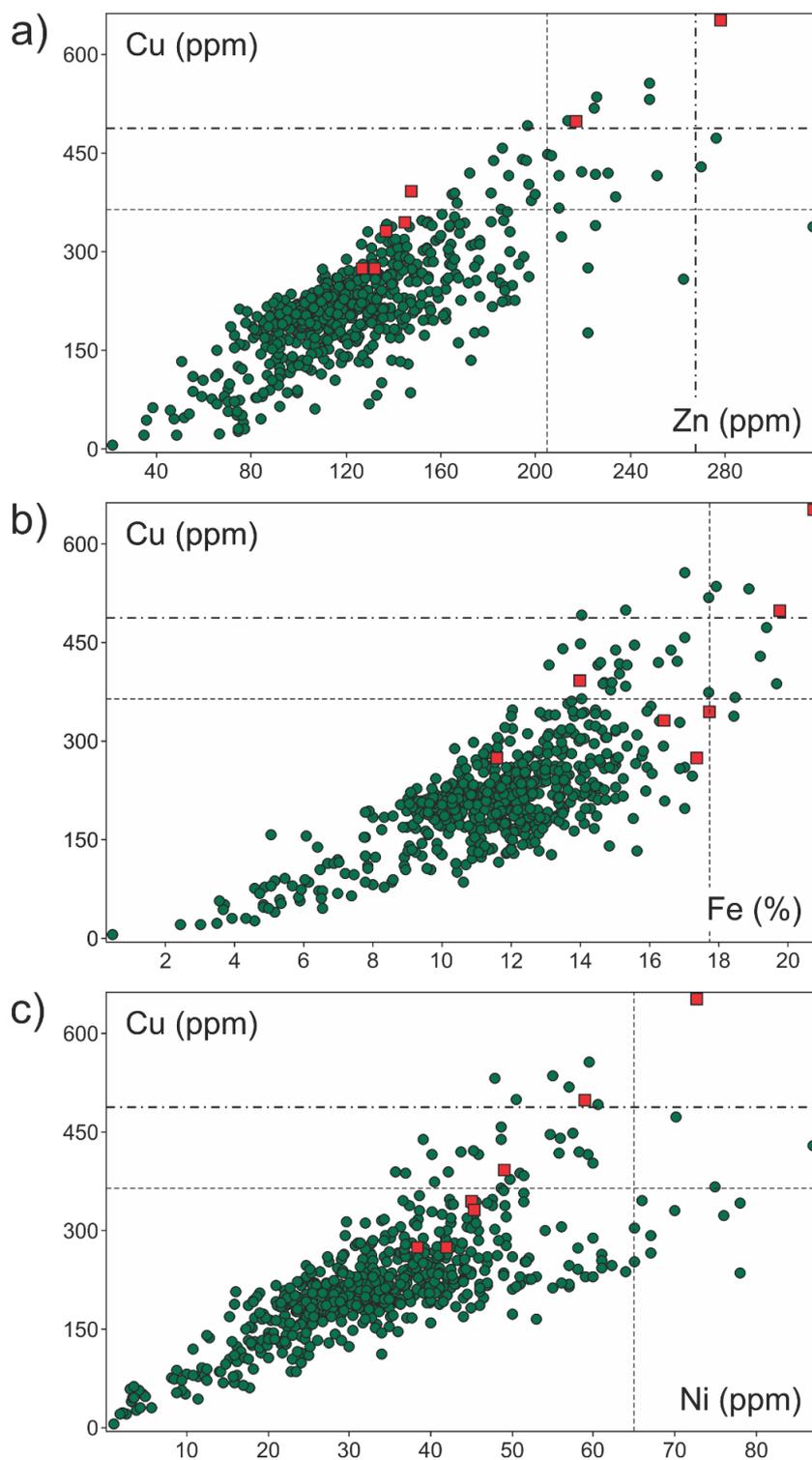


Figura 45. Gráficos de correlação: a) Cu x Zn, b) Cu x Fe e c) Cu x Ni. As amostras preliminares da unidade Paranapanema estão representadas pelos pontos verde escuro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Braga pelos quadrados vermelhos. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos.

A análise química dos sedimentos ativos de drenagens na região de Braga, com ênfase no estudo de detalhe para prospecção geoquímica de Cu, mostrou

resultados significativos para a definição do potencial exploratório e para a compreensão do processo metalogenético da anomalia. Esse tratamento também serve como base para estudos de mineralizações de Cu no Grupo Serra Geral, principalmente na unidade básica Paranapanema.

4.6.3. Geoquímica de sedimentos ativos de drenagens da anomalia de Cr em Entre-Ijuís

As análises químicas das amostras de sedimentos ativos de drenagens de detalhe no Lajeado do Moinho, em Entre-Ijuís, não mostrou valores anômalos, ou seja, nenhuma amostra mostrou valores superiores a 133 ppm em Cr (Fig. 46). Das sete amostras analisadas, duas possuem teores pouco acima do limite de *outlier* alto (86 a 99 ppm Cr), enquanto as outras cinco possuem teores variando de 70 a 76 ppm.

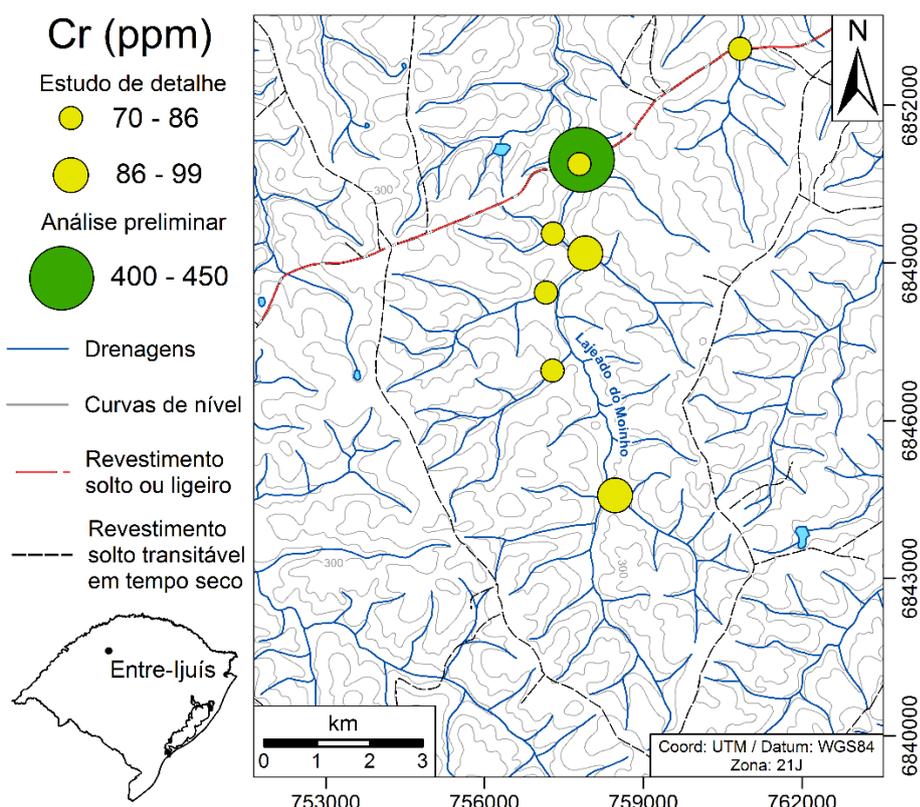


Figura 46. Mapa geoquímico de valor proporcional para Cr (ppm) na região de Entre-Ijuís, na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente. Amostras em amarelo representam as amostras do estudo de detalhe e as verdes as amostras do estudo preliminar.

Adicionando os dados de detalhe ao mapa da figura 7, é possível observar que a amostra preliminar anômala em Cr é mascarada pelo método de interpolação devido às amostras de detalhe com teores baixos de Cr (Fig. 47). Os mapas geoquímicos de isotores dos outros metais de interesse mostram resultados significativos para Co, Cu, Fe, Pd, Ti, V e Zn (Fig. IV, Anexo IV).

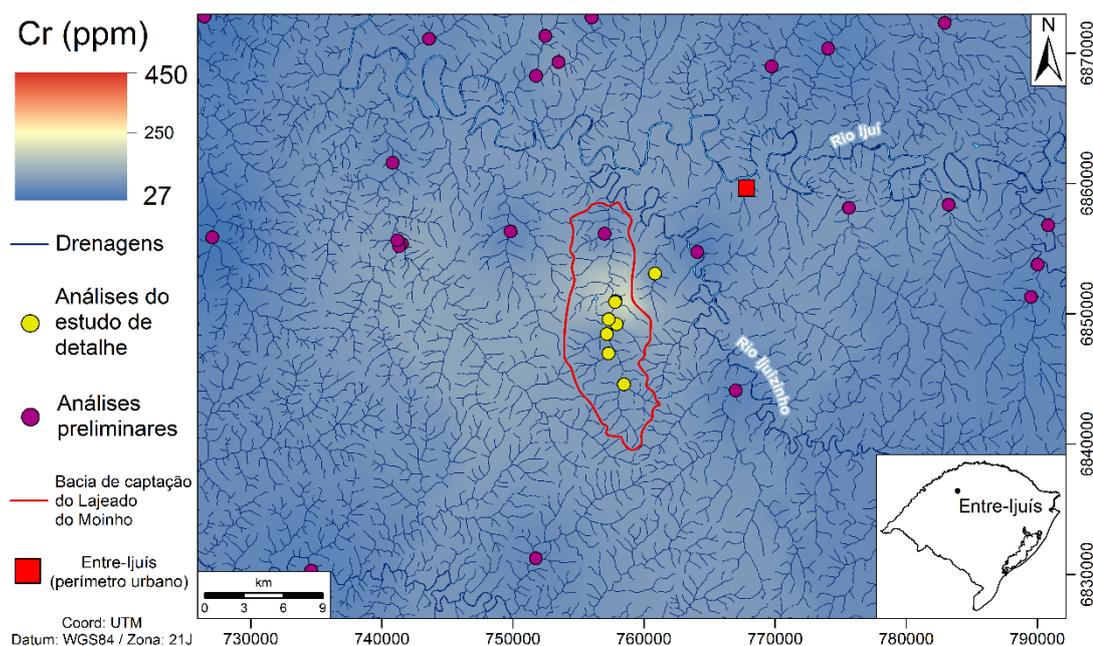


Figura 47. Mapa geoquímico de isotores de Cr (ppm) na região de Entre-Ijuís com as análises das amostras do estudo de detalhe.

O estudo de detalhe de Entre-Ijuís não resultou em amostras anômalas em Cr. Por outro lado, resultou em duas amostras anômalas em Cu, com valor acima do calculado para a unidade básica Gramado (376 ppm), sendo que em uma delas foi encontrado pirita no concentrado de bateia. Pelo gráfico Cr x Cu (Fig. 48a), é possível identificar as amostras de detalhe de Entre-Ijuís no *trend* de amostras enriquecidas em Cu. O mesmo ocorre no gráfico Cr x Fe (Fig. 48b), com duas amostras do estudo de detalhe acima do valor de *outlier* alto para Fe na unidade Gramado (17,68%). As amostras de detalhe de Entre-Ijuís apresentam ótima correlação positiva de Cu com V (Fig. 48c), assim como ocorre na anomalia de Cu de Braga.

O estudo prospectivo de detalhe na região de Entre-Ijuís apresentou resultados satisfatórios para a estimativa do potencial metalogenético da região para Cr. Após a avaliação de detalhe, foram identificadas duas amostras anômalas em Cu com assinatura geoquímica bem definida. Esses resultados, somados às análises petrográficas e de concentrados de bateia, contribuem para a pesquisa de

prospecção geoquímica com o objetivo de definir o potencial metalogenético do Grupo Serra Geral, em especial da unidade básica Gramado.

