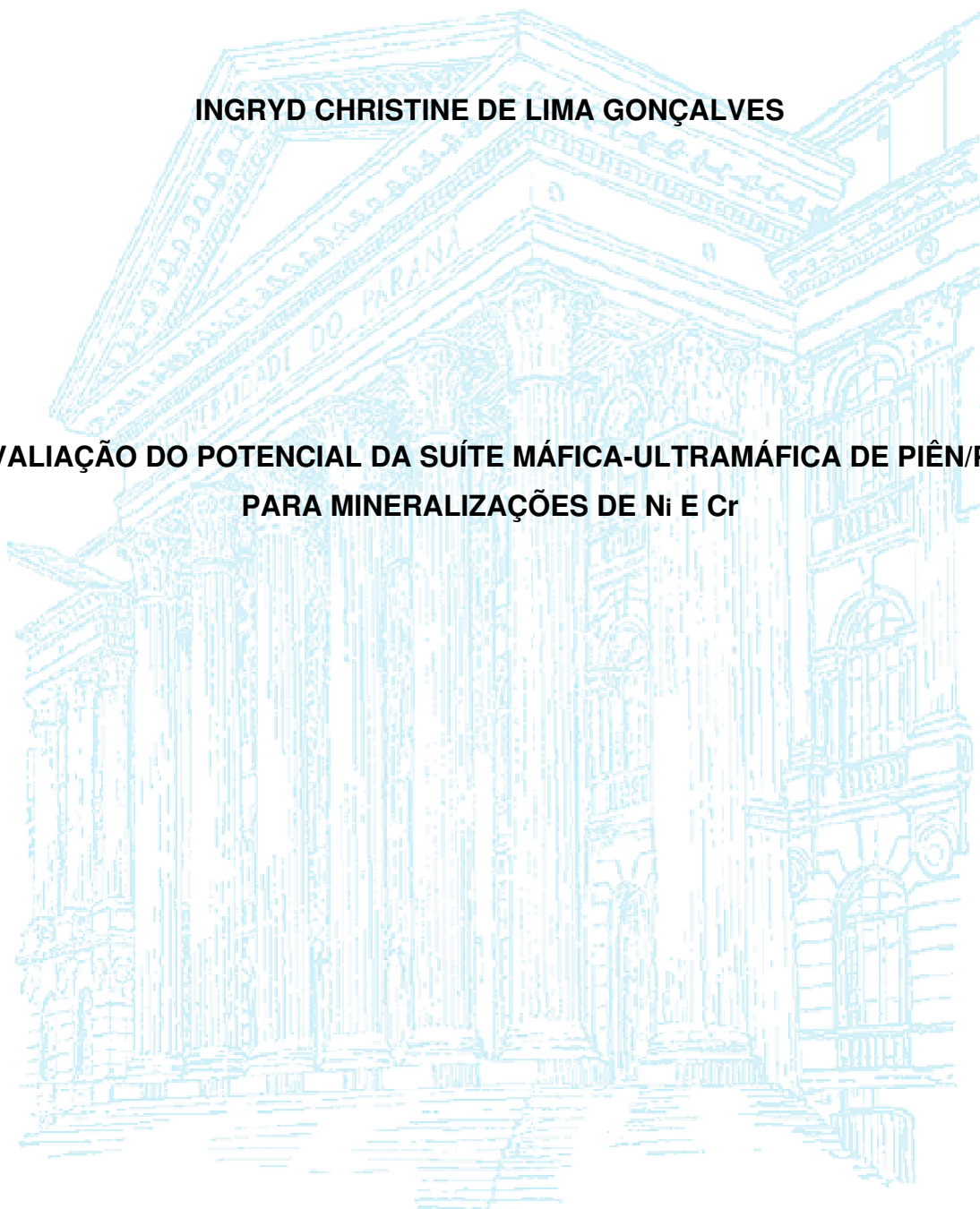


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIENCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

INGRYD CHRISTINE DE LIMA GONÇALVES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA SUÍTE MÁFICA-ULTRAMÁFICA DE PIÊN/PR
PARA MINERALIZAÇÕES DE Ni E Cr**



CURITIBA

2019

INGRYD CHRISTINE DE LIMA GONÇALVES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA SUÍTE MÁFICA-ULTRAMÁFICA DE PIÊN/PR
PARA MINERALIZAÇÕES DE Ni E Cr**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvea
Vasconcellos

Co-orientadores: Prof. Dr. Otavio Augusto Boni
Licht e Profa. Dra. Alessandra de Barros e Silva
Bongiolo

CURITIBA

2019

À Ana Clea Schmane (*In Memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, Marília e Roberto, por me criarem como sua filha, me incentivando sempre a sonhar alto e correr atrás dos meus objetivos.

Ao meu irmão Charles, suas palavras de incentivo no início da graduação foram essenciais e fortalecedoras para chegar nesse momento.

Ao meu primo Leonardo, por sempre acreditar no meu potencial. Ao meu primo Arthur, por me alegrar tanto durante esse ano com a sua simplicidade.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por ser a base da minha formação acadêmica e profissional.

À Universidade Federal do Paraná – UFPR, pela oportunidade de cursar a tão sonhada Geologia.

Aos meus professores orientadores, Eleonora e Otávio, pelo incentivo, compreensão, acompanhamento do trabalho, ensinamentos, discussões e conversas tão ricas e descontraídas sobre o tema. Além de serem geólogos inspiradores, são os melhores orientadores que poderia ter tido.

À professora Alessandra, por me auxiliar com o processamento de dados geofísicos e pela disposição em ajudar. Ao Henrique, pelas revisões e auxílio no tratamento de dados.

Ao meu geólogo preferido e namorado, Saulo Vila Lobus Strapasson, por me acompanhar durante a graduação, pelas discussões geológicas, auxílio, ensinamentos, apoio, incentivo, motivação, risadas, revisões, pelos finais de semana de concentração total nesta monografia e por sempre entrar junto comigo nas ideias mais malucas.

Ao geólogo Rodrigo Sansonowski, por todos os ensinamentos, puxões de orelha e correções durante os dois últimos anos da graduação. À geóloga Rafaela Tadra, por tanto aprendizado, principalmente por ser um exemplo de profissional prática e ágil. À Juliana Schneider, por me apoiar com tanta alegria e positividade.

Aos meus melhores amigos, Karina e Iago, por me ensinarem tanto sobre a vida e profissionalismo. A amizade de vocês foi fundamental para chegar neste momento.

Aos meus amigos e companheiros de mapeamento, por todas as risadas, almoços nas quintas e motivação para finalizar o curso.

RESUMO

A avaliação do potencial mineral de Ni e Cr em rochas ultramáficas pode ser feita por meio do uso e integração de dados geoquímicos e aerogeofísicos em *softwares* de geoprocessamento e estatísticos, alinhados com informações geológicas de uma dada região. Nesta perspectiva, foi analisado o potencial mineral destes elementos nos dois corpos de rochas ultramáficas da Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên - SMUP, Corpo Campina dos Crispins e Corpo Campina dos Maias, localizados no município de Piên/PR. Como trabalhos anteriores indicaram elevados teores para Ni e Cr em amostras de solo, tem-se como hipótese de trabalho que os corpos possuem potencial para essas mineralizações. Com isso, foram elaborados mapas de favorabilidade para Ni e Cr a partir da integração de dados estatísticos descritivos para os elementos citados, assim como de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm), mapas de distribuição dos elementos (Ni e Cr) e mapa de domínios gamaespectrométricos, correlacionando-os com as informações geológicas disponíveis e com o mapa de Índice Máfico (IM) gerado. Os teores anômalos de Cr nas amostras de solo são superiores a 7.670 ppm, enquanto para Ni os teores são maiores que 1.232 ppm e, situam-se predominantemente nos corpos da SMUP, mas também com valores elevados localizados sobre rochas gnáissicas do Terreno Luís Alves. As áreas com os menores valores nos canais de K, eTh e eU e os maiores valores do Índice Máfico correspondem aos dois corpos de rochas ultramáficas da SMUP. Para delimitar as áreas de favorabilidade foi utilizada uma classificação a partir dos parâmetros como os teores das variáveis (mediana, *outlier* e *outlier* extremo) em ppm, intervalo de percentis e domínios gamaespectrométricos. As áreas com maior favorabilidade para Cr e Ni estão localizadas na porção centro-sul do Corpo Campina dos Crispins e na região sudoeste da área de estudo, correspondendo ao Corpo Campina dos Maias, as quais compreendem também as porções de Índice Máfico muito alto.

Palavras chave: Tratamento estatístico; Dados Geoquímicos; Dados Aerogeofísicos.

ABSTRACT

The evaluation of the Ni and Cr mineral potential in ultramafic rocks can be made through the use and integration of geochemical and aerogeophysical data with geoprocessing and statistical software, aligned with geological information of a given region. In this perspective, we analyzed the mineral potential of these elements in the two mafic-ultramafic rock bodies of the Piên Mafic-Ultramafic Suite - SMUP, Campina Crispins and Campina dos Maias, located in Piên/PR. As previous work indicated high levels for Ni and Cr in soil samples, is assumed as hypothesis of this study that these bodies have potential for these mineralizations. Thereby, favorability maps for Ni and Cr were elaborated from the integration of descriptive statistical data for the mentioned elements, as well as K (%), eU (ppm) and eTh (ppm), element distribution maps (Ni and Cr) and gamma-spectrometric domains map, correlating them with the available geological information and the Mafic Index (IM) map that had been generated. The anomalous contents of Cr in soil samples are higher than 7670 ppm, while for Ni the contents are higher than 1232 ppm, being predominantly located in the SMUP bodies, but also with high values on Luís Alves Terrain gneissic rocks. The areas with the lowest values in the K, eTh and eU channels as well as the highest values of the Mafic Index correspond to the two ultramafic rock bodies of SMUP. To delimit the areas of favorability, a classification was determined from the parameters as the contents of the variables (median, outlier and extreme outlier) in ppm, percentile range, gamma-spectrometric domains and Mafic Index. The most favorable areas for Cr and Ni are located in the south-central portion of the Campina dos Crispins Body and in the southwest of the study area, corresponding to the Campina dos Maias Body, which also cover very high Mafic Index portions.

Keywords: Statistical Treatment; Geochemical Data; Aerogeophysical Data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo e vias de acesso. (Base de dados cartográficos MINEROPAR (2005)).	1
Figura 2: Mapa de terrenos tectono-metamórficos da porção sul paulista e leste paranaense, com destaque em vermelho para a área de estudo. Adaptado de Faleiros (2008).	3
Figura 3: Mapa geológico da Região do alto Rio Negro (PR-SC), com destaque para os corpos Campina dos Crispins (C.C.) e Campina dos Maias (C.M.) Fonte: Adaptado de Harara (2001) e Zanetti (2017).	5
Figura 4: Sequência ofiolítica completa de acordo com a definição da Conferência Penrose. Fonte: Queiroga <i>et al.</i> (2012).	8
Figura 5: Distribuição dos principais depósitos minerais em uma sequência ofiolítica. Fonte: Queiroga <i>et al.</i> (2012).	9
Figura 6: Variação média de K, U e Th para rochas ígneas de acordo com o teor de Si. Fonte: Dickson & Scott (1977).	13
Figura 7: Fluxograma das atividades desenvolvidas durante o trabalho.	13
Figura 8: Combinação RGB simplificada com 27 tonalidades. Fonte: Oliveira (2018).	17
Figura 9: A) Histograma Cr valores originais. B) Histograma Cr – $\log_{10}$.	20
Figura 10: A) Histograma Ni valores originais. B) Histograma Ni – $\log_{10}$.	21
Figura 11: A) <i>Boxplot</i> Cr valores originais. B) <i>Boxplot</i> Cr – $\log_{10}$.	22
Figura 12: A) <i>Boxplot</i> Ni dados originais. B) <i>Boxplot</i> Ni – $\log_{10}$.	23
Figura 13: Mapa de teores de Cr (ppm) de solo, Piên/PR, escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).	25
Figura 14: Mapa de teores de Ni (ppm) de solo, Piên/PR, escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).	26
Figura 15: A) Mapa de canal de K (%). B) Mapa de canal de eTh (ppm). C) Mapa de Canal de eU (ppm). D) Mapa Ternário (K-eTh-eU).	28
Figura 16: Mapa de domínios gamaespectrométricos da área de estudo.	30
Figura 17: A) Mapa de Amplitude de Sinal Analítico (ASA). B) Mapa de Índice Máfico	29
Figura 18: Mapa de favorabilidade para Cr, Piên/PR - Escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).	32
Figura 19: Mapa de favorabilidade para Ni, Piên/PR - Escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatística descritiva de Ni e Cr nas amostras de solo para teores originais.	19
Tabela 2: Estatística descritiva de Ni e Cr nas amostras de solo para teores na base logarítmica.....	19
Tabela 3: Valores corrigidos das concentrações negativas de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm).....	27
Tabela 4: Estatística básica dos canais K, eTh e eU.....	29
Tabela 5: Classificação de intervalos para cada radiolemento.....	29
Tabela 6: Classificação dos intervalos para áreas de favorabilidade para Cr.	31
Tabela 7: Classificação dos intervalos para áreas de favorabilidade para Ni.....	33

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Amplitude do Sinal Analítico	18
Equação 2: Índice Máfico	18

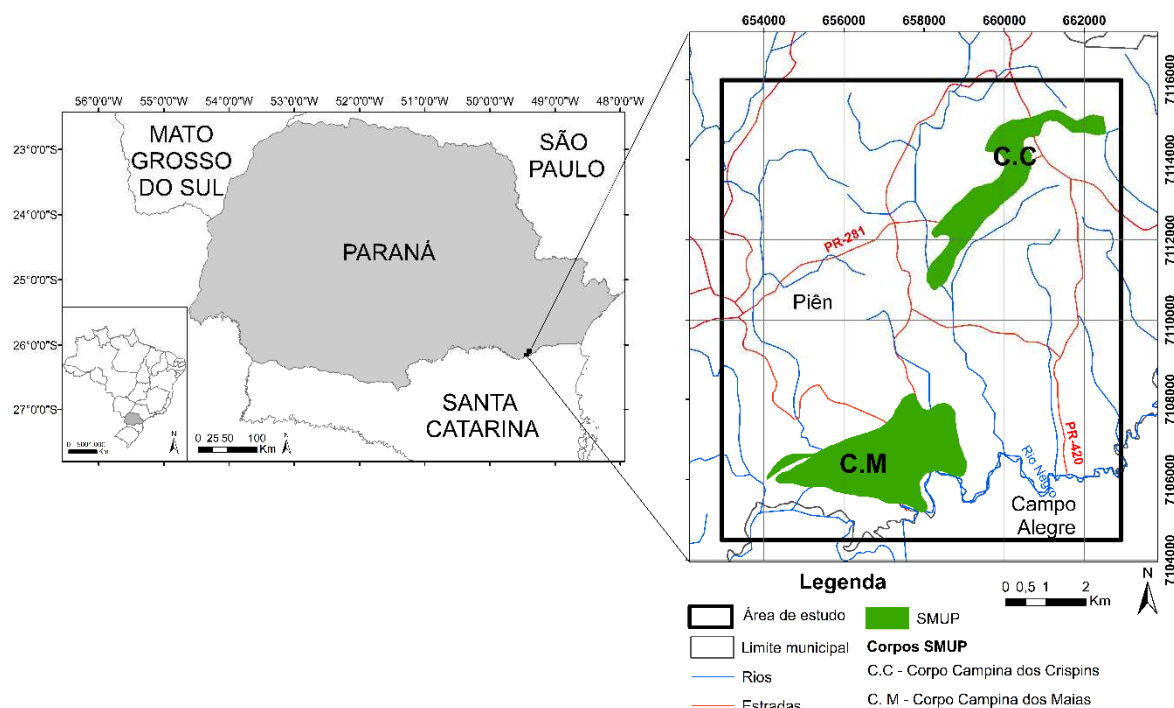
SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Contexto e problema.....	1
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	2
2	Fundamentação teórica.....	2
2.1	Geologia Regional.....	2
2.1.1	Geologia local	4
2.2	Ofiolitos	8
2.3	Avaliação de potencial mineral a partir de dados geoquímicos em rochas ultramáficas.....	10
2.4	Avaliação de potencial mineral a partir de dados aerogeofísicos em rochas ultramáficas.....	12
3	Materiais e métodos	13
3.1	Levantamento bibliográfico	14
3.2	Geoprocessamento.....	14
3.3	Banco de dados geoquímicos.....	15
3.3	Banco de dados aerogeofísicos.....	16
4	Resultados	18
4.1	Geoquímica.....	18
4.2	Geofísica.....	27
4.3	Integração de dados geoquímicos e geofísicos	30
5	Discussão.....	35
6	Conclusões.....	37
	Referências	39
	Anexo I: Tabelas de estatística descritiva de Zn, Co e Cu	42
	Anexo II: Histogramas de teores originais e em $\log_{10}$ de Zn, Co e Cu	43
	Anexo III: <i>Boxplots</i> de teores originais e em $\log_{10}$ de Zn, Co e Cu.....	44
	Anexo IV: Mapa de teores de Zn (ppm)	45
	Anexo V: Mapa de teores de Co (ppm)	46
	Anexo VI: Mapa de teores de Cu (ppm)	47

1 Introdução

A Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên (SMUP) abrange dois corpos de rochas ultramáficas no município de Piên, no estado do Paraná (Harara, 1996). É uma ocorrência de rochas ultramáficas importante para compreensão da evolução do Terreno Curitiba, conotando aspectos geológicos como petrologia, geologia estrutural, geotectônica e geocronologia.

Além disso, pelas características geológicas da SMUP é relevante o estudo do seu potencial mineral. Para isso, foi selecionada uma área de estudo de 114,54 km² que abrange os dois corpos de rochas ultramáficas, denominados por Harara (1996) como Corpo Campina dos Crispins a norte (C.C.) e Corpo Campina dos Maias a sul (C.M.), conforme a Figura 1.



1.1 Contexto e problema

O “Projeto Guaratubinha-Piên”, realizado pela CPRM em 1980, indicou elevados teores de Ni (níquel) e Cr (cromo) nas rochas ultramáficas da Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên, revelando potencialidade econômica para essas rochas no estado do Paraná. No entanto, a atividade mineira nesse local resume-se a minas

para a produção de brita para a construção civil, pois ainda não foram identificadas concentrações de minerais metálicos.

Assim, cabe o estudo de avaliação da potencialidade de minerais metálicos associados à ocorrência de rochas ultramáficas na região.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral do trabalho é a delimitação de áreas com o maior potencial para Ni e Cr nos dois corpos de rochas ultramáficas da Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên.

Os objetivos específicos consistem na elaboração de mapas de distribuição de elementos isolados e mapas geofísicos, a integração destes com o mapa geológico da região para avaliação do potencial exploratório dos corpos e confecção de mapas de favorabilidade de Ni e Cr.

