

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME LUIZ DE OLIVEIRA DIAS

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS, BIOINDICADORES E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA PROSPECÇÃO DE OURO NO COMPLEXO
INTRUSIVO LAVRAS DO SUL (RS)**

**Caçapava do Sul
2025**

GUILHERME LUIZ DE OLIVEIRA DIAS

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS, BIOINDICADORES E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA PROSPECÇÃO DE OURO NO COMPLEXO
INTRUSIVO LAVRAS 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. Dr. Luis Eduardo de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen

**Caçapava do Sul
2025**

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).

A481o Dias, Guilherme Luiz de Oliveira

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS, BIOINDICADORES E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA PROSPECÇÃO DE OURO NO COMPLEXO
INTRUSIVO LAVRAS DO SUL (RS) / GUILHERME LUIZ DE OLIVEIRA DIAS

112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

"Orientação: Luis Eduardo de Souza ".

1. Geologia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Biogeoquímica. 4. Estatística. I. Título.

GUILHERME LUIZ DE OLIVEIRA DIAS

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS, BIOINDICADORES E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA PROSPECÇÃO DE OURO NO COMPLEXO
INTRUSIVO LAVRAS 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: 12 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza
Orientador
UNIPAMPA

Profa. Dra. Luciana Arnt Abichequer
UNIPAMPA

Profa. Dra. Caroline Wagner
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CAROLINE WAGNER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2025, às 16:39, 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 **1932770** e o código CRC **8179B62D**.

Dedico este trabalho à memória da minha mãe
Adriana e ao meu pai Luís Carlos, que sempre
me apoiaram.

AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar, àqueles que contribuíram de forma direta e determinante para a execução técnica e científica deste trabalho. Ao professor Dr. Luis Eduardo de Souza, pela orientação precisa, pela disponibilidade contínua e por fornecer as bases metodológicas que estruturam este trabalho. Ao professor Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen, cuja confiança inicial e visão sobre o potencial da pesquisa foram essenciais para que este projeto se concretizasse, ao professor Dr. Felipe Guadagnin, pela colaboração indispensável nos levantamentos aéreos e nas orientações metodológicas, a professora Dr. Carol Wagner, pelas leituras recomendadas, a professora Dr. Luciana Arnt Abichequer, pelo direcionamento e sugestões enriquecedoras.

Sou igualmente grato ao Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM), pela infraestrutura disponibilizada e pelo ambiente apropriado ao desenvolvimento das análises. À Angela Cristina Bertoi Fleck, por sua assistência técnica atenta, paciência e dedicação, fundamentais no andamento das atividades laboratoriais. Estendo meu agradecimento.

Agradeço também a todos os professores, técnicos e servidores da Universidade Federal do Pampa, que, com competência e comprometimento, constroem diariamente um ensino público de qualidade e contribuíram para minha formação acadêmica.

À minha família, que suportou a distância e nunca deixou de reafirmar o lema que me acompanha desde sempre: “o amor é uma força misteriosa capaz de superar o tempo e o espaço” deixo meu mais sincero reconhecimento. Aos amigos João Libano, Thales Leipnitz, Juliano Albuquerque e Guilherme Ziegler, que foram essenciais ao meu crescimento pessoal, intelectual e crítico ao longo desta jornada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para a pessoa que me tornei, meu muito obrigado.

“E caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram com ímpeto contra aquela casa, que não caiu, porque fora edificada sobre a rocha.”

São Mateus, 7:25

RESUMO

A crescente demanda por minerais estratégicos e a necessidade de métodos exploratórios inovadores impulsionam a prospecção mineral e a pesquisa científica, especialmente a de ouro, que enfrenta desafios devido à sua baixa concentração na crosta terrestre. O presente trabalho justifica-se no âmbito científico-acadêmico, uma vez que propõe a integração de dados geoquímicos, bioindicadores e sensoriamento remoto para a prospecção de ouro no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS). A pesquisa fez o uso da técnica analítica de Fluorescência de Raios X (FRX) em amostras de solo (horizonte B) e tecido foliar da planta *D. viscosa*, também conhecida como vassoura-vermelha. O levantamento foi realizado utilizando o *DJI Mavic 3M (Multispectral Edition)*, um veículo aéreo não tripulado (VANT) equipado com sistema de imageamento multiespectral integrado. O sensor multiespectral possui quatro bandas espectrais: *Green* (560 ± 16 nm), *Red* (650 ± 16 nm), *Red Edge* (730 ± 16 nm) e *Near Infrared* (860 ± 26 nm), além de uma câmera RGB de 20 MP para imageamento em cores verdadeiras. As imagens de alta resolução do VANT foram utilizadas para detalhar e refinar as anomalias espectrais inicialmente identificadas em imagens de menor resolução dos satélites Landsat 8 (*OLI*) e Sentinel-2 (*MSI*). Métodos de análise espacial foram aplicados para realizar a modelagem de anomalias geoquímicas. Com base nos índices espectrais extraídos dos pontos de coleta, e dos perfis de estimativas *E-W* da área, bem como a identificação de elementos *pathfinders* e sua distribuição e correlação; o desenvolvimento de um protocolo metodológico para a bioprospecção, orientou-se pelo tratamento e análise estatística dos dados, levando a criação de modelos gerados a partir da interpolação de diferentes conjuntos amostrais, os resultados demonstraram a eficácia da integração dos métodos. A análise geoquímica do solo identificou anomalias de Fe_2O_3 , que serviram como "verdade de campo". A análise biogeoquímica validou a *D. viscosa* como um bioindicador eficaz. O modelo de regressão multivariável, que integrou múltiplos índices e bandas espectrais, apresentou boa precisão preditiva ($R^2 = 0,765$) para as concentrações de Fe_2O_3 . A sobreposição das três camadas de informação (solo, planta e espectro) reduziu significativamente a incerteza exploratória. Conclui-se que a combinação de geoquímica de solo, bioindicadores e sensoriamento remoto VANT constitui uma abordagem robusta e eficiente, superando as limitações de cada método isolado.

Palavras-Chave: Biogeoquímica; Bioindicadores; Sensoriamento Remoto; Estatística; Ouro; CILS; Farejadores.

ABSTRACT

The growing demand for strategic minerals and the need for innovative exploration methods are driving mineral prospecting and scientific research, especially for gold, which faces challenges due to its low concentration in the Earth's crust. This study is justified in the academic scientific field, as it proposes the integration of geochemical data, bioindicators, and remote sensing for gold prospecting in the Lavras do Sul Intrusive Complex (CILS). The research uses the analytical technique of X-Ray Fluorescence (XRF) on soil samples (horizon B) and leaf tissue from the *Dodonaea viscosa* plant, also known as red broom. The survey was conducted using the DJI Mavic 3M (Multispectral Edition), an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with an integrated multispectral imaging system. The multispectral sensor has four spectral bands: Green (560 ± 16 nm), Red (650 ± 16 nm), Red Edge (730 ± 16 nm), and Near Infrared (860 ± 26 nm), in addition to a 20 MP RGB camera for true color imaging. The high-resolution images from the UAV were used to detail and refine the spectral anomalies initially identified in lower-resolution images from the Landsat 8 (OLI) and Sentinel-2 (MSI) satellites. Geostatistical methods were applied to model geochemical anomalies. Based on spectral indices extracted from collection points and the E-W estimate profiles of the area, as well as the identification of pathfinder elements and their distribution and correlation, the development of a methodological protocol for bioprospecting was guided by the treatment and statistical analysis of data, leading to the creation of models generated from the interpolation of different sample sets. The results demonstrated the effectiveness of the integration of methods. The geochemical analysis of the soil identified Fe_2O_3 anomalies, which served as "ground truth." The biogeochemical analysis validated *D. viscosa* as an effective bioindicator. The multivariate regression model, which integrated multiple spectral indices and bands, showed good predictive accuracy ($R^2 = 0.765$) for Fe_2O_3 concentrations. The overlay of the three layers of information (soil, plant, and spectrum) significantly reduced exploratory uncertainty. It is concluded that the combination of soil geochemistry, bioindicators, and UAV remote sensing constitutes a robust and efficient approach, overcoming the limitations of each isolated method.

