

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANNA CLARA MORAIS AVELAR ÁLVARES

**ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SOLOS NA OCORRÊNCIA DE COBRE PRIMAVERA,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

**CAÇAPAVA DO SUL
2022**

ANNA CLARA MORAIS AVELAR ÁLVARES

**ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SOLOS NA OCORRÊNCIA DE COBRE PRIMAVERA,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dra. Cristiane Heredia Gomes

Coorientador: Geól. Bruno Teixeira Campos Sousa

**Caçapava do Sul
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

Á473a Álvares, Anna Clara Morais Avelar
Análise geoquímica de solos na Ocorrência de Cobre
Primavera, Caçapava do Sul - RS / Anna Clara Morais
Avelar Álvares.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2022.

"Orientação: Cristiane Heredia Gomes".

1. mobilidade dos elementos. 2. dispersão
geoquímica. 3. anomalia geoquímica. 4. cobre. I.
Título.

ANNA CLARA MORAIS AVELAR ÁLVARES

**ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SOLOS NA OCORRÊNCIA DE COBRE PRIMAVERA,
CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 16 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Cristiane Heredia Gomes
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Vinicius Matté
UNIPAMPA

Geól. Lucas Mendes Galinari
Água Fertilizantes



Assinado eletronicamente por **VINICIUS MATTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, 24/03/2022, às 19:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIANE HEREDIA GOMES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0764075** e o código **CRC 61970150**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais,
Rosana e Francisco.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rosana e Francisco pelo apoio incondicional e confiança que me deram desde o meu primeiro momento de vida. Agradeço por nunca terem medido esforços nas horas em que precisei, por todo suporte psicológico e financeiro. Sem eles eu não teria realizado e nem alcançado nenhum dos meus sonhos.

Ao meu irmão Vinicius, pelo amor incondicional, pela união, parceria, carinho e compreensão em todos os momentos da minha vida. À minha família por sempre me apoiarem e confiarem em mim, independente das minhas escolhas.

Agradeço à minha Orientadora, Cristiane Gomes, pelas discussões, paciência e acompanhamento durante a construção deste trabalho estando sempre disponível para esclarecer minhas dúvidas. Seus ensinamentos estarão sempre comigo, obrigada por tudo!

Ao meu Coorientador, Bruno Teixeira, pela amizade, suporte, paciência e pelas experiências trocadas.

Ao Caio e Paula pelo auxílio na etapa de campo e durante a construção deste trabalho. Também agradeço a técnica Angela Cristina, sempre de prontidão para enviar os dados necessários.

Ao professor Dr. Vinicius Matté por aceitar fazer parte desse trabalho, e por todos os conhecimentos e ensinamentos que compartilhou comigo ao longo desses anos. Agradeço ao geólogo Lucas Galinari, pelo suporte e autorização do acesso à área de estudo.

Agradeço à Universidade Federal do Pampa, por me proporcionar ensino gratuito de qualidade, aos funcionários, professores e técnicos que sempre fizeram o possível para que o sonho de ser geóloga pudesse se tornar realidade.

Ao Caio, por todo amor, apoio, cuidado, compreensão, pelos grandes momentos que compartilhamos juntos, pelas conversas construtivas e pela humildade de buscar seu desenvolvimento pessoal comigo. Sou grata por tamanha paciência e disposição, especialmente nos momentos finais de elaboração deste trabalho. Obrigada por me acompanhar durante essa jornada, por me ensinar todos os dias ser uma pessoa melhor através do amor e me fazer tão feliz.

Agradeço às minhas amigas de coração, especialmente a Paula, Tamiris, Adriely e a Bianca, que andam de mãos dadas comigo desde muito tempo e que

estarão comigo para sempre. Obrigada pelo amor, carinho, apoio, incentivo e por todos os momentos compartilhados, pelas conversas, pelas risadas, por todas as bebedeiras e companheirismo nos rolês aleatórios de Caçapava, vou sentir muita saudade, vocês são os presentes que a geologia me proporcionou.

Ao Bruno, que me deu a oportunidade única de conhecer e me interessar pela Geologia. Agradeço por ter me acompanhado desde o início da minha caminhada na geologia e que nunca duvidou das minhas habilidades como futura geóloga. Obrigada pela amizade que temos e por todas as experiências loucas trocadas ao longo desses anos.

A Brisa e ao Ozzy, por alegrar minha casa, por todo amor, sem eles a minha vida seria mais triste.

Agradeço a geologia, por me proporcionar dos conteúdos mais fascinantes e fantásticos sobre a Terra e pelas diversas saídas de campo que foram inesquecíveis e imprescindíveis para boa qualidade de minha formação.

Por fim, agradeço de todo o coração aos meus amigos de Mineiros e Caçapava. Jamais os esquecerei. Sempre levarei comigo os momentos e experiências únicas que compartilhamos. Sem eles a longa estrada geológica percorrida não chegaria ao fim. Agradeço pelos incontáveis momentos de risadas, aprendizado e companheirismo. Agradeço a todos que ajudaram a tornar esse período mais leve e feliz, sempre encontrando uma piada nos momentos mais difíceis. Obrigada por ter feito a experiência da graduação algo inesquecível para mim.

Muito obrigada!

“ A beleza do aprendizado é que ninguém
pode roubá-lo de você”.

B.B. King

RESUMO

O município de Caçapava do Sul faz parte da Província Cuprífera do Escudo Sul-riograndense, no qual há diversas ocorrências de metais bases distribuídos na região. Deste modo o estudo teve como objetivo determinar as características geoquímicas dos solos do entorno da Ocorrência de Cobre Primavera localizada a 10 km ao sul da cidade de Caçapava do Sul. Considerando se tratar de uma importante zona com boas exposições de rochas metamórficas com evidências nítidas de mineralização em superfície, buscou entender os processos pedogenéticos atuantes na área, a mobilidade dos elementos químicos, e a correlação da geologia local com os solos. Foram coletadas e analisadas 17 amostras de solo, através do método de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF). Foi possível observar altas concentrações de Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Co, Mo, Ce e Hf em toda área de estudo, permitindo a compreensão de que estes valores correspondem a uma composição química proveniente das rochas metavulcânicas básicas da região. Os elementos de maior interesse econômico, como Cu e Zn, apresentaram apenas quatro pontos com teores acima de zero, e isso está relacionado com a alta mobilidade desses elementos no ambiente. A partir dos mapas de isotores foi possível evidenciar a afinidade geoquímica entre os elementos, assim como era previsto observando as correlações entre eles. Também foi possível visualizar que os elementos possuem uma concentração a noroeste em relação a sua principal área de influência no solo, e este comportamento está ligado à topografia da área.

Palavras-Chave: mobilidade dos elementos, dispersão geoquímica, anomalia geoquímica, cobre.

ABSTRACT

Caçapava do Sul city is part of the Cuprífera Province of the Escudo Sul-rio-grandense, in which there are several base metal occurrences distributed in the region. Thus, the study aimed to determine the geochemical characteristics of the soils around the Cobre Primavera Occurrence located 10 km south of the city of Caçapava do Sul. Considering that it is an important area with good exposures of metamorphic rocks with clear evidence of surface mineralization, it sought to understand the pedogenetic processes acting in the area, the mobility of chemical elements, and the correlation of the local geology with the soils. Seventeen soil samples were collected and analyzed using the Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (EDXRF) method. It was possible to observe high concentrations of Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Co, Mo, Ce and Hf throughout the study area. Allowing the understanding that these values correspond to a chemical composition coming from the basic metavolcanic rocks in the region. The elements of greater economic interest, such as Cu and Zn, presented only four points with contents above zero, and this is related to the high mobility of these elements in the environment. From the isotherm maps it was possible to evidence the geochemical affinity between the elements, as was predicted by observing the correlations between them. It was also possible to visualize that the elements have a northwest concentration in relation to their main area of influence on the ground, and this behavior is linked to the topography of the area.

Keywords: element mobility, geochemical dispersion, geochemical anomaly, copper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo: Ocorrência de Cobre Primavera, Caçapava do Sul – RS.	22
Figura 2 - Mapa Geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul-rio-grandense.	23
Figura 3 - Mapa geológico: ocorrência de Cobre Primavera, Caçapava do Sul, RS.	26
Figura 4 - Mapa de solos de Caçapava do Sul - RS.	30
Figura 5 - Classificação de Goldschmidt para elementos químicos.	34
Figura 6 - Mobilidade relativa dos elementos químicos em ambiente secundário.....	36
Figura 7 - Horizontes do perfil de solo.....	39
Figura 8 - Coleta de solo com auxílio da pá de corte.	41
Figura 9 - Mapa com pontos de amostragem.....	42
Figura 10 - (A) Procedimento de homogeneização das amostras com auxílio do cadinho de porcelana. (B) Procedimento de quarteamento. (C) Acondicionamento das amostras em sacos plásticos.	43
Figura 11 - Equipamento de EDXRF portátil S1 Turbo SDR Bruker.	44
Figura 12 - Perfil de Neossolo litólico, com o horizonte A em contato direto com a rocha.	47
Figura 13 - Mapas de isolinhas com teores de Fe, Mn e Co em ppm.	54
Figura 14 - Mapas de isolinhas com teor de P, K, Ti, Th.....	56
Figura 15 - Mapas de isolinhas com teor de Cu, Zn e Hf.	57
Figura 16 - Mapas de isolinhas com teor de Cd e Rh.	59
Figura 17 - Mapas de isolinhas com teor de S, Ti e K.....	60
Figura 18 - Mapas de isolinhas com teor de Rh e Al.....	61
Figura 19 - Mapas de isolinhas com teor de Si e Mo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Abundância crustal de alguns elementos químicos em parte por milhão. .32	32
Tabela 2 - Elementos indicadores e farejadores de mineralizações.38	38
Tabela 3 - Resultados da concentração de Elementos Maiores (em porcentagem). 49	49
Tabela 4 - Resultados da concentração de Elementos Menores e Traços (em ppm).50	50
Tabela 5 - Teores médios dos elementos do conteúdo geoquímico dos solos e das rochas.63	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag - Prata

Ar - Argônio

Au - Ouro

Cd - Cádmio

CGCS - Complexo Granítico Caçapava do Sul

CMPF - Complexo Metamórfico Passo Feio

CPRM - Campanha de Pesquisa de Recursos Minerais

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cu - Cobre

EDXRF - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva

Eh - Potencial de Oxirredução

ESrg - Escudo Sul-Rio-Grandense

E-W - Leste-Oeste

Ga - Bilhões de anos

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K - Potássio

Km - Quilômetro

Ma - Milhões de anos

Mo - Molibdênio

Nb - Nióbio

N-S - Norte-Sul

N-W - Noroeste

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

Ppm - Parte por milhão

Ppb - Parte por bilhão

S - Enxofre

SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

Sn - Estanho

Ta - Tântalo

Ti - Titânio

Rb - Rubídio

RS - Rio Grande do Sul

TSG - Terreno São Gabriel

U - Urânio

W - Oeste

\bar{X} - Valor médio do valor de concentração das amostras

Zn - Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivos Gerais	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3 JUSTIFICATIVA	20
4 ÁREA DE ESTUDO	21
4.1 Geologia Regional	23
4.1.1 Terreno São Gabriel	24
4.2 Geologia Local	25
4.2.1 Complexo Metamórfico Passo Feio	25
4.3 Província Cuprífera de Caçapava do Sul	26
4.3.1 Ocorrência de Cobre Primavera	27
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
5.1 Fundamentos de Geoquímica	30
5.2 Ciclos e Ambientes Geoquímicos	31
5.3 Abundância dos Elementos Químicos	31
5.4 Classificação dos Elementos Químicos	33
5.5 Dispersão Geoquímica	34
5.6 Mobilidade dos Elementos	35
5.7 Associações Geoquímicas	37
5.8 Prospecção Geoquímica	38
5.9 Geoquímica de Solos	39
6 MATERIAIS E MÉTODOS	40
6.1 Pré-Campo	40
6.1.1 Revisão Bibliográfica	40
6.1.2 Sensoriamento Remoto	40
6.2 Trabalho de Campo	41
6.2.1 Amostragem de Solo	41
6.3 Pós-Campo	42
6.3.1 Preparo de Amostras	42
6.3.2 Método de Análise	43
6.3.3 Geração de Mapas e Tabelas	45
6.3.4 Interpretação dos Resultados	45
7 RESULTADOS	46
7.1 Características morfológicas do solo	46
7.2 Geoquímica dos solos	47

7.3 Análises estatísticas	51
7.4 Método de Correlação de Pearson	52
7.5 Mapas de isolinhas de concentração dos elementos	53
7.6 Comparação entre as análises dos solos e rochas da Ocorrência de Cobre Primavera	63
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICES	72
ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

O município de Caçapava do Sul, onde se localiza a área de estudo, faz parte do contexto geotectônico do Escudo Sul-rio-grandense (ESrg), no qual há diversas ocorrências de metais bases distribuídos na região, denominada Província Cuprífera de Caçapava do Sul (REMUS et al., 2000). O município apresenta um extenso histórico em relação à exploração mineral de cobre e ouro, mais especificamente a região de Minas do Camaquã, onde foi o maior distrito mineiro e maior produtor de cobre do país no século passado. Neste local, a operação durou mais de 100 anos, com início em 1870 e encerramento das atividades em 1996 (HARRES, 2000).

O cobre foi um dos primeiros metais a ser utilizado e trabalhado pelo homem, onde inicialmente era usado no seu estado nativo, para a confecção de ferramentas de trabalho, possibilitando a evolução da civilização e o desenvolvimento tecnológico industrial. Devido às suas propriedades físicas e químicas, o cobre é um metal importante que contém diversas utilidades, tanto na indústria elétrica e eletrônica, quanto na construção civil e no transporte, o que causa um grande interesse econômico na sua exploração (DNPM, 2001).

Os estudos de pesquisa e prospecção mineral utilizam um conjunto de conhecimentos, técnicas e ferramentas que são imprescindíveis para o reconhecimento e a descoberta de novas áreas mineralizadas. As ferramentas disponíveis para os estudos de pesquisa mineral compreendem métodos diretos (sondagem, amostragem de solo e rocha e análises químicas) e indiretos (análise de sensores remotos e métodos geofísicos; MOON et al., 2006).

A prospecção geoquímica tem como base a amostragem de materiais superficiais, como os sedimentos de corrente e os concentrados de bateia e solos. Tem como objetivo estudar e determinar as concentrações dos elementos químicos e a sua dispersão espacial, para identificar padrões anormais (anomalias geoquímicas) que podem estar associados a presença de mineralizações importantes (MATTOSO & FORMOSO, 2007).

Cada vez mais os estudos de prospecção geoquímica em solo estão sendo utilizados, devido aos seus resultados satisfatórios. Contudo, para definir sua aplicabilidade é necessário um maior conhecimento dos objetivos e interesses da pesquisa, pois os parâmetros variam de uma região para outra. Por isso é essencial analisar o intemperismo e a pedogênese da área em estudo, para definição da

profundidade e do horizonte correto para a coleta das amostras, a fim de evitar a elaboração de dados com erros, que geram anomalias não significativas (SANTOS, 2014). Assim, os depósitos minerais são resultados de ciclos geoquímicos, pois os ciclos promovem as interações entre o manto, a crosta, a biosfera, a hidrosfera e a atmosfera, onde cada um desenvolve uma composição química diferente. O ambiente geoquímico pode ser primário (processos internos) ou secundário (processos superficiais; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

Os minerais que são formados em ambientes primários, em geral, são instáveis no ambiente secundário, e então sofrem alterações que ocasionam a liberação de elementos que são transportados e redistribuídos. É esse processo de dispersão dos elementos que torna os métodos geoquímicos aplicáveis nas buscas de depósitos minerais, pois geram os halos geoquímicos. Os halos geoquímicos são regiões que apresentam teores anormais de elementos químicos que provêm das rochas, solos, vegetação, águas superficiais e subterrâneas (CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

A partir disso, o presente estudo buscou a caracterização geoquímica de solos presentes nas proximidades da ocorrência de cobre Primavera, localizada próximo a cidade de Caçapava do Sul, a qual apresenta evidências nítidas de mineralização em superfície. O potencial de prospecção de metais-base é fundamentado nas variadas ocorrências minerais inseridas nesta região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais desse estudo são caracterizar geoquimicamente, a partir do uso da Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), os solos presentes nas proximidades da ocorrência de cobre Primavera visando assim correlacionar o solo com a ocorrência.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a dispersão dos elementos químicos através das amostras de solo presentes no entorno da ocorrência;
- Analisar estatisticamente os dados geoquímicos;

- Gerar mapas de anomalias geoquímicas;
- Delimitar a área de influência da ocorrência;
- Traçar similitude entre a composição química do solo e o conteúdo geoquímico das rochas da região de estudo.

3 JUSTIFICATIVA

A mineração sempre fez parte da história da humanidade e a partir dela foi possível a evolução da humanidade e o desenvolvimento tecnológico. O Brasil é rico em recursos minerais, os quais são usados como ponto estratégico para o crescimento econômico. O país produz 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não-metálicas e 4 energéticas. E essa diversidade de minerais faz com que o país exerça o papel de grande exportador de minério no cenário mundial (DNPM, 2001). Contudo, esses recursos minerais dependem diretamente da pesquisa e prospecção mineral, pois a descoberta de novas ocorrências possibilita e contribui para um crescimento econômico contínuo do país, como o caso do cobre, que auxilia na balança comercial da indústria extrativa mineral.

A prospecção geoquímica é um método fundamental para a descoberta de novos alvos de ocorrências minerais, onde a partir de análises em amostras de solo, rocha, sedimentos de corrente, água e vegetação, é possível o reconhecimento dos halos de dispersão dos elementos químicos oriundos de depósitos minerais. As análises geoquímicas geram bancos de dados extensos e com o auxílio das técnicas estatísticas e tecnológicas, pode-se gerar mapas geoquímicos. Os mapas geoquímicos permitem a interpretação e a correlação através das concentrações anômalas de elementos químicos na área do estudo. Esses métodos vêm cada vez mais sendo utilizados devido ao seu baixo custo e a facilidade de integração com outros métodos de pesquisa mineral.