2 Fundamentação teórica

Com o intuito de fundamentar o tema de estudo, abordam-se neste capítulo os principais conceitos e produções anteriores que subsidiaram a pesquisa. Dessa forma, são tratados a seguir a contextualização da geologia regional e local da área de estudo, conceituação de ofiolitos e aplicações do uso de dados geoquímicos e aerogeofísicos na avaliação do potencial mineral de rochas ultramáficas para mineralizações de Ni e Cr, assim como as características geoquímicas destes elementos.

2.1 Geologia Regional

A região de estudo está situada integralmente no contexto das rochas pertencentes ao Terreno Curitiba, que se localiza na região sul do Cinturão Ribeira, cinturão orogênico inserido na porção central da Província Mantiqueira (Figura 2).

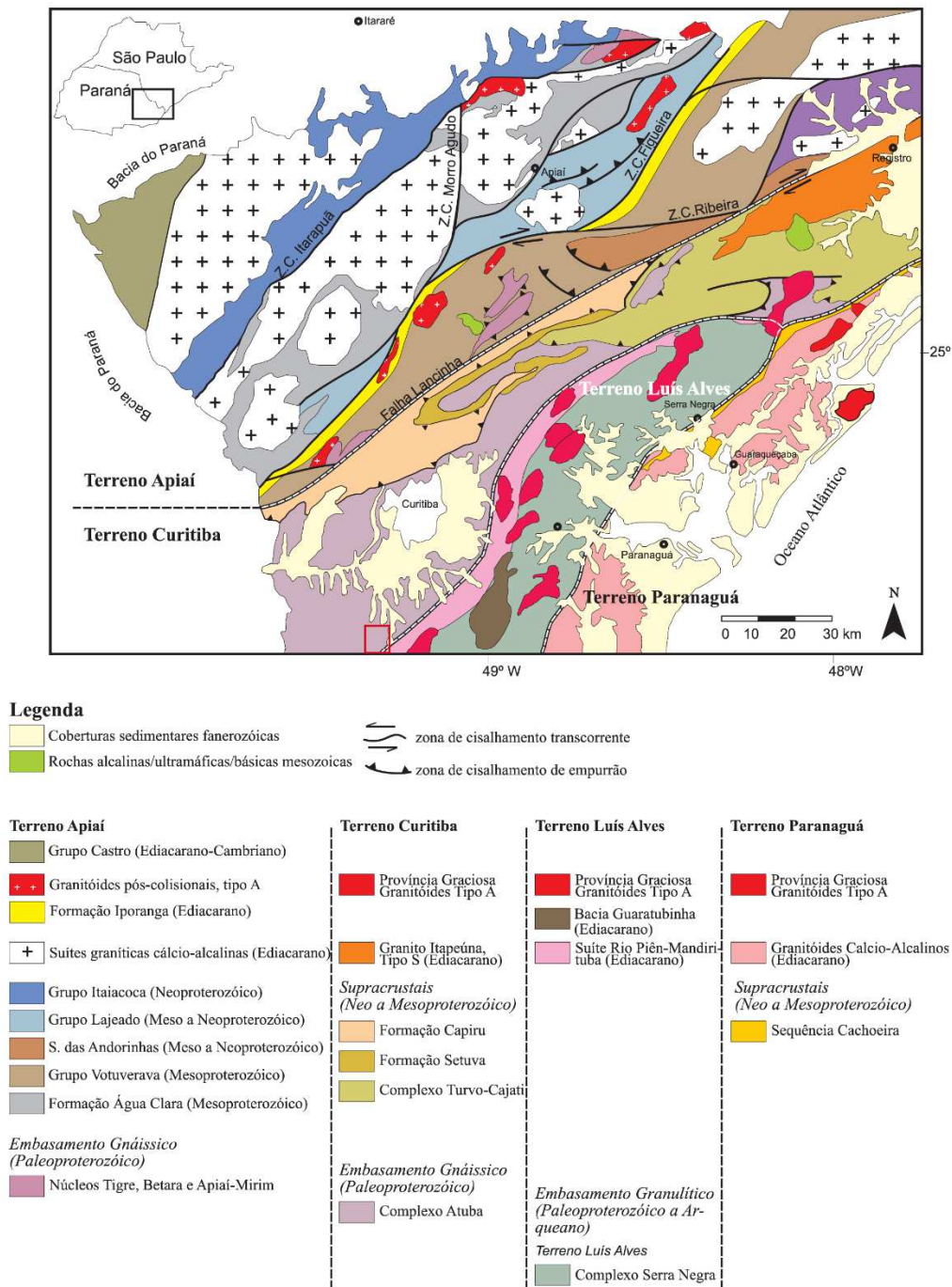


Figura 2: Mapa de terrenos tectono-metamórficos da porção sul paulista e leste paranaense, com destaque em vermelho para a área de estudo. Adaptado de Faleiros (2008).

Almeida *et al.* (1977, 1981) definem a Província Mantiqueira como uma unidade geotectônica da Plataforma Sul-Americana, constituindo-se numa faixa alongada de direção NNE-SSW, com mais de 3.000 km de comprimento e paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, desenvolvida durante o Ciclo Brasileiro. É composta pelos orógenos Araçuí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, limitada pela Província Tocantins, Cráton São Francisco, Bacia do Paraná e pelas bacias Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas (Heilbron *et al.*, 2004).

O Cinturão Ribeira é um compartimento tectônico da Província Mantiqueira localizado na sua porção meridional, também com geometria alongada e de direção NE. O desenvolvimento é relacionado à formação do continente Gondwana Ocidental durante a Orogenia Brasileira-Pan Africana (Basei *et al.*, 1992; Siga Jr. *et al.*, 1995; Heilbron *et al.*, 2004; Faleiros, 2008). É composto por unidades geológicas que possuem grande variedade litológica, estrutural, metamórfica, estratigráfica e isotópica, arrançadas na divisão de domínios ou terrenos tectono-estratigráficos delimitados por zonas de falhas de direção NE-SW: Terreno Apiaí, Terreno Curitiba, Terreno Luís Alves e Terreno Paranaguá (Faleiros, 2008).

O Terreno Curitiba é limitado a norte pela Zona de Cisalhamento da Lancinha, em contato com o Terreno Apiaí e a sul pelo Terreno Luís Alves demarcado pela Zona de Cisalhamento Piên-Mandirituba. Compreende ortognaisses, rochas supracrustais, granitoides deformados, rochas máficas-ultramáficas e metassedimentares divididas em quatro unidades litotectônicas principais: Complexo Atuba, Complexo Turvo-Cajati, Suíte Rio Piên e Sequências Capiru e Setuva (Faleiros, 2008).

2.1.1 Geologia local

Durante a execução do mapeamento da folha geológica de Piên no Projeto da Comissão da Carta Geológica do Paraná, Trein *et al.* (1969) reconheceram corpos de rochas ultramáficas em Piên. Ao estudar o mesmo conjunto de rochas, por meio da análise petrológica e geotectônica, Girardi (1974) as definiu como Complexo Básico-Ultrabásico de Piên. Harara (1996) o redefiniu como Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên – SMUP a partir de estudos petrológicos, metamórficos e estruturais.

A SMUP é constituída por dois corpos descontínuos, sinuosos e lenticulares de rochas ultramáficas, inseridos no contexto da unidade Suíte Rio Piên, localizados entre a Suíte Granítica Piên-Mandirituba a norte e ao Terreno Gnássico Anfibolito Granulítico do Paraná e Santa Catarina a sul, denominados por Harara (1996) de Corpo Campina dos Crispins (C.C.) e Corpo Campina dos Maias (C.M.). O contato entre a SMUP com as encaixantes é tectônico, por falhas de cavalgamento e transcorrências (Harara, 2001). O mapa geológico, adaptado de Harara (2001) e Zanetti (2017), está representado na Figura 3 com a indicação da área de estudo.

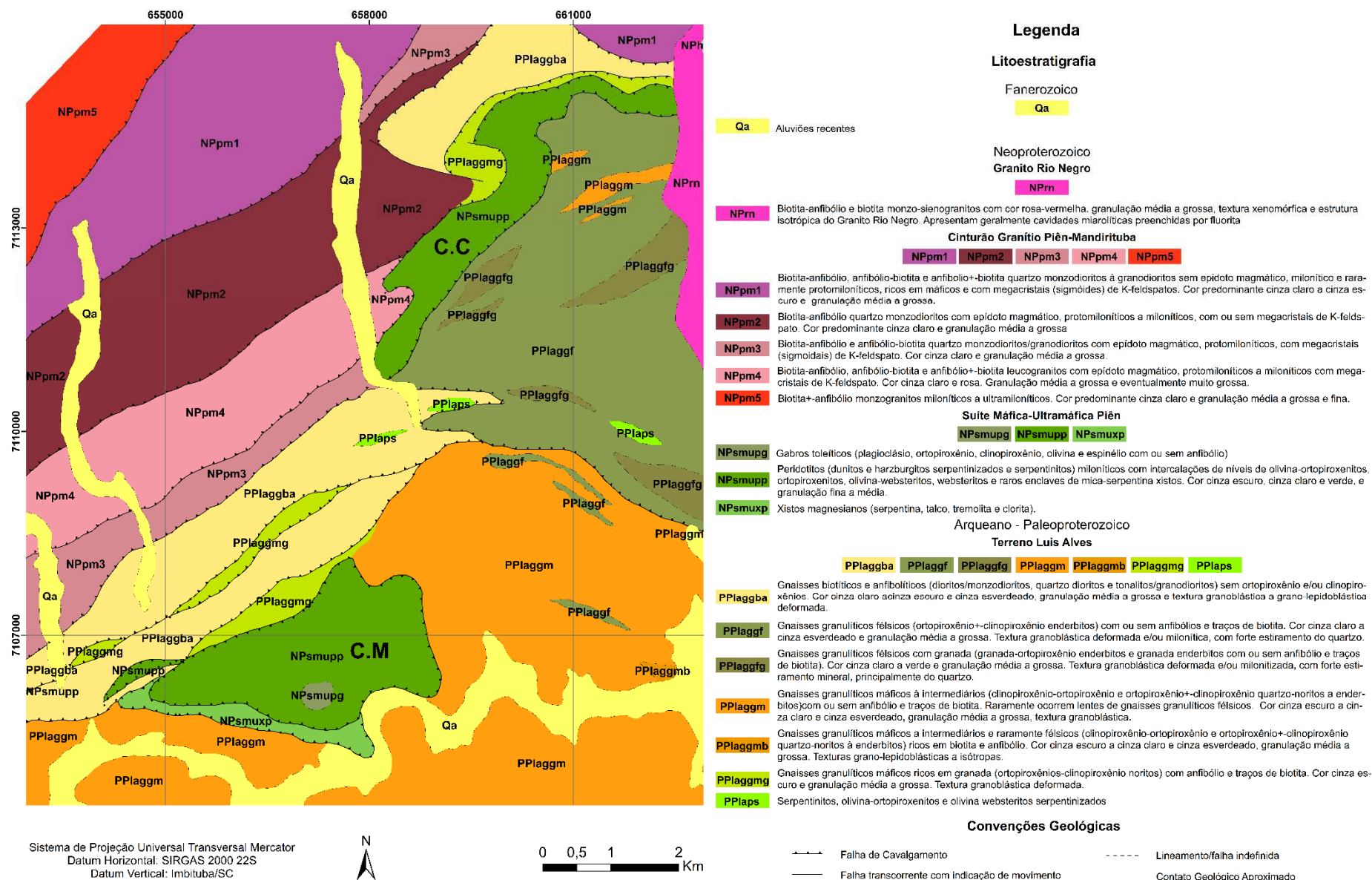


Figura 3: Mapa geológico da Região do alto Rio Negro (PR-SC), com destaque para os corpos Campina dos Crispins (C.C.) e Campina dos Maias (C.M.)
Fonte: Adaptado de Harara (2001) e Zanetti (2017).

Os litotipos das rochas ultramáficas de Piên descritos por Girardi (1974, 1976) são granulitos básicos e intermediários, metaperidotitos, metanoritos, metapiroxenitos, serpentinitos, xistos magnesianos, hornblenda metagabros, anfibolitos e gnaisses anfibolíticos. Harara (1996, 2001) descreve os peridotitos (dunitos, harzburgitos serpentinizados e serpentinitos) como as rochas predominantes, com menores proporções de piroxenitos, metaperidotitos serpentinizados, metapironexenitos, metagabronoritos, gabros e xistos magnesianos.

Petrograficamente, Girardi (1976) identificou nas rochas da SMUP minerais como ortopiroxênios + clinopiroxênios + plagioclásio $\pm$ olivina $\pm$ anfibólios $\pm$ talco $\pm$ clorita. Como minerais subordinados ocorrem, variando de acordo com o litotipo, quartzo, feldspato potássico, anfibólios, clorita, dolomita, epídoto, zircão, granada, opacos, espinélio, rutilo, turmalina, apatita, biotita, titanita e tremolita. Uma característica recorrente é a serpentinização como produto da alteração de olivina, orto e clinopiroxênios, e talco de alteração de piroxênios e clorita de anfibólios, mas pós-serpentinização. Com relação à textura das rochas, o autor descreveu metaperidotitos finos a médios granoblásticos, metapiroxenitos finos a médios granoblásticos, metanoritos finos a médios granoblásticos, xistos magnesianos porfiroblásticos a lepidoblásticos, hornblenda metagabros finos a médios granoblásticos, anfibolitos nematoblásticos e gnaisses anfibolíticos nematoblásticos com alternância de bandas milimétricas a decimétricas claras, constituídas por minerais félsicos, e escuras compostas por anfibólios, plagioclásio e clinopiroxênios.

Harara (1996, 2001), a partir da análise petrográfica, descreveu entre os peridotitos, os dunitos e harzburgitos serpentinizados finos, piroxenitos finos a muitos finos, olivinagabros e olivinagabronoritos maciços e granoblásticos e xistos magnesianos finos a muitos finos nematolepidoblásticos. O autor descreveu como minerais essenciais a olivina (forsterita) $\pm$ clinopiroxênio (diopsídio) $\pm$ ortopiroxênio (enstatita) $\pm$ plagioclásio $\pm$ anfibólio $\pm$ talco, e como acessórios espinélio, magnetita, opacos (cromita), clorita e carbonato. Harara (1996, 2001) também descreve a serpentinização como produto de alteração da olivina e piroxênio nessas rochas, além da ocorrência de talco, tremolita, carbonato e clorita como minerais de alteração pós serpentinização.

Segundo Girardi (1976) e Harara (2001), as rochas ultramáficas da SMUP definem uma sequência ofiolítica incompleta, pois há ocorrência somente da seção ultramáfica basal, não sendo encontrados os litotipos vulcânicos e sedimentos associados da seção crustal. A situação da SMUP é típica de ofiolitos paleoproterozoicos, neoproterozoicos e fanerozoicos (Moore, 2003).

Harara (2001) analisou litogeoquimicamente as rochas da SMUP, obtendo teores para os elementos Ni e Cr, que são o objeto de estudo deste trabalho. Assim, os resultados alcançados foram: peridotitos com resultados químicos empobrecidos em CaO (0,01-0,05%), Al₂O₃ (0,05-2%) e TiO₂ ($\leq$ 0,01%), Ni (1300-1900 ppm), Cr (2000-2900 ppm), Co (80-110 ppm) e perda ao fogo-LOI (10-15%); piroxenitos com resultados de CaO (1-4%), Al₂O₃ (3-8%) e TiO₂ (0,05-0,1%) relativamente mais enriquecidos que os peridotitos, Ni (1000-1700 ppm), Cr (2500-3500 ppm), Co (90-120 ppm) e LOI (1-6%); gabros toleíticos ainda mais enriquecidos em CaO (7,5-8,5%), Al₂O₃ (10-11%) e TiO₂ (0,3-0,4%) que os piroxenitos, Ni (700-800 ppm), Cr (2100-2500 ppm), Co (90-100 ppm) e LOI (1-6%). Essas informações auxiliaram o autor a interpretar e classificar os ofiolitos da SMUP do tipo SSZ, gerados num processo de curto período de tempo entre a formação, alojamento e deformação.

O resultado de 631 ± 17 Ma obtido pelo método SHRIMP (U-Pb em zircão) em gabro toleítico levou Harara *et al.* (2004), Harara (2001), Basei *et al.* (1992) e Siga Jr. (1995) a definirem as rochas ultramáficas de Piên como neoproterozoicas. Basei *et al.* (1992) indicam que a formação dessas rochas está associada ao fechamento de um oceano durante a colisão entre as rochas encaixantes da SMUP no Neoproterozoico, sendo as rochas ultramáficas um registro do pretérito assoalho oceânico.

Girardi (1976) e Harara (1996, 2001) citam a intensa deformação das rochas da SMUP, evidenciada pela presença de dobras, milonitização e minerais metamórficos. Os autores reconheceram uma foliação principal Sn bem desenvolvida, caracterizada pela orientação de olivina, serpentina, piroxênio e magnetita, com orientação preferencial N64E/50-70NW no corpo C.C e N66E/20NW no C.M. Com relação ao metamorfismo, Harara (1996, 2001) indica um intervalo da fácies xisto verde até o início da fácies anfibolito devido à intensa serpentinização da SMUP.

2.2 Ofiolitos

Moore (1986, 2003) define os ofiolitos como fragmentos, seções ou porções remanescentes de crosta oceânica e manto formados em centro de espalhamento e preservados no continente, principalmente em faixas orogênicas. Os ofiolitos são gerados durante eventos colisionais continentais ou oceânicos e/ou acrecionários (obducção), em que por meio de extensos falhamentos de empurrão são alojados no interior dos continentes ou nas margens destes. Os principais ambientes de produção dessa associação são dorsais mesoceânicas, bacias de arcos de ilha juvenis e bacias de antearco e retroarco (Queiroga *et al.*, 2012).

Na Conferência de Penrose de 1972 foi definida uma sequência pseudoestratigráfica para um complexo ofiolítico, a qual compreende uma associação variada de rochas ultramáficas, máficas e sedimentares (Queiroga *et al.* 2012). A figura 4 representa a seção ofiolítica completa, que compreende, da base para o topo: complexo ultramáfico composto por rochas residuais mantélicas, os harzburgitos, lherzolitos e dunitos; complexo máfico plutônico constituído por rochas gabroicas, geralmente associados a camadas cumuláticas máficas-ultramáficas; enxame de diques de composição toleítica, em contato direto com as rochas vulcânicas sobrejacentes; complexo vulcânico máfico constituído por basaltos na forma de *pillow lava*, podendo variar a espessura. A associação sedimentar é representada por rochas químicas oceânicas e/ou sedimentos detríticos pelágicos.



Figura 4: Sequência ofiolítica completa de acordo com a definição da Conferência Penrose. Fonte: Queiroga *et al.* (2012).

Uma forma de classificação dos ofiolitos é pelo ambiente de geração, que compreende dois tipos. Os ofiolitos de zonas de suprassubducção (ZZS) são formados em zonas de subducção sob uma dorsal, subducção de uma dorsal em zonas de ante-arco ou subducção na placa descendente, em que ocorre primeiramente a cristalização de clinopiroxênio, seguida pelo plagioclásio e, o manto de geração é do tipo residual harzburgítico. Os ofiolitos MORB são gerados em ambientes extensionais nas margens oceânicas, caracterizados pela cristalização inicial de plagioclásio num manto residual lherzolítico-harzburgítico (Pearce *et al.*, 1984; Pearce, 1991, 2003; Queiroga *et al.*, 2012).