Keywords: Biogeochemistry; Bioindicators; Remote Sensing; Geostatistics; Gold; CILS; Pathfinders.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma

Figura 2 – Abundância relativa dos elementos na crosta continental

Figura 3 – Modelo de alteração hidrotermal associada aos depósitos apicais disseminados (*porphyry copper*) de Cu-Mo-Au

Figura 4 – Cristal de CaC_2O_4 observado no tecido foliar de *Eucalyptus spp.*

Figura 5 – Mapa de localização da área de estudo

Figura 6 – Mapa geológico da borda oeste do CILS

Figura 7 – Mapas geotectônicos e de localização da área de estudo

Figura 8 – Mapa geológico do CILS

Figura 9 – Mapas temáticos - área da mina Butiá

Figura 10 – Pontos de coleta de solo na mina Butiá

Figura 11 – Pontos de coleta de material foliar na mina Butiá.

Figura 12 – As 15 ortoimagens adquiridas no levantamento nos arredores da mina Butiá.

Figura 13 – Malha amostral com valores estimados de Fe_2O_3 , pelo método: mínima curvatura.

Figura 14 – Malha amostral com valores estimados de Fe_2O_3 , pelo método: vizinho mais próximo.

Figura 15 – Gráfico das assinaturas espectrais do perfil que transecta a área.

Figura 16 – Mapa de anomalia dos valores de $\text{Fe}_2\text{O}_3\%$ – por meio da interpolação vizinho mais próximo.

Figura 17 – Gráfico da variação do percentual de Fe_2O_3 estimado no perfil transversal.

Figura 18 – Mapa de anomalia dos valores % Fe_2O_3 .

Figura 19 – Gráfico demonstrando a variação do % Fe_2O_3 estimado no perfil transversal.

Figura 20 – Gráfico mostrando as concentrações médias de elementos comuns em ambos os meios.

Figura 21 – *Heatmap* das correlações de Pearson (Fe_2O_3 – percentual foliar vs assinaturas espectrais do perfil).

Figura 22 – *Heatmap* das correlações de Pearson (Fe_2O_3 – percentual do solo vs assinaturas espectrais do perfil).

Figura 23 – Percentual de Fe_2O_3 em perfil – (Z)* MC.

Figura 24 – Sobreposição do modelo estimado – perfil univariável vs (Z)* MC.

Figura 25 – Sobreposição do modelo estimado – perfil multivariável vs (Z)* MC.

Figura 26 – Gráfico comparativo entre os modelos estimados pelas assinaturas e os modelos convencionais.

Figura 27 – Gráfico comparativo entre as assinaturas espectrais e os perfis estimados de Fe_2O_3 no solo.

Figura 28 – Gráfico comparativo entre as assinaturas espectrais e os perfis estimados de Fe_2O_3 no tecido foliar.

Figura 29 – Gráfico comparativo entre a assinatura do NDVI e os perfis de Fe_2O_3 percentual do solo.

Figura 30 – Gráfico comparativo entre a assinatura do NDVI e os perfis de Fe_2O_3 percentual do tecido foliar.

Figura 31 – Mapa da mina do Butiá: sobreposição de anomalias Fe_2O_3 percentual solo/planta.

Figura 32 – *Heatmap* das correlações de Pearson (elementos presentes no solo).

Figura 33 – *Heatmap* das correlações de Pearson (elementos presentes no tecido foliar).

Figura 34 - Disposição espacial das concentrações elementares no tecido foliar

Figura 35 - Disposição espacial das concentrações elementares no solo

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Minerais e elementos farejadores.

Tabela 2 – Medidas de ajustamento do modelo.

Tabela 3 – Coeficientes do modelo – modelo univariável.

Tabela 4 – Medidas de ajustamento do modelo

Tabela 5 – Coeficientes do modelo – modelo geral multivariável

Tabela 6 – Fase 1: coleta e análise.

Tabela 7 – Fase 2: tratamento e modelagem.

Tabela 8 – Fase 3: integração e conclusão

Tabela 9 – Estatística descritiva – amostras de solo

Tabela 10 – Estatística descritiva – análise foliar

Tabela 11 – Média e desvio padrão das análises.

Tabela 12 – Dados dos modelos criados.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(B) BLUE – Banda do Azul.

CaC₂O₄ – Oxalato de Cálcio.

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

DN – Digital Number.

ED-XRF – Espectrometria por Dispersão por Energia.

ESRG – Escudo Sul-Rio-Grandense.

Fe₂O₃ – Óxido Férrico.

FRX – Fluorescência de Raios X.

(G) GREEN – Banda do Verde.

LATRAM – Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios.

MC – Mínima Curvatura.

MSI – Multispectral Instrument.

MQO – Mínimo Quadrados Ordinários.

NIR – Infravermelho Próximo.

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index.

NN – Nearest Neighbour.

OLI – Imageador Operacional Landsat 8.

PCA – Análise de Componentes Principais.

pXRF – Espectrometria Portátil de Fluorescência de Raios X .

RN – Red Normalized

(R) RED – Banda do Vermelho.

RI – Red Index.

R/G – Red/Green Ratio.

SGB – Serviço Geológico do Brasil

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado.

VD – Variável Dependente.

VIIs – Variáveis Independentes.

WD-XRF – Espectrometria por Comprimento de Onda.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Estado da Arte	2
1.2 Meta	6
1.3 Objetivos	6
1.4 Metodologia	6
1.5 Organização deste trabalho de conclusão	9
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Caracterização pedogeoquímica por espectrometria de FRX.	11
2.1.1 Fundamentos da espectrometria de FRX	12
2.1.2 Análises pedogeoquímicas	13
2.2 Elementos pathfinders na prospecção mineral	14
2.2.1 Conceitos fundamentais e definições	16
2.2.2 Comportamento geoquímico dos elementos pathfinders	16
2.3 Bioindicadores e cristais de CaC_2O_4 na detecção indireta de mineralizações	18
2.3.1 Cristais de CaC_2O_4 na flora	20
2.3.2 Relação entre CaC_2O_4 e mineralizações metálicas	21
2.3.3 O potencial da <i>D. viscosa</i> como bioindicadora	22
2.4 Sensoriamento remoto aplicado à identificação de zonas de alteração hidrotermal	23
2.4.1 Criação de rasters por razões de bandas.	25
2.5 Métodos estatísticos aplicados à prospecção multielementar	27
3 – ESTUDO DE CASO	29
3.1 Área de estudo	29
3.2 Geologia regional	31
3.3 Geologia local	34
3.4 Apresentação dos dados	36
3.4.1 Área da mina Butiá	36
4 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	38
4.1 Coleta e preparação de amostras	38
4.1.1 Amostragem de solo	38
4.1.2 Amostragem de tecido vegetal	39
4.1.3 Aquisição de imagens multiespectrais	40
4.2 Análises geoquímicas por FRX	41
4.2.1 Preparação das amostras de solo	41
4.2.2 Preparação das amostras de tecido vegetal	42
4.2.3 Análise por FRX	42
4.4 Planejamento amostral e definição do grid	43
4.5 Processamento dos dados do VANT	46
4.5.1 Processamento de imagens de sensoriamento remoto	47