Além disso, considera-se uma importante zona com boas exposições de rochas metamórficas com evidências nítidas de mineralização em superfície. A área foi alvo de pesquisas recentes feita por Borges (2020), onde a ocorrência mineral foi analisada com a utilização de técnicas de prospecção geoquímica a partir de coleta/análise de amostras de rocha, estudos geofísicos eletromagnéticos e mapeamento geológico. Com isso será possível traçar a similitude entre a composição química do solo e o conteúdo geoquímico das rochas.

Apesar de pouco estudada, a área apresenta indícios de que possa vir a ser uma região importante do ponto de vista prospectivo, devido ao potencial econômico, assim representando uma importante fonte de empregos ao município. Vale evidenciar que a área está localizada próxima a zona urbana, facilitando o deslocamento e acesso para a coleta de dados.

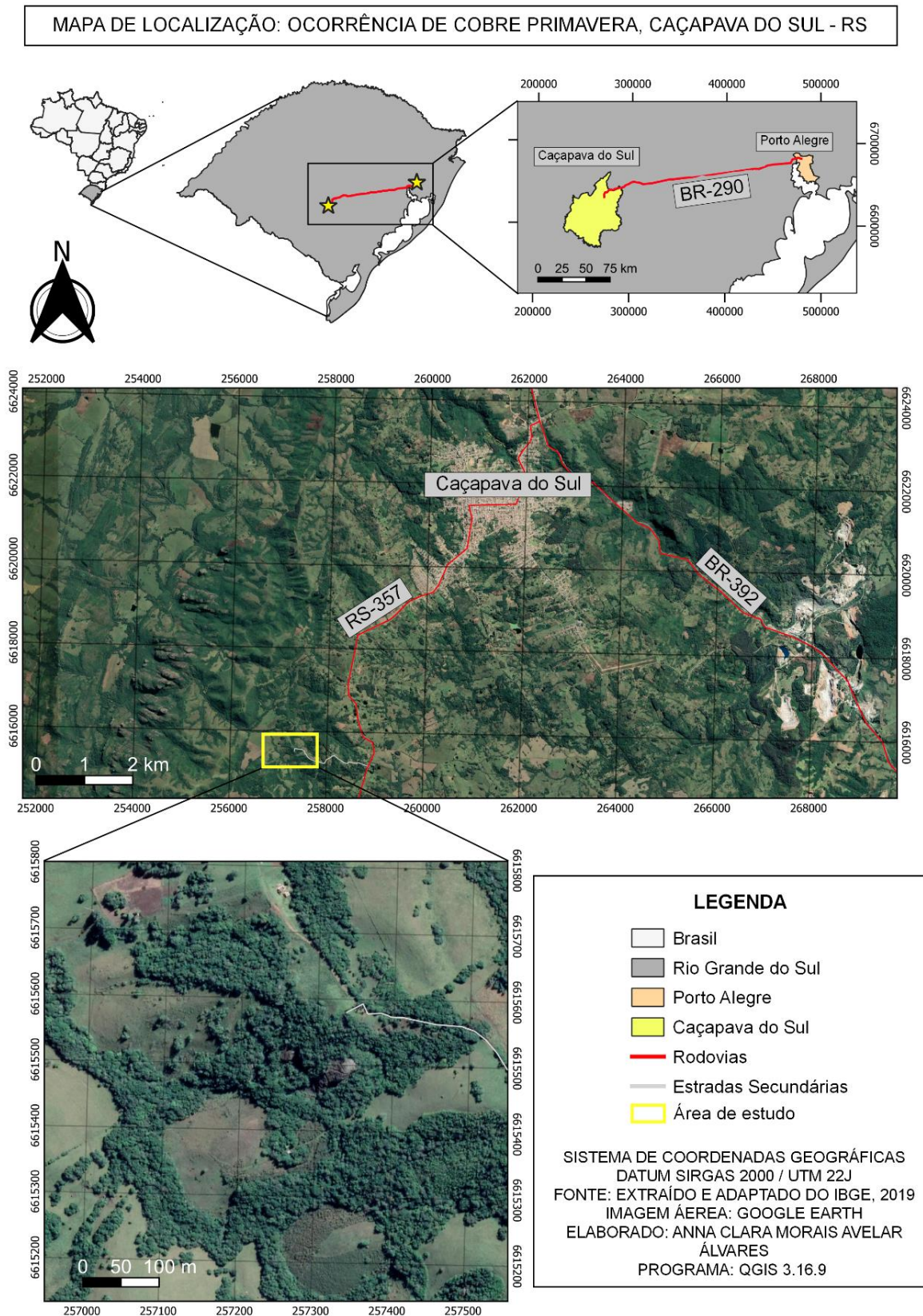
Este estudo além de contribuir para um maior detalhamento dos solos do entorno da ocorrência Primavera, servirá também, como base para futuros trabalhos que visem o conhecimento baseado na mobilidade dos elementos químicos e dos minerais.

4 ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo se encontra no município de Caçapava do Sul (Figura 1), no estado do Rio Grande do Sul, a cerca de 270 km de Porto Alegre, com acesso pela BR-290, sentido oeste, percorrendo cerca de 250 quilômetros até o entroncamento desta com a BR-392, seguindo sentido sul na BR-392 até Caçapava do Sul. Partindo do centro de Caçapava do Sul, o acesso se dá via rodovia RS-357, no sentido de Lavras do Sul, percorrendo cerca de 7 km, até a “Vila do Segredo”, seguindo mais 1 km até a Vila Primavera, entrando a oeste em uma estrada vicinal, onde percorre-se cerca de 1,8 km até a entrada a sul da ocorrência.

A área de estudo tem perímetro de 1750 metros e 130 mil metros quadrados, com coordenada central (UTM-22J): 257341 m E, 6615496 m S. Está inserida na carta topográfica do exército Arroio Santa Bárbara (SH.22-Y-A-IV-2).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo: Ocorrência de Cobre Primavera, Caçapava do Sul – RS.

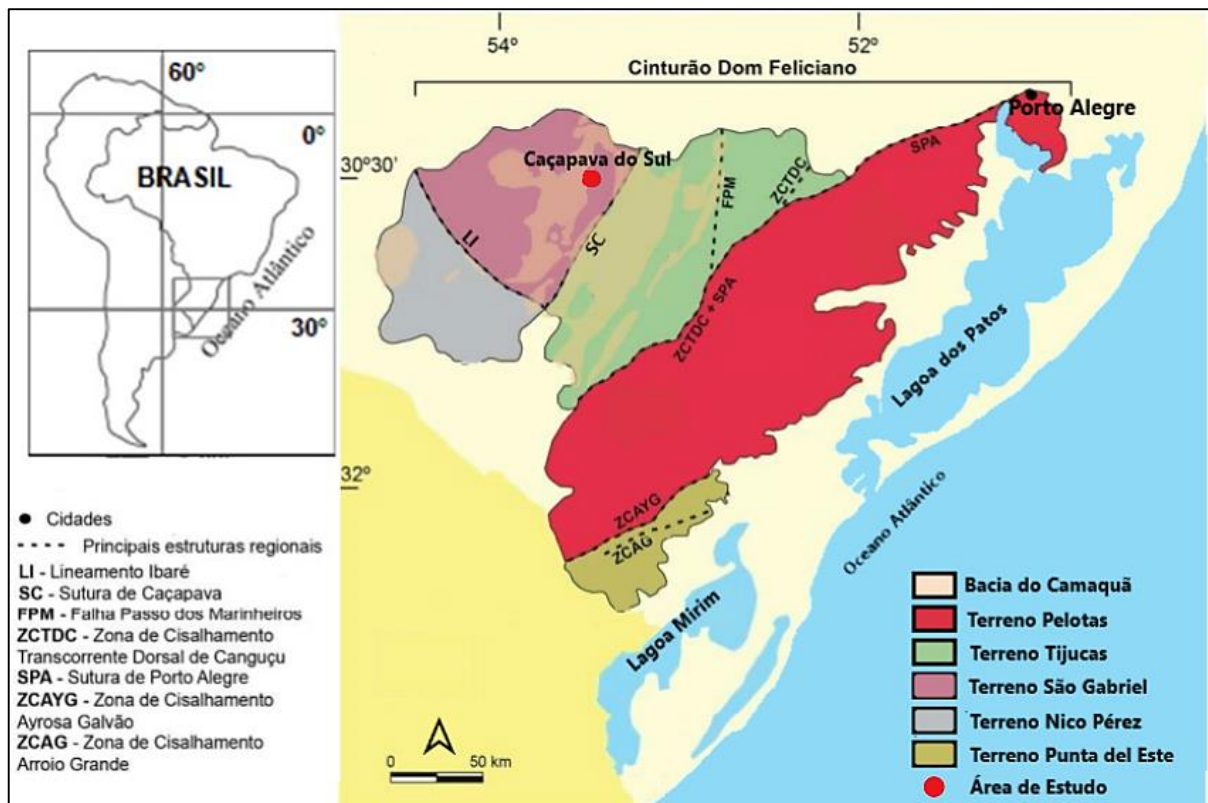


Fonte: Autora. Extraído e adaptado do IBGE, 2019.

4.1 Geologia Regional

Caçapava do Sul está inserida no contexto geológico do Escudo Sul-riograndense (ESrg), o qual possui uma área de cerca de 65.000 km², e representa a porção mais ao sul da Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1981; HARTMANN et al., 2007). O escudo apresenta cinco unidades geológicas (Figura 2) que podem ser individualizadas por lineamentos regionais ou zonas de cisalhamento, sendo, a oeste, a unidade paleoproterozoica, o Terreno Nico Pérez, e a leste o Terreno São Gabriel, Tijucas, Pelotas, e o Terreno Punta del Este, os quais juntos constituem o Cinturão Dom Feliciano (KOESTER et al., 2021).

Figura 2 - Mapa Geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul-riograndense.



Fonte: Extraído e adaptado de Koester et al. (2021).

A formação do ESrg teria ocorrido inicialmente no ciclo de idade paleoproterozoica (2,26 - 2,00 Ga) e continuado durante o ciclo neoproterozoico, no Ciclo Brasileiro/Pan Africano (900 - 535 Ma), onde ocorreu a colisão entre os crátons La Plata e Kalahari, gerando a porção Ocidental do Gondwana. O ESrg é composto por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, que apresentam idades vinculadas

aos estágios pré, sin e pós colisional da Orogênese Brasileira/Pan Africana no neoproterozoico (HARTMANN et al., 2007). A área de estudo está inserida no contexto geotectônico do Terreno São Gabriel.

4.1.1 Terreno São Gabriel

O Terreno São Gabriel (TSG) está localizado no centro do ESrg, e é delimitado a sudoeste pelo Lineamento de Ibaré e a sudeste pela sutura de Caçapava do Sul (COSTA, 1997; HARTMANN et al., 2007; KOESTER et al., 2021). O TSG é formado por associações petrotectônicas formadas durante o evento acrescionário da Orogenia Brasileira, composto por relictos de sequências ofiolíticas, duas sequências de arcos juvenis intraoceânicos e rochas metavulcanossedimentares de idade neoproterozoica, em que os principais processos magmáticos e deformacionais ocorreram entre 850-700 Ma. Estas rochas estão cobertas por sequências vulcânicas e sedimentares da Bacia do Camaquã, intrudidas por granitos pós-tectônicos (CHEMALE JR., 2000; KOESTER et al., 2021). As principais unidades do TSG são o Complexo Cambaí, Complexo Palma, Complexo Bossoroca e o Complexo Passo Feio.

O Complexo Cambaí é constituído por rochas plutônicas, metadioritos, metatonalitos e metatrondhjemitos, que são truncadas por diversos plútons de dioritos a granodioritos, veios de trondhjemitos e pegmatitos com composição quartzo-feldspática (BICCA, 2013).

O Complexo Palma é composto por rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas, que são intercaladas com xisto e paragneisses pelíticos e quartzíticos. Já o Complexo Bossoroca é constituído por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas metamorfizadas (BICCA, 2013).

O Complexo Metamórfico Passo Feio representa as rochas da área de estudo. De acordo com Remus et al. (2000), o complexo é composto por uma sucessão vulcanossedimentar metamorfizada sob fácies anfíbolito inferior.

4.2 Geologia Local

4.2.1 Complexo Metamórfico Passo Feio

O Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) está inserido na porção central do ESrg e representa as rochas da área de estudo (Figura 3). O complexo apresenta ocorrência restrita no domínio oeste do ESrg, contornando os granitos do Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS). As rochas foram datadas por Soliani Jr (1986) com idades de K-Ar entre 666-556 Ma.

Os primeiros trabalhos de mapeamento geológico nesta unidade foram feitos por Ribeiro et al. (1966) e Ribeiro (1970) que definiram os metassedimentos como de origem clástica e incluem o Cinturão Metamórfico Passo Feio na Formação Vacacaí.

O CMPF é composto por rochas metamórficas com estrutura antiformal mergulhante para noroeste, onde a alternância dos tipos litológicos ocorre na forma de bandas. É constituído por uma sucessão vulcanossedimentar metamorfizada neoproterozoica, com predomínio de fácies anfibolito inferior, que compreende ardósias, filitos, xistos pelíticos, xistos gráficasos, mármore, quartzitos, metaconglomerados, rochas cálcio-silicáticas metamorfizadas na fácies xisto verde a anfibolito inferior que ocorreu durante o metamorfismo regional da Orogênese Brasileira (RIBEIRO et al., 1966; BITENCOURT, 1983; REMUS et al, 2000).

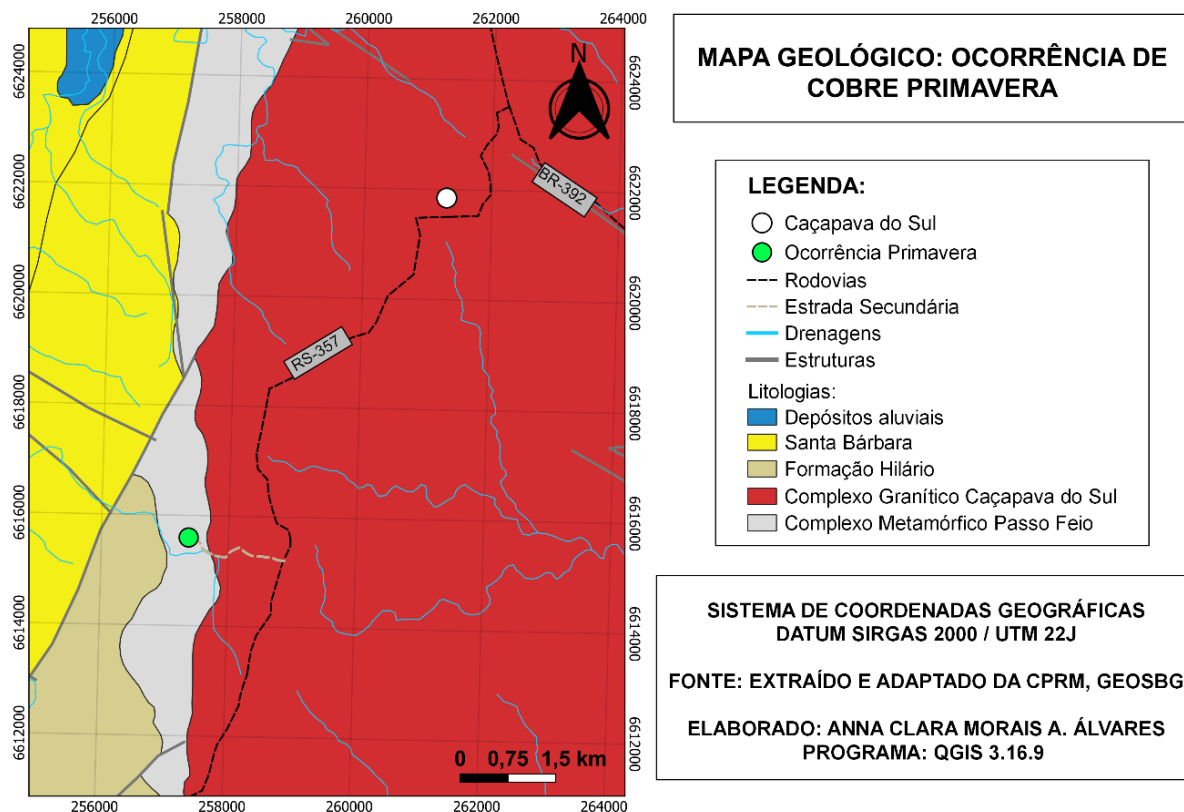
Estas rochas apresentam registro de dois eventos metamórficos regionais M1 e M2 e duas fases deformacionais, D1 e D2, no qual o evento metamórfico M1 é o mais antigo e está associado a fase deformacional D1, onde o primeiro atingiu a fácies anfibolito. Já o evento metamórfico M2 é mais jovem e está associado à fase deformacional D2, em que configura um evento retrometamórfico atingindo a fácies xisto verde que se encontra atualmente (RIBEIRO et al., 1966; BITENCOURT, 1983).

Geotectonicamente o complexo foi considerado por Fragoso-Cesar (1991) como parte de uma sequência de margem passiva e por Fernandes et al. (1992) como parte de uma sequência de retro-arco.