Os ofiolitos possuem relevante importância econômica como fonte de Zn e Cu em sulfetos maciços, Au, elementos do grupo da platina - EGP, corpos podiformes de cromita, Co e Ni em lateritas e também de rochas e minerais industriais como serpentinito e amianto, como mostra a seção ofiolítica da figura 5. A concentração de minerais metálicos com potencial exploratório depende de características geoquímicas dos elementos presentes nos ofiolitos e das condições geológicas a que forem submetidos (Castroviejo, 2004).

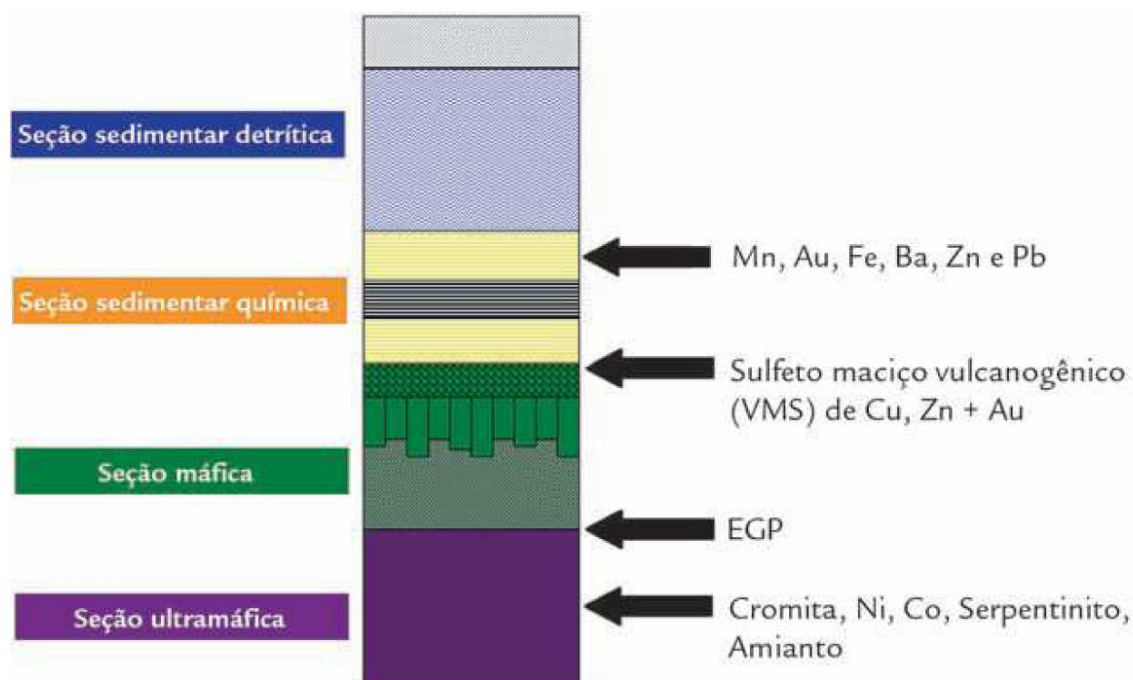


Figura 5: Distribuição dos principais depósitos minerais em uma sequência ofiolítica. Fonte: Queiroga *et al.* (2012).

Um tipo de depósito mineral importante em rochas ultramáficas associadas a ofiolitos são os depósitos de Cr, denominados de cromititos podiformes ou tipo Alpino.

Ocorrem normalmente na forma de *pods* e/ou lentes, consistindo em depósitos pequenos e com geometrias variadas. A formação dos cromititos podiformes inicia-se com a injeção de um magma líquido primitivo do tipo MORB através de uma rocha harzburgítica, permitindo a reação entre o líquido e o litotipo encaixante, dissolvendo o ortopiroxênio e cristalizando a olivina, e, conseqüentemente, gerando corpos duníticos no contato. A reação descrita provoca o aumento de sílica, fazendo com que o líquido entre no campo de precipitação da cromita, cristalizando-a. Nesse tipo de mineralização o Cr é geralmente associado a EGP, Ni, Zn, Ti, Mn, Co, Fe Mg (Ridley, 2013; Biondi, 2015).

Os depósitos de Ni sulfetado são associados normalmente às rochas máficas-ultramáficas, formados pelos processos de imiscibilidade de líquidos, que consiste na separação dos líquidos silicático e sulfetado a partir de um magma originalmente homogêneo; cristalização fracionada a qual gera bandas ou camadas rítmicas ricas em sulfetos, podendo ser interrompida por injeções periódicas de magma, gerando um magma menos diferenciado; contaminação e assimilação crustal por fluidos sulfurosos a partir de rochas encaixantes sulfetadas, tornando o magma ultramáfico saturado em sulfetos e; magma *mixing* que compreende na mistura química, saturando o magma em sulfetos. Esses depósitos são normalmente associados com o Fe, S, O, Cr e Cu (Ridley, 2013; Biondi, 2015).

2.3 Avaliação de potencial mineral a partir de dados geoquímicos em rochas ultramáficas

Durante um trabalho de avaliação de potencial mineral de uma área, devem ser utilizadas ferramentas que auxiliem no direcionamento, tomada de decisão e aprofundamento do conhecimento geológico e exploratório. Uma das ferramentas bastante utilizadas é a aquisição, processamento e análise de dados geoquímicos provenientes de rochas, sedimentos ativos de drenagem, concentrados de bateia, águas de drenagem e de vegetais, pela facilidade, baixo custo e bons resultados envolvidos (Licht, 1998).

A partir desta premissa, a Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM realizou estudos de potencialidade econômica para minerais metálicos na Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên (Daitx & Carvalho 1980). O trabalho, intitulado

Projeto Guaratubinha-Piên, consistiu na prospecção geoquímica e geológica para avaliar a viabilidade econômica de mineralizações de Cu, Pb, Zn, Co, Mo e As nas bacias de Castro e Campo Alegre, e Cr, Ni, Co e Cu na SMUP. Nas áreas das duas bacias vulcano-sedimentares foi realizado o levantamento geoquímico baseado em amostras de sedimentos de corrente e nas áreas das rochas ultramáficas foram coletadas amostras de solo.

Para avaliar a potencialidade mineral das rochas da SMUP Daitx & Carvalho (1980) realizaram a análise estatística exploratória dos teores obtidos, determinação dos limites de teores e confecção de mapas de teores e isoteores dos elementos. Assim, os autores obtiveram como resultado nas rochas ultramáficas uma situação favorável principalmente para Cr, em seguida para Ni e Co e, por último Cu.

Ribeiro *et al.* (1979) também aplicaram os mesmos processamentos estatísticos e elaboraram mapas de teores para analisar amostras de solo para avaliar a ocorrência de sulfetos de Ni e Cu associados ao complexo básico-ultrabásico de Americano do Brasil, localizado em Goiás. O resultado deste trabalho foi a alta favorabilidade para Ni e Cu.

O níquel é um elemento metálico pesado do tipo siderófilo, ou seja, possui afinidade principal com o ferro, mas com tendências calcófilas, então com afinidade com o enxofre e, possui como características gerais ser duro, brilhante, maleável, dúctil, resistente à corrosão e com propriedades magnéticas. Os estados de oxidação do Ni variam entre +1, +2 e +3. A mobilidade do níquel varia de acordo com o ambiente ao qual está condicionado, é facilmente móvel em situações intempéricas, precipitando com óxidos de ferro e manganês, moderadamente em ambiente ácido e oxidante e imóvel em ambiente redutor. O níquel ocorre formando os minerais pentlandita ((Fe, Ni)₉S₈), niquelita (NiAs) e garnierita ((Ni, Mg)₃Si₂O₅(OH)₄) e como traço em olivina ((Mg, Fe)₂SiO₄), piroxênio e anfibólios, geralmente relacionados com Mg, Co, Cu e Cr em rochas ultramáficas (Rose, Hawkes & Webb, 1979 e Licht, 1998).

O cromo é um elemento metálico do tipo siderófilo com grande variação nos estados de oxidação, de +2 a +6. É um metal quebradiço e resistente à corrosão, além de ser imóvel tanto em condições ácidas e básicas quanto em ambientes redutores e oxidantes. Associa-se com minerais máficos, formando cromita (FeCr₂O₄) e crocoita

(PbCrO_4) e como elemento traço em piroxênio, anfibólios e espinélios em rochas máficas e ultramáficas. O principal mineral de minério de Cr é a cromita. O teor médio de Cr em rochas ultramáficas é de 2.300 ppm e 250 ppm nos gabros (Rose, Hawkes & Webb, 1979; Koljonen, 1992; Licht, 1998).

2.4 Avaliação de potencial mineral a partir de dados aerogeofísicos em rochas ultramáficas

Outra ferramenta também utilizada na avaliação de potencial mineral de rochas ultramáficas são os levantamentos aerogeofísicos, devido às características magnéticas e gamaespectrométricas dessas rochas que evidenciam um contraste significativo em relação às demais.

Exemplo disso é o trabalho de Barbosa (2012), que utilizou dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, juntamente com relevo, solos e geologia, para caracterizar o Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, situado em Goiás. Essa unidade geológica é conhecida pela ocorrência de níquel, com isso o trabalho da referida autora aprofundou o conhecimento da região através da delimitação do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia e das rochas adjacentes. Para chegar a esse resultado, Barbosa (2012) gerou mapas de domínios gamaespectrométricos e de Índice Máfico (IM).

A gamaespectrometria consiste na medição da abundância relativa ou na concentração de K, U e Th em rochas e solos, por meio da detecção da radiação gama emitida naturalmente pelas desintegrações isotópicas desses elementos. Os elementos $^{40}\text{K}_{19}$, $^{238}\text{Bi}_{92}$ e $^{232}\text{Th}_{90}$ são os únicos que produzem naturalmente raios gama com energia e intensidade o suficiente que permitem a medição durante um levantamento gamaespectrométrico (Dickson & Scott, 1977).

O K corresponde a 2,35% da crosta continental da Terra, é um elemento alcalino e relativamente móvel em ambientes redutores e oxidantes, ocorrendo principalmente em rochas félsicas ricas em feldspato potássico e micas, que são raros ou ausentes em litotipos máficos e ultramáficos. O U compreende aproximadamente a 3 ppm da crosta e normalmente está presente em rochas compostas por uraninita, monazita e zircão. O Th corresponde a cerca de 12 ppm, pode estar na estrutura da allanita, monazita e zircão, típicos de rochas félsicas. O Th e o U são elementos

imóveis em condições redutoras e oxidantes. A figura 6 mostra a variação de K (%), e de U e Th (ppm) nas rochas ígneas (Dickson & Scott, 1977).

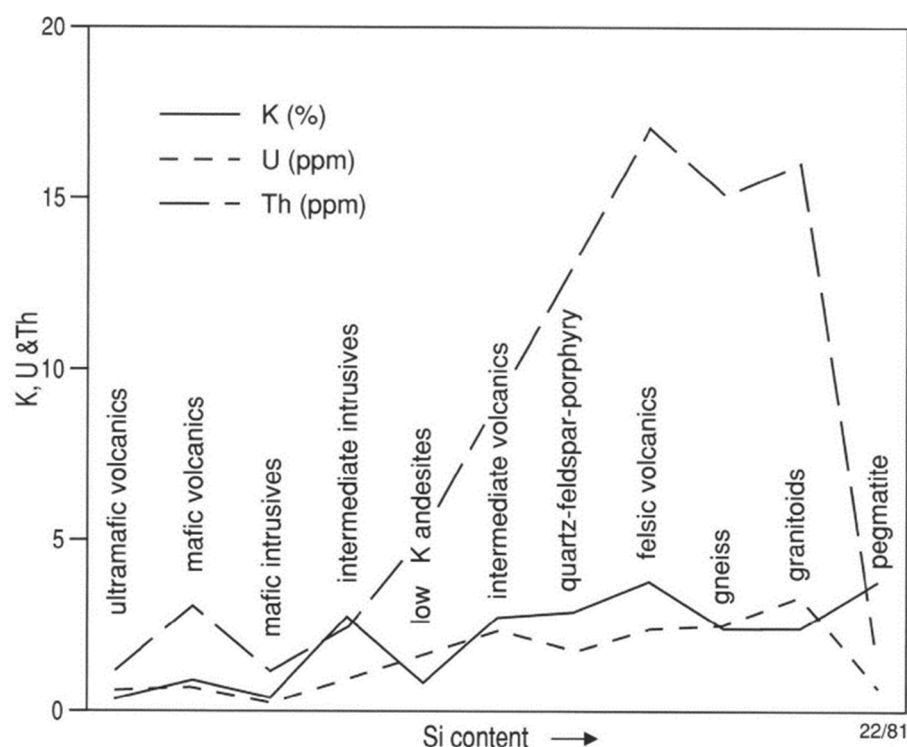


Figura 6: Variação média de K, U e Th para rochas ígneas de acordo com o teor de Si. Fonte: Dickson & Scott (1977).

A magnetometria é a medição da intensidade do campo magnético terrestre, o qual é definido pelo campo magnético principal oriundo do núcleo da Terra, campo externo da magnetosfera e pelo campo crustal (rochas e minerais). É relacionada à susceptibilidade magnética, a qual é uma propriedade física diretamente proporcional ao conteúdo de minerais ferromagnéticos das rochas e solos (Blakely, 1995).

3 Materiais e métodos

Para a realização do trabalho e com o intuito de alcançar os objetivos propostos utilizaram-se materiais e métodos, como mostra o fluxograma das atividades desenvolvidas na Figura 7.

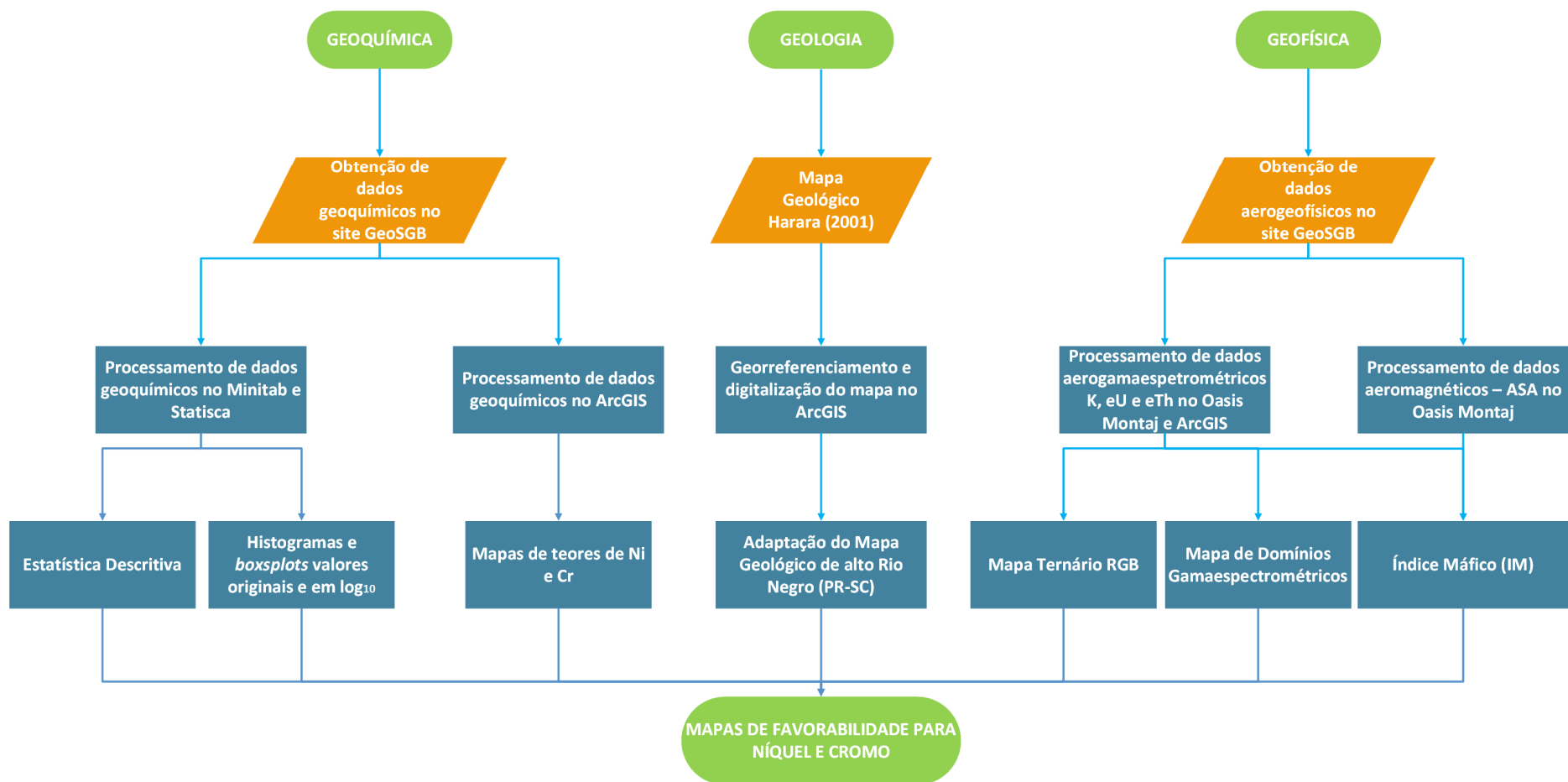


Figura 7: Fluxograma das atividades desenvolvidas durante o trabalho.

A execução do trabalho foi dividida nas seguintes etapas: 1) levantamento bibliográfico sobre o tema e dos materiais e métodos já utilizados no tratamento de dados geoquímicos e aerogeofísicos; 2) obtenção e processamento dos dados geológicos, geoquímicos e aerogeofísicos; 3) integração dos dados geológicos, geoquímicos e aerogeofísicos e análise dos mesmos. As etapas são descritas a seguir.

3.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi feito por meio da consulta de dissertações, teses, periódicos, artigos e livros disponibilizados nos acervos da biblioteca da Universidade Federal do Paraná e do meio virtual.

Os objetivos desta etapa foram o aprofundamento do conhecimento geológico da área de estudo e a compreensão dos processamentos geoquímicos e aerogeofísicos aplicados à avaliação de áreas com potencial mineral para concentrações metálicas em rochas ultramáficas.

3.2 Geoprocessamento

A etapa de geoprocessamento consistiu na integração e no tratamento dos dados geológicos, aerogeofísicos e geoquímicos em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) no *software* ESRI *ArcGIS* 10.6.1, no Datum SIRGAS 2000 Zona 22S. O banco de dados com as informações aerogeofísicas, geológicas e geoquímicas foram compiladas, integradas e tratadas neste *software*, além da elaboração final dos mapas apresentados no presente trabalho na escala 1:25.000.