4.6 Tratamento estatístico dos dados	47
4.7 Análise de correlação Fe ₂ O ₃ vs assinaturas espectrais	48
4.8 Análise de regressão linear múltipla	49
4.8.1 Cálculo dos coeficientes pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO)	49
4.8.2 Seleção de pontos para modelagem	51
4.8.3 Modelo univariável (red normalized)	51
4.8.4 Modelo geral multivariável	53
4.8.5 Validação dos modelos	54
4.9 Interpolação espacial e perfis E-W	54
4.9.1 Método nearest neighbour	54
4.9.2 Método mínima curvatura	56
4.9.3 Comparação dos perfis	58
5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
5.1 Resultados geoquímicos	59
5.1.1 Estatística descritiva - solo	59
5.1.2 Estatística descritiva - vegetal	59
5.1.3 Comparação solo – vegetal	60
5.2 Análise de correlação Fe ₂ O ₃ vs assinaturas espectrais	61
5.3 Modelos de regressão linear	63
5.3.1 Desempenho dos modelos	64
5.3.2 Validação e comparação dos perfis	65
5.4 Discussão integrada	67
5.4.1 Eficácia da integração de dados	67
5.4.2 Potencial dos modelos preditivos	69
5.4.3 Biogeoquímica: solo vs vegetal	69
5.4.4 Aplicabilidade do NDVI na prospecção mineral	69
5.4.5 Limitações e desafios metodológicos	71
5.4.6 Implicações para prospecção de ouro no CILS	72
6 – CONCLUSÃO	73
6.1 Síntese dos principais resultados	73
6.2 Atendimento aos objetivos	74
6.3 Balanço do projeto: análise do percurso metodológico	74
6.4 Contribuições metodológicas	75
6.5 Recomendações para trabalhos futuros	78
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
8. ANEXOS	85

1 – INTRODUÇÃO

A prospecção mineral no Brasil e no mundo é impulsionada por uma demanda crescente, tanto pelo avanço de políticas de transição energética quanto pela ampliação do setor tecnológico, que exige insumos minerais cada vez mais específicos e estratégicos. Esse cenário tem impulsionado a busca por depósitos de elementos essenciais e de ocorrência restrita, ressaltando a necessidade de métodos exploratórios mais eficientes. No contexto dessa evolução, a prospecção geoquímica se destaca como uma das ferramentas mais eficazes para a detecção indireta de mineralizações, utilizando-se da análise sistemática de amostras de solo, rochas, sedimentos e vegetação (Andriotti, 2010; Licht, 1998; Rose et al., 1979). Esses métodos permitem identificar anomalias geoquímicas associadas a depósitos minerais e mapear áreas favoráveis à exploração. A biogeoquímica e o uso de plantas como bioindicadores destacam-se como ferramentas auxiliares na detecção de anomalias em ambientes de cobertura, sobretudo quando integradas a análises espaciais e espectrais (Dunn, 2007; Lintern et al., 2013). A exploração de ouro enfrenta desafios significativos devido à sua baixa concentração na crosta terrestre ($\sim 0,0031$ g/ton), tornando os métodos geoquímicos indispensáveis para identificar zonas com potencial de mineralização (Boyle, 1979). A utilização de elementos farejadores, também chamados de *pathfinders*, está consolidada na literatura como uma estratégia eficaz para rastrear mineralizações ocultas, especialmente em depósitos do tipo pórfiro ou orogênico, nos quais halos de dispersão geoquímica são formados ao redor dos corpos mineralizados (Boyle, 1979; Carranza, 2009). Elementos como arsênio, antimônio, bismuto, telúrio, mercúrio e cobre estão frequentemente associados a mineralizações auríferas e podem ser detectados em baixos teores em tecidos vegetais, incluindo folhas e cristais de oxalato de cálcio formados por espécies como o *Eucalyptus spp.* (Franceschi; Nakata, 2005; Moreira et al., 2018).

A integração de dados geoquímicos com imagens de satélite, como as dos sensores *OLI* e *MSI*, permite mapear com precisão zonas de alteração hidrotermal, lineamentos estruturais e áreas com potencial mineral. O uso de índices espectrais relacionados à presença de óxidos de ferro e minerais de argila tem se mostrado eficiente para delimitar alvos exploratórios, principalmente quando combinado a dados obtidos em campo (Frutuoso et al., 2021; Chakraborty et al., 2020). Contudo, ainda existem lacunas importantes na padronização e validação dessas técnicas, sobretudo em contextos geológicos heterogêneos, como os do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS). A literatura mostra poucos estudos focados na integração entre dados geoquímicos, estatísticos e biogeoquímicos em ambientes

vulcano-plutônicos pós-colisionais com mineralizações auríferas, como é o caso do CILS (Gastal et al., 2006; Moreira; Gastal, 2018). Diante desse panorama, este trabalho tem como foco a borda oeste do CILS, localizado na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense. Essa unidade geológica constitui uma das províncias metalogenéticas mais relevantes do sul do Brasil, reconhecida por suas mineralizações auríferas associadas a sistemas intrusivos (Gastal et al., 2015). De idade neoproterozóica, o CILS apresenta associações shoshoníticas pós-colisionais e mineralizações hospedadas em veios de quartzo com orientação estrutural predominante e intensa alteração hidrotermal (Gastal; Lafon, 1998; Gastal et al., 2015). Além do ouro, a região abriga ocorrências significativas de Cu, Pb, Zn e Ag, associadas a rochas graníticas e vulcânicas, o que reforça seu potencial para prospecção mineral multielementar.

Neste estudo, propõe-se a integração de dados geoquímicos obtidos a partir de folhas de *Eucalyptus spp.* e outras espécies vegetais, além de amostras de solo e rochas, com análises estatísticas, espaciais e espectrais. O objetivo é avaliar o potencial dos cristais de oxalato de cálcio como biomonitores de mineralizações auríferas e estabelecer tabelas de correlação entre os elementos farejadores (*pathfinders*) detectados nos cristais e aqueles presentes nos solos. A pesquisa busca desenvolver, caso os dados tiverem respaldo na realidade, um protocolo metodológico de prospecção biogeoquímica aplicável a ambientes similares, contribuindo para o avanço científico e para a redução dos custos e impactos ambientais das campanhas exploratórias.

1.1 Estado da Arte

De acordo com Alshaghdari (2023, p. 3), “elementos *pathfinders*, também chamados de elementos farejadores, são aqueles que mantêm forte associação espacial ou genética com um elemento ou mineral-alvo de interesse como ouro, cobre ou diamantes”. Esses elementos podem ser utilizados para rastrear a fonte, a trajetória e a localização da mineralização, além de permitir identificar ambientes geológicos favoráveis e possíveis anomalias. Segundo o autor, tais elementos podem ser classificados conforme sua mobilidade, comportamento e afinidade com o mineral-alvo. Por exemplo, alguns são altamente móveis, formando halos de dispersão ao redor de zonas mineralizadas, enquanto outros permanecem imóveis e sinalizam o grau de alteração ou de metamorfismo. Ademais, há elementos compatíveis que co-precipitam com o mineral-alvo e elementos incompatíveis que se separam dele; alguns são

específicos, diagnósticos de determinado tipo de mineralização, e outros são gerais, comuns a vários tipos de depósitos.