A partir de uma datação U-Pb via SHRIMP em zircões detríticos de uma amostra feita por Remus et al. (2000), determinaram que o padrão de proveniência inclui populações de idades Arqueana, Paleoproterozoica e Neoproterozoica, concluindo, portanto, que o complexo deriva de diversas fontes continentais. Porém, concluir a proveniência sedimentar baseada em análise pontual de apenas uma

amostra não é suficiente. Mas de acordo com Saalman et al. (2005), o CMPF ainda é mal definido, sendo composto por rochas que não constituem uma única sequência estratigráfica, e sim por associações de diferentes idades.

Figura 3 - Mapa geológico: ocorrência de Cobre Primavera, Caçapava do Sul, RS.



Fonte: Autora. Extraído e adaptado da CPRM, GEOSBG (RAMGRAB et al., 2004).

4.3 Província Cuprífera de Caçapava do Sul

A Província Cuprífera do ESrg, na região de Caçapava do Sul, localizada na borda leste do Terreno São Gabriel, contém a maior parte das ocorrências conhecidas de cobre, chumbo e zinco do estado, mais especificamente na região de Minas do Camaquã. As Minas do Camaquã apresentam um extenso histórico em relação à exploração mineral, considerado o maior distrito mineiro e maior produtor de cobre do país no século passado, em que a operação durou de 1870 a 1996 (HARRES, 2000).

Os depósitos de metais base foram gerados durante o Ciclo Brasileiro no decorrer de dois eventos diferentes, associados a magmatismo e metamorfismo (594 e 562 Ma). Os metais foram derivados de fontes relacionadas à crosta juvenil e ao

embasamento antigo, onde os principais controles estruturais para a geração dos depósitos de maior expressão são de direção E-W e NW (REMUS, 1999).

Os depósitos de cobre de Minas do Camaquã são os principais depósitos na província e são hospedados nas rochas do Grupo Santa Bárbara. Algumas ocorrências minerais e pequenos depósitos da província, que estão espacialmente relacionados ao CGCS, estão hospedados em rochas metamórficas do CMPF (REMUS et al., 2000).

As ocorrências de cobre do CMPF se formaram há 562 Ma, sendo associadas à intrusão do Granito Caçapava do Sul e classificadas como depósitos epigenéticos (REMUS, 1999). Estudos isotópicos de Pb e S e sua associação espacial indicaram que a gênese da mineralização pode estar relacionada a percolação de fluidos magmáticos da intrusão do CGCS, causando a remobilização de sulfetos pré-existentes das rochas do CMPF (REMUS, 1999; REMUS et al., 2000).

Os depósitos e ocorrências do CMPF possuem potencial econômico relativamente menor do que os das Minas do Camaquã. O metamorfismo regional que ocorreu há 700 Ma reduziu a porosidade, permeabilidade e a quantidade de água disponível nos poros das rochas do CMPF. Conseqüentemente, as condições de lixiviação dos metais e percolação dos fluidos hidrotermais durante a intrusão do CGCS foram reduzidas (REMUS, 1999).

4.3.1 Ocorrência de Cobre Primavera

A ocorrência de Cobre Primavera está localizada a cerca de 10 km do centro de Caçapava do Sul. Está hospedada nas rochas metamórficas do CMPF, próximo à borda oeste do Granito Caçapava do Sul.

Localiza-se na intersecção da Falha dos Andradas/Santa Bárbara, com direção N-S e mergulho 70°W, com outra falha de direção N55°W e mergulho 40°SW. O minério da ocorrência é composto por calcocita, crisocola e malaquita disseminados em xistos brechados e fraturados, ocorrendo na forma de bolsões que atingem teores de até 4% de Cu (RIBEIRO et al., 1978).

Os metais do CMPF foram derivados do embasamento antigo, mas com importante contribuição das rochas vulcanossedimentares do CMPF, que contém componentes pré-Brasilianos e Brasilianos. O enxofre desses depósitos e ocorrências são de origem mista - magmática e sedimentar (REMUS, 1999).

De acordo com Borges (2020), a ocorrência de cobre Primavera apresenta uma assinatura geoquímica de cobre, onde os resultados das análises geoquímicas das rochas apresentaram um teor médio (\bar{X}) elevado de cobre (\bar{X} = 10000 ppm), com a presença de altos teores de Ni (\bar{X} = 109,4 ppm), Zn (\bar{X} = 88 ppm), Co (\bar{X} = 58,43 ppm), Mo (\bar{X} = 2,8 ppm) e Au (\bar{X} = 33,6 ppb), demonstrando fortes anomalias positivas para estes elementos, e um baixo teor de Rb (\bar{X} = 40,17 ppm), indicando uma anomalia negativa de Rb em toda região da área de ocorrência.

4.4 Classificação local dos solos

Com base no mapa de solos do Brasil (DOS SANTOS et al., 2011), a área de estudo apresenta três tipos de solo, Neossolos Litólicos Eutróficos, Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos e Chernossolos Argilúvicos Órticos (Figura 4).

Os Neossolos Litólicos Eutróficos são considerados solos pouco evoluídos pedogeneticamente e caracterizados pela ausência do horizonte B, ou seja, um solo raso sobre a rocha, conseqüentemente na maioria dos casos é possível amostrar o horizonte C facilmente (SANTOS, 2014). Os Neossolos Litólicos apresentam seqüência de horizontes tipo A-C-R, A-R, e podem ser classificados no terceiro nível categórico como Eutróficos, sendo solos de alta fertilidade, conforme definido pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006).

As características morfológicas desses solos se restringem praticamente ao horizonte A, o qual varia, em média, de 15 a 60 cm de espessura, contudo a cor, textura e estrutura, dependem dos tipos de rochas que deram origem ao solo (SILVA & SILVA, 1997b). Além disso, são solos que apresentam heterogeneidade em relação aos atributos físicos, químicos e mineralógicos (BOGNOLA et al. 2002).

Ocorrem geralmente em locais com topografia acidentada, onde há muitos afloramentos de rochas, em encostas de morros (MARQUES et al., 2007). São solos jovens, sendo os primeiros a serem formados juntamente com os cambissolos, os quais apresentam baixas taxas de lixiviação e formação incipiente de oxi-hidróxidos de Fe e de minerais de argila secundários, mas também contém grande quantidade de minerais primários (SANTOS, 2014).

Os Cambissolos são solos com desenvolvimento incipiente, apresentando pedogênese pouco avançada, caracterizados pela pouca diferenciação dos horizontes nas características morfológicas, principalmente pela cor e estrutura,

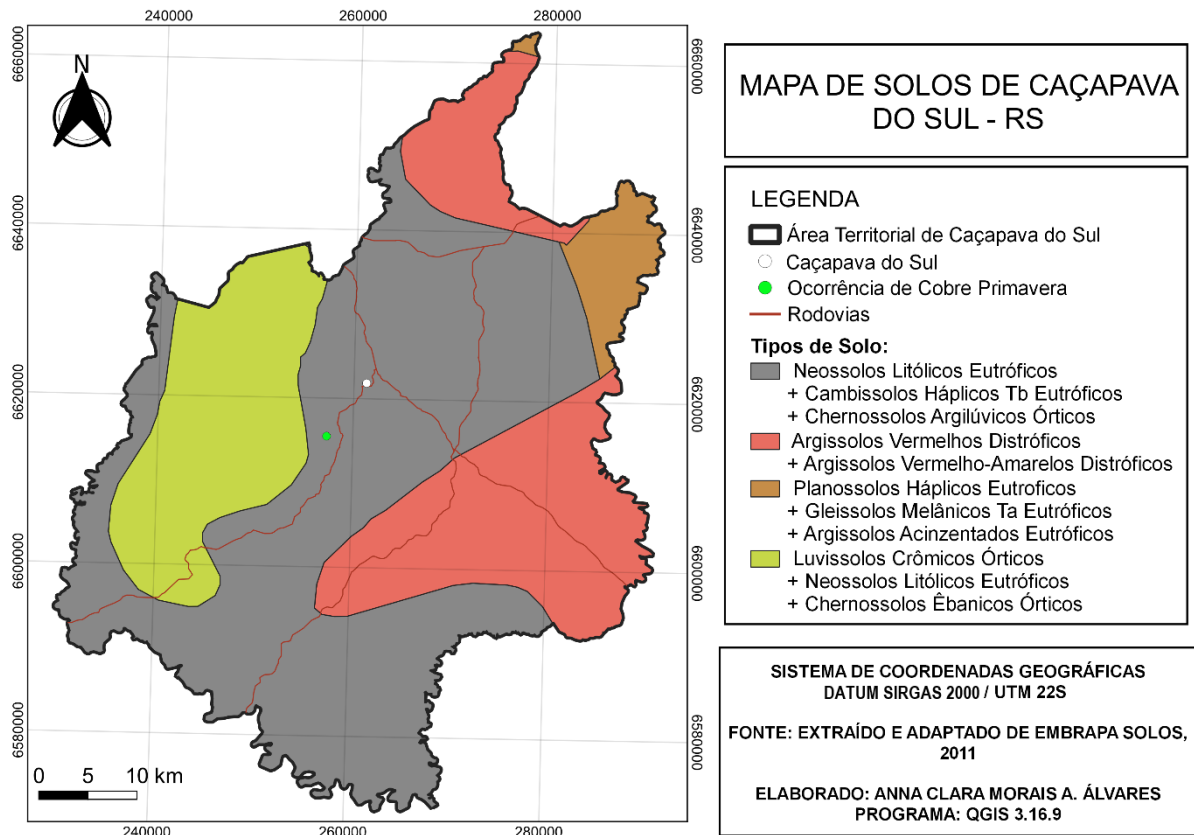
podendo apresentar pequena variação do horizonte A para B. Este grupo de solos apresenta horizontes A, C e B incipiente, com profundidades pequenas, elevado teor de minerais primários, e presença significativa de fragmentos de rocha no solo (SANTOS, 2014).

Ocorrem geralmente em relevos ondulados ou montanhosos, podendo, no entanto, ocorrer em áreas planas. Os Cambissolos Háplicos podem ser classificados no terceiro nível categórico do SiBCS como Tb Eutróficos sendo solos com argila de baixa atividade e alta fertilidade (EMBRAPA, 2006).

Geralmente os Cambissolos e Neossolos Litólicos apresentam pouca estabilidade dos seus agregados por conta da sua granulometria, pois possuem predominância de areia, silte e baixa quantidade de material cimentante como a matéria orgânica e argila, então esses solos são mais propensos à erosão (PEREIRA, 2014).

Já os Chernossolos são solos caracterizados pelo desenvolvimento não muito avançado, pouco profundo e com horizonte superficial A relativamente espesso, escuro e rico em carbono orgânico, sobre horizonte B textural avermelhado, com boa agregação e presença de argilominerais. Ocorrem geralmente em relevo ondulado ou fortemente ondulado. Os Chernossolos Argilúvicos são classificados no segundo nível categórico como um solo com B textural ou nítido abaixo do A chernozêmico, e no terceiro nível categórico como órtico, sendo solos que não apresentam restrição ao uso e manejo, segundo critérios definidos pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006).

Figura 4 - Mapa de solos de Caçapava do Sul - RS.



Fonte: Autora. Extraído e adaptado de EMBRAPA Solos (DOS SANTOS, et al., 2011).

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Fundamentos de Geoquímica

A Geoquímica é uma ciência que estuda a disponibilidade, distribuição e a migração dos elementos químicos e seus isótopos, utilizando os princípios e as leis da química para solucionar problemas de geologia, tanto em ambiente profundo com alta pressão e temperatura, como em ambiente superficial com baixa pressão e temperatura, em que ocorrem os processos de intemperismo e erosão (SANTOS, 2014).

Os processos de movimentação dos elementos químicos entre o manto, a crosta, a biosfera, a hidrosfera e a atmosfera são denominados de ciclos geoquímicos. A geoquímica estuda de forma qualitativa e quantitativa os materiais que compõem o interior e a superfície da Terra, como rochas, solos, sedimentos e água (CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

5.2 Ciclos e Ambientes Geoquímicos

Os ciclos geoquímicos promovem as interações entre o manto, a crosta, a biosfera, a hidrosfera e a atmosfera, onde cada um desenvolve uma composição química diferente. Forças físicas e químicas, como a pressão e a temperatura, agem sobre os ambientes geoquímicos, que juntamente com a abundância relativa dos elementos no local, estabelece quais minerais serão formados e quais serão estáveis no ambiente geoquímico, que pode ser primário ou secundário (PEREIRA, 2003; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

O ambiente primário representa zonas com alta pressão e temperatura, com pouca circulação de fluidos e pouco oxigênio livre que vêm de zonas abaixo dos níveis inferiores da circulação de água meteóricas até zonas do interior da crosta, denominado como ambiente endógeno (PEREIRA, 2003; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

Já o ambiente secundário corresponde ao ambiente exógeno, que são zonas com baixa pressão e temperatura, com circulação de fluidos, oxigênio e dióxido de carbono em abundância. São zonas onde ocorrem os processos de intemperismo, erosão e sedimentação. Os minerais que são formados nos ambientes primários, em geral, são instáveis no ambiente secundário, ocasionando a alteração dos minerais, possibilitando a liberação dos elementos que são transportados. A partir desses processos de alteração e dispersão dos minerais é possível a aplicação de métodos geoquímicos na busca das fontes primárias e secundárias das ocorrências minerais (PEREIRA, 2003; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

5.3 Abundância dos Elementos Químicos

Atualmente existem 118 elementos químicos conhecidos, porém os minerais mais comuns da Terra são constituídos por cerca de 15 elementos químicos principais (KLEIN & DUTROW, 2009). Apesar de não ser possível estabelecer diretamente a composição média da Terra inteira, foi proposta a unidade Clarke, que estabelece a abundância média dos elementos na crosta terrestre (concentração normal) (Tabela 1).

Tabela 1- Abundância crustal de alguns elementos químicos em parte por milhão.

Elemento (Símbolo)	Abundância em parte por milhão (ppm)	Elemento (Símbolo)	Abundância em parte por milhão (ppm)
Bromo (Br)	1,8	Mercúrio (Hg)	0,02
Cádmio (Cd)	0,1	Molibdênio (Mo)	1,5
Cálcio (Ca)	33000	Nióbio (Nb)	20
Carbono (C)	230	Níquel (Ni)	75
Cério (Ce)	81	Ouro (Au)	0,003
Césio (Cs)	3	Oxigênio (O)	473000
Chumbo (Pb)	10	Paládio (Pd)	0,01
Cloro (Cl)	130	Prata (Ag)	0,05
Cobalto (Co)	25	Platina (Pt)	0,0005
Cobre (Cu)	50	Potássio (K)	25000
Cromo (Cr)	100	Rênio (Re)	0,0006
Escândio (Sc)	13	Rubídio (Rb)	150
Estanho (Sn)	80	Selênio (Se)	0,1
Estrôncio (Sr)	300	Silício (Si)	291000
Ferro (Fe)	46500	Sódio (Na)	25000
Flúor (F)	600	Tálio (Tl)	0,45
Fósforo (P)	900	Tântalo (Ta)	2
Gálio (Ga)	26	Telúrio (Te)	0,002
Germânio (Ge)	2	Titânio (Ti)	4400

Háfnio (Hf)	3	Tório (Th)	10
Índio (In)	0,1	Tungstênio (W)	1
Iodo (I)	0,15	Urânio (U)	2,5
Lantânio (La)	25	Vanádio (V)	150
Lítio (Li)	30	Zinco (Zn)	2
Magnésio (Mg)	17000	Zircônio (Zr)	150
Manganês (Mn)	1000		

Fonte: Rose et al., (1979), citado por Cavalcanti & Rocha, (2010).

Os elementos químicos, em relação a abundância na crosta terrestre, são classificados em: elementos maiores, aqueles que apresentam abundância média nos materiais crustais, ou seja, teores acima de 1%; elementos menores, que possuem teores entre 0,1 e 1%; elementos traço, que são representados na forma de ppm e possuem teores menores que 0,1% (LICHT, 2001).

5.4 Classificação dos Elementos Químicos

Dependendo das condições de pressão, temperatura e oxigênio livre do ambiente em que os elementos químicos estão inseridos, os comportamentos de distribuição e migração são determinados por suas afinidades geoquímicas. A classificação geoquímica dos elementos, proposta por Goldschmidt (1937), agrupa os elementos de acordo com suas afinidades geoquímicas, sendo elas: siderófilos, calcófilos, litófilos e atmófilos (Figura 5).

Figura 5 - Classificação de Goldschmidt para elementos químicos.

GRUPO	CLASSIFICAÇÃO DE GOLDSCHMIDT																							
	IA																	VIIIA						
1	H																	He						
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar								
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	Fr	Ra	Ac																					
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
				Ac	Th	Pa	U	Nu	Pu															

 Litófilo	 Siderófilo	 Calcófilo	 Atmófilo
---	--	---	---

Fonte: White, (2005) citado por Santos, (2014).

Os siderófilos estão concentrados no núcleo da Terra. Apresentam afinidade pela fase metálica e grande afinidade geoquímica com o ferro, tanto em fase sólida quanto fundida. Os calcófilos estão concentrados no manto e possuem afinidade pela fase sulfetada. Os litófilos se concentram na crosta terrestre e possuem afinidade com os silicatos. Já os atmófilos se concentram como gases na atmosfera, mas podem ser encontrados na hidrosfera (LICHT, 2001).

5.5 Dispersão Geoquímica

Os minerais que são formados em ambientes primários, em geral, são instáveis no ambiente secundário e sofrem alterações que ocasionam a liberação de elementos químicos que, por fim, são transportados e redistribuídos. Esses conjuntos de processos químicos, mecânicos e bioquímicos são denominados de dispersão (CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

Segundo Pereira (2003), existem dois tipos de dispersão geoquímica: a dispersão primária, que está relacionada aos processos de formação da concentração mineral, como a alteração hidrotermal e a dispersão secundária, que está relacionada aos processos de alteração superficial e geomorfológicos. Esses são de ordem

química ou mecânica, fazendo com que aconteça a desestabilização de uma concentração mineral na zona de oxidação.