A base geológica utilizada neste trabalho é o mapa geológico da região do alto Rio Negro (PR-SC) - Escala 1:70.000, de Harara (2001). O mapa geológico foi georreferenciado no *Datum* UTM SAD69 Zona 22S e reprojetoado para o sistema usado neste trabalho, UTM Sirgas 2000 Zona 22S. Além disso, foi digitalizada apenas a porção que compreende a área de estudo e gerado o mapa apresentado na figura 3.

No *software* Adobe *Illustrator* CC 2019 foi feita a edição final das figuras e dos mapas gerados, principalmente para ajustes de *layouts* e qualidade de resolução.

3.3 Banco de dados geoquímicos

Os dados geoquímicos usados são provenientes do Projeto Guaratubinha-Piên (Daitx & Carvalho, 1980), os quais compreendem análises químicas de amostras de solo sobreposto às rochas ultramáficas da SMUP. Neste projeto foram coletadas amostras majoritariamente do horizonte B, quando esse não era desenvolvido e exposto coletava-se do horizonte BC ou horizonte A, de litossolos e cambissolos. A malha de amostragem teve 3 densidades ou espaçamentos conforme a abordagem e os resultados anômalos prévios encontrados: a primeira, de caráter regional, consistiu em 250x400m, a segunda foi de 100x250m e a última foi feita na malha 100x100m, após análise estatística indicar valores anômalos nas regiões Campina dos Crispins e Campina dos Maias. A malha de amostragem é regular e com orientação N45°E, a mesma direção dos corpos ultramáficos da SMUP.

Os dados geoquímicos foram obtidos com o emprego de técnicas analíticas de espectrometria óptica de emissão semi-quantitativa para 30 elementos e espectrometria de absorção atômica para determinação de Cu, Ni, Co e Cr. Para determinação de Cu, Ni e Co as amostras foram atacadas com ácido nítrico concentrado a quente e também com EDTA (sal dissódico do ácido diamino tetra-acético). Para a determinação do Cr as amostras foram atacadas com ácido fosfórico 85% a quente.

Os dados foram obtidos gratuitamente no site GeoSGB do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e tratados nos *softwares Excel, Minitab v.17, Statisca 10 e ArcGIS*.

Os dados geoquímicos foram organizados em forma de tabela no *software Microsoft Office Excel 2016*, filtrando apenas as amostras que tiveram valores detectados maiores que o limite inferior de detecção para cada elemento e que estão restritas aos limites da área. Assim, foram retidas as seguintes quantidades de valores para Ni (N=2118), Cr (N=1818), Cu (N=2074), Co (N=2007) e Zn (N=1314), sendo N o número de amostras resultante da seleção. Para todas as amostras foram calculados os valores logarítmicos ($\log_{10}$), para serem comparados com os teores originais em ppm. O processamento dos dados geoquímicos prosseguiu no *software ArcGIS*, classificando as amostras na tabela de atributos dos *shapefiles* de acordo

com os dados descritivos da geologia como unidade e litotipos associados conforme mapeados por Harara (2001).

No *software Minitab* v. 17, com a licença do período de avaliação, calculou-se a estatística descritiva básica dos elementos, com os parâmetros descritos por Licht (1998) e Andriotti (2010) para entender o comportamento geoquímico dos elementos do espaço amostral, que são o valor mínimo, 1º quartil (Q1 - 25%), mediana, média, 3º quartil (Q3 - 75%), valor máximo, variância e desvio padrão. Foram calculados também o intervalo interquartil - IQR ($Q3 - Q1$), *outlier* ($Q3 + 1,5 * IQR$) e *outlier* extremo [$Q3 + (3 * IQR)$]. Como forma de representação destes valores e para auxiliar na caracterização e análise dos valores anômalos, foram elaborados gráficos do tipo histograma e diagramas *boxplots* no mesmo *software* estatístico e também no *Statistica* 10, este também com licença no período de avaliação, para os teores originais e para os teores $\log_{10}$.

Para a confecção dos mapas de distribuição de elementos foram calculados no *Excel* 16 o valor mínimo, os percentis 5%, 25%, 40%, 50%, 65%, 75%, 85%, 90%, 91%, 93%, 95%, 97%, 98%, 99% e o valor máximo para cada elemento no seu espaço amostral, conforme metodologia sugerida por Licht (2001). No *software ArcGIS* as amostras foram classificadas por símbolos graduados e com escala de cores representando os intervalos de percentis acima citados.

3.3 Banco de dados aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos utilizados neste trabalho pertencem ao Projeto Paraná-Santa Catarina (2011) da CPRM, compreendendo um levantamento nas regiões sudeste do estado de São Paulo e leste de Paraná e Santa Catarina. Consiste em perfis aeromagnéticos (campo magnético total) e aerogamaespectrométricos (canais de K, eU e eTh) de alta resolução, com linhas de voo espaçadas a cada 500 m e de controle a cada 10 km, orientadas nas direções N-S e E-W, com altura de voo de 100 m sobre o terreno.

Os dados aerogeofísicos foram adquiridos no site GeoSGB da CPRM e processados nos *softwares Oasis montaj* 9.3 da *Geosoft* e *ArcGIS*. Primeiramente foram recortados apenas os dados aerogamaespectrométricos contidos na área de estudo e corrigidos os valores negativos de K, equivalente de Th (eTh) e equivalente

de U (eU), sendo adicionadas constantes que resultassem em valores mínimos iguais a 0,01 (Ulbrich *et al.*, 2009). Após, foram produzidos mapas de canal de K em porcentagem (%), de eTh e eU em ppm e de composição ternária de K, eTh e eU, por meio da interpolação da curvatura mínima (Keckler, 1994).

Utilizando-se os dados aerogamaespectrométricos foi também gerado no *ArcGIS* e no *Oasis Montaj* um mapa de domínios gamaespectrométricos da área de estudo, conforme proposta de processamento de Oliveira (2018). Esta etapa consiste em classificar as concentrações de K, eTh e eU de acordo com a intensidade, por meio da análise estatística, em baixo (1) para valores menores que a mediana, médio (2) para valores entre a mediana mais duas vezes o desvio padrão e alto (3) para valores maiores que a mediana mais duas vezes o desvio padrão. A forma de apresentação dessa classificação é através do RGB (*Red, Green, Blue*) simplificado com 27 tonalidades de combinações, as quais representam os domínios gamaespectrométricos, como exemplificado na figura 8.

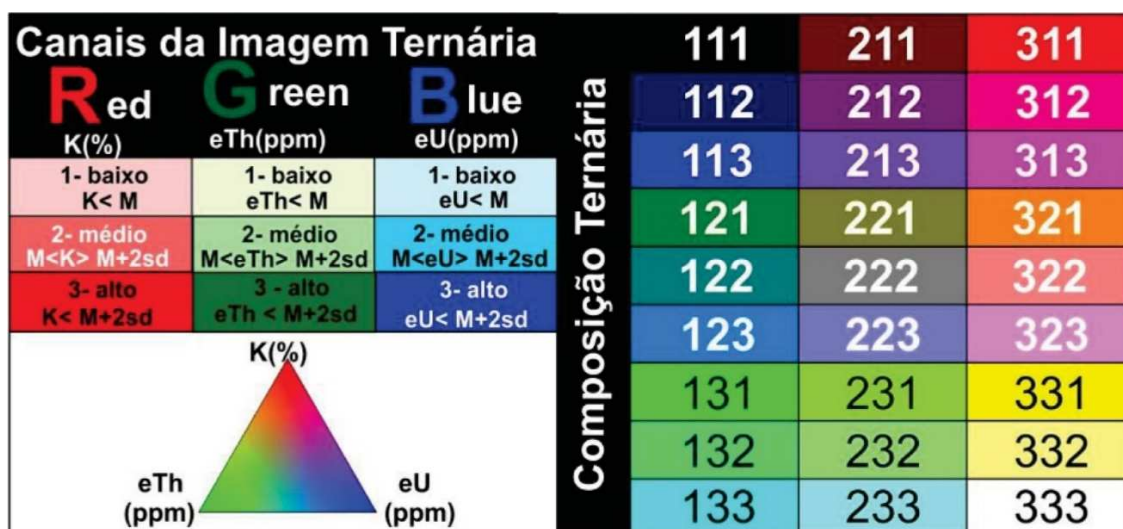


Figura 8: Combinação RGB simplificada com 27 tonalidades. Fonte: Oliveira (2018).

Nabighian (1972), Nabighian *et al.* (2005) e Roest *et al.* (1992) definem a Amplitude do Sinal Analítico (ASA) como uma função relacionada às variadas direções x, y e z do campo magnético, evidenciando o centro do corpo magnético em corpos estreitos e simétricos ou bordas em corpos extensos não simétricos. A ASA foi interpolada por meio do método bidirecional e utilizada para determinar o Índice Máfico (IM). É definida pela equação 1, resultando as variáveis dos gradientes horizontais (Dx e Dy) e verticais (Dz), num valor nT/m (nanoTesla por metro).

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

Pires & Moraes (2006) descrevem o Índice Máfico (IM) como uma técnica válida para delimitação de corpos máficos e ultramáficos, pois elimina a influência de materiais ricos em Fe presentes em solos lateríticos. O cálculo do IM é feito por meio da equação 2, sendo as variáveis ASA, K, eU e eTh.

$$IM = \frac{ASA}{(K * eU * eTh)} \quad (2)$$

4 Resultados

Com o objetivo de elaborar os mapas de favorabilidade para Ni e Cr nos corpos de rochas ultramáficas, os dados geoquímicos de solo e aerogeofísicos foram tratados conforme descrito no capítulo 3, sendo os resultados apresentados no decorrer do presente capítulo. Ao final, serão apresentados os produtos que atendem o objetivo principal deste trabalho, obtidos pela integração dos resultados obtidos do processamento dos dados geoquímicos e aerogeofísicos.

4.1 Geoquímica

Para iniciar os processamentos estatísticos, cartográficos e a análise interpretativa, as amostras de solo do Projeto Guaratubinha-Piên passaram por uma seleção, sendo mantidas apenas as amostras com teores detectados para Ni, Cr, Zn, Co e Cu nas amostras incluídas nos limites da área de estudo. Assim, o espaço amostral dos elementos reduziu-se para Ni (N=2118), Cr (N=1818), Zn (N=1314), Co (N=2007) e Cu (N=2074).

A avaliação dos parâmetros da estatística descritiva para os valores originais dos teores em ppm (partes por milhão) e também para os valores $\log_{10}$ (logarítmicos) foi realizada para todos os elementos supracitados. Os parâmetros considerados foram: valor mínimo, 1º quartil (25%), mediana, média aritmética, 3º quartil (75%), valor máximo, variância e desvio padrão. Serão apresentados neste capítulo apenas os estimadores estatísticos obtidos para Ni e Cr por serem estes o foco de estudo; os valores de Zn, Co e Cu encontram-se no anexo I.

A avaliação permitiu conhecer numericamente os dados geoquímicos, sendo observada uma variância considerável dos teores originais conforme a tabela 1, o que indica a existência de valores anômalos para Ni e Cr no espaço amostral considerado.

Tabela 1: Estatística descritiva de Ni e Cr nas amostras de solo para teores originais.

Variável	Unidade	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Variância	Desvio Padrão
Ni	(ppm)	1,0	16,0	60,0	395,6617	320,0	15000,0	817864,10	904,3584
Cr	(ppm)	5,0	110,0	440,0	1807,569	2000,0	40000,0	9442856,0	3072,923

Além da avaliação para os teores originais, estimou-se também para os valores após transformação logarítmica ($\log_{10}$). Com isso, ocorreu uma redução das variâncias, sugerindo uma normalização da curva que mostrava forte assimetria dos valores (Tabela 2). A assimetria dos valores em ppm e a normalização promovida pela transformação aos $\log_{10}$ podem ser observadas nas figuras 9 e 10.

Tabela 2: Estatística descritiva de Ni e Cr nas amostras de solo para teores na base logarítmica.

Variável	Unidade	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Variância	Desvio Padrão
Ni	(log ppm)	0,0000	1,2041	1,7782	1,8255	2,5051	4,1800	0,800	0,9005
Cr	(log ppm)	0,69897	2,0414	2,6435	2,682	3,301	4,6	1	0,76

No histograma dos teores originais de Cr (Figura 9-A), nota-se forte assimetria da curva de distribuição e uma tendência à polimodalidade, com indicação de 3 subpopulações. Isso se justifica por uma quantidade considerável de amostras com altos teores, acima do 3º quartil, desvio padrão elevado e a existência de uma amostra que determina um valor máximo de grande expressividade anômala. O histograma dos teores em $\log_{10}$ de Cr (Figura 9-B) mesmo com uma distribuição normalizada também sugere a existência de 3 subpopulações e confirma a variabilidade dos teores deste elemento.

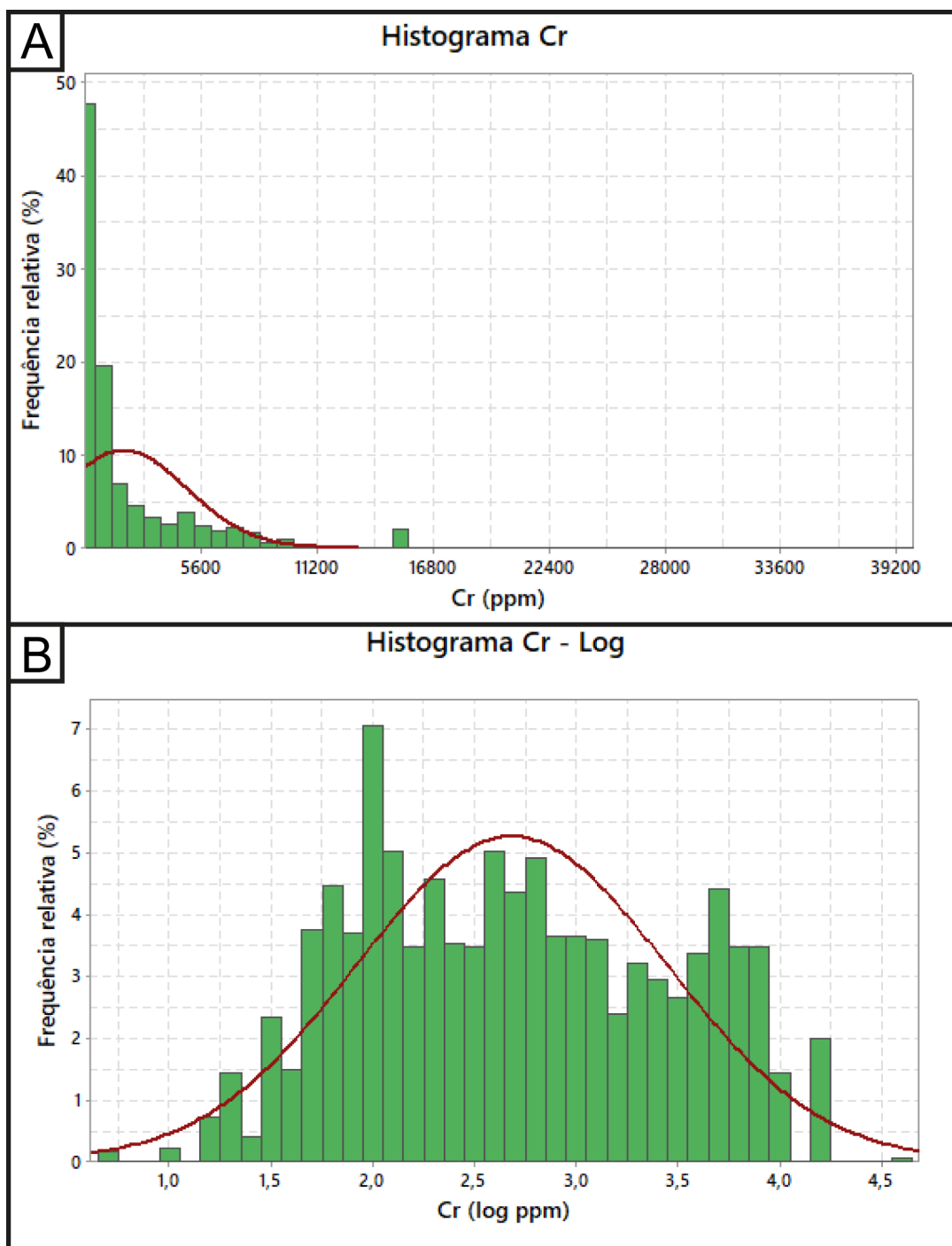


Figura 9: A) Histograma Cr valores originais. B) Histograma Cr – $\log_{10}$.

O histograma dos teores originais de Ni (Figura 10-A) mostra também uma forte assimetria da curva e tendência à polimodalidade, com indicação da existência de 4 subpopulações. Essas características podem ser justificadas pelos altos teores das amostras, acima do 3º quartil, mas em menor quantidade que o Cr. O histograma dos teores em $\log_{10}$ de Ni (Figura 10-B), com os valores normalizados, levou à normalização da curva de distribuição e que melhor evidencia a presença de 4 subpopulações.

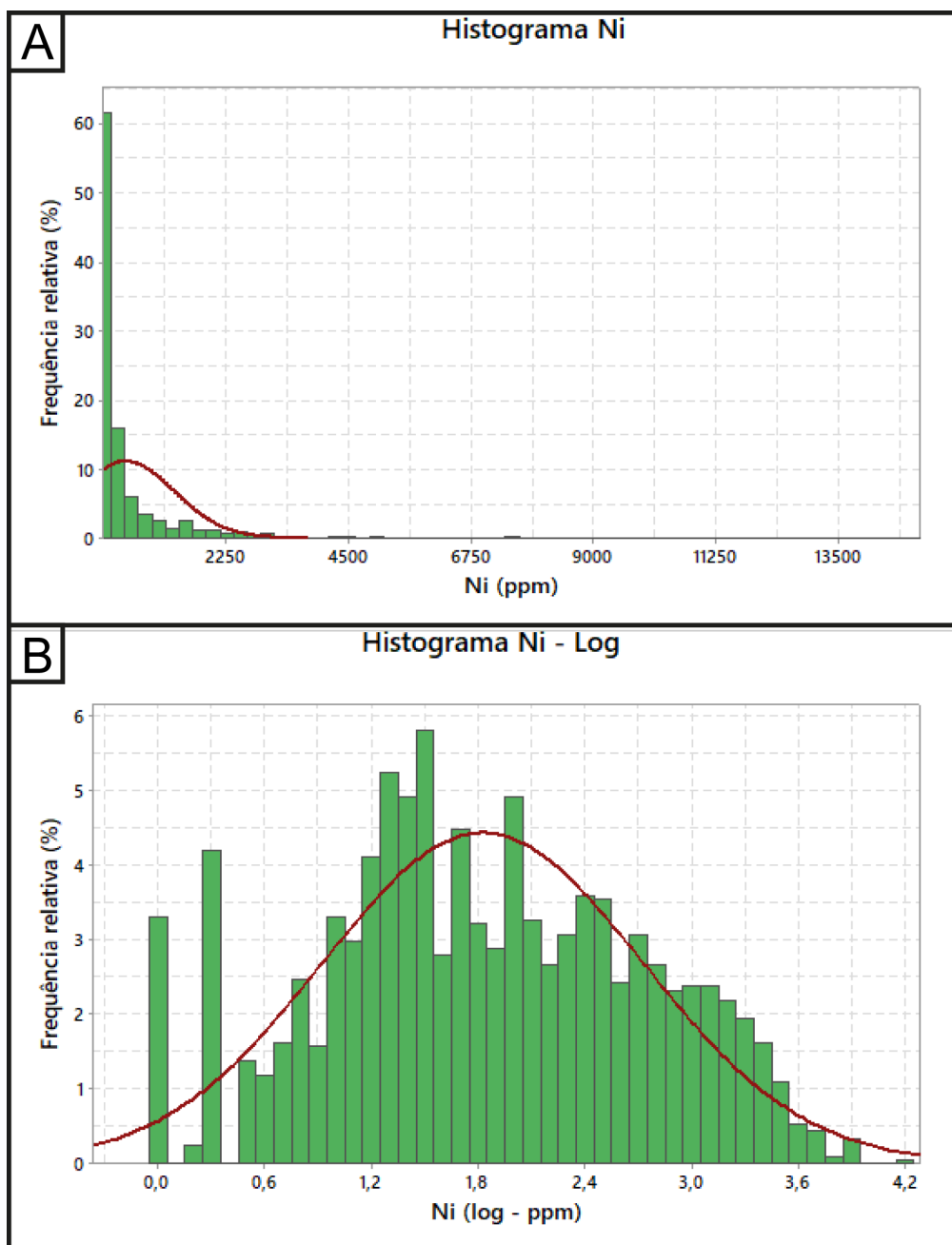


Figura 10: A) Histograma Ni valores originais. B) Histograma Ni – $\log_{10}$.