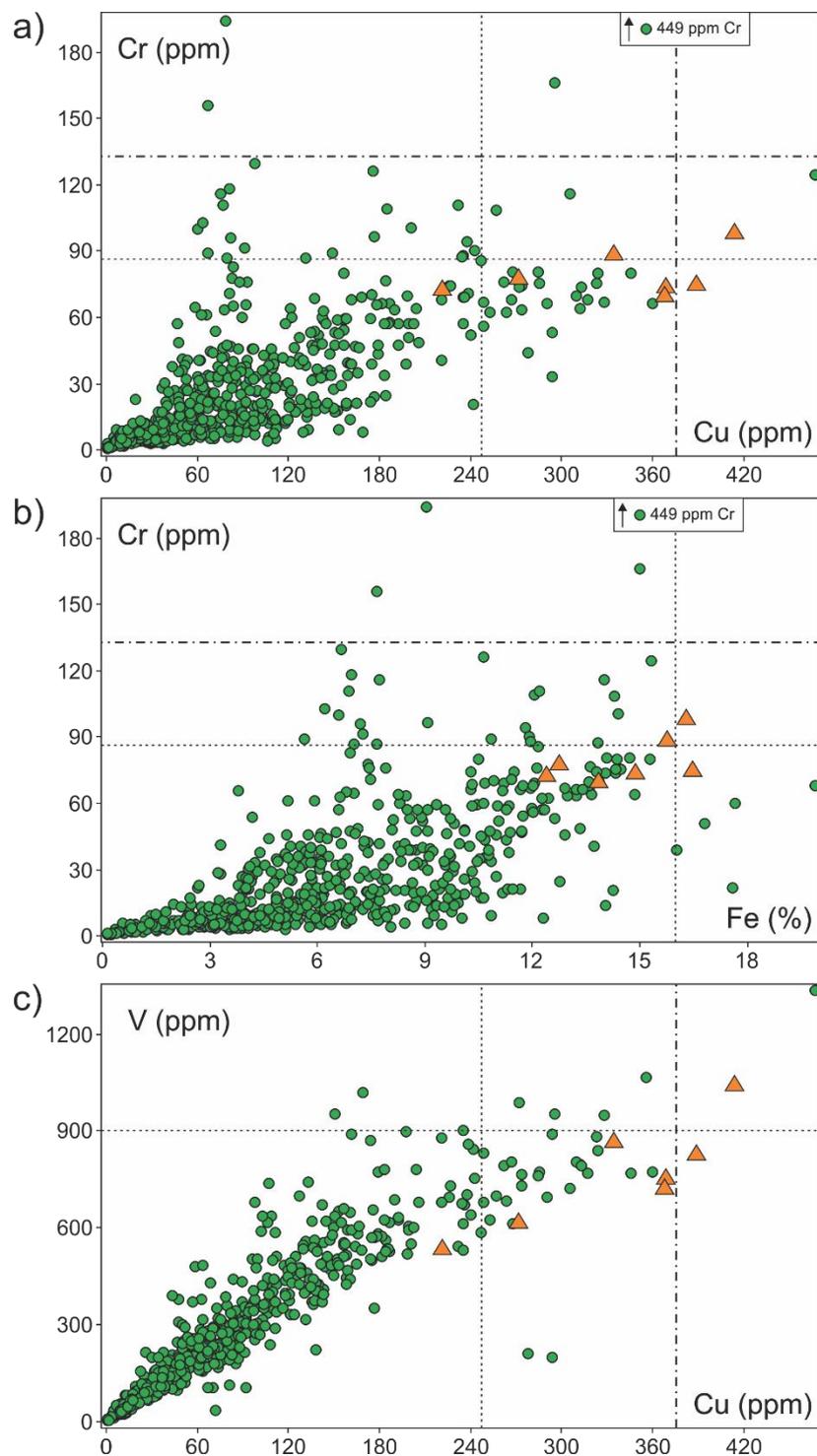


Figura 48. Gráficos de correlação: a) Cr x Cu, b) Cr x Fe e c) V x Cu. As amostras preliminares da unidade Gramado estão representadas pelos pontos verde claro, enquanto as amostras do estudo de detalhe em Entre-Ijuís pelos triângulos laranjas. As linhas tracejadas representam o limite inferior dos *outliers* altos e as linhas ponto-tracejadas o limite inferior dos *outliers* anômalos. Amostras destacadas por estarem representadas fora do campo do gráfico: a) e b) 449 ppm Cr.

5. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesse estudo evidenciaram associações geoquímicas bem definidas, assim como a determinação dos valores anômalos e de *background* dos metais em análises de sedimentos ativos de drenagens no Grupo Serra Geral. O estudo de detalhe nos alvos anômalos em Cu e Cr (Braga e Entre-Ijuís, respectivamente) resultou na confirmação da anomalia de Cu, enquanto a anomalia de Cr não mostrou consistência.

A compreensão das correlações geoquímicas de Cu e Cr é fundamental para a definição do potencial mineral dos alvos estudados e do modelo de processo mineralizador desses metais. O estudo dos concentrados de bateia e petrografia dos basaltos auxiliou para definir qual processo metalogenético concentrou Cu nos sedimentos ativos de drenagens.

Os baixos teores de S nas amostras de sedimentos ativos de drenagens e o comportamento litófilo do Cu corroboram a hipótese de concentração de metais em óxidos (magnetita) proposta por Arioli (2008) e Pinto *et al.* (2011a), onde o Grupo Serra Geral é comparado com a província vulcânica do Atlântico Norte (depósito de Skaergaard). A presença de sulfeto (pirita) em Entre-Ijuís abre a possibilidade de uma possível intrusão do tipo *sill* ou dique com contaminação de enxofre e presença de sulfetos, como ocorre localmente em outras intrusões do Grupo Serra Geral (Renner, 2010), enquanto a presença de cobre nativo pode ser explicada pelo enriquecimento supergênico de origem hidrotermal (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Baggio *et al.*, 2014).

A comparação dos teores encontrados em Braga com análises de sedimentos de drenagens nas cercanias de minas de Cu mostram que os teores não evidenciam a presença de um depósito economicamente viável. O fato de não ter sido observado minério na escala micro e macroscópica reforça a hipótese de que a principal reserva de Cu devem ser os minerais dos derrames basálticos, principalmente magnetita e clinopiroxênio (Arioli, 2008; Pinto *et al.*, 2011a; Pinto & Hartmann, 2014).

5.1. Geoquímica do Cu nos sedimentos ativos de drenagens do Grupo Serra Geral

O estudo preliminar das 2104 análises químicas dos sedimentos ativos de drenagens da Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul, cedidas pela CPRM-PA, demonstrou que os altos teores de Cu, assim como dos metais correlacionáveis a este (Fe, Ti, V e Zn) ocorrem na porção norte do estado, mapeada como basaltos do tipo químico Paranapanema (alto-Ti). A análise estatística reforça esta observação, com os valores de médias e medianas mais elevados nesta unidade. Porém não é possível afirmar que os altos teores de metais provêm de basaltos do tipo químico Paranapanema, já que a unidade básica de mesmo nome foi definida espacialmente a partir do mapa geológico da CPRM (Wildner *et al.*, 2006) do Rio Grande do Sul, em uma escala regional (1:750.000). O estudo de Rosenstengel & Hartmann (2012) definiu a estratigrafia de derrames na região de Ametista do Sul e Frederico Westphalen, próximas à Braga, contendo derrames do tipo Paranapanema no topo, sobrepostos a derrames do tipo Pitanga, ambos alto-Ti. Um padrão semelhante de estratigrafia dos derrames ocorre no município de Entre Rios, oeste de Santa Catarina (Hartmann *et al.*, 2014a, 2014b). Com isso, os sedimentos provenientes da unidade básica Paranapanema podem englobar materiais derivados de diversos tipos químicos de basaltos.

Nos sedimentos ativos de drenagens do Grupo Serra Geral, o Cu possui forte afinidade geoquímica com Fe, Ni, Ti, V e Zn, independente da unidade básica, pois tanto na unidade Paranapanema quanto na Gramado, esta associação se mantém. A forte correlação positiva de Cu, Ni, Cr e Co na unidade básica Gramado possui dois *trends* distintos, sendo as amostras com teores mais elevados de Ni, Cr e Co localizadas, em sua maioria, na borda sul do Grupo Serra Geral, possivelmente relacionadas com diques e *sills* com maior teor de clinopiroxênios ricos em Ni e Cr e ocorrência subordinada de sulfeto de Cu-Ni (bravoíta) e Cu-Co (carrolita) (Renner, 2010).

Na unidade básica Paranapanema, onde ocorrem os teores mais altos de Cu, a associação do Cu com Co é menos significativa, sendo calculada pelo coeficiente de Pearson como moderada (0,40). A afinidade do Cu com o Cr na unidade Paranapanema não pode ser desprezada, pois mesmo sendo considerada moderada, ainda é significativa (0,55). Além disso, o Cr possui forte correlação com Fe e Ni, e moderada com V. Esse fato sugere que Co e Cr podem estar relacionados,

em alguns casos, com a associação Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn, porém dificilmente com teores expressivos.

O V possui importância geoquímica significativa na unidade básica Paranapanema, pois é o elemento com melhor afinidade com Cu, Fe, Ti e Zn, sendo consideradas todas essas correlações como “muito fortes” pelo cálculo do coeficiente de Pearson. Por outro lado, o V possui correlação fraca com Co e moderada com Cr. Essas características mostram que as anomalias de Cu na unidade Paranapanema fazem parte de uma associação geoquímica de característica predominantemente litófila, ou seja, o Cu é, em sua maioria, magmático e sua gênese ou concentração não possui origem por contaminação crustal de enxofre. Essa hipótese corrobora o estudo de Arioli (2008), indicando que a concentração de metais como Cu, Cr, Ni, Ti e V, ocorre em grãos de magnetita dos derrames basálticos com maior teor de FeO_t.

5.2. Gênese das anomalias de Cu nos sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia do Grupo Serra Geral

Os processos metalogenéticos envolvendo mineralizações de metais, como Cu, Ag e Au em províncias basálticas continentais consistem basicamente em depósitos de sulfetos maciços, como nos depósitos de Noril'sk-Talnakh (Rússia) (Lightfoot & Evans-Lamswood, 2014; Ryabov *et al.*, 2014), e Emeishan (China) (Song *et al.*, 2011; Lightfoot & Evans-Lamswood, 2014) e depósitos em óxidos e sulfetos disseminados; como em Skaergaard (Groenlândia) (Nielsen & Brooks, 1995; Momme *et al.*, 2002; Arioli, 2008). No Grupo Serra Geral, o enriquecimento supergênico de Cu-Au-Ag por eventos hidrotermais é o único modelo de processo metalogenético, baseado em ocorrências de minério, estudado até o momento (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Arena *et al.*, 2013, 2014; Baggio *et al.*, 2014).

O baixo teor de S nos basaltos do Grupo Serra Geral, observado tanto em sedimento de corrente (Licht *et al.*, 2006) quanto em rocha total (Romanini & Albuquerque, 2000), evidencia que não houve contaminação crustal significativa relacionada aos sedimentos carbonosos, ricos em pirita, da Bacia do Paraná. Por esse fato, a presença de depósitos de sulfetos maciços no Grupo Serra Geral é improvável. A ocorrência de sulfetos está subordinada a *sills* intrudidos principalmente nas formações sedimentares da Bacia do Paraná (Renner, 2010). Os baixos teores de S encontrados nas amostras de sedimentos ativos de drenagens do atual projeto, e a associação geoquímica de característica litófila, reforçam a hipótese

de que o potencial metalogenético do Grupo Serra Geral não está relacionado a depósitos de sulfetos maciços, e que os elementos metálicos possuem gênese magmática mantélica, ou seja, os metais se concentram nos minerais dos derrames basálticos.