Durante a fase de prospecção, é recorrente o uso de minerais e elementos indicadores como ferramentas para avaliar o potencial mineral de grandes áreas, ajudando a delimitar regiões com menor probabilidade de mineralizações. Despontam dentre eles, elementos como: Hg, As, Mo, Ag, Sn, Sb, Te, W, Bi, Se, que têm sido empregados como indicadores na busca por depósitos de ouro e metais base (Balaram; Sawant, 2020). Devido à sua maior mobilidade em comparação ao ouro em processos hidrotermais e supergênicos, esses elementos formam auréolas geoquímicas que orientam a prospecção em estágios iniciais. O conceito surge na literatura geológica a partir das décadas de 1960 e 1970, acompanhando o avanço das metodologias de prospecção geoquímica. Já na década de 1960, o *Glossary of Geology and Related Sciences*, publicado pelo *American Geological Institute*, descrevia esses elementos como “indicadores móveis associados a depósitos minerais”, estabelecendo uma definição inicial. Posteriormente, Boyle (1979) aprofundou o entendimento sobre o comportamento geoquímico desses elementos, ao demonstrar a correlação entre As, Sb, Bi e Te com mineralizações auríferas, o que conferiu aplicabilidade prática ao conceito. Na década seguinte, os estudos de Jones e Drozd (1983) ampliaram essa abrangência, ao utilizar gases como Hg e S como indicadores em sistemas petrolíferos, metodologia que seria adaptada também para a prospecção de metais. Atualmente, a utilização de elementos farejadores na identificação de halos de dispersão hidrotermal é essencial para localizar mineralizações inexploradas, especialmente em áreas cobertas por solo ou vegetação. Reis (2019) refina esses entendimentos, enfatizando sua aplicação em análises multielementares e modelagem estatística.

Segundo Andrade (2021), os *pathfinders* de maior uso incluem elementos classificados em metálicos Bi, Te, Sb, semimetálicos As, Se e ETR leves associados La e Ce que se fracionam diferencialmente em processos de alteração. A geoquímica de exploração combina coleta sistemática de amostras (rochas, solos, plantas) e tratamento estatístico multivariado para detectar anomalias.

Em função da confiabilidade dos dados, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta eficaz na detecção indireta de mineralizações auríferas, sobretudo na identificação de zonas de alteração hidrotermal associadas. Estudos como o de Frutuoso et al. (2021) demonstram que a aplicação de métodos de realce espectral em imagens Landsat 8, incluindo combinações de bandas, razões espectrais e análise de componentes principais (PCA), permite

mapear com precisão minerais indicativos de alteração, como óxidos de ferro e minerais portadores de hidroxilas, por meio da resposta espectral dos solos e da flora. Complementarmente, outros estudos demonstram que a integração de dados geoquímicos com imagens hiperespectrais permite mapear, com precisão crescente, áreas com potencial mineral, a partir da distribuição de elementos farejadores acumulados em tecidos vegetais e refletidos em suas assinaturas espectrais. Essa abordagem tem se revelado promissora para reduzir os custos e impactos ambientais em campanhas de prospecção, especialmente em regiões onde a cobertura vegetal dificulta o acesso direto ao substrato geológico (Chakraborty et al., 2021).

Plantas como o *Eucalyptus spp.*, absorvem e concentram elementos traço do solo, precipitando-os em seus tecidos foliares na forma de cristais de oxalato de cálcio (CaC_2O_4) associados a íons metálicos, servindo como amostras biogeoquímicas para prospecção. Lintern et al. (2013) publicaram um estudo comprobatório, demonstrando a presença de partículas naturais de ouro no tecido foliar do eucalipto e sua relevância para a exploração de jazidas enterradas. A geoquímica de exploração combina coleta sistemática de amostras com métodos estatísticos multivariados para distinguir anomalias significativas do *background*. Técnicas como normalização de dados, PCA e correlações de Spearman permitem identificar padrões espaciais e associações elementares características de mineralizações. A integração entre os elementos farejadores e as técnicas estatísticas na prospecção geoquímica é fundamental para a identificação de anomalias relacionadas a depósitos minerais. Segundo Andrade (2021), os *pathfinders* de modo geral, são amplamente utilizados devido à sua mobilidade e afinidade geoquímica em processos de alteração hidrotermal ou supergênica. A título de exemplo, o arsênio proveniente de arsenopirita portadora de ouro e seus produtos de alteração é facilmente absorvido por plantas em virtude de sua alta mobilidade e solubilidade em água, acumulando-se em diferentes partes vegetais (Chakraborty et al., 2021).

Além das análises multivariadas, a interpolação geoestatística também desempenha papel crucial na modelagem espacial de anomalias geoquímicas. Técnicas de vizinho mais próximo *nearest neighbor* oferecem interpolações conservadoras dos gradientes elementares. Esses procedimentos facilitam a construção de mapas de contorno e a delimitação precisa de halos exploratórios em prospecção geoquímica (Goovaerts, 1997). Essa abordagem integrada é respaldada pelos estudos de Andriotti (2022), que destaca a importância da estatística na separação dos sinais supracitados e Bonham-Carter (1994) que evidencia a detecção de *pathfinders* como o Bi e o Te em solos, associada a anomalias de Cu e Mo, demonstrando

como a combinação de dados geoquímicos e análise multivariada pode otimizar a identificação de alvos exploratórios.

Diante da relevância geológica e metalogenética do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, bem como o histórico de lavra aurífera que remonta ao final do século XVIII, optou-se por realizar este estudo no município de Lavras do Sul, situado na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense. Este complexo representa um centro vulcano-plutônico pós-colisional, datado entre 604 e 590 Ma, composto por rochas graníticas e vulcanogênicas neoproterozóicas (Gastal et al., 2015). O CILS é reconhecido como uma das principais províncias metalogenéticas do sul do Brasil, com ocorrência de mineralizações auríferas e de metais associados, como Cu, Pb, Zn e Ag, frequentemente hospedadas em veios de quartzo com orientação estrutural predominante entre N40°W e E-W (Gastal et al., 1998). As mineralizações estão associadas a zonas de fraturamento e alteração hidrotermal, caracterizadas pela presença recorrente de sericita, clorita e sulfetos secundários. Além disso, os corpos graníticos da região apresentam zonalidade composicional e contrastes de suscetibilidade magnética, características que favorecem a aplicação de métodos de prospecção integrada (Liz, 2008). Diversos autores têm recorrido a levantamentos geoquímicos integrados e modelamentos termoquímicos para elucidar os mecanismos de precipitação aurífera em sistemas hidrotermais. Mexias et al. (2005) aplicaram o *software* EQ3/6 a fluidos de salinidade 4,8 wt% NaCl a 300 °C do Bloco do Butiá, demonstrando que a queda de pH e temperatura promove a desestabilização de complexos sulfurosos de ouro e que a dissolução de clorita ferrosa é fundamental para fornecer ferro à pirita aurífera. Esses resultados fornecem subsídios quantitativos para interpretar halos de alteração fílica (sericita–pirita) e orientam a calibragem de amostragem geoquímica e alvos de sensoriamento remoto em contextos geológicos multifásicos, como o CILS.

A partir desse contexto, o presente trabalho apresenta e discute os resultados obtidos a partir de análises de FRX em amostras de solo, rochas e plantas e propõe integrá-las com estatísticas multivariadas e geoespaciais para avaliar suas correlações como ferramentas de prospecção mineral no CILS. Espera-se que esta abordagem ofereça subsídios para o desenvolvimento de protocolos metodológicos, contribuindo para a exploração mineral sustentável em contextos geológicos semelhantes (Dunn, 2007).