Para a determinação dos valores anômalos foram construídos diagramas de *boxplot*, que consiste numa técnica eficaz em um trabalho de avaliação de potencial mineral. Inicialmente foram utilizados os valores já calculados para 1º quartil, mediana e 3º quartil, adicionalmente calcularam-se os valores de IQR, *outlier* e *outlier* extremo, conforme determina Andriotti (2010).

O valor de *outlier* calculado para Cr foi de 4.835 ppm, enquanto o de *outlier* extremo foi de 7.670 ppm, esses valores caracterizam o espaço amostral e norteiam a respeito da quantidade de amostras com potencial para o elemento analisado.

Assim, é possível visualizar um grande número de amostras com teores acima do *outlier* e do *outlier* extremo na representação do *boxplot* na figura 11-A, corroborando o histograma (Figura 9-A). O *boxplot* dos dados transformados em $\log_{10}$ (Figura 11-B) normaliza a distribuição dos valores, mostrando a mesma resposta obtida com o histograma (Figura 9-B).

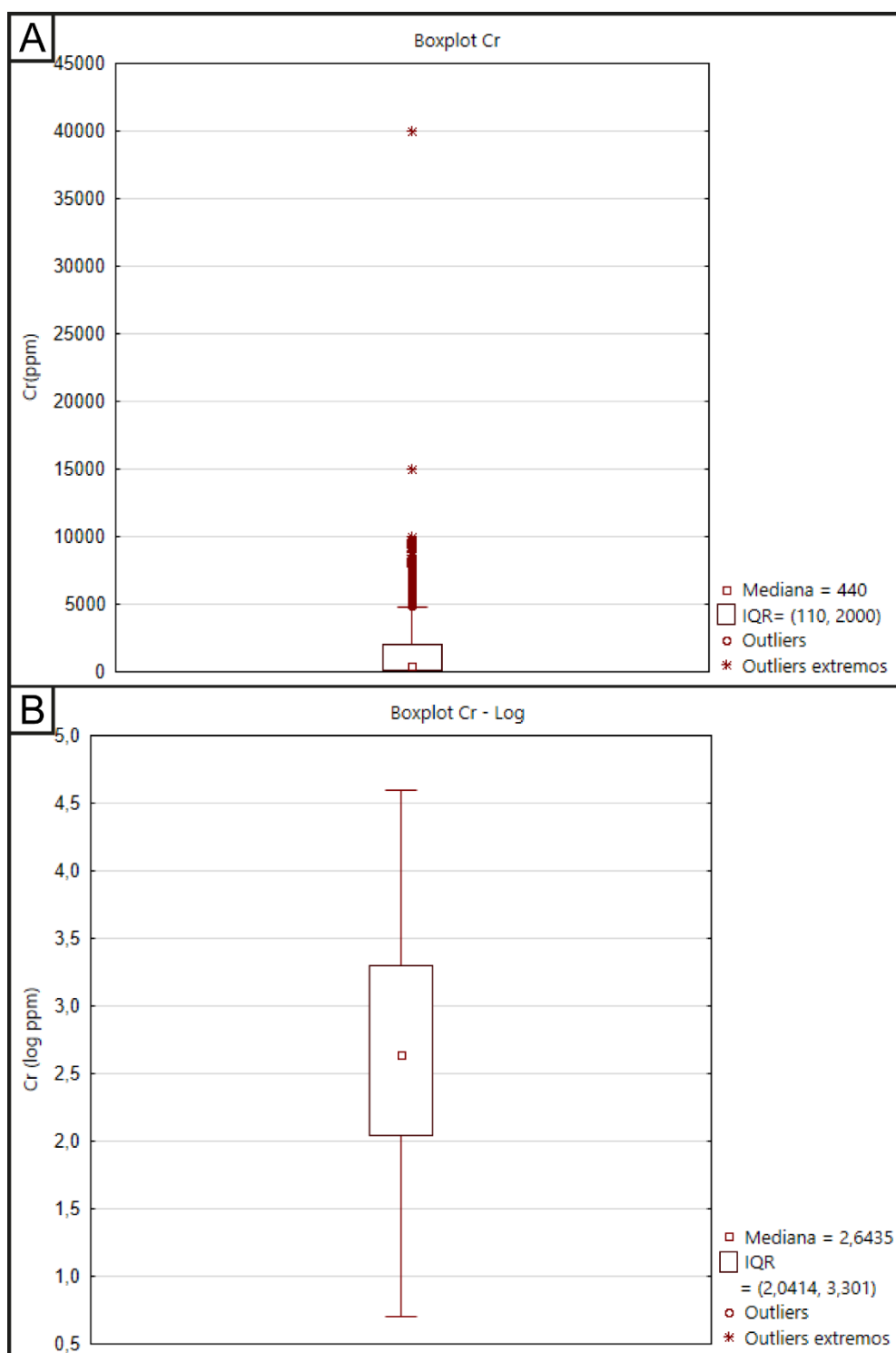


Figura 11: A) *Boxplot* Cr valores originais. B) *Boxplot* Cr – $\log_{10}$.

Ao tratar do Ni, o valor de *outlier* obtido foi de 776 ppm e para o *outlier* extremo foi de 1.232 ppm. No *boxplot* (Figura 12-A) observa-se um elevado número de amostras com valores acima do *outlier* e do *outlier* extremo. O *boxplot* da figura 12-B mostra os valores transformados em $\log_{10}$, mostrando a mesma configuração apresentada pela curva de distribuição da figura 10-B.

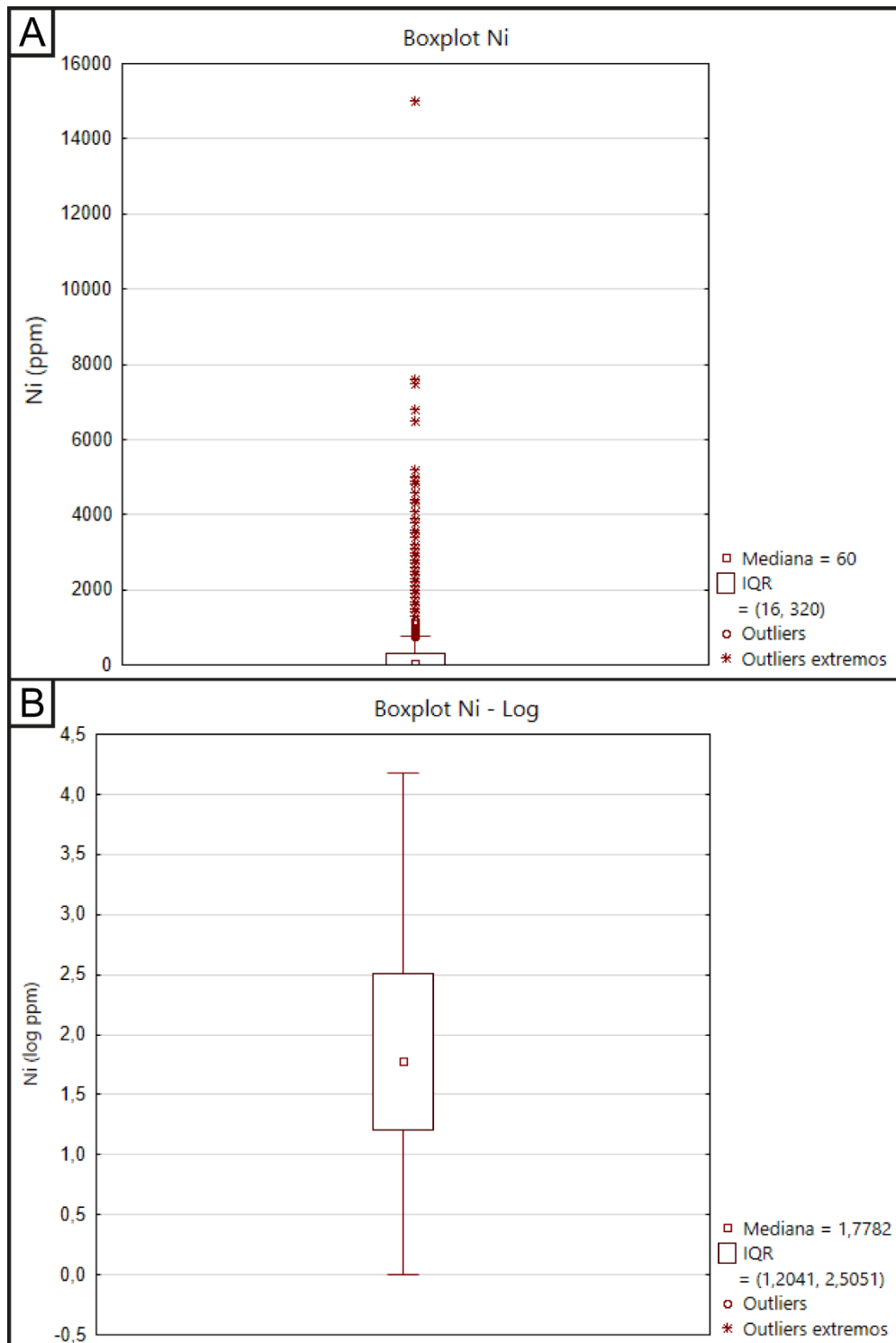


Figura 12: A) *Boxplot* Ni dados originais. B) *Boxplot* Ni – $\log_{10}$.

Os histogramas com os teores originais e em $\log_{10}$, assim como os diagramas boxplots, de Zn, Co e Cu elaborados encontram-se nos Anexos II e III.

Em seguida foi realizado o tratamento cartográfico dos dados geoquímicos, baseado nos resultados obtidos com as análises estatísticas. Para isso, no ambiente *ArcGIS*, pela tabela de atributos de cada *shapefile*, as amostras receberam as informações de unidade geológica, litotipos e sigla da unidade como definidas por Harara (2001). Com isso, foi possível identificar quais as amostras com teores elevados situam-se sobre os corpos de rochas ultramáficas delimitados pelo autor.

Finalizada essa etapa, utilizando as informações estatísticas como valor mínimo, valor máximo e mais 16 percentis selecionados, foram elaborados mapas de distribuição dos teores de Ni, Cr, Zn, Cu, Co, sendo que os dos três últimos encontram-se nos anexos IV, V e VI.

Pelo mapa de teores de Cr (Figura 13) nota-se a concentração das amostras (N=112) com os valores elevados entre o percentil 91 (6.101 ppm) ao valor máximo (40.000 ppm), sobre os dois corpos de rochas ultramáficas, estando a maior concentração situada no centro do Corpo Campina dos Maias e no centro-sul do Corpo Campina dos Crispins. Vale destacar a presença de uma quantidade considerável de amostras (N=51), do mesmo intervalo de percentis, na unidade de gnaisses granulíticos do Terreno Luís Alves, que está em contato com as rochas da SMUP.

O mapa de distribuição de teores das amostras de Ni (Figura 14) também foi confeccionado utilizando-se a classificação em 16 percentis. Observa-se um agrupamento de amostras (N=113) com teores elevados, entre o percentil 93 (1.601 ppm) até o valor máximo (15.000 ppm), também sobre os corpos das rochas ultramáficas da SMUP, com uma concentração na porção central do corpo C.M. No corpo C.C. é possível perceber a ocorrência de um maior número de amostras entre o percentil 97 (2.601 ppm) até valor máximo (15.000 ppm), indicando que aparentemente o potencial para Ni é maior neste corpo. À exemplo do que foi descrito para o Cr, há ocorrência de amostras (N=37) com teores acima do percentil 93 sobre a unidade de gnaisses félsicos do Terreno Luís Alves de Harara (2001).

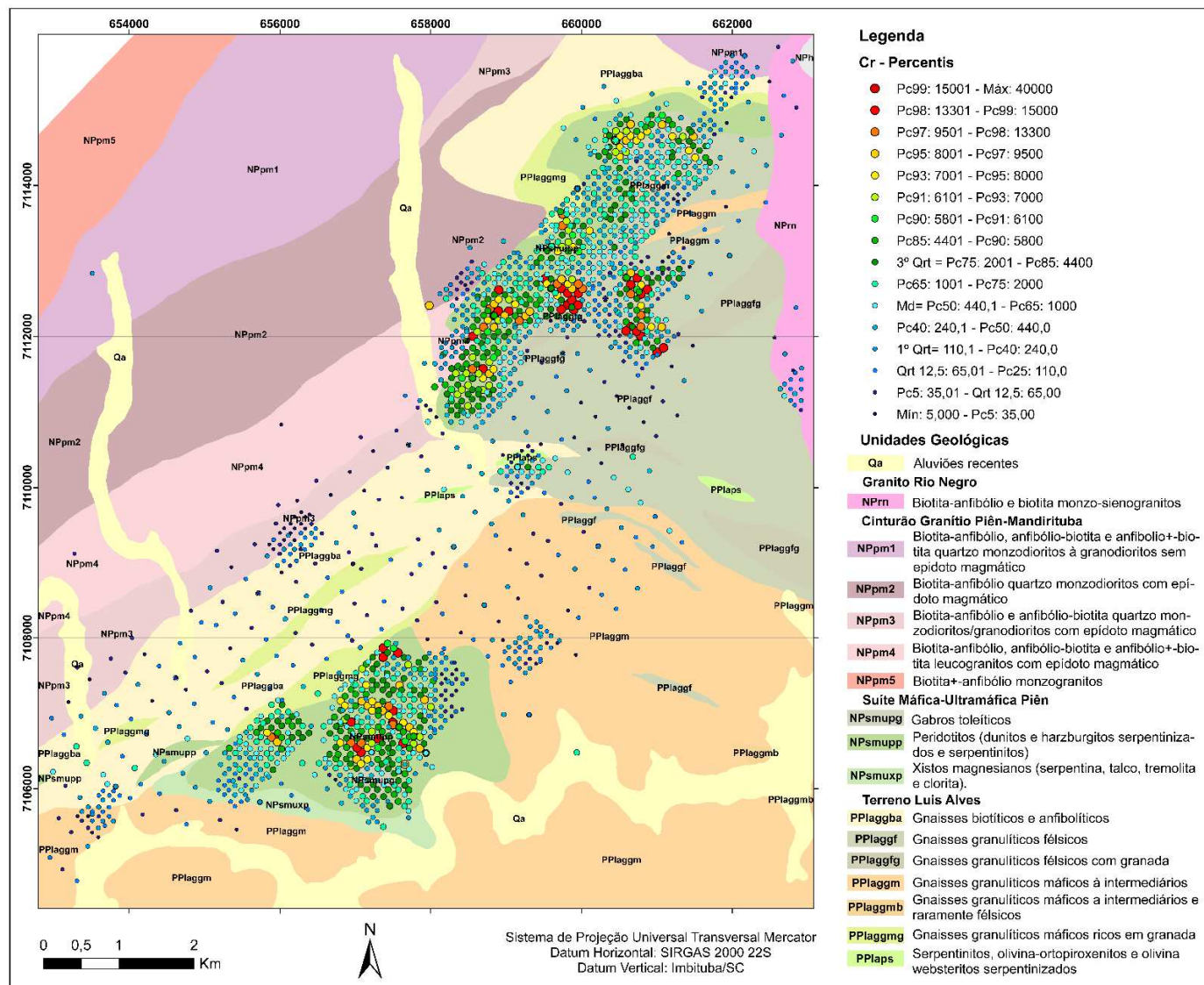


Figura 13: Mapa de teores de Cr (ppm) de solo, Piên/PR, escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).

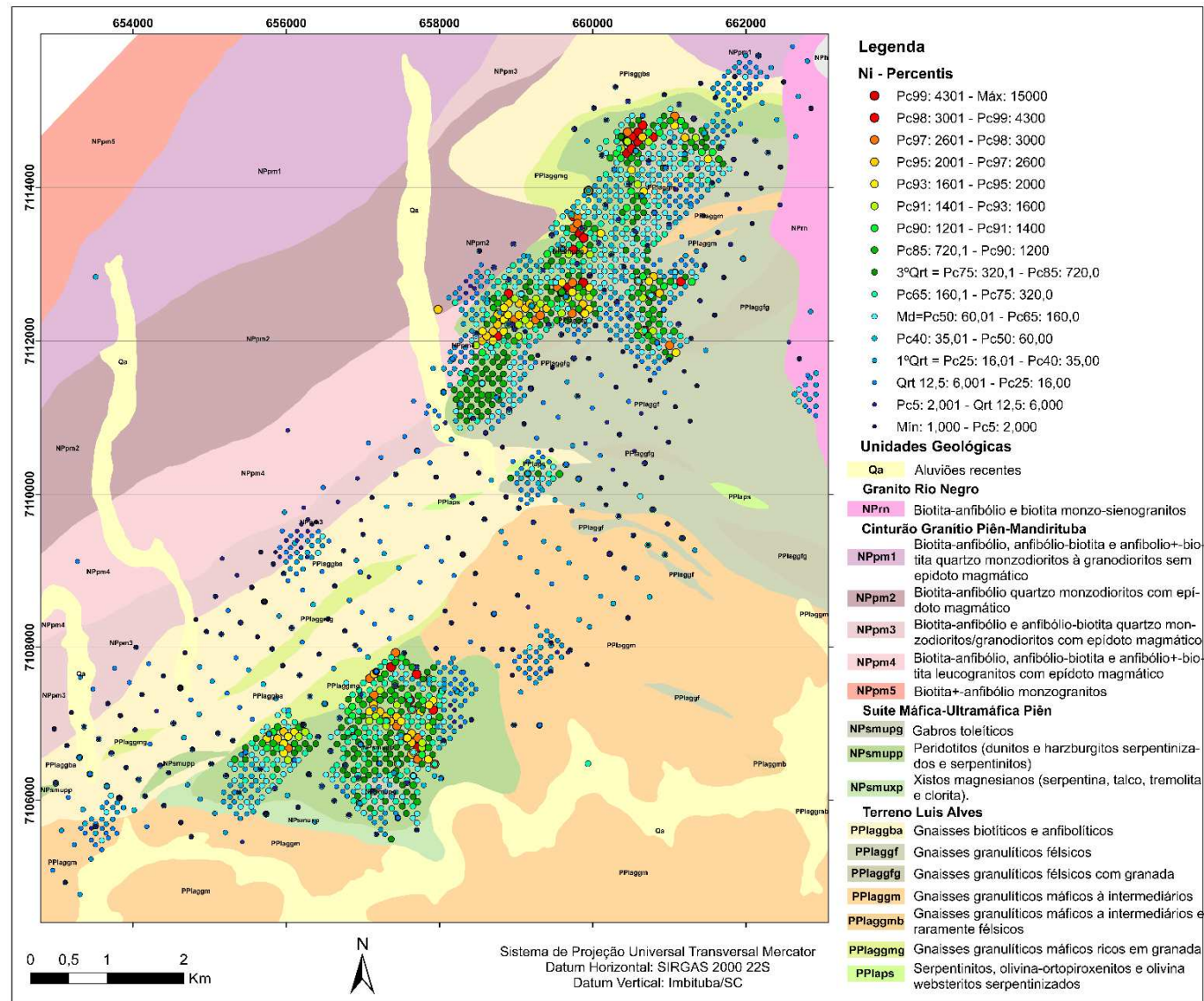


Figura 14: Mapa de teores de Ni (ppm) de solo, Piên/PR, escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).