A associação Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn (\pm Cr-Co) na unidade Paranapanema é evidente e indica que os altos teores de Cu podem estar associados diretamente com os derrames basálticos, sem nenhuma evidência de concentração por sulfetos. A hipótese de que as concentrações de metais (Cr-Cu-Ni-Ti-V) no Grupo Serra Geral ocorrem nos grãos de magnetitas, sugerida por Arioli (2008), em comparação com o depósito de Skaergaard, é o modelo mais adequado para a situação. Pinto *et al.* (2011a) relaciona a ocorrência de cobre nativo na região de Vista Alegre (cerca de 50 km a NE de Braga), norte do Rio Grande do Sul, com a alteração de minerais opacos e clinopiroxênios por fluidos hidrotermais, propondo que esses minerais são as reservas de Cu nos basaltos da região.

Em uma situação na qual um derrame inteiro possui minerais com altos teores de Cu, a chance de mais de uma drenagem erodir um derrame é maior do que a de erodir um *sill*, por geralmente possuir maior continuidade lateral. Por isso, os sedimentos ativos de drenagens próximas provavelmente teriam influência do derrame alto-Cu, fazendo com que os teores de Cu em todas as amostras seja mais elevado que a média e a mediana dos basaltos em geral. Em um derrame com altos teores de Cu em seus minerais, a concentração anômala do metal (em torno de 550 ppm de acordo com os dados do atual trabalho) nos sedimentos ativos de drenagens seria mais sutil comparada com a concentração de Cu em um material proveniente de um *sill* com sulfetos (950 ppm, valor hipotético levando em consideração que a média de Cu em sedimentos de drenagens nas minas cupríferas da Bacia do Camaquã é de 2460 ppm Cu, de acordo com Pestana *et al.*, 1997), por este possuir, teoricamente, concentrações mais maciças de Cu. Com isso, a anomalia proveniente de uma intrusão sulfetada teria maior discrepância em relação aos derrames próximos com baixo teor de Cu (Fig. 49). Porém, o que ocorre nas amostras de detalhe da região anômala de Braga são duas anomalias (499 ppm e 655 ppm Cu), uma amostra no intervalo dos *outliers* altos (399 ppm Cu) e três amostras no intervalo entre o 3º quartil e o *outlier* alto (275 a 346 ppm Cu), o que condiz com a situação da hipótese da concentração do Cu nos minerais de um ou mais derrames de basalto. A ocorrência de uma amostra com teor de Cu acima do valor de *outlier* alto à jusante do Lajeado Quebra-Dente, e outra anômala coletada no Rio Turvo (Fig. 31), evidencia que não há uma concentração de Cu restrita, o que ocorreria caso houvesse um *sill*

rico em sulfetos, já que não houve diluição da anomalia à jusante, como ocorreria de acordo com o modelo de Hawkes (1976).

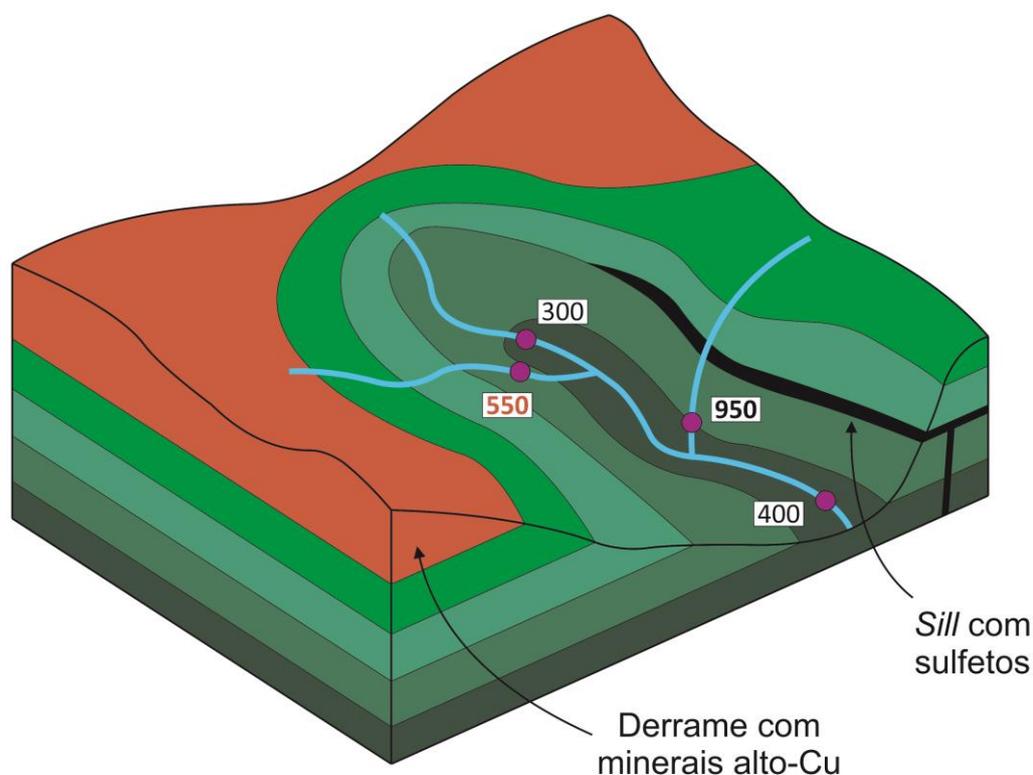


Figura 49. Esquema hipotético de teores de Cu (em ppm) em amostras de sedimentos ativos de drenagens, envolvendo as duas hipóteses de concentração de Cu no Grupo Serra Geral: derrame basáltico com minerais alto-Cu e intrusões (*sill*) com presença de sulfetos de Cu. A amostra com material proveniente diretamente do derrame alto-Cu (550 ppm) possui anomalia pouco discrepante em relação a uma anomalia de um *sill* com sulfetos de Cu (950 ppm, valor hipotético). Isso deve-se a concentração maciça de Cu no *sill* em comparação à concentração disseminada de Cu nos minerais do derrame.

Nos concentrados de bateia na região de Entre-Ijuís foram identificados grãos de pirita e de cobre nativo. A presença do sulfeto de Fe deixa em aberto duas hipóteses para sua origem: intrusão máfica do tipo *sill* ou dique contaminada com S das rochas sedimentares carbonosas da Bacia do Paraná; ou então essa contaminação ocorreu em uma porção localizada de algum derrame de basalto, já que a contaminação crustal nas lavas do Grupo Serra Geral é mínima e insignificante, mas eventualmente pode ter ocorrido em uma situação especial, o que ainda não foi registrado nos estudos da literatura até o momento. Não há evidências geológicas ou geoquímicas capazes de descartar ambas hipóteses, já que não foi observado em campo, e não há nenhuma feição diagnóstica em imagem de satélite, como por exemplo um corpo intrusivo na região de Entre-Ijuís.

Os concentrados de bateia de Braga mostraram porcentagens de hematita superiores em relação às amostras de Entre-Ijuís, o que pode ser relacionado à uma maior taxa de alteração, principalmente dos óxidos de Fe (magnetita), resultado de intemperismo químico mais acentuado ou de intensa percolação de fluido hidrotermal.

A presença de brecha hidrotermal e da intensa alteração dos basaltos para esmectita na região de Entre-Ijuís evidencia que os eventos hidrotermais, descritos inicialmente por Hartmann *et al.* (2012a), evoluíram pelo menos até o estágio H2 (Duarte & Hartmann, 2014). Cobre nativo de origem supergênica, remobilizado dos minerais dos basaltos (principalmente magnetita e clinopiroxênios) por fluido hidrotermal de baixa temperatura (< 150 °C), proveniente do aquecimento do Aquífero Guarani, e precipitado em fraturas e amígdalas dos basaltos, foi observado nos municípios de Vista Alegre e Taquaruçu do Sul, norte do Rio Grande do Sul (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Baggio *et al.*, 2014). A ocorrência de cobre nativo nos concentrados de bateia de Entre-Ijuís pode ser resultado do mesmo tipo de processo.

5.3. Gênese da anomalia de Cr nos sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia do Grupo Serra Geral

As mineralizações de Cr mais importantes exploram a fase óxido de uma intrusão máfica-ultramáfica estratiforme, explorando como minério a cromita, como ocorre no Complexo de Bushveld, na África do Sul (Eales, 1993; Eales & Cawthorn, 1996). Até o presente momento, o único corpo intrusivo ultramáfica relacionado com o magmatismo do Grupo Serra Geral é o Complexo Básico Lomba Grande, na região de Morungava, próxima a Porto Alegre. Esta intrusão é composta por diabásios e olivina-gabros (Viero & Roisenberg, 1992).

A análise das amostras de sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Gramado e do Complexo Básico Lomba Grande possibilitam delimitar assinaturas geoquímicas, através da interpretação do gráfico da figura 37, diferenciando as intrusões ultramáficas do Complexo Básico Lomba Grande, os *sills* e diques intrudidos nas rochas sedimentares da borda sul da Bacia do Paraná e os basaltos da unidade Gramado (Fig. 50). Enquanto as intrusões máficas-ultramáficas, diques e *sills* possuem maiores teores de Cr e Ni, os basaltos são enriquecidos em V.

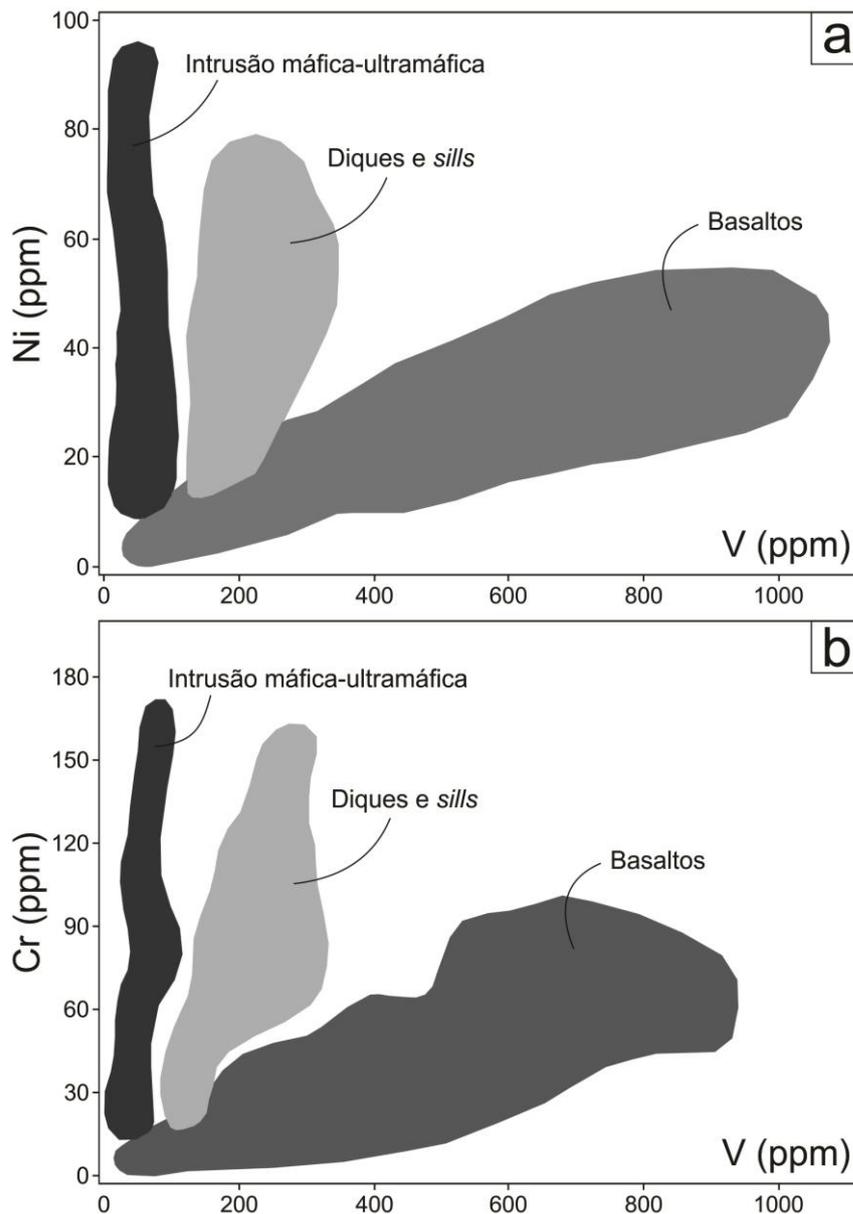


Figura 50. Gráficos Ni (ppm) x V (ppm) e Cr (ppm) x V (ppm) com a interpretação da figura 37. Em cinza escuro, o campo com a assinatura geoquímica da intrusão máfica-ultramáfica, baseada na resposta das amostras do Complexo Básico Lomba Grande. Em cinza a assinatura dos basaltos da unidade Gramado. Em cinza claro, a assinatura de diques e *sills* da borda sul da Bacia do Paraná.