O processo de dispersão dos elementos torna os métodos geoquímicos aplicáveis nas buscas de depósitos minerais, pois geram os halos geoquímicos (CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

5.6 Mobilidade dos Elementos

A forma como um elemento se dispersa em um meio natural específico, sendo ela com maior ou menor facilidade, é nomeada como mobilidade geoquímica (PEREIRA, 2003). A mobilidade geoquímica depende dos fatores químicos, físicos, mecânicos e do seu potencial iônico obtido pelo quociente da carga iônica pelo raio iônico (LEVINSON, 1974).

Elementos com baixo potencial iônico como o Cu, Pb, Zn, Cd e Ag são solúveis como simples cátions. Elementos com médio potencial iônico, como Ti e Sn, são imóveis devido à baixa solubilidade e a forte tendência à adsorção em superfícies. Já os elementos com alto potencial iônico se combinam com o oxigênio e formam oxianions solúveis (ROSE et al, 1979, citado por LICHT, 2001).

A mobilidade em ambiente primário é alta e depende dos fatores físicos, como, por exemplo, a viscosidade do magma. Já a mobilidade em ambiente secundário depende dos fatores mecânicos, como, por exemplo, o espaço dos poros, tamanho e densidade dos grãos, etc (PEREIRA, 2003).

Um mesmo elemento pode apresentar mobilidade diferente de acordo com as condições de Eh (potencial de oxirredução) e pH (potencial hidrogeniônico) do ambiente. Então, elementos que estão associados em ambiente primário podem apresentar mobilidades diferentes no ambiente secundário (Figura 6). Por exemplo, molibdênio associado a cobre em depósitos cupríferos, servirá de farejador de Cu, pois o cobre apresenta maior dispersão em ambiente secundário. O cobre tem a tendência a precipitar em meio básico, enquanto que a mobilidade do molibdênio tende a aumentar (BARASKO, 1967).

Figura 6 - Mobilidade relativa dos elementos químicos em ambiente secundário.

MOBILIDADE RELATIVA	CONDIÇÕES AMBIENTAIS			
	OXIDANTE	ÁCIDO	NEUTRO A ALCALINO	REDUTOR
MUITO ALTA	Cl, I, Br S, B	Cl, I, Br S, B	Cl, I, Br S, B Mo, V, U, Se, Re	Cl, I, Br
ALTA	Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn	Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra
MÉDIA	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au As, Cd	As, Cd	As, Cd	
BAIXA	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn	Si, P, K Fe, Mn
MUITO BAIXA ^ IMÓVEL	Fe, Mn Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, Terras Raras	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, Terras Raras	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, Terras Raras Zn Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, Terras Raras S, B Mo, V, U, Se, Re Zn Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au As, Cd Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl

Fonte: Levinson, 1974.

De acordo com a mobilidade geoquímica, os elementos podem ser classificados como elementos móveis ou elementos imóveis. Os elementos móveis, como o Zn, Pb e Cu, são elementos que apresentam facilidade para serem solubilizados e são carregados em solução nas águas subterrâneas, com isso possibilitam a dispersão química. Contudo, para que ocorra a mobilidade de metais em soluções é necessário um Eh relativamente negativo ou condições redutoras e um

pH ácido, o qual, próximo a depósitos sulfetados, é favorecido. Nessas condições, em subsuperfície, a maioria dos metais apresentam solubilidade alta, porém em ambiente superficial não, onde são adsorvidos novamente pelos sedimentos finos de corrente ou precipitados juntamente com óxidos, como o ferro e o manganês (PEREIRA, 2003).

Os elementos imóveis, como Ti, Cr, Ta, Nb e Sn são elementos que apresentam baixa solubilidade, por isso a dispersão ocorre através da desagregação e transporte dos minerais que têm esses elementos. Sendo assim, a dispersão é de ordem mecânica. Há minerais que são mais resistentes e são transportados de forma mecânica por longas distâncias. No entanto, há minerais que rapidamente são desagregados pela ação química natural ou abrasão resultante de transporte de corrente (PEREIRA, 2003).

5.7 Associações Geoquímicas

Determinados elementos químicos quando se encontram em condições naturais agrupam-se conforme suas regras de comportamento e afinidade para formarem ligações químicas. Elementos que apresentam semelhança na mobilidade geoquímica tendem a se agruparem em um mesmo tipo de depósito, mas isso depende da valência e do raio iônico dos átomos (LICHT, 2001; PEREIRA, 2003; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

Deste modo, a prospecção mineral estuda o elemento mais abundante associado com aquele mais raro ou que apresenta dispersão mais limitada. Este é o elemento farejador (*pathfinder*) (Tabela 2), que apresenta anomalia e halos de dispersão que são mais facilmente detectáveis do que o elemento procurado que contém valor econômico (PEREIRA, 2003).

Tabela 2 - Elementos indicadores e farejadores de mineralizações.

Tipo de depósito	Elementos presentes na mineralização	
	Indicadores	Farejadores
Cromita tipo Bushveld	Cr	Ni, Fe, Mg
Magnetita estratificada tipo Bushveld	Fe	V, Ti, P
Sulfetos Cu-Ni tipo Sudbury	Cu, Ni, S	Pt, Co, As, Au
Pt-Ni-Co estratificadas tipo Bushveld	Pt, Ni, Cu	Cr, Co, S
Óxidos Fe-Ti tipo Allard Lake	Fe, Ti	P
Carbonatitos a Nb-Ta (Oka)	Nb, Ta	Na, Zr, P
Pegmatitos de metais raros	Be, Li, Cs, Rb	B, U, Th, TR
Cobre pórfiro (Bingham)	Cu, S	Mo, Au, Ag, Re, As, Pb, Zn, K
Cobre pórfiro (Climax)	Mo, S	W, Sn, F, Cu
Skarn a magnetita (Iron Springs)	Fe	Cu, Co, S
Skarn a cobre (Yerington)	Cu, Fe, S	Au, Ag
Skarn a Pb-Zn (Hanover)	Pb, Zn, S	Cu, Co
Skarn a W-Mo-Sn (Bishop)	W, Mo, Sn	F, S, Cu, Be, Bi
Veios de metais-base	Pb, Zn, Cu, S	Ag, Au, As, Sb, Mn
Graisens a Sn-W	Sn, W	Cu, Mo, Bi, Li, Rb, Si, Cs, Re, F, B
Veio Sn-sulfeto	Sn, S	Cu, Pb, Zn, Ag, Sb
Veio Co-Ni-Ag (Cobalt)	Co, Ni, Ag, S	As, Sb, Bi, U
Metais preciosos epitermais	Au, Ag	Sb, As, Hg, Te, Se, S, U
Mercúrio	Hg, S	Sb, As
Veios uraníferos	U	Mo, Pb, F
Cobre em basalto (Lake Superior)	Cu	Ag, As, S
Sulfeto maciço de Cu vulcanogênico	Cu, S	Zn, Au
Sulfeto maciço de Cu-Zn-Pb vulcanogênico	Zn, Pb, Cu, S	Ag, Ba, Au, As
Formações ferríferas ricas em Au-As	Au, As, S	Sb
Pb-Zn tipo Mississippi Valley	Zn, Pb, S	Ba, F, Cd, Cu, Ni, Co, Hg
Fluorita tipo Mississippi Valley	F	Ba, Pb, Zn
Urânio tipo arenito	U	Se, Mo, V, Cu, Pb
Cu em red-beds	Cu, S	Ag, Pb
Urânio em calcrete	U	V
Folhelho cuprífero (Kupferschiefer)	Cu, S	Ag, Zn, Pb, Co, Ni, Cd, Hg
Arenito cuprífero	Cu, S	Ag, Co, Ni

Fonte: Rose et al., 1979.

5.8 Prospecção Geoquímica

A prospecção geoquímica é uma subdivisão da geoquímica que busca medir sistematicamente o conteúdo de elementos traço nos diversos materiais. O seu objetivo é propiciar descobertas de concentrações anômalas em certos elementos que contrastem com o ambiente que representa o fundo geoquímico ou *background*, para a descoberta de ocorrências minerais (PEREIRA, 2003; CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

A concentração normal dos elementos em escala ampla é denominada de Clarke e em escala de detalhe é chamado de *background*, mas a concentração entre o normal e a anomalia é chamado de Limiar. Entretanto, para se calcular esses intervalos e definir o que é anômalo é preciso definir qual o valor do Clarke e qual o valor considerado normal para o elemento no seu respectivo *Metallotect*. Desta

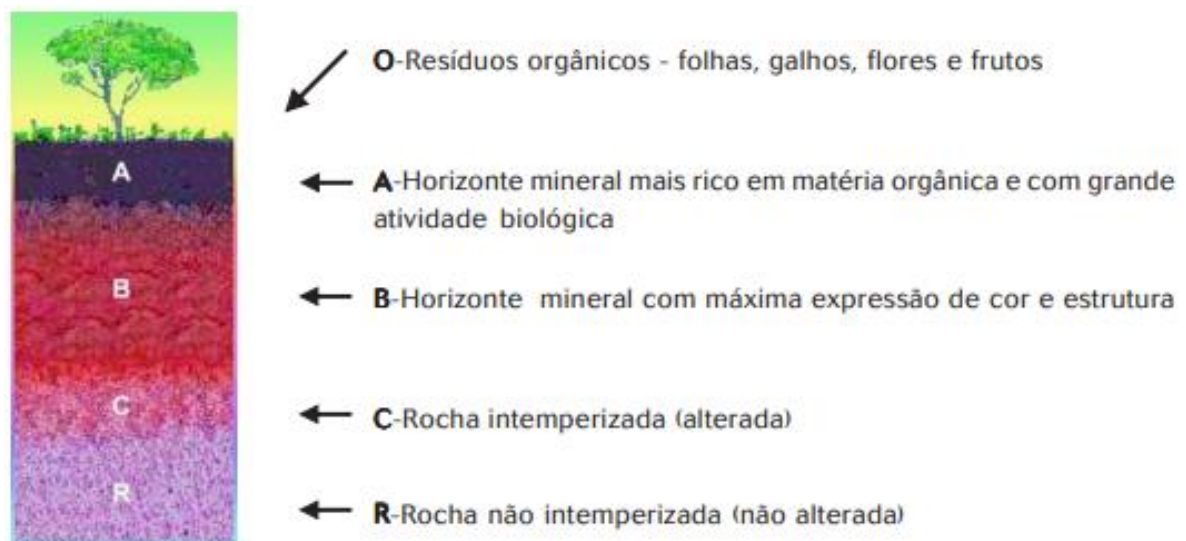
forma, foi definida a afinidade dos elementos químicos com determinados tipos de rochas, para que seu teor, mesmo sendo maior que o teor médio da crosta, não fosse considerado um elemento anômalo e chamado de *Metallotectes* (CAVALCANTI & ROCHA, 2010).

5.9 Geoquímica de Solos

Geoquímica de solo ou Pedogeoquímica é um método de prospecção geoquímica que trabalha com amostragem de solo. Os solos são produtos da ação do intemperismo químico, físico e biológico, e os principais fatores que influenciam no processo de formação dos solos são: clima, circulação de água, relevo, vegetação, Eh, pH, ação biológica e tempo (SANTOS, 2014).

Os solos são divididos em camadas, que são nomeadas de horizontes do solo (Figura 7). Essas camadas variam de espessura da base para o topo, onde a base é mais espessa e o topo mais fino. Os horizontes são denominados pelas letras O, A, B, C e R. O horizonte O é a camada de matéria orgânica, o horizonte A, contém matéria orgânica juntamente com material rochoso, o horizonte B é uma camada intermediária, onde geralmente ocorre interação dos minerais com o clima, o horizonte C é a área de transição entre o solo e a rocha; e o horizonte R é a rocha não intemperizada (DUCHAUFOR, 2012).

Figura 7 - Horizontes do perfil de solo.



Fonte: Lima & Melo, 2007.

As características, como a evolução pedogenética e a composição mineralógica influenciam no contraste das anomalias geoquímicas. Desta forma, os solos mais maduros apresentam contrastes menos pronunciados em relação à mineralização, devido ao intenso intemperismo ocorrido. Já os solos mais imaturos apresentam contrastes mais pronunciados, por terem passado por uma taxa menor de intemperismo (SANTOS, 2014).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo é dividido em três etapas: 1) Pré-Campo; 2) Trabalho de campo e 3) Pós-Campo.

6.1 Pré-Campo

Essa etapa consiste na realização da revisão bibliográfica e produção de um banco de dados a partir de sensoriamento remoto.

6.1.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é responsável pela fundamentação teórica do estudo. Compreende a compilação de dados e informações por meio de consultas a livros, artigos, monografias, teses, periódicos e mapas já publicados sobre o tema da pesquisa.

6.1.2 Sensoriamento Remoto

O uso das técnicas de sensoriamento remoto teve como objetivo obter informações sem o contato direto com o local, onde foi possível o reconhecimento da área por meio de imagens de satélite via o software Google Earth PRO, assim identificando as vias de acesso, a geomorfologia e a topografia do local.

A partir das imagens de satélite foi determinada a quantidade necessária de amostras de solos a serem coletadas, e assim elaborada a malha semirregular de amostragem de solo. Posteriormente, foram elaborados os mapas de localização, geológico e de pontos com o auxílio do software QGis 3.16.9.

6.2 Trabalho de Campo

Foi realizado dois de trabalho de campo, com objetivo o objetivo da realização da amostragem de solo para aquisição de dados para as análises mineralógicas e geoquímicas. Para a execução do campo foram utilizadas imagens de satélite, GPS, bússola e caderneta de campo.

6.2.1 Amostragem de Solo

As coletas de amostras de solo foram realizadas através do auxílio de uma pá de corte (Figura 8), onde em cada ponto foram retiradas a matéria orgânica e posteriormente foram perfurados de 30 a 40cm de profundidade com a pá de corte, e com auxílio de uma pá de plástico, a qual foi esterilizada com álcool entre cada amostragem para que não houvessem contaminações.

Figura 8 - Coleta de solo com auxílio da pá de corte.



Em cada ponto foram retiradas em torno de 500 gramas de solo, que foram acondicionadas em sacos plásticos e devidamente identificadas. Durante o processo de amostragem, a coloração e textura do solo foram anotadas em uma planilha. As amostras foram coletadas com espaçamento médio de 100 metros, totalizando 17 amostras (Figura 9).

Figura 9 - Mapa com pontos de amostragem.



Fonte: Autora.

6.3 Pós-Campo

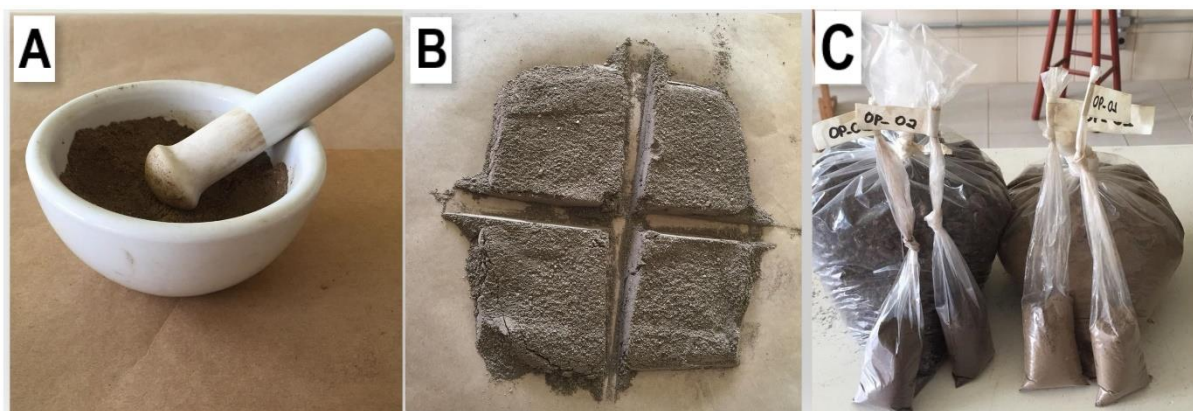
O pós-campo constitui na preparação e realização das análises químicas das amostras e, por fim, a geração de mapas e tabelas para a interpretação dos dados obtidos.

6.3.1 Preparo de Amostras

Após o campo as amostras coletadas passaram por uma secagem natural de três dias em temperatura ambiente de acordo com os critérios da Embrapa (2006). O passo seguinte foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Petrografia da Unipampa,

onde foram feitas a homogeneização com pilão e o quarteamento das amostras. Nessa etapa, foram separadas aproximadamente 30 gramas de cada amostra e depois acondicionadas em sacos plásticos esterilizados e identificados para serem realizadas as análises geoquímicas dos solos (Figura 10). Posteriormente foi feita a descrição macroscópica para determinar a mineralogia das amostras, com o auxílio de Microscópio Estereoscópico Binocular marca Quimis modelo Q724S-2, com 2x e 4x de aumento.

Figura 10 - (A) Procedimento de homogeneização das amostras com auxílio do cadinho de porcelana. (B) Procedimento de quarteamento. (C) Acondicionamento das amostras em sacos plásticos.



Fonte: Autora.

6.3.2 Método de Análise

As amostras foram submetidas a análises através de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF) (Figura 11) no Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios (LATRAM) da Unipampa, para identificação da sua composição química. A partir da técnica de EDXRF é possível a determinação da concentração simultânea ou sequencial de diversos elementos, sem precisar de nenhum tratamento químico, sendo uma técnica rápida e de baixo custo (WASTOWSKI, et al., 2010).

Figura 11 - Equipamento de EDXRF portátil S1 Turbo SDR Bruker.



Fonte: Autora.

Cada amostra de solo foi submetida a leituras em triplicatas, em que o tempo de leitura de cada amostra foi em média 120 segundos. É aconselhado as leituras em triplicatas para que haja uma maior confiabilidade dos resultados, onde os resultados finais são uma média das triplicatas.