4.2 Geofísica

Os dados aerogamaespectrométricos geralmente apresentam bons contrastes em áreas com ocorrências de rochas ultramáficas. Como os dados aerogamaespectrométricos obtidos possuem valores negativos para K e U, foram aplicadas as correções indicadas na tabela 3 para cada variável, a fim de deslocar a origem da escala de valores para o valor mínimo de 0,01.

Tabela 3: Valores corrigidos das concentrações negativas de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm).

Canal	Valor mínimo	Valor adicionado	Mínimo corrigido
K (%)	-0,1	0,11	0,01
eTh (ppm)	0,53	-0,52	0,01
eU (ppm)	-0,46	0,47	0,01

Feita a correção, foram gerados os mapas de canal de K, eTh e eU a partir da interpolação da curvatura mínima para suavizar a superfície com o valor interpolado o mais próximo possível do valor original, bem como um mapa de composição ternária dos 3 elementos por meio da escala de cor RGB.

A figura 15-A mostra o mapa de canal de K (%) para a área de estudo, no qual são observados valores muito baixos principalmente na porção nordeste da área e, secundariamente, na região sudoeste, regiões que correspondem aos corpos de rochas ultramáficas da SMUP, até extrapolando de certa forma o limite geológico mapeado para elas. Os valores altos de K (%) concentram-se na região noroeste, correspondendo às rochas do Cinturão Granítico Piên-Mandirituba.

A figura 15-B é o mapa de canal de eTh (ppm), que mostra valores muito baixos na porção centro-nordeste e centro-sudoeste, coincidindo com os dois corpos de rochas ultramáficas, evidenciando geometrias muito semelhantes às delimitadas por Harara (2001). As regiões dos valores altos de eTh situam-se na porção noroeste, coincidindo com os valores altos de K, e a sudeste, onde estão mapeados gnaisses.

O mapa do canal de eU (ppm) (Figura 15-C) não mostra contornos de valores baixos com geometria tão definida quanto os de eTh e K, mas ainda nota-se a ocorrência de baixos valores nas mesmas regiões de eTh e K, centro-nordeste e

centro-sudeste. Os valores altos de eU localizam-se na porção noroeste, mostrando uma anomalia positiva que corresponde aos granitoides mapeados por Harara (2001).

O mapa ternário da figura 15-D apresenta de forma clara o contraste geológico das rochas ultramáficas e gnaisses e granitoides circundantes. As duas manchas negras a sudoeste e a nordeste, que indicam a superposição de anomalias negativas de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm), correspondem aos dois corpos de rochas ultramáficas da SMUP, ultrapassando o limite geológico proposto por Harara (2001).

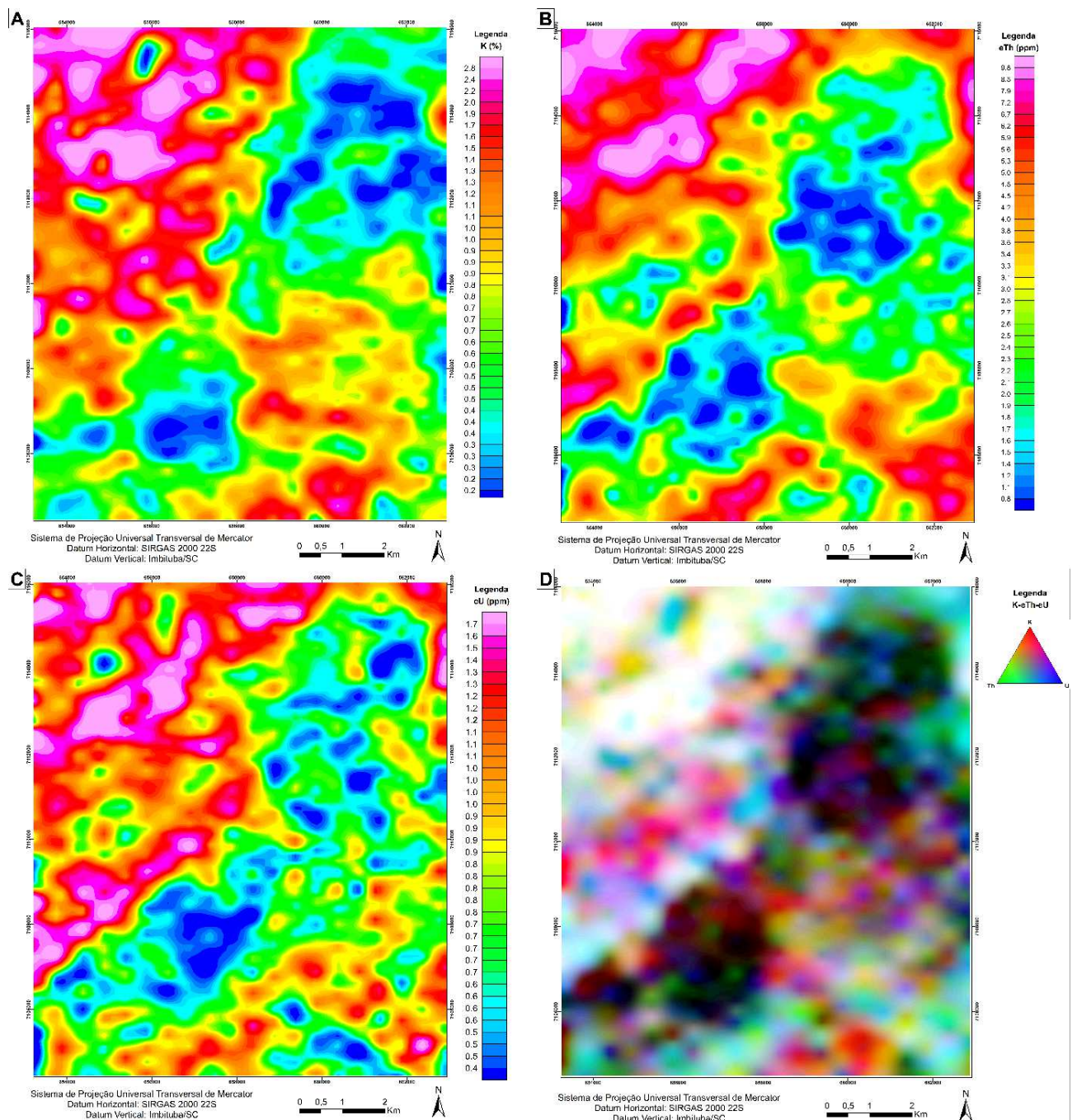


Figura 15: A) Mapa de canal de K (%). B) Mapa de canal de eTh (ppm). C) Mapa de Canal de eU (ppm). D) Mapa Ternário (K-eTh-eU).

Para construção do mapa de domínios gamaespectrométricos foram determinados os parâmetros estatísticos básicos dos canais de K, eTh e eU na área de estudo, os quais são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Estatística básica dos canais K, eTh e eU.

Canal	Mín	Mediana (*Md)	Máximo	Desvio (**Sd)	Md+(2x2d)	M+SD	M-SD
K (%)	0,01	1,01	4,19	0,73	3,93	1,74	0,28
eTh (ppm)	0,01	3,75	12,79	2,45	13,55	6,2	1,3
eU (ppm)	0,01	0,92	2,49	0,36	2,36	1,28	0,56

*Mediana, **Desvio padrão da média

Baseando-se nos valores da tabela 4, foi elaborada uma classificação para os intervalos de cada radioelemento em baixo (1), médio (2) e alto (3), a qual é detalhada na tabela 5. Para representação das classes que correspondem aos domínios gamaespectrométricos, os valores são calculados com a mediana e um, dois e três desvios padrão respectivamente, associados com a composição de RGB de Oliveira (2018).

Tabela 5: Classificação de intervalos para cada radioelemento.

Canal	Baixo (1)	Médio (2)	Alto (3)
K (%)	$K < 0,73$	$0,73 < K < 3,93$	$K > 3,93$
eTh (ppm)	$eTh < 3,75$	$3,75 < eTh < 13,55$	$eTh > 13,55$
eU (ppm)	$eU < 0,92$	$0,92 < eU < 2,36$	$eU > 2,36$

O mapa de domínios gamaespectrométricos da figura 17 é o resultado da estatística básica e da classificação, descritas anteriormente. Neste mapa são definidas 27 classes gama, variando de acordo com teores baixo, médio e alto de K, eTh e eU, as quais são correlacionáveis às unidades geológicas mapeadas por Harara (2001) e representadas no mapa geológico da figura 3.

A unidade de aluviões recentes corresponde predominantemente aos domínios cinza (222) e verde claro (232), que indica concentrações médias de radioelementos.

O Granito Rio Negro é caracterizado pelos domínios azul claro (133) e verde claro (132) na porção leste da área, indicando variação de médio a alto nos teores eU, alto para o eTh, fatos que contrastam essa unidade com as adjacentes, e baixo para o K.

Entre as unidades do Terreno Luís Alves, variações de gnaisses félsicos e máficos, nota-se um predomínio do domínio cinza (222) na região centro-sudeste, indicando concentrações médias para os 3 radioelementos. Para os gnaisses félsicos há uma ocorrência do domínio verde azulado (122) na porção nordeste, indicando um valor baixo para o K.

As rochas da Suíte Máfica-Ultramáfica de Piên possuem uma assinatura que varia de baixo a médio para todos os radioelementos estudados, predominando o baixo. Entretanto, nota-se um predomínio de domínios azul escuro (112) e preto (111), indicando baixos valores para o K, eTh e eU. No corpo C.M. há ocorrência do domínio marrom (211), com assinatura média para potássio, o que pode ser explicado pela mobilidade deste elemento.

A assinatura dos monzodioritos e granodioritos do Cinturão Granítico Piên-Mandirituba é caracterizada pelos teores altos de K, eTh e eU, pois correspondem aos domínios branco (333), amarelo (332) e róseos (323 e 322) localizados na porção noroeste da área.

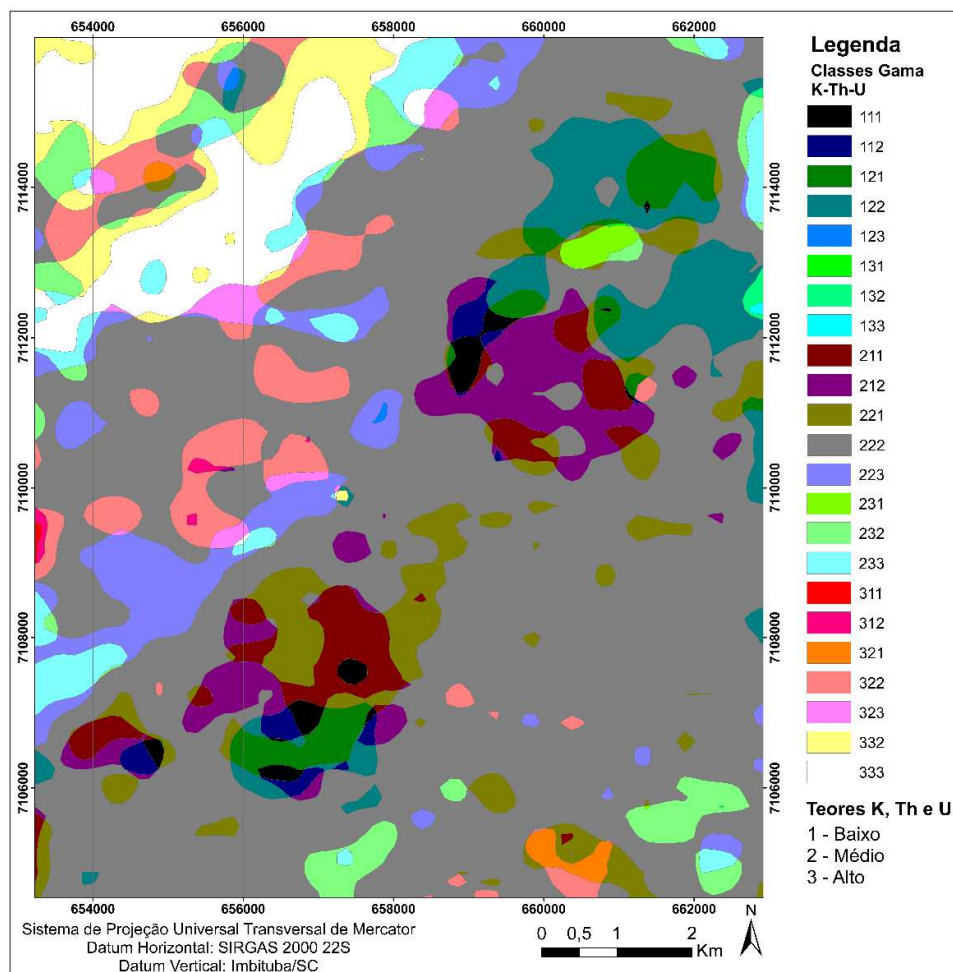


Figura 16: Mapa de domínios gamaespectrométricos da área de estudo.

A magnetometria é baseada nas medidas de intensidade do campo magnético terrestre, que é refletida pela susceptibilidade magnética dos minerais, sendo usada principalmente para observar feições magnéticas de uma região, como lineamentos estruturais. Como o foco deste trabalho é a potencial ocorrência de Ni e Cr nas rochas da SMUP, os dados aeromagnetométricos foram utilizados para gerar dados de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), representados no mapa da figura 18-A, para calcular o Índice Máfico (IM).

Por meio do Índice Máfico é possível eliminar as influências dos solos lateríticos e das lateritas (ricas em ferro e que, por isso, podem gerar falsas anomalias positivas), evidenciando as assinaturas de corpos litológicos com alta susceptibilidade magnética.

Dessa forma, foi gerado o mapa de Índice Máfico para a área de estudo, conforme mostra a figura 18-B, que viabilizou a individualização dos dois corpos de rochas ultramáficas, pois correspondem às áreas com muito alto Índice Máfico, localizadas nas porções nordeste e sudoeste da região de estudo. Os corpos correspondem aos mapeados por Harara (2001) como C.C. e C.M. da SMUP, e ainda pelo Índice Máfico nota-se um contorno de intensidade muito alta que extrapola os limites geológicos definidos pelo mesmo autor

4.3 Integração de dados geoquímicos e geofísicos

O uso de dados geoquímicos e geofísicos auxilia em trabalhos de prospecção mineral. Esses dados são geralmente estudados separadamente e de forma individualizada. A proposta deste trabalho, porém é a integração desses dois temas, alinhados com dados geológicos, para obter respostas de favorabilidade mais apuradas e robustas.

A partir dessa proposta, os resultados obtidos do tratamento de dados geoquímicos e aerogeofísicos foram integrados, determinando intervalos para áreas de favorabilidade de Cr e Ni nos corpos de rochas ultramáficas da SMUP. Os parâmetros utilizados para delimitar intervalos foram baseados na estatística dos dados geoquímicos e nos domínios gamaespectrométricos, comparados com as unidades geológicas mapeadas por Harara (2001) e com o resultado obtido do Índice Máfico. Os critérios adotados são os seguintes:

- Baixo: áreas com teores Cr e Ni (ppm) menores que a mediana, intervalo entre percentis que corresponde aos teores selecionados pela estatística exploratória e domínios gamaespectrométricos com um valor baixo (1) ou médio (2) e dois valores altos (3);
- Médio: áreas com teores Cr e Ni (ppm) entre a mediana e *outlier*, intervalo entre percentis que corresponde aos teores selecionados pela estatística exploratória e domínios gamaespectrométricos com apenas um valor alto (3) e os demais médio (2) ou baixo (1);
- Alto: regiões com teores Cr e Ni (ppm) entre *outlier* e *outlier* extremo, entre percentis que corresponde aos teores selecionados pela estatística exploratória e domínios gamaespectrométricos com um valor baixo (1) e dois valores médios (2);
- Muito Alto: áreas com teores Cr e Ni (ppm) maiores que o *outlier* extremo, intervalo entre percentis que corresponde aos teores selecionados pela estatística exploratória e domínios gamaespectrométricos com três ou dois valores baixos (1) e apenas um valor médio (2);

Dessa maneira, os parâmetros com os intervalos utilizados na delimitação das áreas de favorabilidade para Cr constam da tabela 6.

Tabela 6: Classificação dos intervalos para áreas de favorabilidade para Cr.

Cr	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Teor (ppm)	Cr<440	440<Cr>4835	4835<Cr>7670	Cr>7670
Intervalo percentis	Mín a Pc50	Pc50 a Pc85	Pc90 a Pc93	Pc95-Máx
Domínios gamaespectrométricos	Um valor baixo (1) ou médio (2) e dois valores altos (3)	Apenas um valor alto (3) e os demais médio (2) ou baixo (1)	Um valor baixo (1) e dois valores médios (2)	Três ou dois valores baixos (1) e apenas um valor médio (2)

A localização das áreas classificadas para Cr estão representadas no mapa de favorabilidade da figura 19, no qual são identificadas 6 áreas caracterizadas como muito alta favorabilidade correspondendo a 0,84 km² de abrangência, 7 áreas com alta favorabilidade totalizando 2 km², 7 áreas com média favorabilidade com aproximadamente 2,96 km² de extensão e uma área de baixa favorabilidade com 105,07 km².