O teor de Cu nos sedimentos ativos de correntes também distingue as assinaturas dos basaltos da unidade Gramado e do Paranapanema, diferenciando-os das intrusões máficas-ultramáficas do Complexo Básico Lomba Grande. As figuras 32 e 36 evidenciam que as razões Cr/Cu e Ni/Cu são superiores nos sedimentos das intrusões ultramáficas, enquanto que os teores de V nos sedimentos provenientes dos basaltos são consideravelmente superiores.

Na unidade básica Gramado, a associação geoquímica Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn (\pm Cr) se mantém, como na unidade Paranapanema. A diferença é a forte afinidade de Cu, Fe, Ni e V com Co. Adotando a hipótese de Arioli (2008), na qual a magnetita seria a principal reserva de Cr, Cu, Ni, Ti e V nos basaltos do grupo Serra Geral, o Co poderia também estar associado aos grãos de magnetita. As fortes correlações entre Co, Mn e Ba devem estar relacionadas com a captura do Co e do Ba pelo óxido de Mn em ambiente secundário (Licht *et al.*, 2006).

A anomalia de Cr identificada na região de Entre-Ijuís após o tratamento prévio das 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens, cedidas pela CPRM, não obteve consistência nas sete amostras de detalhe, com cinco amostras no intervalo entre o 3º quartil e o *outlier* alto e duas amostras pouco acima do *outlier* alto. A geoquímica da amostra anômala também não condiz com a assinatura de uma intrusão ultramáfica, possuindo valor de V pelo menos cinco vezes maior do que a média dos sedimentos provenientes do Complexo Básico Lomba Grande. Provavelmente houve algum equívoco na amostragem do material ou no processo de obtenção do dado.

A ocorrência de espinélio do tipo cromita nos concentrados de bateia da região de Braga (anômala em Cu) não evidencia a presença de uma intrusão ultramáfica acamadada como ocorre em Bushveld (Eales & Cawthorn, 1996), pois a cristalização de cromita em basaltos, mesmo que não seja comum, é possível. Um exemplo disso é a presença de cromita nos basaltos da planície de Snake River, nos Estados Unidos (Thompson, 1973).

5.4. Potencial metalogenético das anomalias de Braga (Cu) e Entre-Ijuís (Cr)

As anomalias de Cu em Braga e Cr em Entre-Ijuís foram identificadas através do tratamento de 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens. A anomalia de Braga é uma das seis regiões anômalas em Cu no Grupo Serra Geral, Rio Grande do Sul, sendo todas localizadas na unidade básica Paranapanema. Já a anomalia de Entre-Ijuís é a única anomalia de Cr identificada no Grupo Serra Geral, na unidade básica Gramado. Sete amostras de sedimentos ativos de correntes e concentrados de bateia foram coletados em cada alvo e analisados com o objetivo de confirmar e caracterizar as anomalias de Cu e Cr.

As amostras de detalhe da região de Braga resultaram em altos teores de Cu, com duas amostras anômalas (499 e 655 ppm) e uma amostra acima do valor de *outlier* alto (393 ppm). A amostra com teor máximo de Cu possui valor 3 vezes maior

que a média (218 ppm) dos basaltos Paranapanema. Esses dados confirmam a anomalia de Cu na bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.

Comparando os teores anômalos de Cu de Braga com as amostras de sedimentos ativos de drenagens de outros depósitos de cobre, o Grupo Serra Geral não apresenta valores que representem uma concentração economicamente viável de Cu. No depósito do tipo *skarn* de Fenghuangshan (Hongying *et al.*, 2012), na China, os valores mais altos de Cu nos sedimentos de drenagens próximos ao depósito variam de cerca de 3000 ppm até 7000 ppm (Wang *et al.*, 2004). Nas minas de Cu da Bacia do Camaquã, porção central do Rio Grande do Sul, o teor médio de Cu em sedimentos de drenagens é de 2460 ppm, com o teor máximo de 6439 ppm (Pestana *et al.*, 1997). No depósito de Pike Hill, no nordeste dos Estados Unidos, os valores mais altos variam de cerca de 3500 ppm a pouco mais de 8000 ppm (Piatak *et al.*, 2006). No depósito de Darrehzar, na província de Kerman, no sudeste do Irã, o teor médio de Cu nos sedimentos de drenagens próximos à área mineralizada é de 3070 ppm, com teor máximo de 8430 ppm de Cu (Soltani *et al.*, 2014).

Na região de Braga não foi observado nenhum tipo de minério de Cu, seja em campo, em lâmina petrográfica ou nos concentrados de bateia. Também não foi identificada nenhuma rocha diferente dos derrames basálticos e brechas hidrotermais. A hipótese de Arioli (2008) e Pinto *et al.* (2011a) de que as concentrações de metais ocorrem nos grãos de magnetita dos basaltos do Grupo Serra Geral explicaria o fato de não ter sido encontrado minério de Cu na região anômala de Braga. Esse fato restringe o potencial metalogenético da região pelo fato de não haver evidência de minério de Cu para a exploração mineral. Por outro lado, a ocorrência de brecha hidrotermal, geodos de ágata e calcedônia, a intensa alteração dos minerais dos basaltos para esmectita e a presença de porcentagens significativas de hematita nos concentrados de bateia de Braga indicam que há a possibilidade de ter ocorrido percolação de fluidos hidrotermais de baixa temperatura (< 150 °C) capazes de remobilizar o Cu dos minerais dos basaltos e precipitar na forma de cobre nativo em amígdalas e fraturas (Pinto & Hartmann, 2011, 2014; Pinto *et al.*, 2011a; Baggio *et al.*, 2014).

Em Entre-Ijuís, o estudo de detalhe da anomalia de Cr (449 ppm) na bacia de captação do Lajeado do Moinho resultou em cinco amostras acima do valor de 3º quartil (> 39 ppm) e duas amostras acima do valor de *outlier* alto (> 86 ppm), com valor máximo de 99 ppm de Cr. Por não possuir consistência estatística, o potencial metalogenético para um possível depósito de Cr na região de Entre-Ijuís é desprezível. Por outro lado, os teores de Cu foram significativos. Das sete amostras

do estudo de detalhe, duas resultaram em teores acima do *outlier* anômalo (376 ppm) para os basaltos da unidade básica Gramado, e quatro amostras acima do valor de *outlier* alto (247 ppm). A amostra com maior teor de Cu possui quase 5 vezes o valor da média de Cu da unidade Gramado (85 ppm). Esse fato não representa uma expectativa animadora em relação ao potencial metalogenético da região para exploração de Cu, já que os teores são ainda menores que a anomalia de Cu na região de Braga.

A partir do tratamento dos dados de sedimentos ativos de drenagens e concentrados de bateia, a anomalia de Cu de Braga mostrou resultados consistentes e significativos, porém com baixo respaldo para exploração de metais. Já a anomalia de Cr de Entre-Ijuís não obteve consistência, pelo fato das sete amostras de detalhe resultarem em valores inexpressivos de Cr. Com isso, a contribuição da província vulcânica Paraná para exploração de recursos minerais metálicos continua sendo apenas potencial.

6. CONCLUSÕES

- 1) Através de cartografia geoquímica de 2104 análises de sedimentos ativos de drenagens cedidas pela CPRM – Sureg-PA, alvos com altos teores relativos de metais foram identificados no Grupo Serra Geral, noroeste do Rio Grande do Sul, destacando as regiões dos municípios de Braga (439 a 519 ppm de Cu) e Entre-Ijuís (449 ppm de Cr).
- 2) A anomalia de Cu em Braga foi confirmada após o estudo de detalhe, com mais duas amostras anômalas (499 e 654 ppm). A assinatura geoquímica das anomalias reforça a associação Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn.
- 3) A anomalia de Cr em Entre-Ijuís não obteve consistência estatística após a análise de detalhe de sedimentos ativos de drenagens. Os teores de Cr das sete amostras coletadas variaram de 70 a 99 ppm. Com isso, o potencial metalogenético no Grupo Serra Geral para Cr, na região de Entre-Ijuís, não é significativo
- 4) A unidade básica do tipo químico Paranapanema possui teores maiores de Fe, Cu, Ni, Co, Cr, Ti, V e Zn em relação à unidade básica Gramado.
- 5) Os valores de S são baixos (média = 0,013%), comprovando que não houve contaminação significativa de enxofre que possibilitasse a concentração de sulfetos nos derrames basálticos do Grupo Serra Geral.
- 6) O valor calculado pelo diagrama *Boxplot* para o limiar anômalo em Cu, em amostras de sedimentos ativos de drenagens é de 482 ppm na unidade básica Paranapanema. Na unidade básica Gramado, o limiar anômalo em Cr é de 133 ppm.
- 7) A principal associação geoquímica para elementos metálicos nas unidades básicas Paranapanema e Gramado é Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn (\pm Co-Cr).

- 8) As baixas razões Cr/Cu e Ni/Cu evidenciam a ausência de intrusões máfico-ultramáficas nas unidades básicas Paranapanema e Gramado. A relação dos teores de Cr e Ni com V na unidade básica Gramado realça um conjunto de amostras com teores relativamente altos de Cr e Ni e baixos de V, localizadas predominantemente na borda sul do Grupo Serra Geral no estado, sendo provavelmente resultado de intrusões máficas do tipo *sills* e diques.
- 9) No estudo de detalhe em Braga e Entre-Ijuís, não foram observadas rochas máficas-ultramáficas ou corpos intrusivos nos alvos prospectivos. As litologias caracterizadas em campo e em lâmina petrográfica foram basaltos e brechas hidrotermais.
- 10) Nas amostras de concentrados de bateia, foi registrada a presença de pirita (uma amostra) e cobre nativo (uma amostra) na região de Entre-Ijuís. A ocorrência de sulfeto demonstra que houve contaminação de enxofre de alguma rocha da área fonte do sedimento. A presença de um corpo intrusivo (*sill* ou dique) ou derrame basáltico com a presença subordinada de sulfetos são as hipóteses mais prováveis, apesar de não haver indícios que comprovem a presença de intrusões ou a contaminação de S nos basaltos. Já a presença de cobre nativo pode ser resultado da remobilização e precipitação do Cu em fraturas e amígdalas nos basaltos por fluidos hidrotermais de baixa temperatura (< 150 °C).
- 11) O caráter litófilo da associação de metais (Cu-Fe-Ni-Ti-V-Zn) identificada no Grupo Serra Geral indica que a concentração dos elementos metálicos deve estar contida nos minerais dos derrames basálticos. As evidências observadas neste estudo corroboram com a hipótese sugerida por Arioli (2008) e Pinto *et al.* (2011a), na qual a concentração dos metais no Grupo Serra Geral ocorre principalmente nos grãos de magnetita.
- 12) Apesar da anomalia de Cu caracterizada na região de Braga, os teores relativamente baixos, comparados com estudos de prospecção geoquímica em minas de Cu (integrado ao fato de não ter sido observado minério de Cu em campo, em lâmina ou nos concentrados de bateia), não permitem sugerir a presença de um depósito economicamente viável.