1.2 Meta

De acordo com a contextualização apresentada nos itens anteriores, este trabalho se propôs a desenvolver e validar uma metodologia de prospecção biogeoquímica baseada na análise de rochas, solos e cristais de oxalato de cálcio em folhas de *D. viscosa* como bioindicadores para a identificação de áreas com potencial mineral no Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

1.3 Objetivos

Para que a meta do trabalho fosse atingida, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- I. propor um protocolo metodológico para prospecção biogeoquímica;
- II. caracterizar a distribuição espacial dos elementos farejadores (As, Hg, Cu, Pb, Zn) em amostras de solo e planta utilizando técnicas de FRX;
- III. identificar e quantificar as concentrações de *pathfinders* em folhas de *D.Viscosa*, e solos.
- IV. estabelecer correlações estatísticas entre os elementos farejadores nas plantas e as características geológicas locais;
- V. desenvolver mapas temáticos e geoquímicos multivariados para identificação de alvos com potencial aurífero utilizando técnicas de análise espacial.

1.4 Metodologia

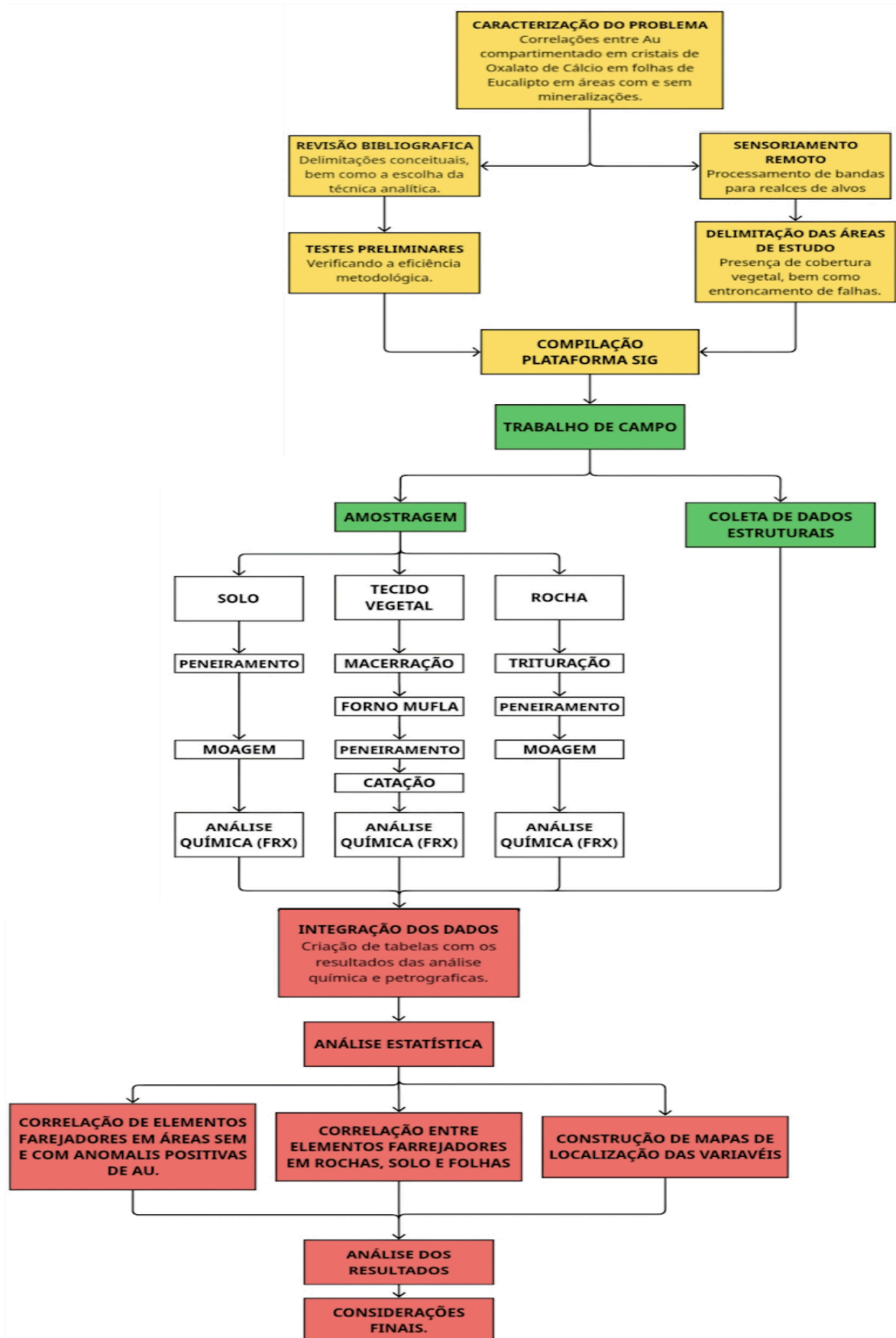
A metodologia inicia-se com uma revisão da bibliografia existente sobre os estudos realizados na área de pesquisa, com o objetivo de estabelecer uma base teórica sólida para a realização do trabalho. Para alcançar esse objetivo, foram revisados livros, artigos, resumos, relatórios, mapas, monografias, dissertações e teses relacionados à biogeoquímica na exploração mineral e à geologia regional, assim como trabalhos de técnicas analíticas

análogas pelo mundo. Concomitantemente, a seleção de áreas de estudo no CILS foi baseada em dados pré-existentes como lineamentos estruturais e informações sobre requerimentos de lavra disponibilizados pelo SIGMINE/ANM.

A aquisição de imagens obtidas por sensores *OLI* e *MSI* possibilitou o mapeamento por razões de bandas, o que culminou na delimitação das áreas. Posteriormente, à coleta sistemática e georreferenciada de amostras de solos (horizonte B), rochas (com foco em alterações), folhas de *Eucalyptus* spp., e outras espécies vegetais nos arredores da mina, seguida pela preparação adequada de cada material: trituração, moagem, quarteamento para rochas, quarteamento, peneiramento para solos, e para os tecidos foliares optou-se pela secagem em estufa por um período de 48 horas, procedeu-se à maceração do material até a obtenção de um pó extra-fino. As análises químicas foram centradas na FRX para elementos farejadores As, Hg, Cu, Pb, Zn e outros elementos nos três meios.

Um controle de qualidade analítico foi mantido através do uso de correções estatísticas, a fim de descartar eventuais valores anômalos. Os dados geoquímicos foram submetidos à análises estatísticas descritivas, de correlação bivariada e multivariadas, além de análises espaciais. Finalmente, todos os dados obtidos foram integrados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para interpretação conjunta, visando avaliar as correlações entre os compartimentos amostrais, a eficácia dos cristais de oxalato como bioindicadores, bem como suas relações espaciais tanto fornecidas pelo sensoriamento quanto inferidas pela interpolação e conclusões estatísticas; por fim, pretende-se propor um protocolo otimizado para prospecção biogeoquímica na região. Esta metodologia integradora permitirá uma análise robusta das correlações entre os elementos farejadores nos diferentes meios amostrais, contribuindo para a avaliação da eficácia dos cristais de CaC_2O_4 como bioindicadores na prospecção de ouro e para o desenvolvimento de um protocolo metodológico aplicável em áreas com contexto geológico similar.

Figura 1 - Fluxograma.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.5 Organização deste trabalho de conclusão

A organização deste trabalho está estruturada em 5 capítulos, correspondendo aos tópicos apresentados abaixo.

O Capítulo 1, apresenta a problemática do trabalho, iniciando pela demanda crescente por minerais estratégicos e a necessidade de métodos exploratórios eficientes. Abordando a relevância da prospecção geoquímica, o uso de bioindicadores como o *Eucalyptus* spp. e especificamente os cristais de CaC_2O_4 na detecção indireta de mineralizações auríferas, e a aplicação do sensoriamento remoto na identificação de zonas de alteração hidrotermal. O capítulo também introduz o conceito de elementos farejadores (*pathfinders*) e a importância da integração de dados geoquímicos, biogeoquímicos e de sensoriamento remoto, com foco no CILS.