As porções da área de estudo com muito alta favorabilidade para Cr situam-se na porção nordeste e sudoeste, correspondendo, predominantemente, aos dois corpos de rochas ultramáficas da SMUP e áreas com índice máfico muito alto (Figura 18-B). Nota-se que no corpo C.C. há mais áreas com essa classificação, acompanhadas de áreas com favorabilidade média. As regiões delimitadas com favorabilidade alta localizam-se próximas ou no entorno às de muito alta favorabilidade. As regiões menos favoráveis para Cr compreendem as rochas mapeadas por Harara (2001) como variações de granitoides e gnáissicas e de Índice Máfico médio a baixo (Figura 18-B).

Observa-se a delimitação de porções com caráter de muito alta a alta favorabilidade nas unidades geológicas do Terreno Luís Alves, descritas como gnaisses granulíticos félsicos e máficos à intermediários. E, essas mesmas áreas são possuem muito alto Índice Máfico. Esta associação não está de acordo com as características geoquímicas e geofísicas esperadas para essas litologias, pois normalmente não contêm minerais com teores elevados de Ni, Cr e Fe e com baixos de K, U e Th.

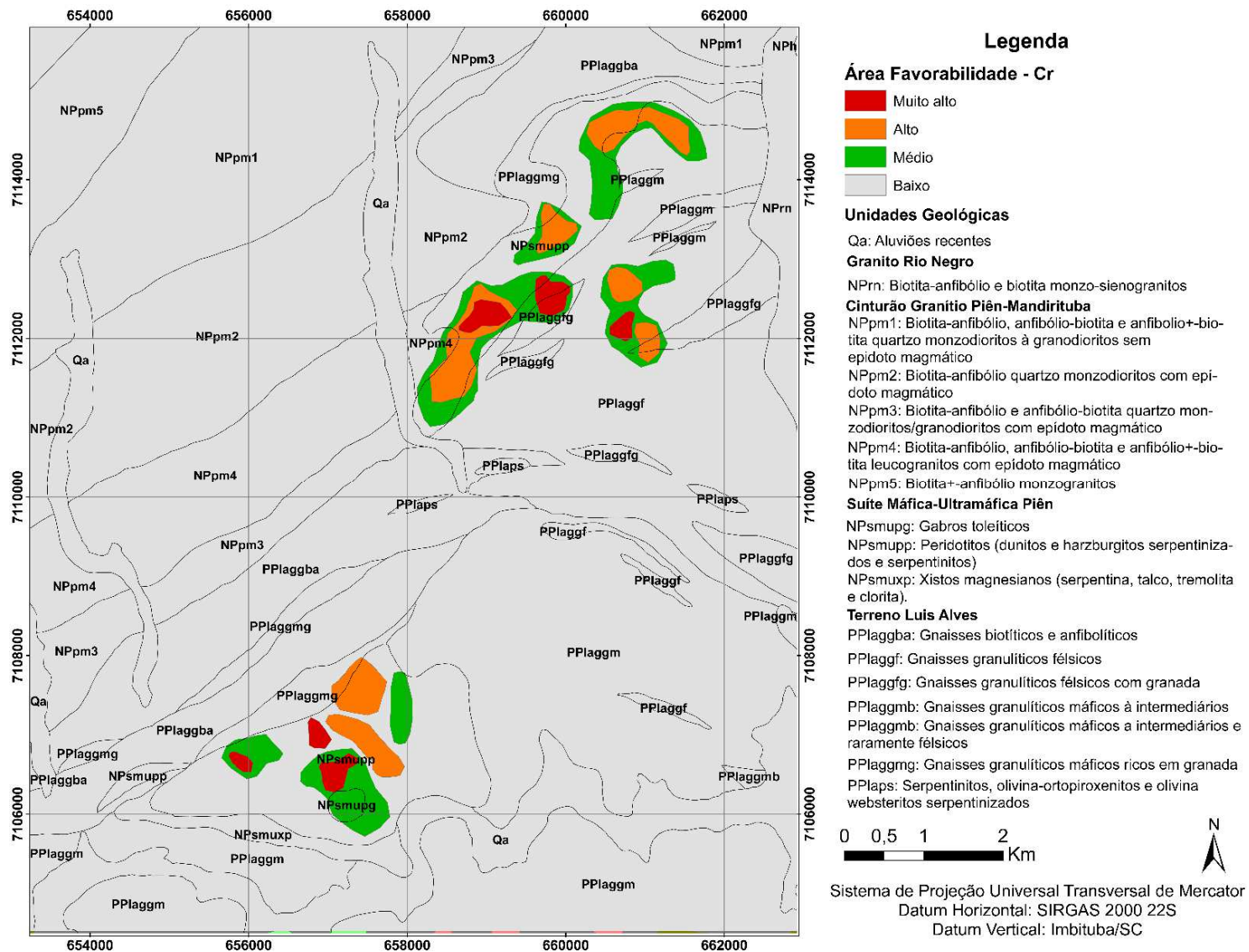


Figura 18: Mapa de favorabilidade para Cr, Piên/PR - Escala 1:25.000 (Base geológica de Harara, 2001).

Os parâmetros de classificação dos intervalos das áreas de favorabilidade para Ni constam na tabela 7.

Tabela 7: Classificação dos intervalos para áreas de favorabilidade para Ni.

Ni	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Teor (ppm)	Ni<60	60<Ni>776	776<Ni>1232	Ni>1232
Intervalo percentis	Mín-Pc50	Pc50-Pc85	Pc85-Pc90	Pc91-Máx
Domínios gamaespectrométricos	Um valor baixo (1) ou médio (2) e dois valores altos (3)	Apenas um valor alto (2) e os demais médio (2) ou baixo (1)	Um valor baixo (1) e dois valores médios (2)	Três ou dois valores baixos (1) e apenas um valor médio (2)

As áreas de muito alta a alta favorabilidade para Ni são menores que as com mesma classificação para Cr, pois as 3 áreas de muito alta favorabilidade correspondem a 0,50 km² e as 7 áreas de alta favorabilidade têm 1,3 km². Por outro lado, as porções classificadas como média favorabilidade para Ni ocorrem em maior proporção que para o Cr, pois para Ni há 5 áreas de média favorabilidade que totalizam 4,31 km² e uma extensa área de favorabilidade baixa de 108,43 km², como mostra o mapa de favorabilidade para Ni da figura 20.

As porções da área com muito alta favorabilidade para Ni localizam-se sobre as rochas ultramáficas da SMUP, principalmente na porção centro-sul do corpo C.C, e também na porção indicada com Índice Máfico muito alto (Figura 18-B). No sudoeste da área investigada ocorrem menores proporções de locais mais promissores para Ni, mas não necessariamente correspondem a áreas menos relevantes durante a avaliação de potencial mineral. E, à semelhança do mapa de favorabilidade para Cr, há áreas de muito alta e alta favorabilidade para Ni sobre as rochas gnáissicas do Terreno Luís Alves e também com muito alto Índice Máfico.

Segundo os critérios de avaliação, as porções sudeste, noroeste e central da área de estudo, foram caracterizadas como de baixa favorabilidade para Cr. Nessas porções ocorrem granitoides do Cinturão Granítico Piên-Mandirutba e gnaisses do Terreno Luís Alves, litotipos com assinaturas geoquímicas e geofísicas coerentes com as identificadas neste trabalho.

5 Discussão

A avaliação do potencial mineral de alguma região é um trabalho que demanda tempo e alto custo, itens que podem ser considerados problemáticos ao analisar os próximos esforços necessários durante um projeto de exploração e pesquisa mineral, como campanhas de sondagens e mapeamento geológico de detalhe.

Com o tempo foram sendo desenvolvidas ferramentas que auxiliam nessa etapa inicial de um trabalho de exploração mineral, propiciando um melhor direcionamento para áreas de interesse, tais como o uso e o tratamento de dados geoquímicos e aerogeofísicos por meio de *softwares* de geoprocessamento. Muitas vezes essas bases de dados estão disponíveis gratuitamente, possibilitando o reconhecimento prévio e de baixo custo de uma região.

A análise de dados geoquímicos foi uma das ferramentas aplicadas neste trabalho. Por meio da estatística descritiva, elaboração de histogramas e *boxplots* de teores originais e em $\log_{10}$ e ainda, confecção de mapas de distribuição de teores, foram constatados valores anômalos para Cr e Ni nas amostras de solo desenvolvidos sobre as rochas ultramáficas da SMUP e também sobre litotipos muito próximos a elas. Esse resultado é o mesmo obtido por Daitx & Carvalho (1980) com os mesmos dados amostrais, mas com outra abordagem de tratamento dos dados. Esses autores analisaram os dados separando-os por áreas menores e trabalhando com as amostras somente em log, gerando mapas de isoteores e gráficos para cada localidade, enquanto no presente trabalho os dados foram processados para uma área única que engloba os dois corpos de ultramáficas.

Ainda com relação aos dados geoquímicos, ressalta-se a efetividade da aplicação da análise na potencialidade mineral de rochas ultramáficas, o que fica evidente no trabalho de Ribeiro *et al.* (1979) que obtiveram respostas significativas ao avaliar Ni e Cu no Complexo Ultrabásico Americano do Brasil, em Goiás, por meio da estatística e cartografia geoquímica.

O tratamento dos dados aerogamaespectrométricos mostrou teores baixos nas análises dos canais de K, eTh e eU na região de ocorrência dos dois corpos das rochas ultramáficas, concordando com o comportamento típico descrito por Dickson & Scott (1977). Para as rochas adjacentes, descritas como granitoides e gnaisses por

Harara (2001), os valores variam de médio a alto para os radioelementos, também de acordo com o que é descrito por Dickson & Scott (1977).

O comportamento descrito para os radioelementos é o mesmo identificado por Barbosa (2012) nas rochas ultramáficas do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, em Goiás. Essa comparação mostra a importância do uso de dados aerogamaespectrométricos em trabalhos envolvendo rochas ultramáficas, pois as suas características possibilitam boas informações exploratórias e auxiliares ao mapeamento geológico.

A geração do Índice Máfico a partir de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos, auxiliou na individualização dos corpos de rochas ultramáficas, além de embasar a ocorrência de amostras geoquímicas com valores acima do *outlier* extremo para Ni e Cr em locais mapeados como gnaisses do Terreno Luís Alves. Da mesma forma como Barbosa (2012) fez em seu trabalho, delimitando a partir desse produto os corpos do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, Goiás.

Como dados geoquímicos e aerogeofísicos mostram boas respostas que auxiliam na avaliação do potencial mineral em rochas ultramáficas, a integração destes é viável e enriquecedora, pois aumenta mais ainda o direcionamento às áreas favoráveis para a ocorrência de elementos de interesse exploratório associados a elas.

Assim, por meio da integração dos dados geoquímicos e aerogeofísicos, é possível delimitar áreas favoráveis para Ni e Cr nos dois corpos de rochas ultramáficas na SMUP mapeados por Harara (2001), principalmente no corpo localizado a nordeste, Campina dos Crispins. Essas áreas correspondem a locais com teores baixos a médios para K, eU e eTh e Índice Máfico muito alto, o que auxiliou a delimitá-las e compreender a localização e a resposta das amostras geoquímicas.

Outra unidade geológica da área de estudo que apresenta alta favorabilidade para Ni e Cr pertence ao Terreno Luís Alves, constituído por gnaisses félsicos e máficos, uma resposta inesperada em virtude da composição mineral e química destas rochas.

A explicação para essas incompatibilidades de respostas geoquímicas, geofísicas e geológicas fica evidente à medida que são consideradas e comparadas as diferentes técnicas e escalas de trabalho utilizadas. A escala de mapeamento de Harara (2001) é de menor detalhe (1:70.000) que a utilizada neste trabalho (1:25.000). A isso, somam-se as dificuldades impostas pela qualidade de afloramentos e exposição de rochas, espessura de solo, presença de vegetação densa e mesmo feições alteradas pela ação do homem, as quais dificultam o mapeamento geológico. Além disso, os dados geofísicos e geoquímicos coletados sistematicamente e em malha regular fornecem respostas que são impossíveis de serem obtidas durante o mapeamento geológico. Neste sentido, os resultados obtidos pelo presente trabalho poderão ser utilizados para detalhamento do mapa geológico da região investigada.

A associação de Ni e Cr com as rochas ultramáficas, por essas corresponderem a uma seção ofiolítica incompleta, leva a interpretar que a possível ocorrência pode ser relacionada com a mineralização de ofiolitos descrita por Castroviejo (2004), Ridley (2013) e Biondi (2015). O tipo é cromita podiforme, tendo a cromita como mineral de minério principal, possibilidade já levantada por Daitx & Carvalho (1980), e Ni sulfetado para o potencial de Ni.

No entanto, cabe levantar a questão do tipo de magma envolvido na formação dessas mineralizações, que Castroviejo (2004), Ridley (2013) e Biondi (2015) consideram do tipo MORB, enquanto as rochas ultramáficas da SMUP são associadas por Harara (2001) ao tipo SSZ devido às características litogeoquímicas.

6 Conclusões

As conclusões obtidas, por meio da análise de dados, dos resultados e discussões dos trabalhos de integração de dados geoquímicos, aerogeofísicos e geológicos, são:

- Na região de Piên/PR afloram dois corpos de rochas ultramáficas, Corpo Campina dos Crispins e Corpo Campina dos Maias;
- Os teores anômalos de Cr estão localizados principalmente nos corpos de rochas ultramáficas e correspondem às amostras com valores acima de 7.670 ppm;

- Os teores anômalos de Ni estão localizados principalmente nos corpos de rochas ultramáficas e são aqueles com valores maiores que 1.232 ppm;
- Os teores anômalos de Cr são mais elevados que os de Ni e de maior ocorrência, normalmente coincidindo em área;
- As duas áreas com maiores concentrações de valores baixos para K, eTh e eU compreendem os dois corpos de rochas ultramáficas da SMUP, porém extrapolam os limites dos mesmos e alcançando as litologias encaixantes;
- Os dois corpos de rochas ultramáficas da SMUP constituem as áreas com Índice Máfico muito alto, entretanto também é extrapolado o limite geológico mapeado para essas rochas, englobando as encaixantes;
- As áreas de maior favorabilidade para Cr localizam-se na porção NE e SW, sendo a de NE com maior predominância e correspondente às rochas ultramáficas do Corpo Campina dos Crispins.
- As áreas de maior favorabilidade para Ni situam-se nas rochas ultramáficas da SMUP, principalmente na porção centro-sul do corpo Campina dos Crispins e no centro do corpo Campina dos Maias.
- Foram também identificadas áreas com teores elevados de Cr e Ni nas rochas gnáissicas do Terreno Luís Alves, adjacentes às rochas ultramáficas, o que aponta para a possibilidade de existirem pequenos corpos de rochas ultramáficas nesses locais;
- A potencial mineralização de Ni e Cr pode ser associada aos ofiolitos, possivelmente do tipo cromitito podiforme e Ni sulfetado.

Referências

- Almeida F.F.M. de., Hasui Y., Brito-Neves B.B. & Fuck R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. Simpósio Geologia Nordeste, Campina Grande, Recife: SBG/NE. Anais. p. 363-391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17: 1-29.
- Andriotti J.L.S. 2010. Interpretação de dados de prospecção geoquímica com o auxílio de estatística. Porto Alegre, CPRM, 73p.
- Barbosa I.O. 2012. Modelo de depósito do Complexo Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, GO, com base em dados multitemáticos. Tese de Doutorado. Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 97p.
- Basei M.A.S., Siga Jr. O., Machiavelli A. & Mancini F. 1992. Evolução tectônica dos terrenos entre os cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). *Revista Brasileira de Geociências*, 22(2):216-221.
- Biondi J.C. 2015. Processos metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. 2ed. Oficina de Textos, São Paulo, 555p.
- Blakely R.J. 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, New York, 437p.
- Castroviejo R. El oro en ofiolitas. 2004. In: Pereira E., Castroviejo R., Ortiz F. (eds). Complejos Ofiolíticos en Iberoamérica: guías de prospección para metales preciosos. Madrid: Rede CYTED, (2): 25-69.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2011. Projeto Aerogeofísico Paraná-Santa Catarina. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Texto Técnico. Volume I.
- Daitx E.C. & Carvalho M.A.S. 1980. Projeto geoquímica na área de Guaratubinha-Piên. São Paulo. DNPM/CPRM, 184p. (Relatório interno).

Dickson B.L. & Scott K.M. 1997. Interpretation of serial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. AGSO Journey Australia Geology & Geophysics, Australia, 17(2):187-200.

Faleiros F.M. 2008. Evolução de terrenos tectono-metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 306p.

GeoSGB, Dados, Informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. Disponível em < <http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acessado em 20 de janeiro de 2019.

Giradi V.A.V. 1974. Petrologia do Complexo Básico-Ultrabásico de Piên-PR. São Paulo. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Giradi V.A.V. 1976. Petrologia do Complexo Básico-Ultrabásico de Piên, Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 6(2):109-124.

Harara O.M.M. 1996. Análise estrutural, petrológica e geocronológica dos litotipos da região de Piên (PR) e adjacências. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 196p.

Harara O.M.M. 2001. Mapeamento e investigação petrológica e geocronológica dos litotipos da região do Alto Rio Negro (PR-SC): um exemplo de sucessivas e distintas atividades magmáticas durante o Neoproterozoico. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 206p.

Harara O.M.M., Basei M.A.S., Siga Jr. O., Campos Neto M.C. 2004. Neoproterozoic supra subduction zone (SSZ) ophiolitic rocks from Piên (PR), Southern Brazil. Quarenta anos de geocronologia no Brasil. Boletim de Resumos.

Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M. C., Silva L.C., Trouw R. A. J. & Janasi V.A. Província Mantiqueira. 2004. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Britoneves B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 203-234.

Keckler D. 1994. Surfer® for Windows. User's Guide. Golden Software, Inc.

Koljonen T. 1992. The geochemical atlas of Finland. Part 2: Till Espoo: Geological Survey of Finland, 218p.

Licht O.A.B. 1998. Prospecção Geoquímica: Princípios, técnicas e métodos. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Rio de Janeiro, 216p.

Licht O.A.B. 2001. A Geoquímica Multielementar na Gestão Ambiental – Identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no estado do Paraná. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Geologia, Universidade Federal do Paraná, 187p.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. 2005. Folha Joinville (SG. 22-X-D).

Moore E.M. 1986. The Proterozoic ophiolite problem, continental emergence, and the Venus Connection. Science, 234: 65-68.

Moore E.M. 2003. A personal history of the ophiolite concept, in Dilek, Y., and Newcomb, S., eds. Ophiolite concept and the evolution of geological thought: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 373:17-29.

Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics. 37(3): 507-517.

Nabighian M.N., Ander M.E., Grauch V.J.S., Hansen R.O., Lefehr T.R., Li Y., Pearson W.C., Peirce J.W., Phillips J. D. & Ruder M.E. 2005. Historical development of the magnetic method in exploration, Geophysics.

Oliveira V. S. 2018. Interpretação geofísico-geológica de uma porção setentrional do Cráton Amazônico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Paraná, 125p.

Pearce J. A. 1991. Ocean floor comes ashore. Nature. 354:110-111.