7. REFERÊNCIAS

Abram, M.B., Ferreira, F.J.F., Licht, O.A.B., Jost, H., Brito, R.S.C., Wildner, W., Arioli, E.E., Kirchner, C.A. & Cerqueira, D.B. 2008. Potencialidade para mineralizações de Ni-Cu e EGP na região sudoeste do estado do Paraná. *In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS*, 4., 2008. Foz do Iguaçu. *Resumos*.

Amaral, S.E.D. 1971. Geologia e petrologia da formação Irati (Permiano) no estado de São Paulo. *Boletim IGA*, 2: 03-81.

Andriotti, J.L.S. 2010. *Interpretação de dados de prospecção geoquímica com o auxílio de estatística*. Porto Alegre, CPRM, 73p.

Araújo, L.M., França, A.B. & Potter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*, 7(3): 317-336.

Arena, K.R., Hartmann, L.A. & Baggio, S.B. 2014a. Geological controls of copper, gold and silver in the Serra Geral Group, Realeza region, Paraná, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 63: 178-200.

Arena, K.R., Hartmann, L.A. & Baggio, S.B. 2014b. Geologia e mineralização de cobre nativo, ouro e prata de Realeza, Paraná, Brasil. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds). Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, UFRGS, p. 55-74.

Arioli, E.E. 2008. Arquitetura faciológica da seqüência vulcânica e o significado exploratório das anomalias geoquímicas de elementos do grupo da platina (EGP) e metais associados no Sistema Magmático Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil. Curitiba, 262p. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.

Baggio, S.B, Hartmann, L.A., Arena, K.R., Duarte, S.K. & Antunes, L.M. 2014. Sílica gossan em mineralização de cobre nativo, ouro e prata no Grupo Serra Geral. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds). Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral.* Porto Alegre, UFRGS, p. 111-134.

Bellieni, G., Brotzu, P., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, M., Melfi, A.J., Pacca, I.G., Piccirillo, E.M. & Stolfa, D. 1983. Petrological and paleomagnetic data on the plateau basalt to rhyolite sequences of the Southern Paraná Basin (Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 55(4): 355-383.

Brim, R.J.P. 1985. Prospecção geoquímica. *In: Oliva, L.A. (Ed.). Métodos e técnicas de pesquisa mineral.* Brasília, MME/DNPM, 355p.

Brooks, C.K. & Gleadow, A.J.W. 1977. A fission-track age for the Skaergaard intrusion and the age of the East Greenland basalts. *Geology*, 5(9): 539-540.

Brooks, C.K., Keays, R.R., Lambert, D.D., Frick, L.R. & Nielsen, T.F.D. 1999. Re–Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland: constraints on plume–lithosphere interactions and the genesis of the Platinova reef, Skaergaard intrusion. *Lithos*, 47(1): 107-126.

Brückmann, M.P., Hartmann, L.A., Knijnik, D.B., Tassinari, C.C.G., Sato, K. & Baggio, S.B. 2014. A duração do magmatismo no Grupo Serra Geral, província vulcânica Paraná. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds). Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral.* Porto Alegre, UFRGS, p. 233-246.

Carelli, T.G. & Borghi, L. 2011. Caracterização de Microfácies Sedimentares em Folhelhos da Formação Ponta Grossa (Devoniano) na Borda Leste da Bacia do Paraná. *Anuário do Instituto de Geociências*, 34(2): 84-104.

Comin-Chiaramonti, P., Bellieni, G., Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. Classification and petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). *In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.) The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico - USP, p. 47-74.

Coulon, F.K., Gamermann, N.G. & Formoso, M.L.L. (1973). Considerações sobre a gênese da Formação Tupanciretã. *Pesquisas*, 2(1): 79-89.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2008. *Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000*. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

Duarte, L. C. 2008. Evolução geológica, geoquímica e isotópica de mineralizações com geodos de ametista, Artigas, República Oriental do Uruguai. Porto Alegre, p. 167. Tese de Doutorado em Geociências, Programa de Pós-graduação em Geociências Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Duarte, L.C., Hartmann, L.A., Vasconcellos, M.A.Z., Medeiros, J.T.N. & Theye, T. 2009. Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, southern Paraná Magmatic Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3): 427–436.

Duarte, L.C., Hartmann, L.A., Ronchi, L.H., Berner, Z., Theye, T. & Massonne, H.J. 2011. Stable isotope and mineralogical investigation of the genesis of amethyst geodes in the Los Catalanes gemological district, Uruguay, southernmost Paraná volcanic province. *Mineralium Deposita*, 46(3): 239-255.

Duarte, L.C., Hartmann, L.A., Medeiros, J.T.N. & Juchem, P.L. 2014. Origem epigenética dos geodos de ametista e ágata no Grupo Serra Geral. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds.) Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, UFRGS, p. 21-40.

Duarte, S.K. & Hartmann, L.A. 2014. Evolução dos injetitos de areia no Complexo Novo Hamburgo, província vulcânica Paraná. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds.)*

Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral. Porto Alegre, UFRGS, p. 203-232.

Eales, H.V. & Cawthorn, R.G. 1996. The Bushveld Complex. *Developments in Petrology*, 15: 181-229.

Eales, H.V., Botha, W.J., Hattingh, P.J., De Klerk, W.J., Maier, W.D. & Odgers, A.T.R. 1993. The mafic rocks of the Bushveld Complex: a review of emplacement and crystallization history, and mineralization, in the light of recent data. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 16(1): 121-142.

Eggleton, R.A., Foudoulis, C., & Varkevisser, D. 1987. Weathering of basalt: changes in rock chemistry and mineralogy. *Clays and Clay Minerals*, 35(3): 161-169.

Ernesto, M., Raposo, M.I.B., Marques, L.S., Renne, P.R., Diogo, L.A. & De Min, A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the north-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, 28(4): 321-340.

Favilla, C.A.C., Rodrigues, T.L.N. & Caldasso, A.L.S. 1995. Depósitos Sedimentares Sin a Pós Vulcanismo Basáltico no Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO SULBRASILEIRO DE GEOLOGIA, 6., 1995, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre, SBG, p. 267-269.

Fernandes, A.J., Maldaner, C.H., Sobrinho, J.M.A., Pressinotti, M.M.N. & Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto-SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica. *Geologia USP. Série Científica*, 10(2): 73-99.

Ferreira, F.J.F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. São Paulo, 169 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Filho, D.B.F. & Junior, J.A.S. 2009. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1).

Frank, H.T., Gomes, M.E.B. & Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, 36(1): 49–57

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang-Chang, H., Caetano-Chang, M.R. & Nogueira-Pressinotti, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3): 249–265.

Goldschmidt, V.M. 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Journal of the Chemical Society*, 655-673.

Goulart, A.R., Oliveira, J.C., Bruno, M.D.R., Costa, P.S. & Wildner, W. 2011. Comparação geoquímica entre Grandes Províncias Ígneas com base na metalogenia de Cu-Ni e PGE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA*, 8., 2011, Gramado. Resumos.

Hartmann, L.A. 2014. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. *Ciência e Natura*, 36(3): 173-182.

Hartmann, L.A. & Baggio, S.B. 2014. *Metalogenia e exploração mineração no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, UFRGS, 553p.

Hartmann, L.A., Wildner, W., Duarte, L.C., Duarte, S.K., Pertille, J., Arena, K.R., Martins, L.C. & Dias, N. L. 2010. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. *Geological Magazine*, 147(06): 954-970.

Hartmann, L.A., Duarte, L.C., Massonne, H.J., Michelin, C., Rosenstengel, L.M., Bergmann, M., Theye, T., Pertille, J., Arena, K.R., Duarte, S.K., Pinto, V.M., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C. & Wildner, W. 2012a. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdalae and giant amethyst geodes in lavas from the Southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. *International Geology Review*, 54(1): 1-14.

Hartmann, L.A., Arena, K.R. & Duarte, S.K. 2012b. Geological relationships of basalts, andesites and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Torres, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237: 97-111.

Hartmann, L.A., Baggio, S.B. & Duarte, S.K. 2013. Decoding geochemical and gamma-spectrometric signatures from lavas and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Novo Hamburgo, Brazil. *International Geology Review*, 55(4): 510-524.

Hartmann, L.A., Antunes, L.M. & Rosenstengel, L.M. 2014a. Stratigraphy of amethyst geode-bearing lavas and fault block structures of the Entre Rios mining district, Paraná volcanic province, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(1): 187-198

Hartmann, L.A., Duarte, S.K., Arena, K.R., Pertille, J. Rosenstengel, L.M., Antunes, L. M., Baggio, S. B. 2014b. Correlação de derrames do Grupo Serra Geral com uso de estratigrafia, geoquímica e gama-espectrometria. *In: Hartmann, L. A., Baggio, S.B. (Eds). Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral. Porto Alegre, UFRGS, p. 149-164.*

Hasenack, H. & Weber, E. 2010. *Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul. Escala 1:50.000.* Porto Alegre, UFRGS, Centro de Ecologia. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento n.3).

Hawkes, H.E. 1957. Principles of geochemical prospecting. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1000-F: 225-353.

Hawkes, H.E. 1976. The downstream dilution of stream sediment anomalies. *Journal of Geochemical Exploration*, 6(1): 345-358.

Hongying, Q., Rongfu, P., Hongcai, F., Jinwen, L., Yonglei, W., Haolin, W. & Lei, Y. 2012. Geology, Geochemistry, and Geochronology of the Fenghuangshan Skarn-type Copper Deposit in the Tongling Ore Cluster, Anhui Province, East China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 86(3): 700-718.

Janasi, V.A., Freitas, V.A. & Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1): 147-153.

Kamo, S.L., Czamanske, G.K., Amelin, Y., Fedorenko, V.A., Davis, D.W. & Trofimov, V. R. 2003. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1): 75-91.

Larsen, L.M. & Watt, W.S. 1985. Episodic volcanism during break-up of the North Atlantic: evidence from the East Greenland plateau basalts. *Earth And Planetary Science Letters*, 73(1): 105-116.

Licht, O.A.B. 1998. Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos. Rio de Janeiro, CPRM, 236p.

Licht, O.A.B., Kirchner, C.A. & Romanini, S.J. 2006. Geoquímica de sedimentos ativos de drenagens. *In*: Wildner, W., Brito, R.S.C., Licht, O.A.B. & Arioli, E.E. (Eds). Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do sudoeste do estado do Paraná. Escala 1:200.000. Brasília, CPRM/MINEROPAR, p. 50-65.

Lightfoot, P.C. & Evans-Lamswood, D. 2014. Structural controls on the primary distribution of mafic–ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. *Ore Geology Reviews*, 64: 354-386.

Lightfoot, P.C., Hawkesworth, C.J., Hergt, J., Naldrett, A.J., Gorbachev, N.S., Fedorenko, V.A. & Doherty, W. 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(2): 171-188.

Manning, C.E. & Bird, D.K. 1991. Porosity evolution and fluid flow in the basalts of the Skaergaard magma-hydrothermal system, East Greenland. *American Journal of Science*, 291(3): 201-257.

Mantovani, M.S.M., Marques, L.S., De Souza, M.A., Civetta, L., Atalla, L. & Innocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). *Journal of Petrology*, 26(1): 187-209.

Melfi, A.J., Piccirillo, E.M. & Nardy, A.J.R. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin (Brazil). An introduction. *In*: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico - USP, p. 1-13.

Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. Porto Alegre, 255p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.

Miller Jr., J.D. & Andersen, J.C. 2002. Attributes of Skaergaard-type PGE reefs. *In*: INTERNATIONAL PLATINUM SYMPOSIUM, 9., Durham. Abstract. Duke University, Durham, p. 305-308.

Mincato, R.L. 1994. Avaliação do potencial da Província Ígnea Continental do Paraná para Mineralizações de Ni-Cu-EGP, a partir dos modelos Noril'sk e Insizwa. Campinas, 113 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

Mincato, R.L. 2000. Metalogenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província Ígnea Continental do Paraná. Campinas, 172 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

Momme, P., Tegner, C., Brooks, K.C. & Keays, R.R. 2002. The behaviour of platinum-group elements in basalts from the East Greenland rifted margin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(2): 133-153.