Esta técnica identifica os elementos, tanto de modo quantitativo quanto qualitativo. Detecta os raios-x emitidos através de um detector de silício que produz um espectro de intensidade em função da energia a partir da excitação dos átomos dos elementos. Essa intensidade emitida pelos componentes das amostras está associada com a concentração de cada elemento existente nas amostras, onde os resultados das composições das amostras analisadas são organizados em planilhas,

com resultados em porcentagem (KRUMMENAUER, 2017). Os limites detectáveis pelo equipamento se encontram no anexo A.

6.3.3 Geração de Mapas e Tabelas

A partir dos dados gerados por meio da técnica de EDXRF, foram elaboradas tabelas no Microsoft Excel 2007 para efetuar as análises uni e bivariadas e, posteriormente, a confecção de mapas de isolinhas de concentração dos elementos existentes no solo através do Software Surfer®.

6.3.4 Interpretação dos Resultados

Para a interpretação dos dados foi realizada a análise e interpretação dos resultados analíticos, de modo a esclarecer o comportamento geoquímico das amostras de solos e delimitação da área de influência da ocorrência. O uso de métodos estatísticos possibilita uma melhor compreensão do conjunto de dados fazendo com que aumente a confiabilidade da análise. Para isso é feita a análise bivariada com intuito de comparar duas distribuições para medir seu grau de associação.

O parâmetro que calcula esse grau de associação e a relação de dependência entre os elementos químicos é o coeficiente de correlação de Pearson. Através da matriz de correlação é possível calcular sumarizando a relação entre duas variáveis conforme a equação 1:

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum (X_i - M_x)(Y_i - M_y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Onde n é o número de dados, X_i representa o valor da variável X, M_x é a média dos valores da variável X, Y_i representa o valor da variável Y, M_y é a média dos valores da variável Y, σ_x é o desvio padrão de X, e σ_y é o desvio padrão de Y.

O coeficiente de correlação de Pearson (ρ) varia de -1 a 1. O sinal demonstra se a direção da correlação é positiva ou negativa e o valor indica a intensidade da relação entre as variáveis. Uma correlação próxima de 1 ou -1, significa que há um maior grau de dependência estatística entre as variáveis e quanto mais próximo de zero, menor essa relação linear (FIGUEIREDO FILHO & SILVA JÚNIOR, 2009). Dancey e Reidy (2005), classificam os valores como: $\rho = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $\rho =$

0,40 até 0,6 (moderado); $\rho = 0,70$ até 1 (forte) (citado por FIGUEIREDO FILHO & SILVA JÚNIOR, 2009). Portanto, neste estudo, será considerado amostras com alta similitude as que apresentarem coeficiente de correlação acima de 0,70.

7 RESULTADOS

7.1 Características morfológicas do solo

O reconhecimento das classes de solos e suas características morfológicas são de fundamental importância para o entendimento da influência dos processos de intemperismo e pedogênese na dispersão dos elementos químicos, pois, quando utilizada de forma adequada, a geoquímica de solos é um método muito confiável em comparação com outras técnicas de exploração (HAWKES & WEBB, 1962).

Os solos presentes na área são do tipo Neossolos Litólicos, e são considerados solos pouco evoluídos e caracterizados pela ausência do horizonte B, ou seja, um solo raso sobre a rocha (Figura 12), conseqüentemente foi possível amostrar o horizonte C facilmente.

As características morfológicas do solo se restringem ao horizonte A, o qual varia, em média, de 15 a 50 cm de espessura. No apêndice A, encontra-se a tabela com as características morfológicas dos solos amostrados, sendo elas: granulometria, classe do solo, coloração e observações.

As granulometrias das amostras variam de arenoso, arenoso-argiloso e argiloso; A classe do solo em todos os pontos é do tipo Neossolo; Já a coloração, varia de marrom claro a marrom escuro. Em alguns pontos foi possível observar a presença de concreções e fragmentos de rocha na amostra.

A partir das análises mineralógicas foi possível identificar que os principais minerais presentes nas amostras coletada na área eram: quartzo; plagioclásio; piroxênio; calcita; micas; feldspato alcalino; e minerais de coloração esverdeada, de difícil identificação, podendo ser clorita, malaquita e crisocola, conforme descrito por Ribeiro et al. (1978) e Borges (2020).

Figura 12 - Perfil de Neossolo litólico, com o horizonte A em contato direto com a rocha.



Fonte: Autora.

7.2 Geoquímica dos solos

As amostras que foram analisadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva apresentaram uma variedade de 20 elementos químicos que estão presentes na tabela do apêndice B, com os resultados geoquímicos das 17 amostras de solo, em porcentagem. A Tabela 3, exibe as concentrações dos elementos maiores em porcentagem, e a Tabela 4, exibe as concentrações dos elementos menores e traço em ppm.

Os elementos maiores das amostras são Mg, Al, Si, K, Ca, Fe e Ti. Segundo Levinson (1974), Mg e Ca apresentam mobilidade alta em ambiente oxidante, ácido, neutro alcalino e redutor. O Si e o K apresentam mobilidade baixa em ambiente oxidante, ácido, neutro alcalino e redutor. O Fe também apresenta mobilidade baixa, com exceção em ambiente oxidante, que apresenta mobilidade muito baixa a imóvel. Já o Al e o Ti apresentam mobilidade muito baixa a imóvel em todos os ambientes.

Os elementos menores e traço das amostras coletadas são P, S, Cl, Mn, Co, Cu, Zn, Mo, Rh, Cd, Ce, Hf, Th. De acordo com Levinson (1974), o elemento Ce possui mobilidade muito baixa a imóvel em todos os ambientes. Os elementos P, Mn e Th apresentam mobilidade baixa nos ambientes, porém o Mn e o Th possuem mobilidade muito baixa a imóvel em ambiente oxidante.

Os elementos Co e Cd apresentam mobilidade média nos ambientes, no entanto em ambiente redutor, o Cd apresenta mobilidade muito baixa a imóvel. Já os elementos S e Cl apresentam mobilidade muito alta nos ambientes, porém o S, possui mobilidade muito baixa a imóvel em ambiente redutor. O Zn tem mobilidade alta em ambiente oxidante e ácido, e muito baixa a imóvel em ambiente neutro alcalino e redutor (LEVINSON, 1974).

O elemento Cu possui mobilidade média em ambiente oxidante, alta em ambiente ácido e muito baixa a imóvel em ambiente neutro alcalino e redutor. O Mo possui mobilidade alta em ambiente oxidante e ácido, muito alta em ambiente neutro alcalino e muito baixa a imóvel em ambiente redutor (LEVINSON, 1974).

De acordo com Ribeiro et al. (1978), o minério da Ocorrência Primavera é formado por calcocita, crisocola e malaquita disseminadas em xistos (metavulcânicas básicas metamorfizadas) fraturados e brechados, com bolsões formados localmente com teores de até 4% de Cu.

Os principais constituintes dos xistos são minerais filossilicatos (muscovita, biotita, clorita, talco e serpentina), os quais compõem mais de 30% da composição modal da rocha, e menos de 20% de feldspatos (feldspato potássico ou plagioclásio) em sua composição, além de quartzo e minerais acessórios como ilmenita, hematita, pirita, epidoto, titanita e carbonatos. Os xistos derivados de rochas básicas como o basalto podem apresentar minerais como actinolita e albita (WINGE, et al., 2001).

Tabela 3 - Resultados da concentração de Elementos Maiores (em porcentagem).

Amostras (%)	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
OP-01	4,39	10,33	48,57	0,65	0,73	0,54	4,37
OP-02	4,53	13,03	41,30	1,30	0,86	1,33	9,13
OP-03	4,20	9,69	29,63	1,52	1,46	2,22	8,78
OP-04	4,85	10,83	36,23	2,51	0,75	1,34	5,68
OP-05	3,92	12,80	40,13	1,87	1,82	2,22	9,38
OP-06	4,44	11,30	36,60	1,74	1,29	2,12	8,70
OP-07	5,10	12,53	43,07	0,89	0,51	1,41	10,40
OP-08	8,61	12,37	38,07	0,70	0,72	0,90	7,51
OP-09	5,98	11,17	37,50	0,74	1,05	0,97	7,81
OP-10	3,94	11,43	35,57	1,55	1,18	2,40	9,69
OP-11	5,84	13,20	45,73	1,96	1,26	2,15	9,92
OP-12	5,21	12,13	39,87	1,94	1,39	2,23	9,10
OP-13	4,18	11,63	38,77	1,74	1,22	2,30	8,91
OP-14	5,91	10,53	38,47	0,54	1,30	1,13	9,00
OP-15	5,16	11,43	40,33	0,42	2,47	1,30	8,25
OP-16	5,28	15,00	49,50	0,87	2,95	0,98	7,57
OP-17	5,30	9,73	35,53	0,43	2,21	1,33	8,00

Fonte: Autora.

Tabela 4 - Resultados da concentração de Elementos Menores e Traços (em ppm).

Amostras (ppm)	mE	mS	P	S	Cl	Mn	Co	Cu	Zn	Mo	Rh	Cd	Ce	Hf	Th
OP-01	257333	6615568	200	500	1130	630	2400	0	0	70	2400	1030	2600	70	0
OP-02	257266	6615645	500	0	930	1730	5130	200	70	100	1770	870	3830	0	0
OP-03	257174	6615599	1000	0	1230	1600	4330	0	0	200	2200	1000	3830	100	370
OP-04	257074	6615597	630	0	1200	1030	2930	0	0	130	2170	1000	2700	70	630
OP-05	257130	6615494	2000	0	1230	1770	5470	0	0	30	1530	800	2830	100	370
OP-06	257196	6615567	1170	100	1200	1630	4730	0	0	130	1930	1000	2200	100	370
OP-07	257431	6615564	200	230	1130	1600	6230	470	70	0	1570	830	5000	0	0
OP-08	257380	6615478	430	130	1030	1170	4170	0	0	70	2030	930	4170	100	0
OP-09	257311	6615433	1030	470	1100	1170	4130	0	30	70	2100	570	4630	30	0
OP-10	257239	6615356	1330	0	1070	1630	5370	0	0	100	1800	800	2600	100	370
OP-11	257159	6615415	1130	0	1170	1900	6070	0	0	0	500	600	1970	70	230
OP-12	257111	6615348	2000	0	1070	1700	5230	0	0	70	1570	800	2070	70	700
OP-13	257175	6615270	1470	100	1170	1730	5070	0	0	170	1730	770	2530	100	630
OP-14	257426	6615444	200	500	1170	1630	4870	30	0	70	2030	970	4630	70	0
OP-15	257520	6615464	270	430	1100	1800	4670	0	0	30	2000	900	4030	70	0
OP-16	257592	6615407	0	330	1130	1430	4770	0	0	0	530	700	2630	30	0
OP-17	257513	6615537	70	170	1030	1770	4130	30	0	70	2370	1070	3530	0	0

Fonte: Autora.

7.3 Análises estatísticas

O uso de métodos estatísticos possibilita uma melhor compreensão do conjunto de dados fazendo com que aumente a confiabilidade da análise. Para isso foram realizados procedimentos estatísticos básicos, como média, mediana, desvio padrão, variância, assimetria, curtose, máximo e mínimo, com objetivo de caracterizar estes domínios, aos quais auxiliaram na interpretação e na análise deste banco de dados, assim identificando a existência de prováveis anomalias.

No Apêndice C encontra-se o sumário estatístico das análises, apresentando os dados sobre estatística descritiva dos solos provenientes da Ocorrência de Cobre Primavera.

A comparação da média com a mediana nos fornece uma medida da assimetria da distribuição, quando uma média é mais elevada que a mediana a distribuição é assimétrica positiva, e quando a mediana é maior que a média, a distribuição é assimétrica negativa. A maioria dos valores das médias superam as medianas das distribuições, indicando que os valores menores ocorrem com mais frequência.

Podemos notar que os elementos Si, Fe, Al, Mg, Ca, K e Ti apresentam valores de desvio padrão e variância altos, significando que os valores amostrais estão bem distribuídos em torno da média, ou seja, as amostras variam muito entre si, sendo amostras que apresentam heterogeneidade. Mas é possível visualizar que as amostras de solos e as populações amostrais são consideradas homogêneas em sua maioria, porém, com uma pequena tendência a heterogeneidade.

A curtose é o grau de achatamento de uma distribuição, em relação à distribuição normal, podendo ser de três tipos: mesocúrtica quando a distribuição é normal, leptocúrtica quando a distribuição é mais pontiaguda que a normal, e platicúrtica quando a distribuição é mais achatada que a normal (BERQUÓ, et al., 1981).

Os valores de curtose que são mais próximos de 0 representam que a distribuição é aproximadamente simétrica. Já os valores que se distanciam de 0, podem indicar que os dados não estão normalmente distribuídos, que seria um indicador que existam anomalias para estes elementos na região. Podemos notar que elementos como P, S, K, Ti, Mo, Cd, Ce, Hf e Th apresentam valores de curtose negativo, sendo distribuições com curvas leptocúrticas. O restante dos elementos são curvas platicúrticas.

A assimetria é o grau de desvio de uma curva no sentido horizontal em relação a normal, podendo ele ser positivo ou negativo. Juntamente com a curtose é utilizada como comparação e definição de qual distribuição os dados seguem, onde valores de assimetria iguais a zero indicam distribuição simétrica, valores menores que zero, distribuição assimétrica negativa, e valores maiores que zero, distribuição assimétrica positiva.

Os elementos Cl, Mn, Fe, Co, Rh, Cd e Hf exibem distribuição assimétrica negativa, ou seja, estes elementos apresentam maiores concentrações de dados nos valores altos. Já os elementos Cu, Zn, Mg e Ca exibem distribuição assimétrica positiva forte, e os elementos Al, Si, P, S, K, Ti, Mo, Ce e Th apresentam distribuição assimétrica positiva fraca, e isto significa que estes elementos exibem altas concentrações de dados nos valores mais baixos.

7.4 Método de Correlação de Pearson

As características geoquímicas dos solos são um reflexo do ambiente e da geologia local, portanto a composição do solo está intrinsecamente relacionada com as rochas do entorno da área investigada. Deste modo, buscou-se através do coeficiente de correlação de Pearson, medir a correlação entre os conjuntos de dados estudados.

O coeficiente de correlação de Pearson (ρ) varia de -1 a 1, onde o sinal demonstra se a direção da correlação é positiva ou negativa e o valor indica a intensidade da relação entre as variáveis. Quando uma correlação é próxima de 1 ou -1, indica que há um maior grau de dependência estatística entre as variáveis, e quanto mais próxima de zero, menor essa relação linear (FIGUEIREDO FILHO & SILVA JÚNIOR, 2009).

Então quando a correlação é positiva, indica que a presença de um elemento influencia na presença do outro, e quando é negativa, significa que a entrada de um elemento implica na saída de outro (BRIOSCHI NETO, 2019).

Foi gerada uma tabela com a matriz de correlação (Apêndice D), em que foram consideradas amostras com alta similitude as que apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,7. E para uma melhor visualização, estes valores foram evidenciados na tabela.

Na Tabela (Apêndice D) é possível observar correlação positiva entre os pares de elementos: K x P (0,71); Ti x P (0,80); Fe x Mn (0,87); Co x Mn (0,82); Co x Fe (0,96); Zn x Cu (0,85); Cd x Rh (0,70); Th x P (0,76); Th x K (0,87); Th x Ti (0,74). Já as correlações negativas são: K x S (-0,79); Ti x S (-0,74); Mo x Si (-0,72); Rh x Al (-0,86).

As correlações observadas são condizentes com as afinidades geoquímicas dos elementos e a litologia da área de estudo, e comuns em regiões onde ocorrem mineralizações de Cu (GOLDSCHMIDT, 1937; RIBEIRO et al., 1978; BORGES, 2020).