Pearce J.A. 2003. Supra-subduction zone ophiolites: The search for modern analogues. In: DILEK, Y., NEWCOMB, S. (eds.). Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America, Special Paper, 373: 269-293.

Pearce J.A., Lippard S.J. & Robertis S. 1984. Characteristics and Tectonic Significance of Supra Subduction Zone Ophiolites. In: B. P. KOKELEAR & M. F. HOWELLS (editors), Marginal Basin Geology. Geol. Soc. London. Spec – Publ. 16: 77-84.

Pires A.C.B. & Mores R.A.V. 2006. New processing Technologies applied do airborne geophysical data: impacto n interpretation. In: 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, 2006, Ouro Preto, MG.

Ribeiro M.J., Santos M.M. Dos, Bressan S.R. 1979. Geochemical exploration over a Mafic-Ultramafic Complex, Americano do Brasil, Goias, Brazil. Journal of Geochemical Exploration. 12(1): 9-19.

Rose A.W., Hawkes H.E. & Webb J.S. (2ª Ed.) 1979. Geochemistry in mineral exploration. New York: Academic Press, 657p.

Roest W.R, Verhoef J. & Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, Geophysics. 57(1): 116-125.

Siga Jr., Basei M.A.S; Reis Neto J.M. Dos, Machiavelli A. & Harara O.M. 1995. O Complexo Atuba: Um cinturão Paleoproterozoico intensamente retrabalhado no Neoproterozoico. Boletim do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 26:69-9.

Queiroga G.N., Suita M.T.M., Pedrosa-Soares A.C., Martins M.M. & Pinheiro M.A.P. 2012. Síntese sobre ofiolitos: evolução dos conceitos. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 65(1): 47-58.

Ridley J. 2013. Ore Deposit Geology. Cambridge University Press, 391p.

Trein E., Muratori A., Basumallick S. & Fuck R. A., Marini O. J. 1969. Folha Geológica de Piên. Comissão Carta Geológica Paraná, Curitiba.

Ulbrich H.H.G.J., Ulbrich M.N.C, Ferreira F.J.F., Alves L.S., Guimarães G.B. & Fruchting A. 2009. Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. Revista do Instituto de Geociências, USP, 9(1): 33-53.

Zanetti L.Z. 2017. Litopetrotectônica das rochas granulíticas e não granulíticas de parte da porção norte do Terreno Luís Alves, região entre Piên (PR) e São Bento do Sul (SC). Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 77p.

Anexo I: Tabelas de estatística descritiva de Zn, Co e Cu

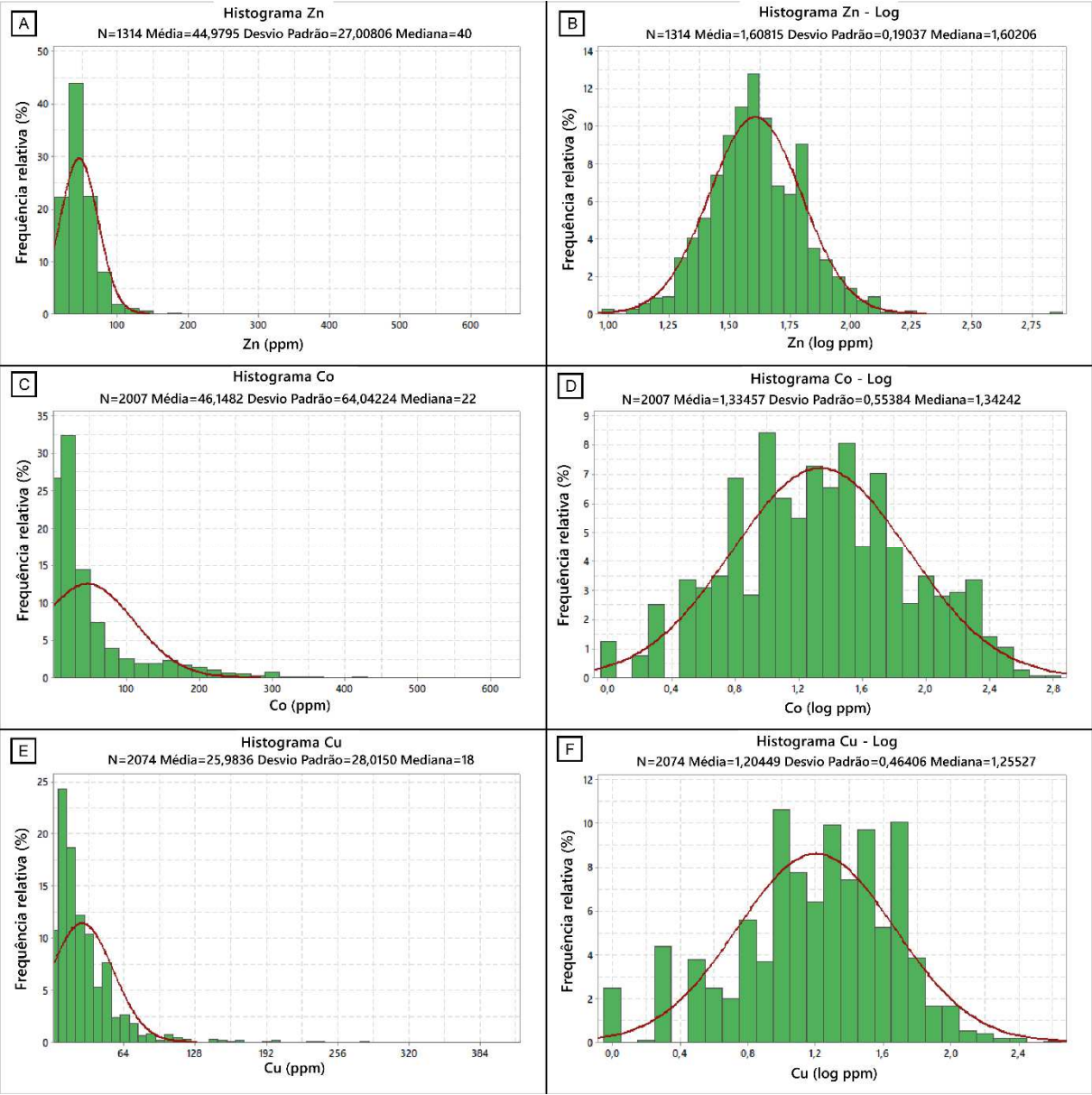
Estatística descritiva de Zn para N=1314, Co para N=2007 e Cu para N=2074 para teores originais

Variável	Unidade	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Variância	Desvio Padrão
Zn	(ppm)	10,0	30,0	40,0	44,9795	55,0	670,0	729,4352	27,0081
Co	(ppm)	1,0	9,0	22,0	46,1482	50,0	640,0	4101,408	64,04224
Cu	(ppm)	1,0	9,0	18,0	25,9836	35,0	420,0	784,8398	28,015

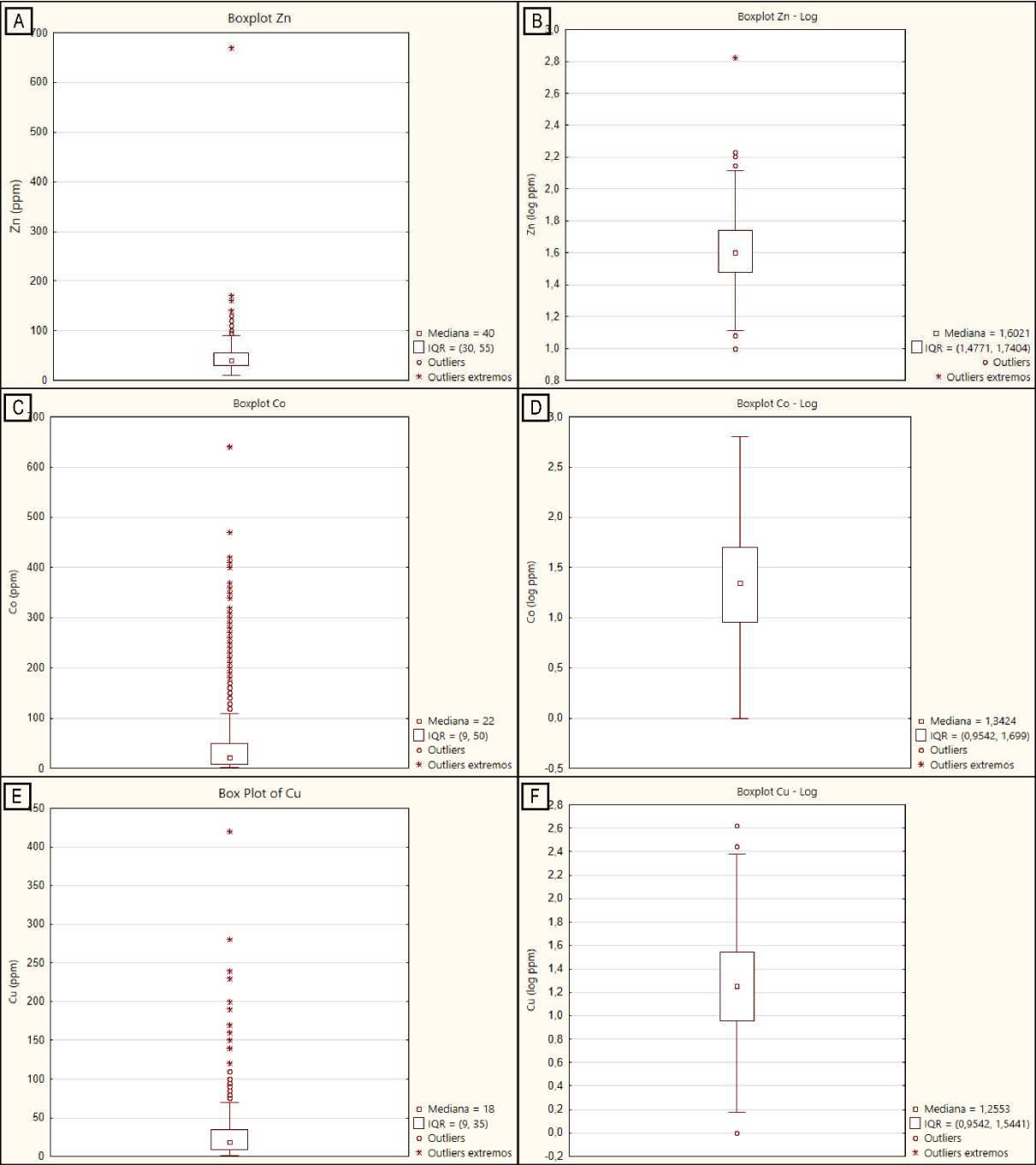
Estatística descritiva de Zn para N=1314, Co para N=2007 e Cu para N=2074 para teores em log₁₀

Variável	Unidade	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Variância	Desvio Padrão
Zn	(log - ppm)	1314	1	1,47712	1,60206	1,60815	1,74036	2,8261	0,0362
Co	(log - ppm)	2007	0	0,954243	1,34242	1,33457	1,69897	2,8062	0,307
Cu	(log - ppm)	2074	0	0,954243	1,25527	1,20449	1,54407	2,6232	0,2154

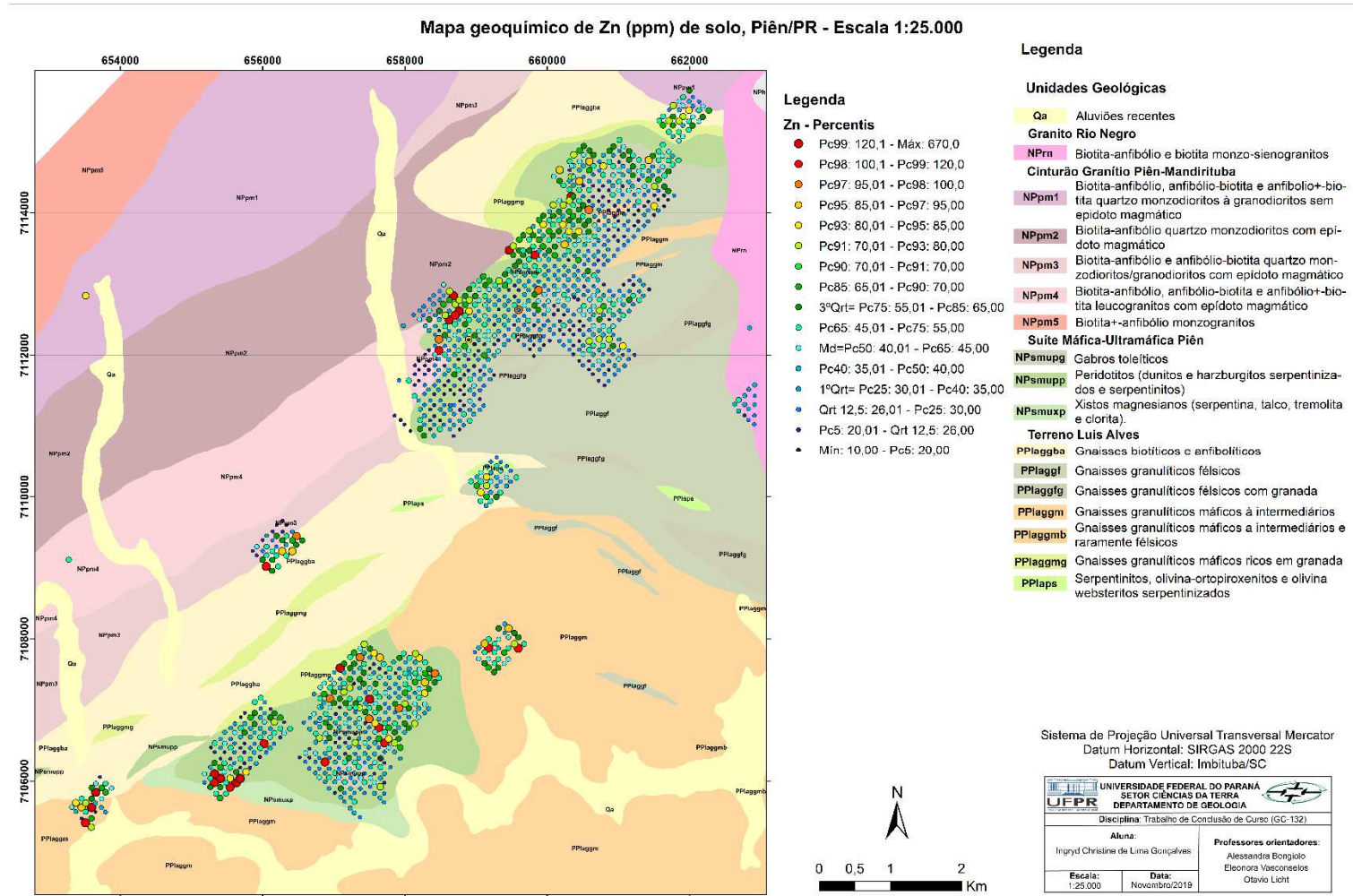
Anexo II: Histogramas de teores originais e em $\log_{10}$ de Zn, Co e Cu



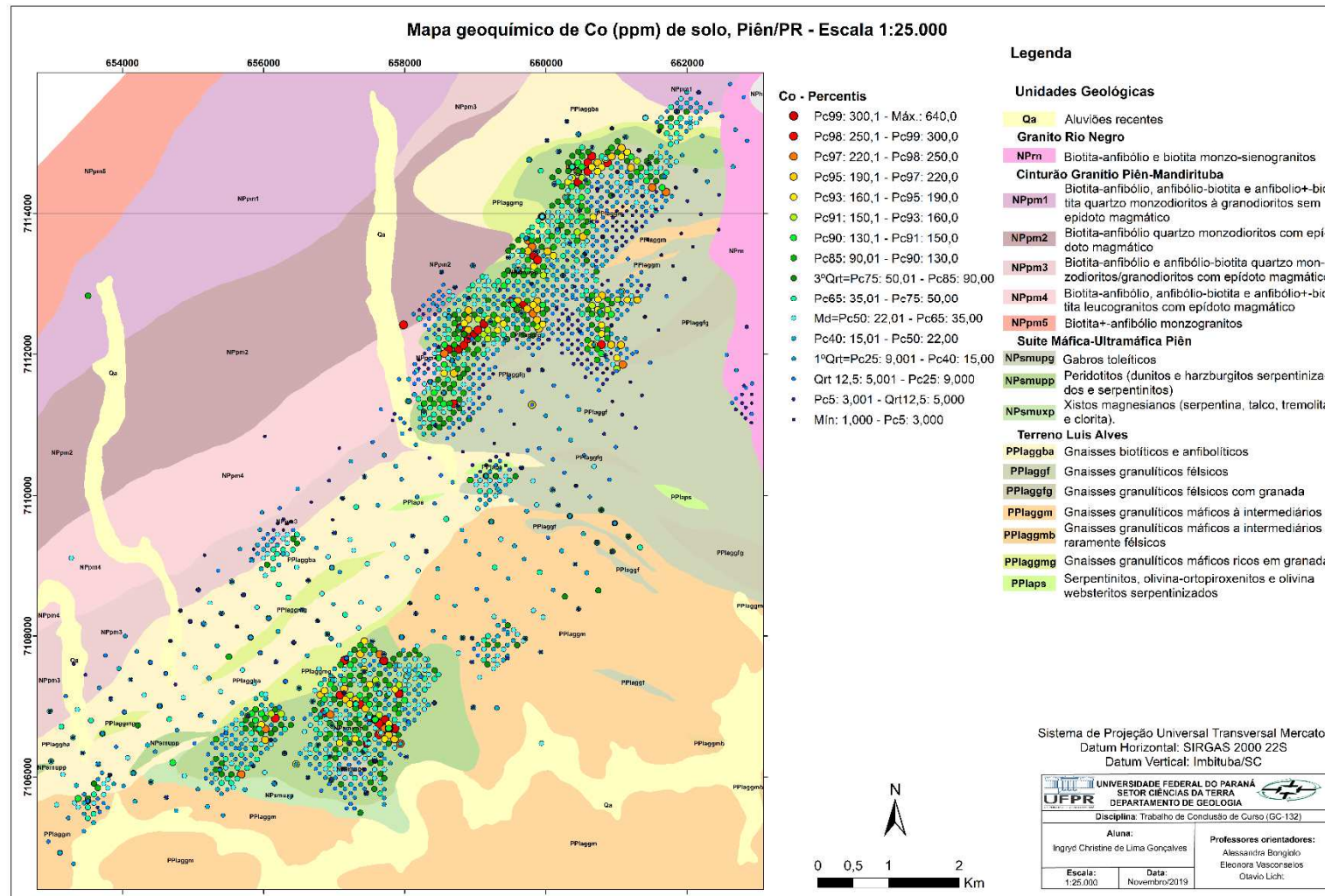
Anexo III: *Boxplots* de teores originais e em $\log_{10}$ de Zn, Co e Cu



Anexo IV: Mapa de teores de Zn (ppm)



Anexo V: Mapa de teores de Co (ppm)



Anexo VI: Mapa de teores de Cu (ppm)

Mapa geoquímico de Cu (ppm) de solo, Piên/PR - Escala 1:25.000