Naldrett, A.J., Lightfoot, P.C., Fedorenko, V., Doherty, W. & Gorbachev, N.S. 1992. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores. *Economic Geology*, 87(4): 975-1004.

Nardy, A.J.R., Machado, F.B. & Oliveira, M.A.F. 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1): 178-195.

Nielsen, T.F.D. & Brooks, C.K. 1995. Precious metals in magmas of East Greenland; factors important to the mineralization in the Skaergaard Intrusion. *Economic Geology*, 90(7): 1911-1917.

Peate, D.W. 1997. The Paraná-Etendeka Province. *In*: Mahoney, J.J & Coffin, M. (Eds). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington, American Geophysical Union, p. 217-245.

Peate, D.W. & Hawkesworth, C.J. 1996. Lithospheric to asthenospheric transition in low-Ti basalts from Southern Paraná, Brazil. *Chemical Geology*, 127(1): 1-24.

Peate D.W., Hawkesworth C.J. & Mantovani M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55(1-2): 119-139

Pertille, J., Hartmann, L.A., Duarte, S.K., Arena, K., Rosa, M.L.C.C. & Barboza, E.G. 2013. Gossan characterization in the Quaraí and Los Catalanes amethyst geode districts (Brazil and Uruguay), Paraná volcanic province, using rock geochemistry and gamma-spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 127-139.

Pestana, M.H.D., Formoso, M.L., & Teixeira, E.C. 1997. Heavy metals in stream sediments from copper and gold mining areas in southern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 58(2): 133-143.

Piatak, N.M., Seal, R.R., II, Hammarstrom, J.M., Kiah, R.G., Deacon, J.R., Adams, M., Anthony, M.W., Briggs, P.H., & Jackson, J.C. 2006. Geochemical characterization of mine waste, mine drainage, and stream sediments at the Pike Hill Copper Mine

Superfund Site, Orange County, Vermont. Reston, U.S. Geological Survey, 120 p. (*Scientific Investigations Report*)

Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P., Melfi, A.J., Stolfa, D., Bellieni, G., Marques, L.S., Giaretta, A., Nardy, A.J.R., Pinese, J.P.P., Raposo, M.I.B. & Roisenberg, A. 1988a. Petrochemistry of continental flood basalt-rhyolite suites and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico - USP, p. 107-156.

Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P., Bellieni, G., Civetta, L., Marques, L.S., Melfi, A.J., Petrini, R., Raposo, M.I.B. & Stolfa, D. 1988b. Petrogenetic aspects of continental flood basalt-rhyolite suites from the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, p. 107-156.

Pinto, V.M. & Hartmann, L.A. 2011. Flow-by-flow chemical stratigraphy and evolution of thirteen Serra Geral Group basalt flows from Vista Alegre, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 83(2): 425-440.

Pinto, V.M. & Hartmann, L.A. 2014. A mineralização de cobre nativo de Vista Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. In: Hartmann, L. A., Baggio, S. B. (Eds). *Metalogenia e Exploração Mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, UFRGS, p. 75-88.

Pinto, V.M., Hartmann, L.A. & Wildner, W. 2011a. Epigenetic hydrothermal origin of native copper and supergene enrichment in the Vista Alegre district, Paraná basaltic province, southernmost Brazil. *International Geology Review*, 53(10): 1163-1179.

Pinto, V.M., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., McNaughton, N.J. & Wildner, W. 2011b. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at 135 Ma. *Chemical Geology*, 281(1): 93-102.

Quintas, M.C.L., Mantovani, M.S.M. & Zalán, P.V. 1999. Uma contribuição para o estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(3): 217-226.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J., Prevot, M. & Perrin, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic–Cretaceous boundary. *Science*, 258(5084): 975-979.

Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Ferraud, G. & Piccirillo, E.M. 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Parana flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1): 199-212.

Renner, L.C. 2010. Geoquímica de *sills* basálticos da formação Serra Geral, sul do Brasil, com base em rocha total e micro-análise de minerais. Porto Alegre, 226 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rocha-Campos, A.C., Cordani, U.G., Kawashita, K., Sonoki, H.M. & Sonoki, I.K. 1988. Age of the Paraná Flood Volcanism. In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico - USP, p. 25-45.

Romanini, S.J. & Albuquerque, L.F.F. 2000. Aspectos geológicos, geoquímicos e potencialidade em depósitos de Ni-Cu-EGP do magmatismo da Bacia do Paraná. In: CPRM – Superintendência Regional de Porto Alegre, *Projeto Platina e Associados*.

Rose, A.W., Hawkes, H.E. & Webb, J.S. 1979. *Geochemistry in mineral exploration*. London, Academic Press.

Rosenstengel, L.M. & Hartmann, L.A. 2012. Geochemical stratigraphy of lavas and fault-block structures in the Ametista do Sul geode mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 48: 332-348.

Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., & Gora, M.P. 2014. *Trap Magmatism and Ore Formation in the Siberian Noril'sk Region*. Dordrecht, Springer.

Soltani, N., Moore, F., Keshavarzi, B. & Sharifi, R. 2014. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 1-18.

Song, X., Wang, Y., & Chen, L. (2011). Magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits in magma plumbing systems: Features, formation and exploration. *Geoscience Frontiers*, 2(3), 375-384.

Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C.J., Kirstein, L. & Mantovani, M.S.M. 1996. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1): 95-109.

Thompson, R.N. 1973. Titanian chromite and chromian titanomagnetite from Snake River Plain basalt, a terrestrial analogue to lunar spinels. *American Mineralogist*, 58: 826-830.

Turner, S.P., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(3): 333-348.

Viero, A.P. & Roisenberg, A. 1992. Petrologia e geoquímica do Complexo Básico de Lomba Grande, RS. *Pesquisas em Geociências*, 19(1): 41-54.

Wang, C., Shen, Z., Li, X., Luo, C., Chen, Y. & Yang, H. 2004. Heavy metal contamination of agricultural soils and stream sediments near a copper mine in Tongling, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 73(5): 862-869.

Wildner, W., Brito, R.S.C., Licht, O.A.B. & Arioli, E.E. 2006. *Geologia e recursos minerais do sudoeste do estado do Paraná. Escala 1:200.000*. Brasília, CPRM/MINEROPAR, 95 p. + mapas.

Wooden, J.L., Czamanske, G.K., Fedorenko, V.A., Arndt, N.T., Chauvel, C., Bouse, R. M., King, B.W., Knight, R.J. & Siems, D.F. 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(15): 3677-3704.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. & Zanotto, O.A. 1990. Bacia do Paraná. *In: Raja-Gabaglia, G.P. & Milani,*

E.J. (Eds). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/SEREC/CENSUD, p. 135-168.

ANEXOS

ANEXO I – TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Tabela I. Parâmetros estatísticos dos elementos analisados nos sedimentos ativos de drenagens das Unidades Ácidas. Total de 75 amostras.

Elemento (unidade)	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Ag (ppb)	34	37	38	1	66	15
Al (%)	1,84	1,83	2,49	0,31	3,27	0,72
Au (ppb)	5	3	5	0	29	5
As (ppm)	3	3	2	1	8	1
Ba (ppm)	191	193	149	31	437	75
Ca (%)	0,23	0,2	0,18	0,03	0,72	0,12
Co (ppm)	31	23	10	2	92	23
Cr (ppm)	16	10	5	1	64	14
Cu (ppm)	73	44	8	6	257	65
Fe (%)	6,48	5,33	3,69	0,87	18,37	3,75
K (%)	0,05	0,05	0,04	0,01	0,12	0,02
Mg (%)	0,14	0,12	0,1	0,02	0,39	0,08
Mn (ppm)	1474	1419	894	112	4622	793
Ni (ppm)	11	7	2	1	35	9
Pd (ppb)	12	5	5	1	48	10
Pt (ppb)	4	3	1	1	19	4
Sr (ppm)	21	17	16	3	98	14
Ti (%)	0,22	0,17	0,08	0,02	0,79	0,17
V (ppm)	244	172	43	23	927	217
Zn (ppm)	82	74	-	5	168	37

Tabela II. Parâmetros estatísticos dos elementos analisados nos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Esmeralda. Total de 23 amostras.

Elemento (unidade)	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Ag (ppb)	46	46	45	26	63	9
Al (%)	2,92	2,83	-	2,24	4,23	0,53
Au (ppb)	3	4	1	1	8	2
As (ppm)	4	4	3	2	8	1
Ba (ppm)	196	201	-	109	267	44
Ca (%)	0,24	0,23	0,23	0,13	0,35	0,06
Co (ppm)	49	48	25	23	102	19
Cr (ppm)	42	39	-	10	105	23
Cu (ppm)	128	106	-	63	291	61
Fe (%)	9,79	9,6	-	6,2	13,64	2,28
K (%)	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,01
Mg (%)	0,15	0,14	0,14	0,06	0,31	0,06
Mn (ppm)	1991	1764	-	616	4258	784
Ni (ppm)	19	17	-	5	48	11
Pd (ppb)	9	5	5	5	32	8
Pt (ppb)	4	4	1	1	9	2
Sr (ppm)	17	16	18	11	36	5
Ti (%)	0,3	0,23	-	0,11	0,86	0,19
V (ppm)	384	390	-	115	734	179
Zn (ppm)	103	98	98	69	176	26

Tabela III. Parâmetros estatísticos dos elementos analisados nos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Paranapanema. Total de 605 amostras.

Elemento (unidade)	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Ag (ppb)	38	40	1	1	855	50
Al (%)	2,4	2,32	2,45	0,19	4,66	0,73
Au (ppb)	4	4	< 1	< 1	74	5
As (ppm)	2	1	1	< 1	8	1
Ba (ppm)	213	205	200	19	950	83
Ca (%)	0,28	0,28	0,31	0,02	0,6	0,1
Co (ppm)	62	62	62	2	176	20
Cr (ppm)	67	67	70	4	225	25
Cu (ppm)	218	213	231	6	557	82
Fe (%)	11,6	11,72	11,95	0,46	19,68	2,73
K (%)	0,05	0,05	0,05	0,01	0,12	0,02
Mg (%)	0,23	0,23	0,25	0,01	0,63	0,1
Mn (ppm)	2403	2288	2560	40	9920	961
Ni (ppm)	34	33	32	1	87	13
Pd (ppb)	15	14	5	1	78	11
Pt (ppb)	10	9	1	1	153	8
Sr (ppm)	23	22	21	1	87	11
Ti (%)	0,45	0,41	0,5	0,04	1,49	0,2
V (ppm)	618	573	495	20	1697	236
Zn (ppm)	124	118	110	22	317	38

Tabela IV. Parâmetros estatísticos dos elementos analisados nos sedimentos ativos de drenagens da unidade básica Gramado. Total de 647 amostras.