7.5 Mapas de isolinhas de concentração dos elementos

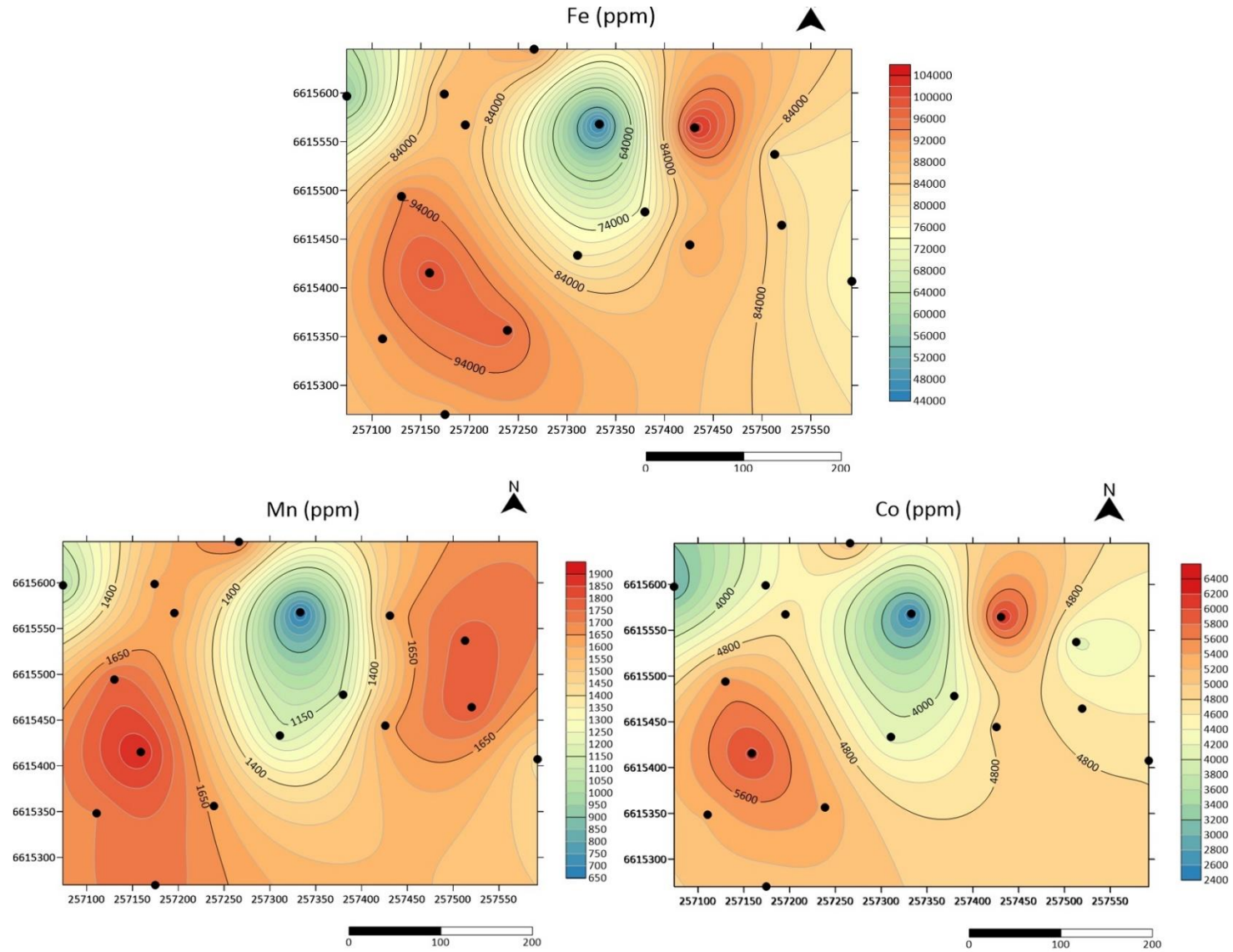
Através dos resultados das correlações e comparação com a bibliografia, foi possível selecionar as variáveis para a elaboração dos mapas de isolinhas de concentração dos elementos.

Com estes mapas é possível observar a relação do contexto geológico local com a localização das concentrações elevadas para os diversos elementos estudados. Também se observa a correlação entre concentrações de elementos diferentes, evidenciando a afinidade entre eles.

Em relação a simbologia utilizada nos mapas, as cores frias representam os teores menores e as cores quentes representam os teores altos. A configuração dos intervalos das curvas de isovalores se apresenta para cada mapa elaborado. Cada mapa elaborado exibe a configuração dos intervalos das curvas de isovalores dos elementos.

A Figura 13 mostra as curvas de isoteores, em ppm, para os elementos químicos Fe, Mn e Co, em que é possível notar bem claramente as correlações positivas entre si (Fe x Mn; Co x Mn; Co x Fe). E isso ocorre porque durante o intemperismo, o magnésio tende a ser removido em solução, preferentemente ao ferro, ao passo que o cobalto tende a seguir o ferro, exceto nos casos onde ocorre a separação do ferro e do manganês, quando então segue o manganês (CARR & TUREKIN, 1961).

Figura 13 - Mapas de isolinhas com teores de Fe, Mn e Co em ppm.



Fonte: Autora.

Levando em conta que estes elementos possuem mobilidades consideradas média e em alguns casos muito baixas, é possível observar áreas em comum onde todos estes elementos apresentam valores altos, considerados anômalos, os quais estão no entorno dos afloramentos, sendo então um bom indicador de qual é a área de influência da rocha no solo.

As rochas estão aflorando entre os pontos OP-1, OP-08 e OP-09 e possuem um comportamento sudoeste quanto a sua principal área de influência no solo, e este comportamento está ligado à topografia da área. Já a área de influência secundária é sentido nordeste, sendo na porção mais alta da área, podendo identificar uma continuidade do corpo rochoso.

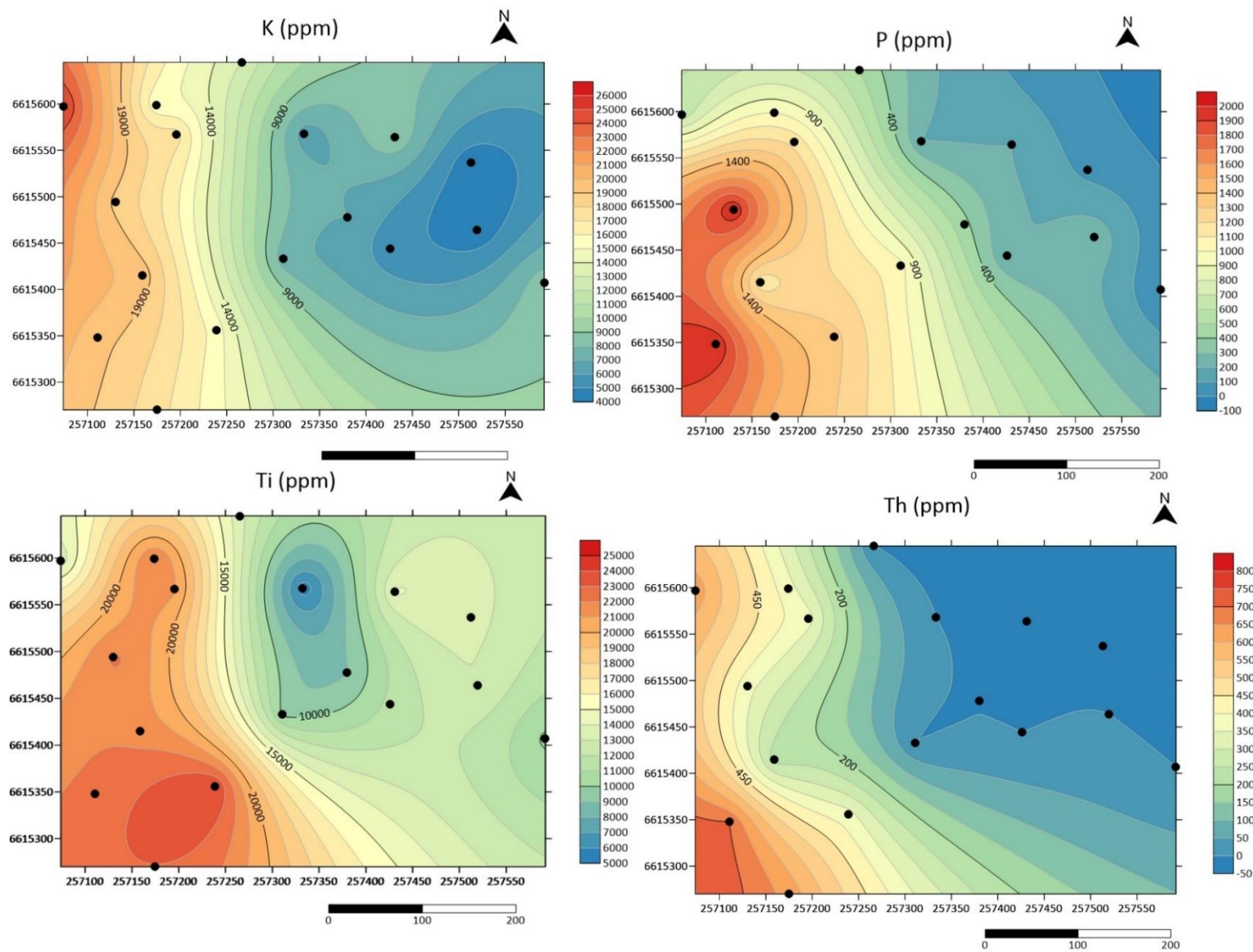
É possível notar que os três mapas são parecidos, onde geograficamente as menores concentrações estão localizadas na porção e centro-norte e noroeste da malha de amostragem, especificamente nos pontos OP-01 e OP-04.

A figura 14 mostra as curvas de isotores, em ppm, para os elementos químicos P, K, Ti e Th, onde pode-se notar as correlações positivas entre si (K x P; Ti x P; Ti x K; Th x P; Th x K; Th x Ti). É possível notar que os quatro mapas são parecidos, onde geograficamente as maiores concentrações estão localizadas na porção sudoeste e noroeste da malha de amostragem. Já as menores concentrações estão localizadas na porção leste da malha de amostragem. Estes elementos possuem um comportamento sudoeste quanto a sua principal área de influência no solo, e este comportamento está ligado à topografia da área.

A figura 15 mostra as curvas de isotores, em ppm, para os elementos químicos Cu, Zn e Hf, onde pode-se notar as correlações positivas entre Cu e Zn, e correlações negativas entre Hf e Zn e Hf e o Cu (Zn x Cu; Hf x Zn; Hf x Cu). Geograficamente as maiores concentrações de Zn e Cu estão localizadas na porção norte e nordeste, e nestes mesmos pontos o Hf apresenta as menores concentrações, ou seja, quando a correlação é negativa significa que a entrada de Cu e Zn implica na saída do Hf.

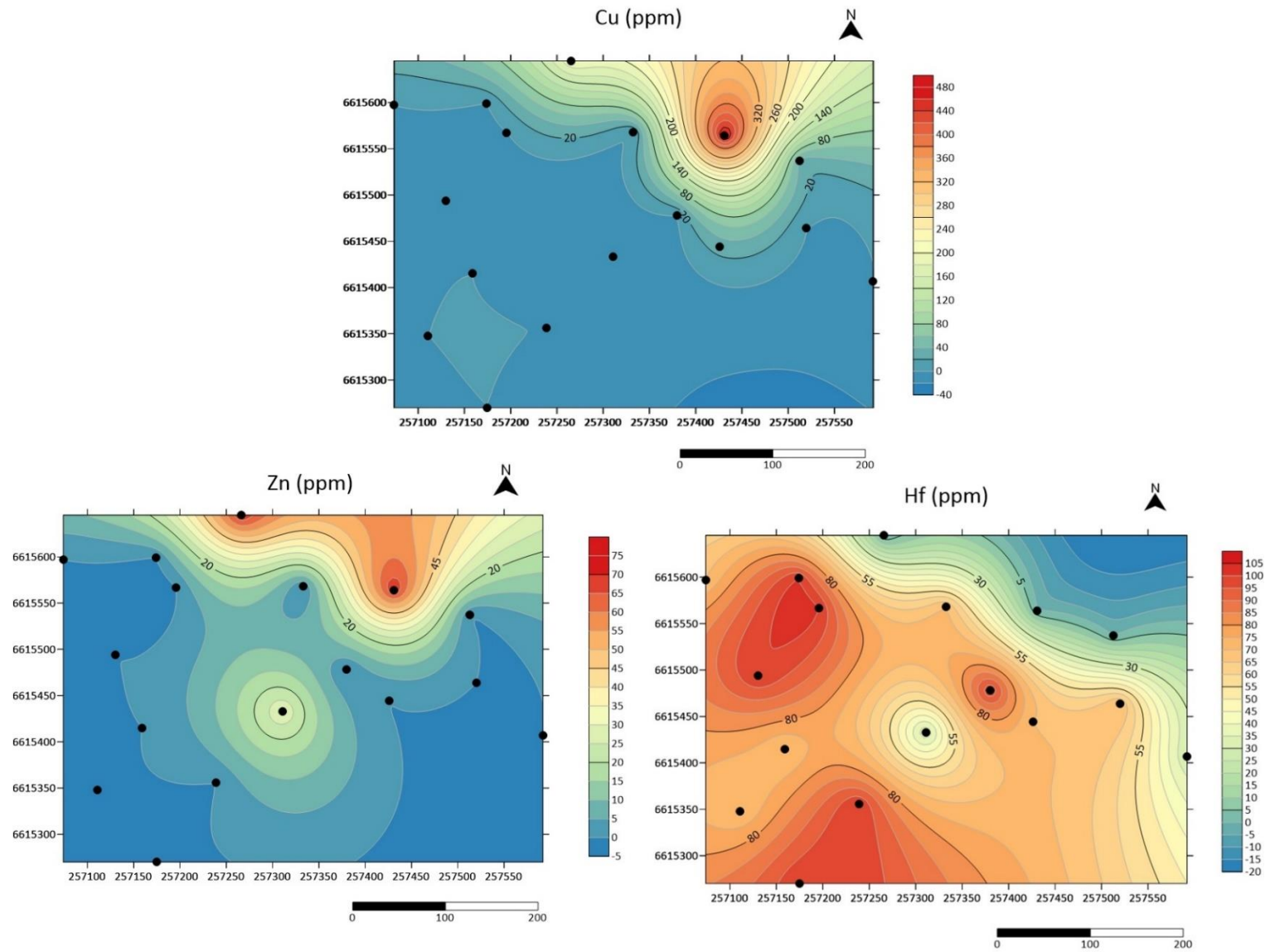
O Cu e o Zn apresentam apenas quatro pontos com concentrações acima de zero, e isso está relacionado com a alta mobilidade desses elementos nos ambientes. Pode-se sugerir que estes pontos apresentaram concentrações, devido as concreções encontradas no solo, pois de acordo com Feng (2011), metais traço são significativamente enriquecidos nas concreções.

Figura 14 - Mapas de isolinhas com teor de P, K, Ti, Th.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Mapas de isolinhas com teor de Cu, Zn e Hf.

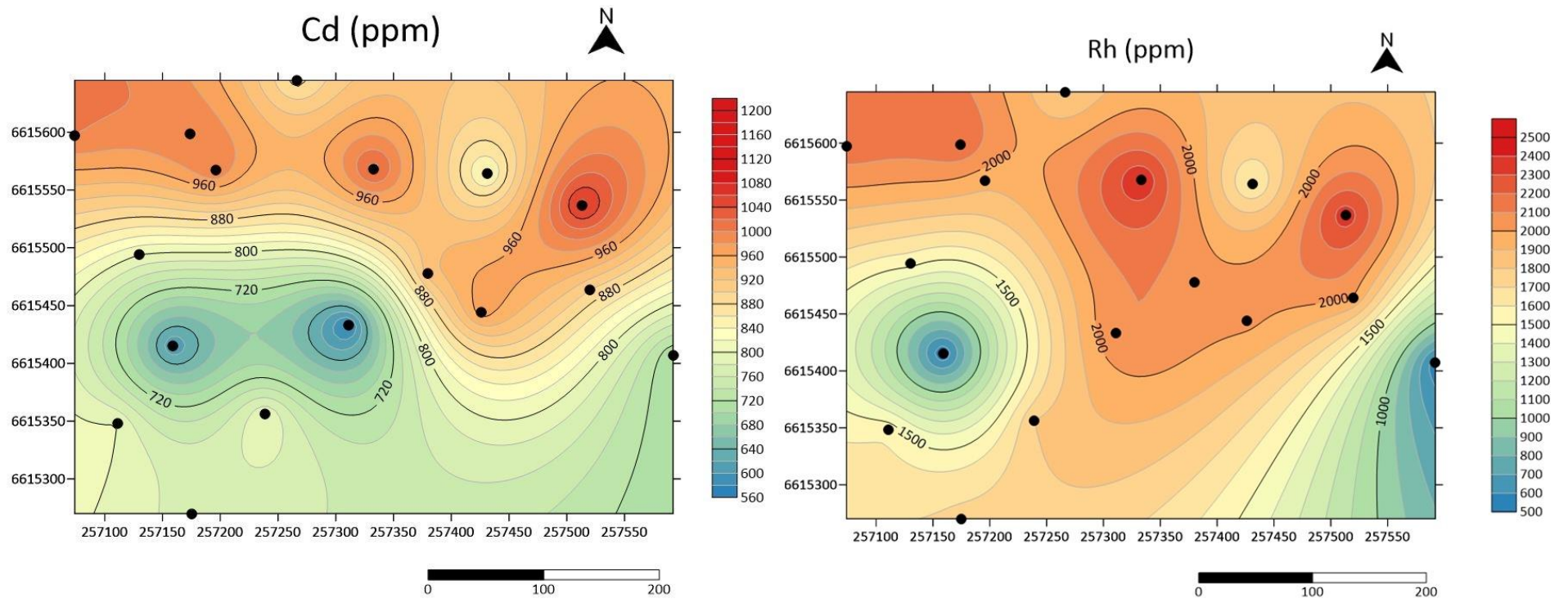


Fonte: Autora.

A figura 16 mostra as curvas de isotores, em ppm, para os elementos químicos Cd e Rh, em que é possível visualizar a correlação positiva entre eles. As maiores concentrações estão localizadas nas porções noroeste, norte e nordeste, e as menores concentrações estão localizadas na porção centro-sudoeste, centro-sul e lés-sudeste.