O Capítulo 2, aprofunda os conceitos e as técnicas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho abordando tópicos como a caracterização pedogeoquímica por espectrometria de FRX, a função e o comportamento dos elementos *pathfinders* na prospecção mineral, o papel dos bioindicadores e cristais de CaC_2O_4 na detecção indireta de mineralizações, a aplicação do sensoriamento remoto na identificação de zonas de alteração hidrotermal, e a análise da distribuição espacial de elementos aplicada à prospecção multielementar. Este capítulo estabelece a base teórica para as análises e discussões subsequentes.

No Capítulo 3, é introduzida a área de estudo, o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), localizado na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense. Bem como os aspectos referentes à geologia regional e local da área, destacando sua relevância geológica e metalogenética.

O Capítulo 4, Desenvolvimento do Trabalho, descreve a execução das etapas práticas da pesquisa. Este capítulo aborda a aplicação dos métodos definidos, desde os trabalhos de campo para coleta de amostras até as análises laboratoriais e o processamento dos dados. Detalha a construção dos bancos de dados geoquímicos, biogeoquímicos e de sensoriamento remoto que servirão de base para a fase de análise e interpretação dos resultados.

O Capítulo 5, Apresentação e Discussão dos Resultados, apresenta os dados obtidos e

realiza uma análise integrada. Neste capítulo, são avaliados os resultados das análises químicas dos cristais de CaC_2O_4 e dos solos, estabelecendo correlações entre os elementos pathfinders em ambos os materiais. Discute-se o potencial dos cristais como biomonitores de mineralizações auríferas e a eficácia da integração de dados para a definição de alvos exploratórios, culminando na proposição de um protocolo metodológico de prospecção biogeoquímica.

O Capítulo 6, Considerações Finais, sintetiza os principais resultados e conclusões do estudo, destacando as contribuições da pesquisa para a prospecção mineral. São discutidas as limitações do trabalho e apresentadas sugestões para pesquisas futuras, reforçando a relevância da metodologia desenvolvida para a exploração de depósitos minerais em ambientes similares.

O Capítulo 7, Referências, apresenta as referências bibliográficas que embasaram os métodos e as fontes de informações.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos que fundamentam a integração de dados geoquímicos, bioindicadores vegetais e sensoriamento remoto aplicados à prospecção aurífera. Inicialmente, abordam-se os fundamentos da caracterização pedogeoquímica por meio de espectrometria de FRX, com ênfase nos procedimentos analíticos e na interpretação dos resultados. Em seguida, discute-se o papel dos elementos *pathfinders* na prospecção mineral, explorando suas definições, propriedades geoquímicas e mecanismos de dispersão, aspectos essenciais para a identificação de anomalias associadas a mineralizações ocultas. Além disso, o capítulo ainda inclui uma análise sobre o uso de bioindicadores, com destaque para os cristais de CaC_2O_4 presentes nos tecidos foliares da flora analisada, e sua correlação com concentrações anômalas de metais no ambiente edáfico. A aplicação do sensoriamento remoto na identificação de zonas de alteração hidrotermal também é contemplada, destacando as potencialidades das técnicas espectrais na delimitação de alvos exploratórios. Por fim, são apresentados os principais métodos estatísticos utilizados na prospecção multielementar, com foco na modelagem espacial de anomalias geoquímicas e na otimização da seleção de áreas com maior potencial mineral.

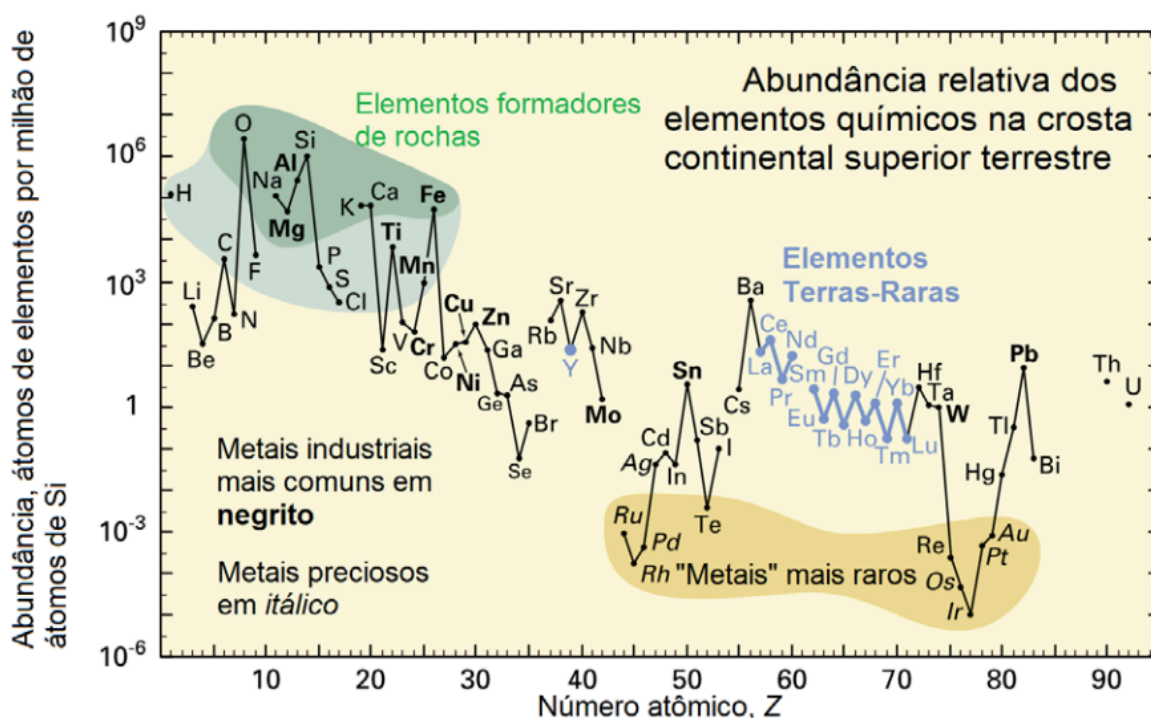
2.1 Caracterização pedogeoquímica por espectrometria de FRX.

Em estudos pedogeoquímicos, o pXRF tem sido aplicado com sucesso em mapeamentos regionais, identificação de anomalias associadas a mineralizações, caracterização de perfis de alteração e avaliação de contaminação de solos. Sarala (2009) demonstrou a eficácia desta técnica na prospecção mineral em regiões de clima frio, utilizando análises de solos superficiais para identificar anomalias de elementos *pathfinders* associados a mineralizações auríferas na Finlândia. O autor verificou que elementos como Ca e Fe, bem como a maioria dos elementos traço analisados Cu, Zn, Pb, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, W, Th e U, apresentavam variações correlacionáveis às mudanças litológicas no substrato rochoso, evidenciando o potencial do pXRF como ferramenta de prospecção.

Apesar das vantagens, o uso do pXRF em análises de solos apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Fatores como a umidade, a heterogeneidade, a granulometria e a rugosidade da superfície analisada podem afetar significativamente as medições. Parsons et al. (2013) observaram que o teor de umidade do

solo pode reduzir em até 80% a intensidade do sinal para elementos leves, recomendando a secagem das amostras sempre que possível. Além disso, a presença de matéria orgânica pode interferir nas análises, especialmente para elementos leves, devido ao efeito de matriz.

Figura 2 - Abundância relativa dos elementos na crosta continental.



Fonte: Extraído de Haxel 2002.