Elemento (unidade)	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Ag (ppb)	24	16	1	1	2262	107
Al (%)	1,64	1,59	1,26	0,08	4,26	0,8
Au (ppb)	3	1	< 1	< 1	443	18
As (ppm)	2	1	1	< 1	9	1
Ba (ppm)	217	200	200	7	2495	164
Ca (%)	0,28	0,24	0,19	0,01	1,47	0,22
Co (ppm)	33	28	25	1	299	25
Cr (ppm)	27	15	5	1	449	32
Cu (ppm)	85	64	9	1	467	73
Fe (%)	6,39	5,78	5,35	0,14	19,89	3,55
K (%)	0,06	0,05	0,03	0,01	0,19	0,04
Mg (%)	0,18	0,15	0,09	0,01	0,95	0,14
Mn (ppm)	1335	1159	1275	19	11209	893
Ni (ppm)	17	14	6	< 1	100	15
Pd (ppb)	8	5	5	1	70	9
Pt (ppb)	3	1	1	1	24	3
Sr (ppm)	33	25	25	1	141	26
Ti (%)	0,3	0,25	0,11	< 0,01	1,27	0,21
V (ppm)	287	223	106	4	1335	228
Zn (ppm)	79	74	84	2	287	40

ANEXO II – HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA

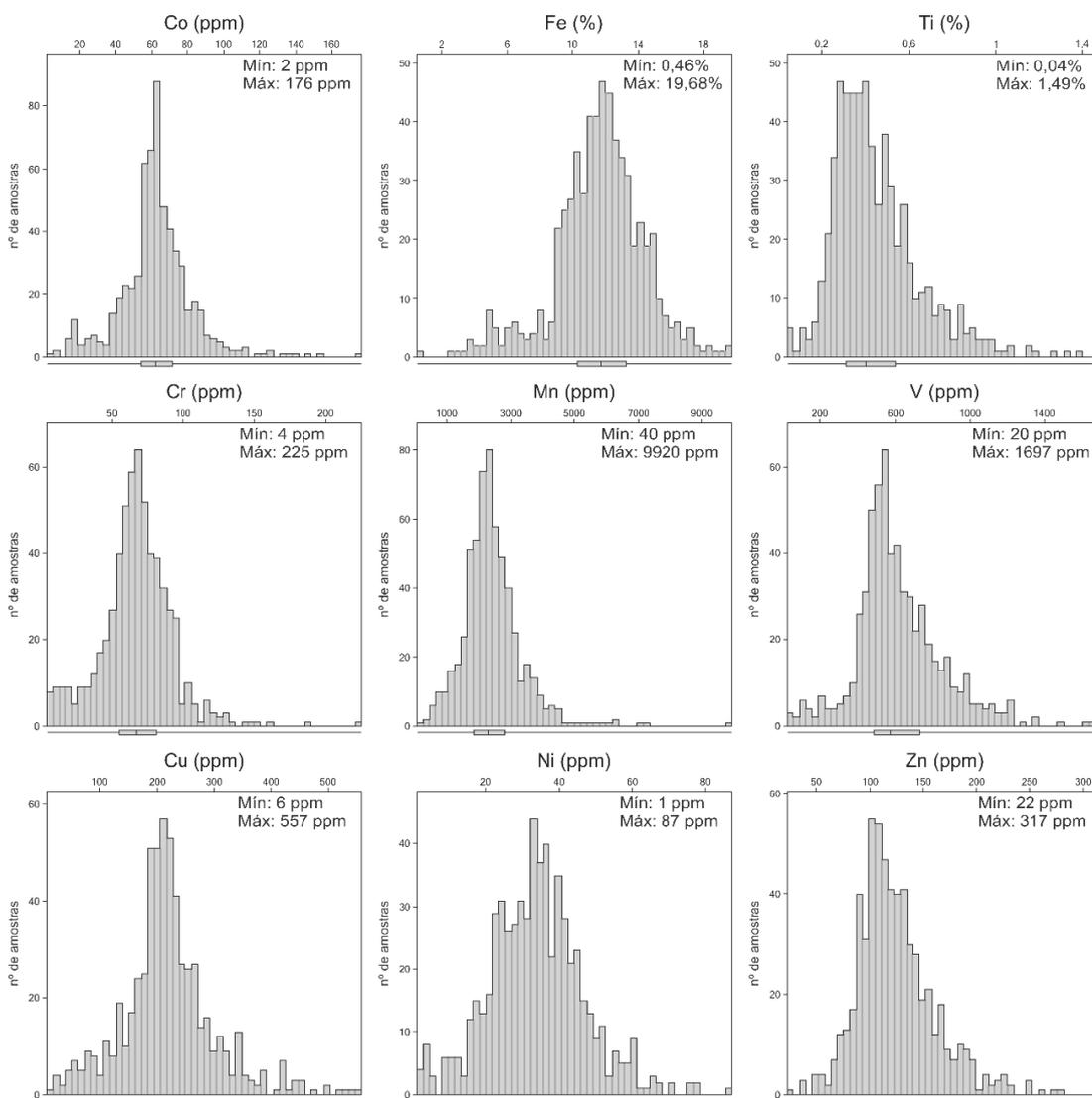


Figura I. Histogramas de frequência das amostras da unidade básica Paranapanema para elementos de interesse. Evidência de distribuição normal com boa simetria em todos elementos.

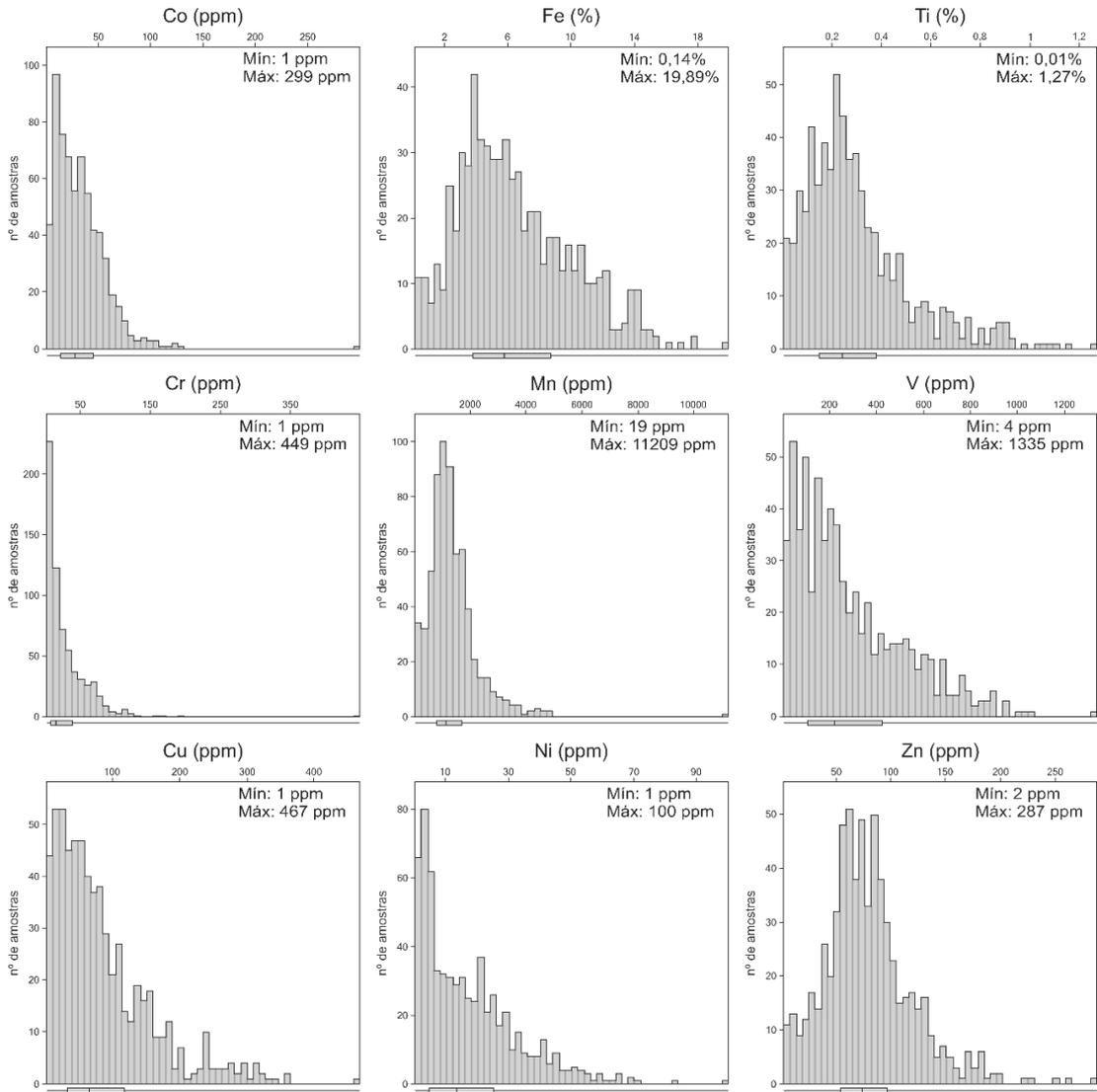


Figura II. Histogramas de frequência das amostras da unidade básica Gramado para elementos de interesse. Evidência de distribuição normal assimétrica em todos elementos, com exceção do Zn, que apresenta boa simetria.

ANEXO III – TRATAMENTO ESTATÍSTICO PARA O CÁLCULO DE ANOMALIA

Tabela V. Parâmetros estatísticos utilizados no diagrama *Boxplot* e para cálculo do valor de anomalia dos elementos nas análises das amostras de sedimentos ativos de drenagens na unidade básica Paranapanema. Total de 605 amostras.

Elemento (unidade)	1º Quartil	3º Quartil	IQR	<i>Outlier</i> Alto	<i>Outlier</i> Anômalo
Ag (ppb)	26	48	22	81	114
Al (%)	1,94	2,83	0,89	4,16	5,5
Au (ppb)	3	5	2	8	11
As (ppm)	1	2	1	4	6
Ba (ppm)	174	244	69	348	452
Ca (%)	0,21	0,34	0,13	0,39	0,5
Co (ppm)	54	71	17	98	124
Cr (ppm)	55	81	26	121	160
Cu (ppm)	180	255	76	368	482
Fe (%)	10,29	13,28	2,99	17,77	22,25
K (%)	0,03	0,06	0,03	0,11	0,15
Mg (%)	0,21	0,34	0,13	0,54	0,73
Mn (ppm)	1858	2800	942	4213	5626
Ni (ppm)	25	41	16	65	89
Pd (ppb)	5	22	17	48	73
Pt (ppb)	6	13	7	24	34
Sr (ppm)	17	28	11	45	62
Ti (%)	0,31	0,54	0,23	0,88	1,22
V (ppm)	484	733	249	1107	1480
Zn (ppm)	101	142	42	205	267

Tabela VI. Parâmetros estatísticos utilizados no diagrama *Boxplot* e para cálculo do valor de anomalia dos elementos nas análises das amostras de sedimentos ativos de drenagens na unidade básica Gramado. Total de 647 amostras.

Elemento (unidade)	1º Quartil	3º Quartil	IQR	<i>Outlier</i> Alto	<i>Outlier</i> Anômalo
Ag (ppb)	1	28	27	69	109
Al (%)	1,07	2,2	1,14	3,9	5,61
Au (ppb)	< 1	2	2	6	9
As (ppm)	1	3	2	5	8
Ba (ppm)	125	267	142	480	694
Ca (%)	0,14	0,35	0,21	0,67	0,98
Co (ppm)	14	46	31	92	139
Cr (ppm)	7	39	32	86	133
Cu (ppm)	32	118	86	247	376
Fe (%)	3,84	8,74	4,9	16,08	23,42
K (%)	0,03	0,08	0,05	0,16	0,23
Mg (%)	0,09	0,23	0,15	0,45	0,67
Mn (ppm)	816	1691	875	3004	4316
Ni (ppm)	5	25	21	56	88
Pd (ppb)	1	13	12	31	49
Pt (ppb)	1	4	3	9	13
Sr (ppm)	14	46	32	93	141
Ti (%)	0,15	0,38	0,23	0,73	1,07
V (ppm)	107	424	317	900	1375
Zn (ppm)	54	94	43	161	225