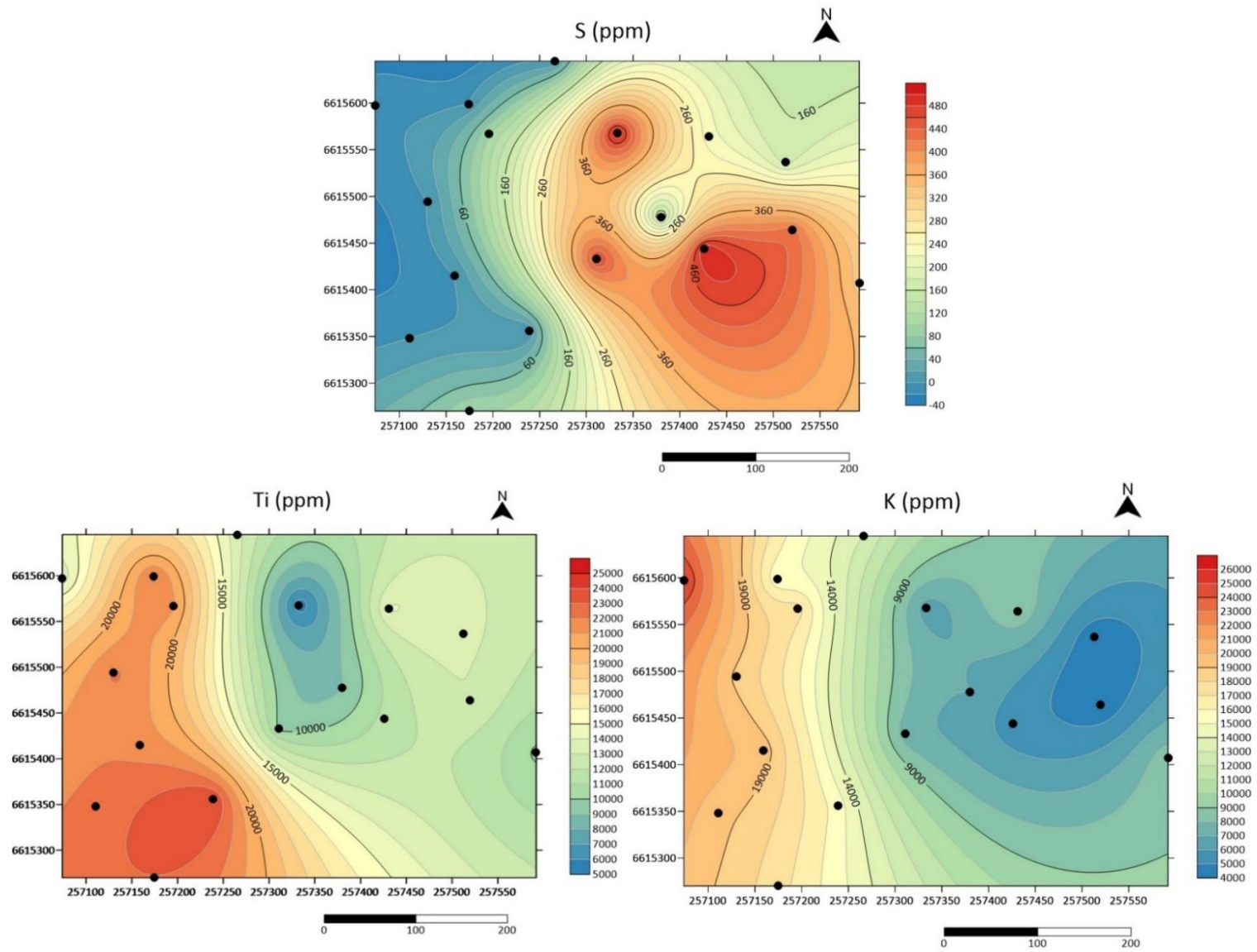
As figuras 17, 18 e 19 mostram as curvas de isotores, em ppm, para os elementos S, Ti, K, Al, Rh, Si e Mo, nos quais pode-se visualizar as correlações negativas entre eles. Como já dito anteriormente, quando a correlação é negativa significa que a entrada de um elemento implica na saída de outro, ou seja, a entrada do S implicou na saída do Ti e K, a entrada do Al implicou na saída do Rh, e a entrada do Si implicou na saída do Mo.

Figura 16 - Mapas de isolinhas com teor de Cd e Rh.



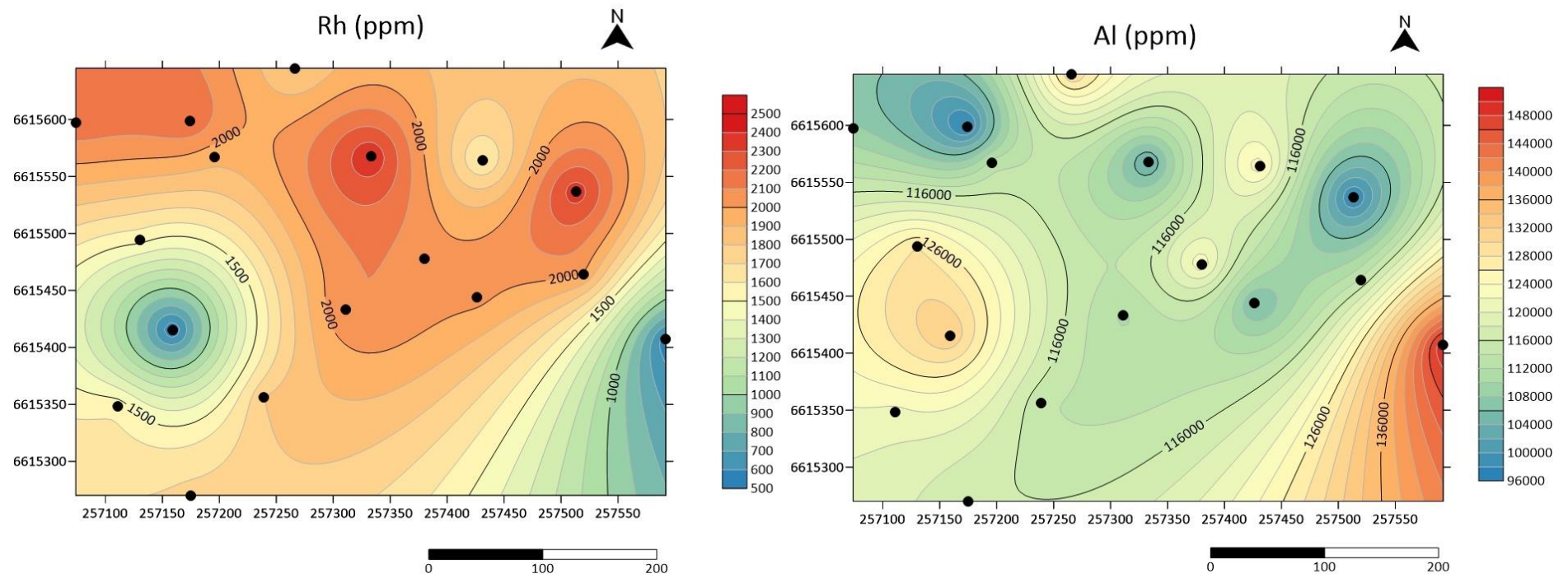
Fonte: Autora.

Figura 17 - Mapas de isolinhas com teor de S, Ti e K.



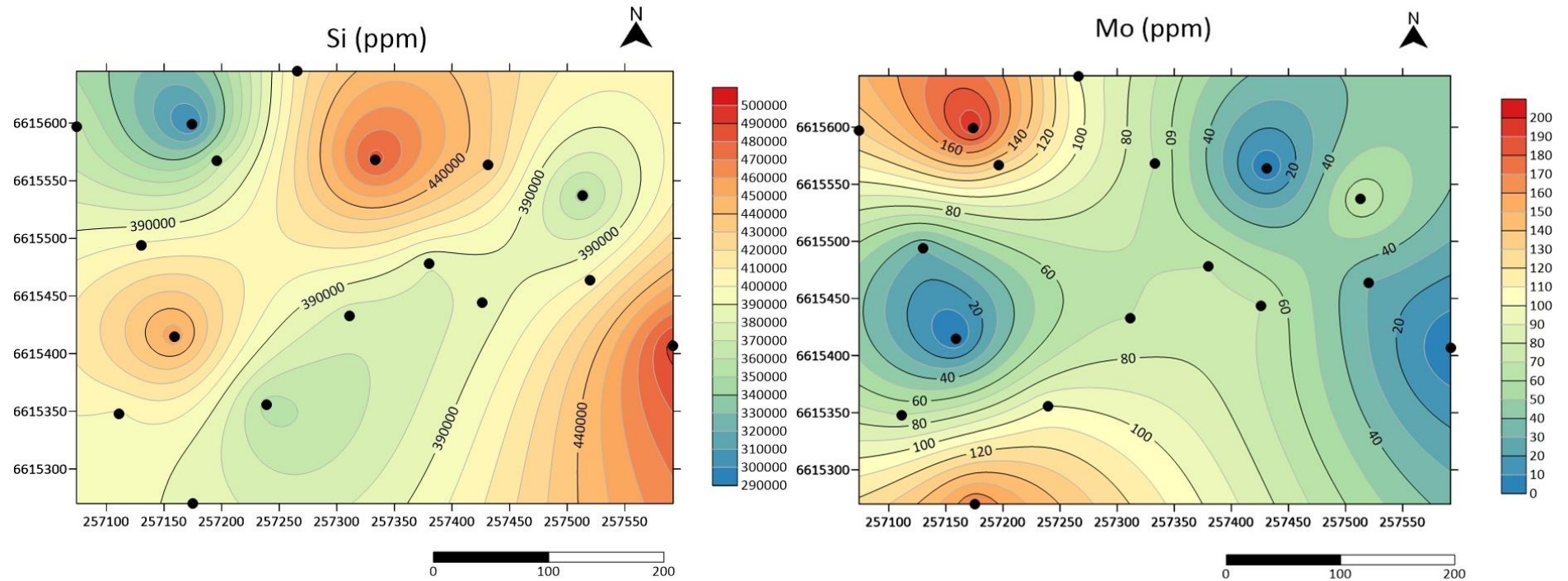
Fonte: Autora.

Figura 18 - Mapas de isolinhas com teor de Rh e Al.



Fonte: Autora.

Figura 19 - Mapas de isolinhas com teor de Si e Mo.



Fonte: Autora.

7.6 Comparação entre as análises dos solos e rochas da Ocorrência de Cobre Primavera

Comparando-se o comportamento dos solos amostrados neste estudo e o estudo do conteúdo geoquímico das rochas da área, desenvolvido por Borges (2020). Na tabela a baixo encontra-se os teores médios de todas as análises, quanto aos elementos Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, Si, Ti, Zn, Th, Ce, Co, Hf, Mo e Cu. Nota-se que os solos se encontram enriquecidos em Ca, Ti, Th, Ce, Co, Hf e Mo e empobrecidos em Al, Fe, K, Mg, Mn, P, Si, Zn e Cu.

Tabela 5 - Teores médios dos elementos do conteúdo geoquímico dos solos e das rochas.

Teor médio dos elementos	Conteúdo Geoquímico dos Solos (Presente Estudo)	Conteúdo Geoquímico das Rochas (BORGES, 2020)
Al (%)	11,72	14,001
Ca (%)	1,36	1,007
Fe (%)	8,37	9,813
K (%)	1,26	1,687
Mg (%)	5,11	5,476
Mn (%)	0,15	0,176
P (%)	0,08	0,157
Si (%)	39,70	56,07
Ti (%)	1,58	1,067
Zn (ppm)	10	88
Th (ppm)	215,88	3,38
Ce (ppm)	3281,18	83,03
Co (ppm)	4688,24	58,43
Hf (ppm)	63,53	3,646
Mo (ppm)	77,06	2,8
Cu (ppm)	42,94	> 10000

Fonte: Autora e Borges (2020).

É possível verificar que os teores médios de Th, Ce, Co, Hf e Mo no solo encontrados nos solos são surpreendentemente altos. Levando em consideração que estes elementos possuem mobilidades consideradas alta a média e em alguns casos muito baixas, pode-se sugerir que o enriquecimento desses elementos nos solos seja resultado de lixiviação promovendo sua remoção das rochas.

De acordo com Anand (2005), as camadas 2:1 das esmectitas, podem conter vários cátions de raio iônico compatível como Mg^{+2} , Al^{+3} e Fe^{+3} , podendo, desta forma, hospedar diversos elementos traço durante a evolução do intemperismo.

Então, os minerais da fração argila e a matéria orgânica no solo são uma importante barreira geoquímica, causando o acúmulo destes elementos químicos (SANTOS, 2014). Sendo assim, percebeu-se que, em geral, estes altos teores ocorrem em solos mais jovens, com menor grau de intemperismo e lixiviação.

A tendência de crescimento dos teores pode estar relacionada à adsorção diferencial dos elementos por óxidos hidratados de Fe, Al e Mn (BRADY, 1989), causando eventualmente retenção destes elementos nas camadas superficiais.

Já o empobrecimento do Si no solo é devido a sua baixa mobilidade, pois o mineral típico de silício é o quartzo (SiO_2), o qual é um mineral resistente ao intemperismo, sendo assim a dispersão dele é baixa. Já o empobrecimento do Zn e Cu no solo, é consequência das suas altas mobilidades, porque são elementos que apresentam facilidade para serem solubilizados e são carregados em solução nas águas subterrâneas, com isso possibilitando a dispersão química, causando o empobrecimento.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Os resultados permitiram concluir que:

Os solos encontrados na área correspondem ao Neossolo Litólico, que são considerados solos rasos e pouco profundos, pouco evoluídos pedogeneticamente e caracterizados pela ausência do horizonte B. São solos com contato lítico dentro de 50 cm a partir da superfície, apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha. A granulometria predominante é do tipo Arenoso-Argiloso com presença de fragmentos de rochas, e a coloração predominante é marrom escuro.

Conforme observado nos resultados, os solos amostrados apresentaram valores altos de Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Co, Mo, Ce, Hf e Th.

Rochas metavulcânicas básicas apresentam maior quantidade de minerais ferromagnesianos em sua composição e são caracterizadas por conteúdos de SiO_2 em torno de 45-52% e altos teores de Al_2O_3 , CaO , FeO , MgO e TiO_2 , e são relativamente ricas em K_2O , P_2O_5 e MnO . Ou seja, os teores dos elementos nos solos coletados na área são condizentes com a litologia da área.

O Co e o Mo estão presentes em concentrações elevadas devido ao conteúdo destes elementos na composição química dos minerais presentes nas rochas da área. São elementos que são correlacionados diretamente ao cobre. Naturalmente, o cobalto e o molibdênio podem ser encontrados em vários minerais, mas geralmente são obtidos como subprodutos durante a extração do cobre.

O cobalto possui raio iônico muito semelhante ao do ferro e do magnésio, então frequentemente o Co substitui estes elementos na estrutura cristalina de alguns minerais ferromagnesianos.

Os valores de concentração elevados de Ce e Th estão diretamente relacionados à presença de minerais ricos em Elementos Terras Raras, podendo sugerir que as rochas da região possam conter minerais como monazita, allanita e bastnasita.

As concentrações elevadas de Hf podem estar associadas ao zircônio em minerais como a zirconita, um silicato misto de zircônio e háfnio, pois o Hf é pouco

presente na crosta terrestre. Também é associado a minerais pesados de titânio, como a ilmenita (FeTiO_3). Como a zirconita é um mineral de relativa estabilidade química e resistência à erosão, é frequentemente encontrada nos solos (SABEDOT & SAMPAIO, 2002).

Os elementos de maior interesse econômico, como o Cu e o Zn, apresentaram apenas quatro pontos com teores acima de zero (OP-02: Cu = 200 ppm, Zn = 70 ppm; OP-07: Cu = 470 ppm, Zn = 70 ppm; OP-09: Zn = 30 ppm; OP-14: Cu = 30 ppm; OP-17: Cu = 30 ppm), e isso está relacionado com a alta mobilidade desses elementos nos ambientes, pois apresentam facilidade para serem solubilizados e são carreados em solução nas águas superficiais e subterrâneas, com isso possibilitando a dispersão química.

A baixa concentração de cobre nos solos da área não quer dizer que a rocha não tenha cobre em sua composição ou não tenha um potencial econômico, e um indício disto é que o molibdênio apresentou teores elevados (Mo: $\bar{X} = 77,06$ ppm), visto que o molibdênio associado a cobre em depósitos cupríferos, servirá de elemento farejador, pois o cobre apresenta maior dispersão em ambiente secundário, enquanto que a mobilidade do molibdênio é menor.

A partir dos mapas de isotores foi possível evidenciar a afinidade entre os elementos, assim como era previsto observando as correlações entre eles. E também foi possível visualizar que os elementos possuem um comportamento noroeste quanto a sua principal área de influência no solo, e este comportamento está ligado à topografia da área. Mas é possível visualizar que alguns elementos (Al, Fe, Mn, Co, Cd, Rh, Hf) apresentam uma área de influência espalhadas por toda a região.

Então recomenda-se o adensamento da malha de coleta das amostras, para que se possa delimitar de forma mais precisa a área de influência do depósito. E para confirmar a presença, ou não, de algum depósito mineral de algum desses elementos químicos na região, é necessário a realização de novos estudos mais detalhados para resultados mais conclusivos a respeito desse tópico, como amostragem geoquímica, análise estrutural e descrição macroscópica e microscópica dos testemunhos de sondagem existentes da área de estudo e também a aplicação de métodos geofísicos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., NEVES, B.B., & FUCK, R.A., Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth Sciences Reviews**, 17, 1-29, 1981.
- ANAND, R.R. **Weathering history, landscape evolution and implications for exploration**. In: BUTT, C.R.M. et al. (Ed.). Regolith expression of Australian ore systems: a compilation of exploration case histories with conceptual dispersion, process and exploration models. Canberra, Australia: Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration (CRC LEME), 2005.
- BARASKO, J.J. **Relationships between some elements in the rocks, soils and plants of the some mineralized areas of British Columbia**. 218p. Dissertação (Mestrado) - University of British Columbia, 1967.
- BERQUÓ, E. S.; DE SOUZA, J. M. P.; GOTLIEB, S. L. D. **Bioestatística**. São Paulo: E.P.U.; 350p., 1981.
- BICCA, M. M. **Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã – RS**. Dissertação de Mestrado em Ciências - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BITENCOURT, M. F. **Geologia, Petrologia e Estrutura dos Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS**. Unpublished M.Sc. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 161 p. 1983.
- BOGNOLA, I. A. et al. Caracterização dos Solos do Município de Carambeí, PR. Rio de Janeiro; **Embrapa – Solos**, 2002. 75p. – (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 8).
- BORGES, Natália Pinheiro. **Aplicação do método eletromagnético indutivo e estudo litogeoquímico: Mina Primavera, Caçapava do Sul - RS**. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2020.
- BRADY, N. C. Natureza e Propriedade dos Solos. "The nature and properties of soils". Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo F^o. 7^a ed. Rio de Janeiro. 1989.
- BRIOSCHI NETO, P., **Caracterização geoquímica de solos e área de influência dos Carbonatitos Picada dos Tocos e Passo Feio, Caçapava do Sul - RS**. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2019.
- CARR, M. II. & TUREKIN, K. K. **The geochemistry of cobalt**. **Geochim. cosmochim. Acta** 23: 9-60. 1961.
- CAVALCANTI NETO, M. T. de O; ROCHA, A. M. R. da. **Noções de prospecção e pesquisa mineral para técnicos de geologia e mineração**. Natal: Editora do IFRN, 2010.