2.1.1 Fundamentos da espectrometria de FRX

A espectrometria de fluorescência de raios X fundamenta-se no princípio físico da emissão de radiação secundária característica, quando um material é excitado por radiação eletromagnética de alta energia (raios X primários). Quando um átomo é irradiado com energia suficiente para remover elétrons das camadas mais internas (K, L ou M), ocorre uma desestabilização momentânea. Para restabelecer a estabilidade, elétrons de camadas mais externas preenchem as vacâncias criadas, liberando energia na forma de fótons de raios X com comprimentos de onda específicos para cada elemento químico (Jenkins, 1999).

A intensidade da radiação fluorescente emitida é proporcional à concentração do elemento na amostra, permitindo análises quantitativas após calibração adequada com

materiais de referência. O equipamento de FRX da Bruker utilizado nesse estudo, possibilita a determinação simultânea de elementos a partir do magnésio ($Z = 12$), não detectando elementos de número atômico inferior (Silva et al., 2018).

Existem dois tipos principais de espectrômetros de FRX: os de dispersão por comprimento de onda (WD-XRF) e os de dispersão por energia (ED-XRF). Nos espectrômetros WD-XRF, a radiação fluorescente é separada por difração em cristais analisadores, o que permite maior resolução espectral e, conseqüentemente, melhor sensibilidade analítica. Já nos espectrômetros ED-XRF, a separação ocorre diretamente por meio de detectores semicondutores, que discriminam os fótons de raios X de acordo com suas energias. Embora apresentem menor resolução que os WD-XRF, os equipamentos ED-XRF são mais compactos, menos custosos e servem de base para analisadores portáteis pXRF frequentemente utilizados em análises de campo (Potts e West, 2008).

2.1.2 Análises pedogeoquímicas

Em estudos de intemperismo e pedogênese, o cálculo do balanço químico de massa é fundamental para avaliar perdas e ganhos de elementos ao longo de perfis de alteração. Na prospecção mineral, a FRX tem sido aplicada com sucesso na identificação de halos geoquímicos associados a diversos tipos de depósitos. Somarin et al. (2012) demonstraram que análises por Espectrometria Portátil de Fluorescência de Raios X (pXRF) de solos superficiais podem produzir dados com boa correlação com resultados laboratoriais convencionais. Os autores identificaram associações de Cu-Mo-Au e Cu-Zn-Pb em solos sobre depósitos do tipo pórfiro e sulfetos maciços vulcanogênicos.

Lacerda et al. (2002) aplicaram esta abordagem em perfis de solos com horizonte B textural na região de Lavras (MG), utilizando o Ti como elemento imóvel de referência. Os autores conseguiram quantificar as perdas de sílica e bases Ca, Mg, Na, K e o enriquecimento relativo de Al e Fe durante a pedogênese, estabelecendo relações entre a composição geoquímica dos solos e os processos intempéricos atuantes em diferentes materiais de origem.

Oliveira et al. (2014) utilizaram FRX para caracterizar perfis de alteração desenvolvidos sobre rochas graníticas no nordeste brasileiro, identificando padrões de distribuição de elementos maiores e traço que permitiram reconstruir a história pedogenética da região. Os autores observaram empobrecimento progressivo em Si, Ca, Mg, Na e K da

base para o topo dos perfis, acompanhado por enriquecimento relativo em Al, Fe e Ti, refletindo a intensidade dos processos de hidrólise e lixiviação em ambiente tropical.

Em estudos ambientais, a FRX tem sido amplamente utilizada para mapear contaminação de solos por metais pesados e outros elementos potencialmente tóxicos. Rouillon e Taylor (2016) aplicaram pXRF para avaliar a distribuição espacial de Pb, Zn, Cu e As em solos urbanos, identificando hotspots de contaminação associados a atividades industriais históricas e tráfego veicular. Os autores destacaram a capacidade da técnica para realizar screening rápido de grandes áreas.

2.2 Elementos *pathfinders* na prospecção mineral

A utilização de elementos farejadores na prospecção mineral baseia-se no conceito de associação geoquímica, que corresponde ao conjunto de elementos que ocorrem naturalmente associados em um determinado tipo de depósito mineral (Licht, 1998). Esta associação é determinada pelos processos que deram origem ao depósito e pode ser utilizada como uma assinatura geoquímica característica. Segundo Rose et al. (1979), os elementos farejadores apresentam vantagens significativas em relação ao elemento de interesse econômico, incluindo:

- I. maior mobilidade geoquímica, permitindo a formação de halos de dispersão mais amplos;
- II. concentrações mais elevadas e mais facilmente detectáveis pelos métodos analíticos disponíveis;
- III. distribuição mais regular, reduzindo o efeito pepita que frequentemente afeta elementos como o ouro.

No contexto da prospecção aurífera, Boyle (1979) identificou diferentes associações de elementos farejadores para diferentes tipos de depósitos de ouro:

- I. depósitos epitermais, elementos como As, Sb, Hg, Tl e Se;

- II. depósitos mesotermiais, As, Sb, W, Bi e Te são os mais relevantes;
- III. depósitos associados a intrusões, Cu, Mo, Bi, W e Sn podem ser utilizados como farejadores.

Tabela 1: Minerais e elementos farejadores.

Alvo Mineral	Principais Minerais farejadores	Principais Elementos farejadores
Ouro	Pirita, calcopirita, arsenopirita, bismutinita magnetita, teluretos, tetraedrita, pirita, esfalerita, muscovita, monazita, bastnasita, quartzo, scheelita, volframita, cassiterita.	Fe, Mn, Cu, Co, Ni, Sb, Zn, As, Bi, Te, Sn, Se, Tl, Ag, Hg, Pb, Mo e W.

Fonte: Adaptado de Balaram, V. e Sawant, S. S. 2023.

2.2.1 Conceitos fundamentais e definições

A importância dos elementos *pathfinders* reside em sua capacidade de superar limitações inerentes à detecção direta do elemento-alvo. Conforme destacam Balaram e Sawant (2020), durante estudos de exploração, elementos *pathfinders*, juntamente com minerais indicadores, são reconhecidos como indicadores de depósitos de metais nobres e básicos. Em muitos casos, o elemento de interesse econômico pode ocorrer em concentrações extremamente baixas, próximas ou abaixo dos limites de detecção das técnicas analíticas convencionais, ou apresentar distribuição errática, dificultando sua detecção direta em amostragens incipientes.

Os mecanismos de dispersão geoquímica desses elementos variam significativamente em função do tipo de ambiente epigenético e das condições superficiais. Em ambientes hipogênicos, a dispersão é predominantemente controlada por fluidos hidrotermais, resultando na formação de halos de alteração concêntricos ou zonados ao redor dos corpos mineralizados. Por outro lado, em ambientes supergênicos, a dispersão é controlada por processos intempéricos e pedogenéticos, com mobilização e redistribuição dos elementos em função de suas propriedades geoquímicas e das condições ambientais locais (Licht, 1998).

2.2.2 Comportamento geoquímico dos elementos *pathfinders*

A formação de halos primários e secundários constitui um aspecto fundamental na aplicação de elementos *pathfinders*. Halos primários formam-se durante os processos mineralizantes, refletindo gradientes físico-químicos em torno do corpo mineralizado. Estes halos frequentemente apresentam zonação, com diferentes elementos concentrando-se preferencialmente em diferentes distâncias do núcleo mineralizado. Já os halos secundários desenvolvem-se durante processos intempéricos e pedogenéticos, quando a mineralização primária é exposta a condições superficiais (Dunn, 2007).