ANEXO IV – MAPAS GEOQUÍMICOS DE ISOTEORES

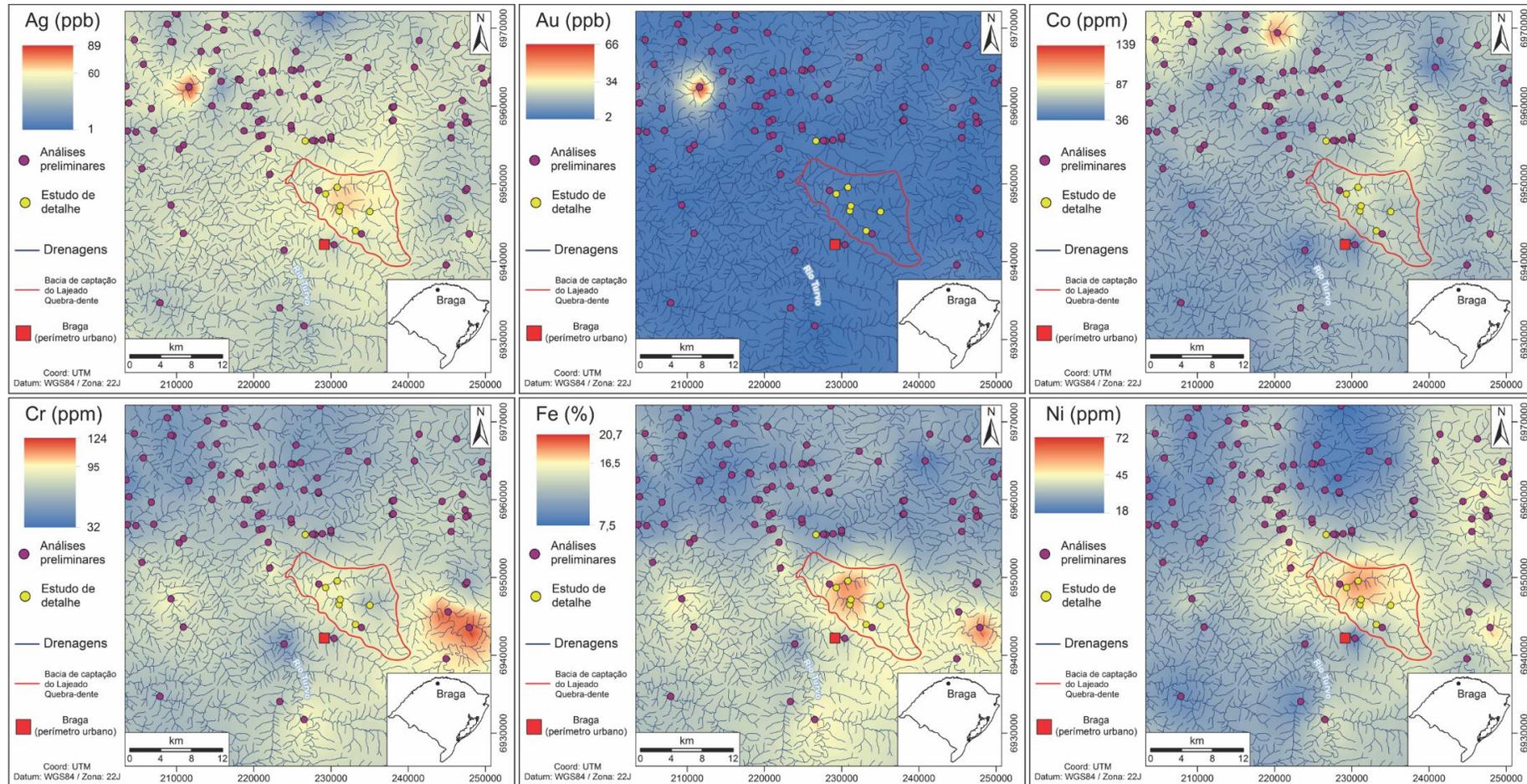


Figura III. Mapas geoquímicos de isotores de Ag (ppb), Au (ppb), Co (ppm), Cr (ppm), Fe (%) e Ni (ppm) na região de Braga, noroeste do Rio Grande do Sul. Em roxo, as amostras preliminares, e em amarelo as amostras do estudo de detalhe. Em destaque, a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.

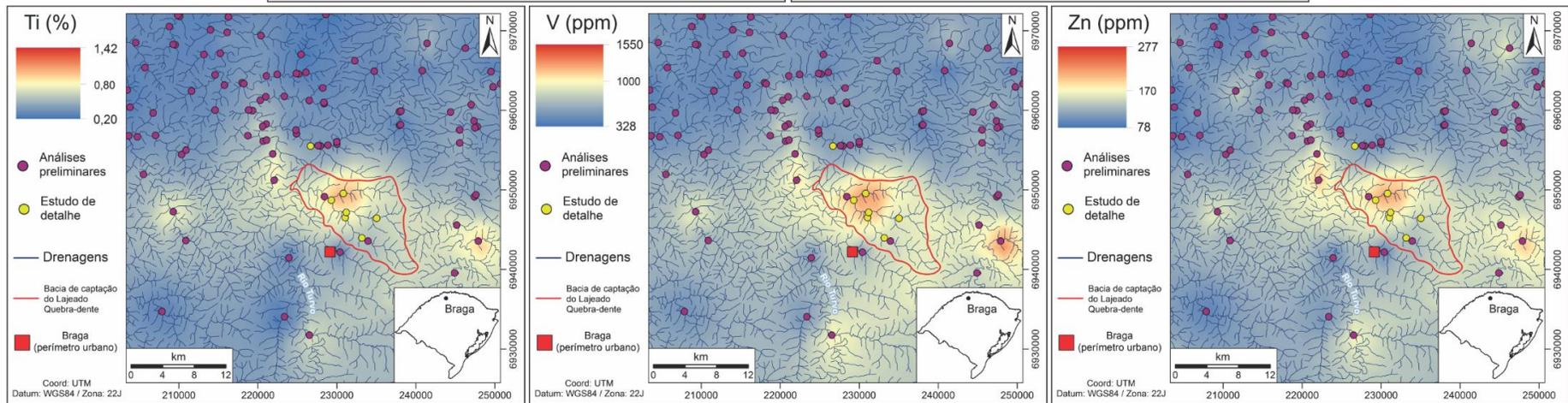
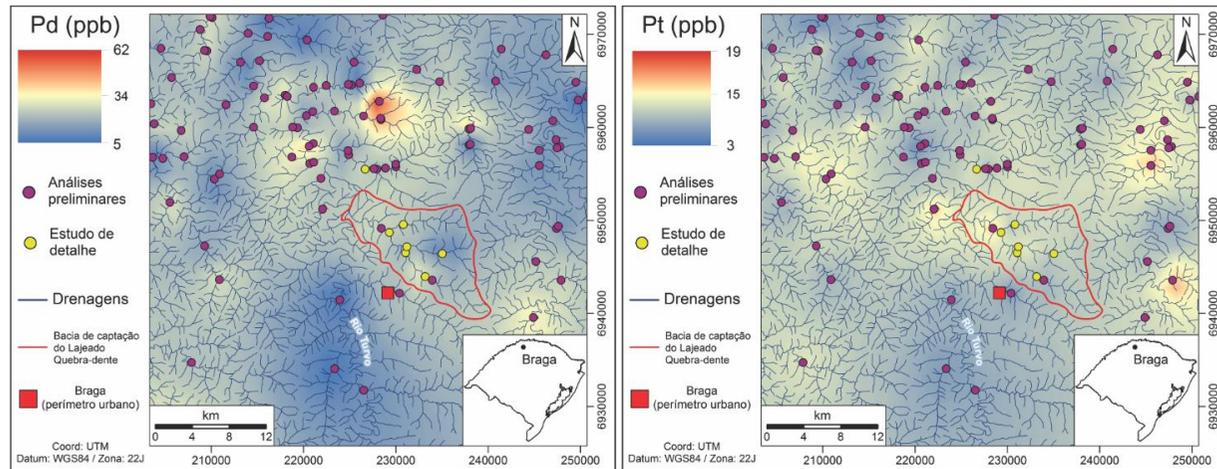


Figura III (cont.). Mapas geoquímicos de isotores de Pd (ppb), Pt (ppb), Ti (%), V (ppm) e Zn (ppm) na região de Braga, noroeste do Rio Grande do Sul. Em roxo, as amostras preliminares, e em amarelo as amostras do estudo de detalhe. Em destaque, a bacia de captação do Lajeado Quebra-Dente.

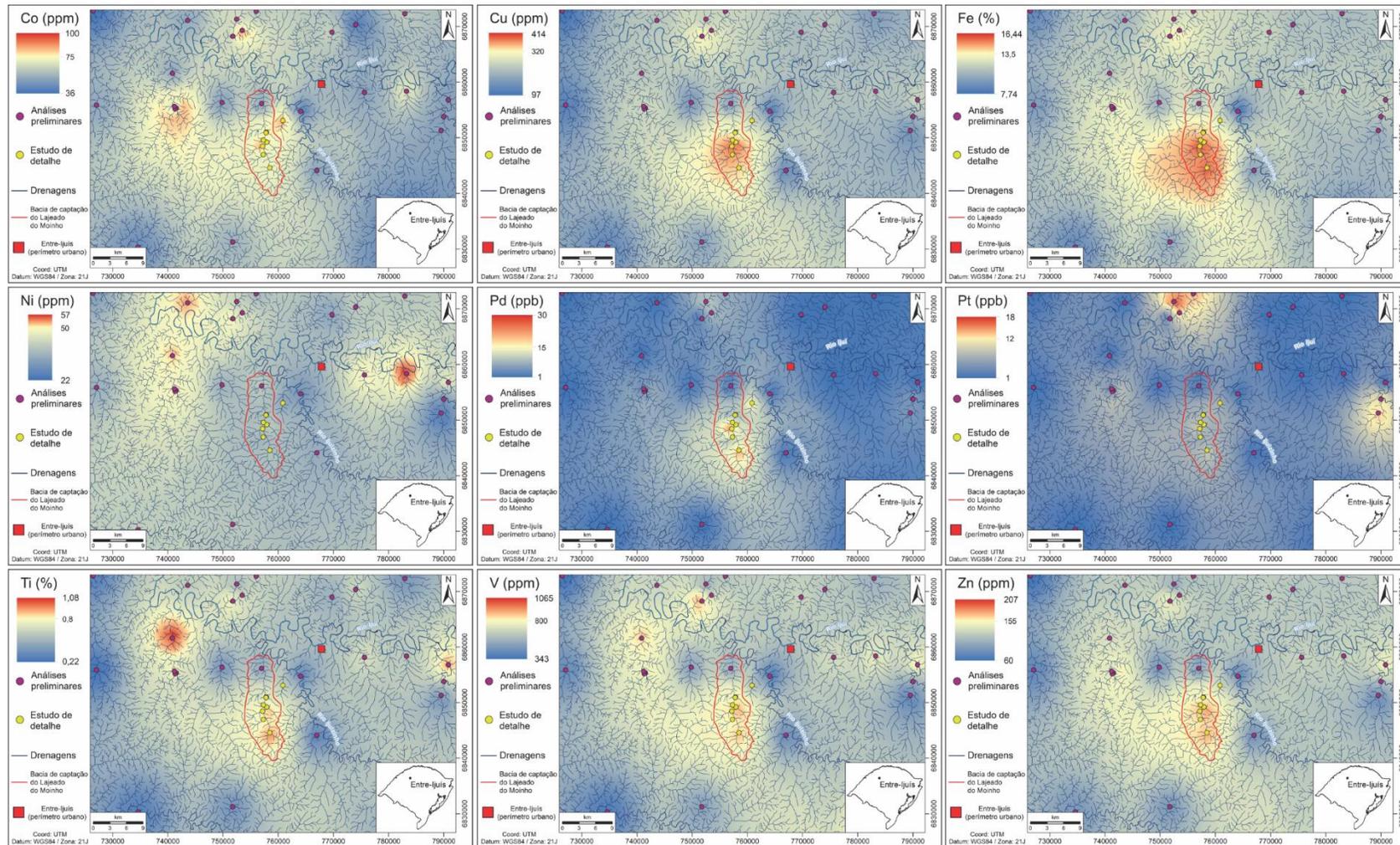


Figura IV. Mapas geoquímicos de isotores de Co (ppm), Cu (ppm), Fe (%) e Ni (ppm), Pd (ppb), Pt (ppb), Ti (%), V (ppm) e Zn (ppm) na região de Entre-Ijuís, noroeste do Rio Grande do Sul. Em roxo, as amostras preliminares, e em amarelo as amostras do estudo de detalhe. Em destaque, a bacia de captação do Lajeado do Moinho.