COSTA, A. F.U. **Teste e Modelagem Geofísica da Estruturação das Associações Litotectônicas Pré-Cambrianas no Escudo Sul-riograndense**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 291p. 1997

CHEMALE Jr., F., Evolução Geológica do Escudo Sul-Riograndense. In: Holz, M & De Ros, L. F. (Eds), **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO/UFRGS, 13-52, 2000.

DANCEY, C. & REIDY, J., Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed, 2006.

DOS SANTOS, H. G. et al. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Embrapa Solos-Documents**, 2011.

DUCHAUFOR, R. **Pedology: pedogenesis and classification**. Springer Science & Business Media, 2012.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Balanço Mineral Brasileiro. Brasília: DNPM, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2º ed. Brasília, 2006. 306p.

FENG, J-L. Trace elements in ferromanganese concretions, gibbsite spots, and the surrounding Terra Rossa overlying dolomite: their mobilization, redistribution and fractionation. **Journal of Geochemical Exploration**, v.108, n.1, p.99-111, 2011.

FERNANDES, L. A. D., et al. Deformation patterns in the southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt. **Journal of South American Earth Sciences**, 5: 77-96. 1992.

FIGUEIREDO, D. B. F.; SILVA, J. A. J., Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FRAGOSO-CESAR, R.. **Tectônica de Placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul**. São Paulo, 366p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 1991.

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

HARRES, M. M., Minas do Camaquã (Caçapava do Sul - RS): A exploração do cobre no Rio Grande do Sul. In L. H. Ronchi & A. O. C. Lobato (ed.) **As Minas do Camaquã**. São Leopoldo, Editora UNISINOS, 21-53, 2000.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE Jr., F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-cambriano. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J.C. (Org.). In: **50 anos de Geologia**. 1 ed. Instituto de Geociências, Porto Alegre. Editora Comunicação e Identidade, v. 1, p. 97-123, 2007.

HAWKES, H.E. & WEBB, J. S. **Geochemistry in mineral exploration**. New York: Harper & How, 415p. 1962

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (IBGE). Malha municipal da divisão político-administrativa brasileira, 2019.

KLEIN, C., DUTROW, B., **Manual de ciência dos minerais**. Bookman Editora. Porto Alegre, p. 706, 2009.

KOESTER, Edinei et al. A evolução crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a perspectiva dos sistemas isotópicos Sr-Nd. **Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: **Compasso Lugar-Cultura**, 2021. p. 13-27, 2021.

KRUMMENAUER, A., **Desenvolvimento e Validação de Metodologia Analítica para Análise de Aços por Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF)**, 88 f., Dissertação (Mestrado em PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LEVINSON, A. A., Introduction to exploration geochemistry. Calgary: Applied Publishing, 1974. 612p.

LICHT, O. A. B., **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, Brasil**. 2001.1 CD-ROM. Tese (Doutorado) – Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

LIMA, V. C.; MELO, V. F. Perfil do solo e seus horizontes. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p. 11-16, 2007.

MARQUES, F. A., RIBEIRO, M. R., BITTAR, S. M. B., TAVARES FILHO, A. N., & LIMA, J. F. W. F. Caracterização e classificação de Neossolos da ilha de Fernando de Noronha (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1553-1562, 2007.

MATTOSO, S. Q.; FORMOSO, M. L. L. Princípios Básicos para Prospecção Geoquímica. In: Licht, O.A.B, De Mello, C.S.B. e Da Silva, C.R. (eds.). **Prospecção Geoquímica–Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás**. SBGq/CPRM, Rio de Janeiro, p. 97-152, 2007.

MOON, C. J.; WHATELEY, M. E. G.; EVANS, A. M. **Introduction to Mineral Exploration**. 2. ed. Oxford: Backwell Publishing, 2006.

PEREIRA, R. M., **Fundamentos de prospecção mineral**. Interciência, p. 75-142, 2003.

PEREIRA, J. S. **Avaliação das perdas de solos por erosão laminar na área de influência da UHE Amador Aguiar I**. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

RAMGRAB, G. E. et al. Folha SH. 22 - Porto Alegre. In: SCHOBENHAUS, C. et al. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo, sistema de informações geográficas, programa geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2004.**

REMUS M.V.D. **Metalogênese dos depósitos hidrotermais de metais base e Au do Ciclo Brasileiro do Bloco São Gabriel, RS.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 170p, 1999.

REMUS M.V.D.; HARTMANN L.A.; MCNAUGHTON N.J.; GROVES D.I.; FLETCHER, I.R. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasileiro Cycle in southern Brazil. **Journal South American Earth Sciences**, p.191-216, 2000.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO, P. M. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. **Boletim DNPM DFPM**, Porto Alegre, n. 127, 1966.

RIBEIRO, M., Geologia da folha de Bom Jardim: Rio Grande do Sul- Brasil. In: **Boletim: Divisão de Geologia e Mineralogia**. Brasília, 247: 1- 142. 1970.

RIBEIRO M.; FANTINEL, L.M. Associações Petrotectônicas do Escudo Sul-Riograndense: Tabulação e distribuição das associações petroectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. **Iheringia, Série Geologia**, Porto Alegre, 1978, n. 5, p.19-54, 1978.

ROSE A. W., HAWKES H. E., WEBB J. S. **Geochemistry in mineral exploration**. 2. ed., London, Academic Press, 657 p. 1979.

SABEDOT, S. e SAMPAIO, C. H. Caracterização de zircões da Mina Guaju (PB). **Rev. Esc. Minas**, vol 55, no 1, UFOP. 2002.

SANTOS, C. C. **Mobilidade de elementos químicos no perfil de solo e seu controle na prospecção geoquímica: aplicação na região de Santa Maria da Vitória, BA.** Brasília, 132 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2014.

SILVA, J. R. C.; SILVA, F. J. da. Produtividade de um solo litólico associado ao controle de erosão por cordões de pedra em contorno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.435-440, 1997b.

SOLIANI Jr., E. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 1986.

WASTOWSKI, A. D.; ROSA, G. M. **Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF).** Química Nova, v.33, p.1449-1452, 2010.

WINGE, M. et al. **Glossário Geológico Ilustrado**. 2001. Disponível no site <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso: 19/02/2022.

WHITE, W. M. *Geochemistry*. Oxford: Blackwell-Wiley, 672p., 2005.

APÊNDICES

Apêndice A – Características morfológicas dos solos amostrados.

Amostras	mE	mS	Tipo de Solo (Granulometria)	Classe do Solo	Coloração	Observações
OP-01	257333	6615568	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Claro	Presença de concreções
OP-02	257266	6615645	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de concreções e fragmentos de rochas
OP-03	257174	6615599	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-04	257074	6615597	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	-
OP-05	257130	6615494	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	-
OP-06	257196	6615567	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	-
OP-07	257431	6615564	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de concreções e fragmentos de rochas
OP-08	257380	6615478	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-09	257311	6615433	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-10	257239	6615356	Arenoso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-11	257159	6615415	Arenoso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-12	257111	6615348	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-13	257175	6615270	Arenoso-Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-14	257426	6615444	Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-15	257520	6615464	Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	-
OP-16	257592	6615407	Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	Presença de fragmentos de rochas
OP-17	257513	6615537	Argiloso	Neossolo	Marrom Escuro	-

Fonte: Autora.

Apêndice B - Resultado geoquímico das 17 amostras da área de estudo, em porcentagem, obtidos através do EDXRF.

Amostras (%)	mE	mS	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Mo	Rh	Cd	Ce	Hf	Th
OP-01	257333	6615568	4,39	10,33	48,57	0,02	0,05	0,113	0,647	0,727	0,54	0,063	4,373	0,24	0	0	0,007	0,24	0,103	0,26	0,007	0
OP-02	257266	6615645	4,53	13,03	41,3	0,05	0	0,093	1,297	0,86	1,327	0,173	9,127	0,513	0,02	0,007	0,01	0,177	0,087	0,383	0	0
OP-03	257174	6615599	4,2	9,69	29,63	0,1	0	0,123	1,517	1,457	2,22	0,16	8,777	0,433	0	0	0,02	0,22	0,1	0,383	0,01	0,037
OP-04	257074	6615597	4,85	10,83	36,23	0,063	0	0,12	2,513	0,753	1,34	0,103	5,68	0,293	0	0	0,013	0,217	0,1	0,27	0,007	0,063
OP-05	257130	6615494	3,92	12,8	40,13	0,2	0	0,123	1,87	1,82	2,217	0,177	9,383	0,547	0	0	0,003	0,153	0,08	0,283	0,01	0,037
OP-06	257196	6615567	4,44	11,3	36,6	0,117	0,01	0,12	1,743	1,293	2,117	0,163	8,703	0,473	0	0	0,013	0,193	0,1	0,22	0,01	0,037
OP-07	257431	6615564	5,1	12,53	43,07	0,02	0,023	0,113	0,89	0,51	1,413	0,16	10,4	0,623	0,047	0,007	0	0,157	0,083	0,5	0	0
OP-08	257380	6615478	8,61	12,37	38,07	0,043	0,013	0,103	0,7	0,72	0,897	0,117	7,507	0,417	0	0	0,007	0,203	0,093	0,417	0,01	0
OP-09	257311	6615433	5,98	11,17	37,5	0,103	0,047	0,11	0,74	1,05	0,973	0,117	7,807	0,413	0	0,003	0,007	0,21	0,057	0,463	0,003	0
OP-10	257239	6615356	3,94	11,43	35,57	0,133	0	0,107	1,553	1,183	2,403	0,163	9,693	0,537	0	0	0,01	0,18	0,08	0,26	0,01	0,037
OP-11	257159	6615415	5,84	13,2	45,73	0,113	0	0,117	1,957	1,257	2,15	0,19	9,92	0,607	0	0	0	0,05	0,06	0,197	0,007	0,023
OP-12	257111	6615348	5,21	12,13	39,87	0,2	0	0,107	1,937	1,39	2,233	0,17	9,1	0,523	0	0	0,007	0,157	0,08	0,207	0,007	0,07
OP-13	257175	6615270	4,18	11,63	38,77	0,147	0,01	0,117	1,737	1,217	2,297	0,173	8,907	0,507	0	0	0,017	0,173	0,077	0,253	0,01	0,063
OP-14	257426	6615444	5,91	10,53	38,47	0,02	0,05	0,117	0,543	1,297	1,127	0,163	9,003	0,487	0,003	0	0,007	0,203	0,097	0,463	0,007	0
OP-15	257520	6615464	5,16	11,43	40,33	0,027	0,043	0,11	0,417	2,47	1,3	0,18	8,253	0,467	0	0	0,003	0,2	0,09	0,403	0,007	0
OP-16	257592	6615407	5,28	15	49,5	0	0,033	0,113	0,867	2,953	0,977	0,143	7,573	0,477	0	0	0	0,053	0,07	0,263	0,003	0
OP-17	257513	6615537	5,3	9,73	35,53	0,007	0,017	0,103	0,427	2,213	1,327	0,177	8,003	0,413	0,003	0	0,007	0,237	0,107	0,353	0	0

Fonte: Autora.

Apêndice C - Sumário Estatístico das análises.

VARIÁVEL	MÉDIA	MEDIANA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	CURTOSE	ASSIMETRIA	MÁXIMO	MÍNIMO
Mg	5,11	5,10	1,12	1,2593	5,43	1,95	8,61	3,92
Al	11,72	11,43	1,37	1,8698	0,64	0,61	15,00	9,69
Si	39,70	38,77	4,96	24,5551	0,57	0,38	49,50	29,63
P	0,08	0,06	0,06	0,0042	-0,77	0,57	0,20	0,00
S	0,017	0,01	0,02	0,0004	-1,14	0,72	0,05	0
Cl	0,112	0,113	0,01	0,0001	0,47	-0,69	0,12	0,093
K	1,256	1,30	0,65	0,4169	-1,15	0,26	2,51	0,417
Ca	1,363	1,26	0,66	0,4399	0,83	1,10	2,95	0,51
Ti	1,580	1,34	0,60	0,3640	-1,50	0,01	2,40	0,54
Mn	0,153	0,163	0,03	0,0011	1,84	-1,49	0,19	0,063
Fe	8,365	8,777	1,51	2,2767	2,23	-1,39	10,40	4,373
Co	0,469	0,477	0,10	0,0096	1,01	-0,79	0,62	0,24
Cu	0,004	0	0,01	0,0001	11,02	3,27	0,05	0
Zn	0,001	0	0,00	0,0000	3,45	2,18	0,01	0
Mo	0,008	0,007	0,01	0,0000	-0,06	0,56	0,02	0
Rh	0,178	0,19	0,05	0,0029	2,06	-1,51	0,24	0,05
Cd	0,086	0,087	0,01	0,0002	-0,44	-0,55	0,11	0,057
Ce	0,328	0,28	0,10	0,0097	-1,30	0,34	0,50	0,197
Hf	0,006	0,007	0,00	0,0000	-0,78	-0,67	0,01	0
Th	0,022	0	0,03	0,0007	-0,98	0,72	0,07	0

Fonte: Autora.

Apêndice D – Matriz de Correlação de Pearson.

	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Mo	Rh	Cd	Ce	Hf	Th	
Mg	1	0,16	0,08	-0,34	0,25	-0,32	-0,40	-0,12	-0,49	-0,21	-0,10	-0,07	-0,04	-0,02	-0,35	-0,04	-0,10	0,39	-0,08	-0,42	
Al		1	0,64	0,07	-0,16	-0,16	0,14	0,23	0,02	0,22	0,30	0,53	0,21	0,25	-0,58	-0,86	-0,63	-0,20	-0,17	-0,10	
Si			1	-0,29	0,37	-0,11	-0,20	0,13	-0,41	-0,20	-0,20	0,07	0,18	0,14	-0,72	-0,58	-0,35	-0,22	-0,32	-0,36	
P				1	-0,59	0,28	0,71	-0,12	0,80	0,32	0,39	0,35	-0,31	-0,22	0,27	-0,16	-0,37	-0,51	0,56	0,76	
S					1	-0,02	-0,79	0,17	-0,74	-0,41	-0,39	-0,34	0,01	0,03	-0,36	0,21	0,02	0,47	-0,26	-0,66	
Cl						1	0,40	0,07	0,33	-0,04	-0,04	-0,04	-0,23	-0,44	0,19	-0,10	0,03	-0,23	0,53	0,40	
K							1	-0,25	0,69	0,16	0,16	0,16	-0,17	-0,16	0,37	-0,27	-0,16	-0,65	0,42	0,87	
Ca								1	0,04	0,40	0,07	0,11	-0,37	-0,42	-0,27	-0,33	-0,09	-0,17	-0,06	-0,13	
Ti									1	0,66	0,65	0,57	-0,13	-0,22	0,36	-0,25	-0,19	-0,49	0,49	0,74	
Mn										1	0,87	0,82	0,14	0,06	-0,08	-0,40	-0,23	-0,06	-0,04	0,16	
Fe											1	0,96	0,39	0,30	-0,14	-0,43	-0,40	0,13	-0,03	0,10	
Co												1	0,43	0,32	-0,35	-0,63	-0,53	0,03	-0,08	0,06	
Cu													1	0,85	-0,29	-0,07	0,00	0,51	-0,62	-0,32	
Zn														1	-0,18	-0,02	-0,21	0,55	-0,69	-0,38	
Mo															1	0,54	0,42	-0,12	0,44	0,53	
Rh																1	0,70	0,38	0,08	-0,04	
Cd																	1	0,10	0,08	-0,03	
Ce																		1	-0,42	-0,64	
Hf																			1	0,54	
Th																					1

Fonte: Autora.

ANEXOS

Anexo A - Limites de detecção do equipamento de EDXRF portátil S1 Turbo SDR Bruker.

GeoChem General (Dual)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V	Cr	MnO	Fe ₂ O ₃	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y
*LOD (ppm)	6100	1500	1100	280	140	100	86	61	51	31	24	32	31	18	9	6	6	6	5	5	5
GeoChem General (Dual)	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ce	Hf	Ta	W	Pt	Au	Hg	Pb	Bi	Th	U	
*LOD (ppm)	6	6	7	200**	500**	900**	250**	31	40	500**	31	500**	37	22	100**	18	18	18	31	49	

Notas:

O método utilizado para a análise das amostras através do equipamento de EDXRF portátil S1 Turbo SDR Bruker foi o GeoChem General (Dual).

*Os valores são reportados como elementares LOD;

**Não é um verdadeiro LOD. É um limite artificial projetado para evitar falsos positivos, abaixo do qual a calibração não reportará um valor;

O limite de detecção (LOD) é a menor concentração que pode ser detectada;

O LOD é especificado para a matriz de SiO₂ em três sigmas, nível de confiança de 99,7% e tempo de 120 segundos de análise. Os LODs elementares individuais melhoram em função da raiz quadrada do tempo de análise. Os limites de detecção são especificados para amostras reais de solo em condições próximas às ideais, onde apenas alguns elementos estão presentes em uma amostra. Para amostras que contêm uma quantidade significativa de outros elementos sobrepostos, o LOD para um elemento específico pode ser significativamente maior do que o relatado. O limite de detecção depende de vários fatores, como: Interferências de matriz, Elementos de sobreposição, Nível de confiança estatística e Tempo de teste.