Hale (1981) destaca que elementos como As, Sb e Bi formam halos geoquímicos extensos em torno de mineralizações auríferas, devido à sua associação paragenética com o ouro e à sua maior mobilidade em condições supergênicas. O autor observa que estes

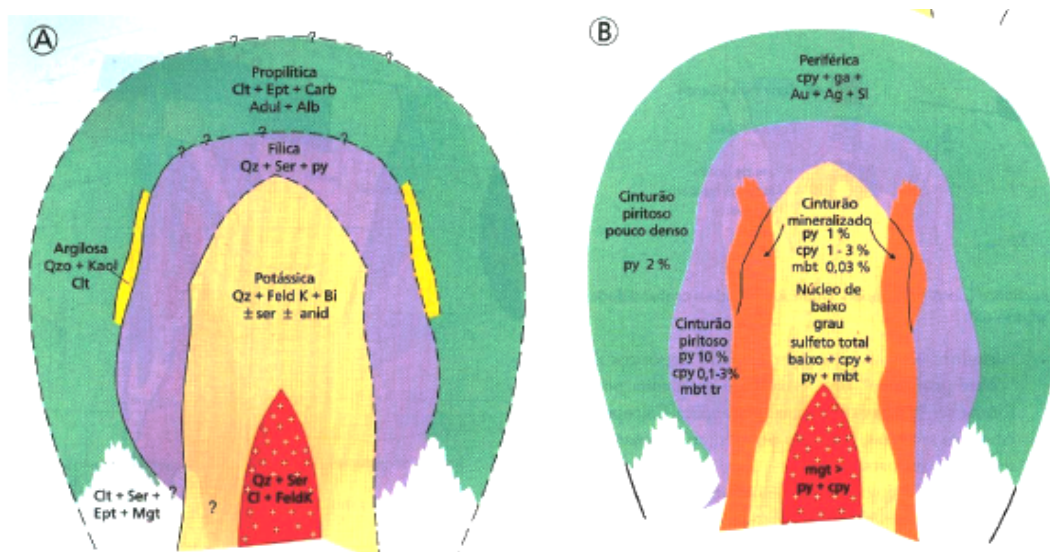
elementos podem ser detectados em concentrações anômalas a distâncias significativamente maiores que o próprio ouro.

A estabilidade desses elementos em condições superficiais varia consideravelmente em função do clima, relevo, cobertura vegetal e atividade biológica. Em regiões tropicais, onde os processos intempéricos são intensos, elementos móveis podem ser lixiviados das porções superficiais do perfil de solo e reconcentrados em horizontes mais profundos ou dispersos no sistema de drenagem. Korshunova e Charykova (2019) estudaram as formas móveis de ouro e elementos *pathfinders* em sedimentos superficiais no depósito de ouro Novye Peski, demonstrando que a especiação química dos elementos controla significativamente sua mobilidade e, conseqüentemente, seus padrões de dispersão.

As associações mineralógicas fornecem informações sobre a natureza das mineralizações e os processos de alteração associados. Em sistemas epitermais a associação de As com minerais como arsenopirita (FeAsS), realgar (AsS) e ouropigmento (As₂S₃) é comum em zonas mineralizadas em ouro. Já em sistemas pórfiros, Mb ocorre principalmente como molibdenita (MoS₂), frequentemente associada a mineralizações de cobre e ouro (Sillitoe, 2010).

Para depósitos do tipo pórfiro Cu-Au, Sillitoe (2010) revisou o uso de elementos *pathfinders* em diferentes contextos geológicos, destacando a importância de Mb, Re, Te e Se como indicadores de sistemas mineralizados. O autor observou que a zonation geoquímica destes elementos reflete a estrutura concêntrica típica dos sistemas pórfiros, com diferentes associações elementares caracterizando as zonas potássica, fílica, argílica e propilítica, como demonstrado na Figura 3:

Figura 3 - Modelo de alteração hidrotermal associada aos depósitos apicais disseminados (*porphyry copper*) de Cu-Mo-Au. (A) Distribuição zonada dos minerais silicatados. (B) Distribuição dos minerais metálicos.



Fonte: Biondi, 2003

Toniolo et al. (2010), em estudo sobre a metalogênese das províncias metálicas na área de Lavras do Sul e Caçapava do Sul, destacaram a importância dos elementos *pathfinders* na caracterização dos diferentes estilos de mineralização presentes na região. Os autores identificaram assinaturas geoquímicas distintas para mineralizações auríferas associadas a sistemas epitermais, mesotermiais e relacionadas a intrusões, comprovando o potencial dos elementos *pathfinders* para discriminar diferentes tipos de depósitos em um mesmo contexto geológico.

2.3 Bioindicadores e cristais de CaC_2O_4 na detecção indireta de mineralizações

A aplicação de bioindicadores e de cristais de CaC_2O_4 na prospecção mineral tem sido demonstrada em diversos contextos geológicos, com resultados que destacam o potencial desta abordagem como complemento aos métodos convencionais de exploração. Os estudos documentados na literatura fornecem evidências da eficácia desta técnica para diversos tipos de mineralização.

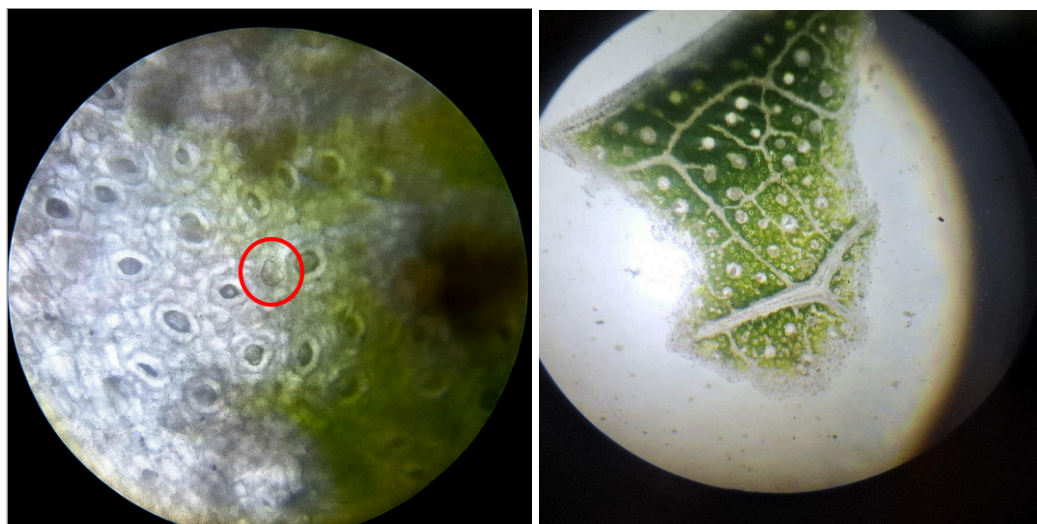
Na Austrália, além do trabalho de Lintern et al. (2013) utilizando *Eucalyptus* nativos sobre depósitos auríferos, outros estudos têm expandido a aplicação desta abordagem para

diferentes tipos de mineralização. Dunn (2007) relata a utilização de biogeoquímica na detecção de depósitos de Au, Cu, Zn, U e ETRs. Barreiro (2017) investigou o comportamento biogeoquímico de elementos-traço em plantas que crescem sobre o CILS, demonstrando correlações significativas entre a composição elementar dos tecidos vegetais e as mineralizações auríferas conhecidas na região. Este estudo fornece uma base importante para a aplicação de métodos biogeoquímicos na prospecção mineral no ESRG.

2.3.1 Cristais de CaC_2O_4 na flora

Os cristais de oxalato de cálcio (CaC_2O_4) representam uma das formas mais comuns de biomineralização em plantas, ocorrendo em mais de 215 famílias de angiospermas e em diversos tecidos vegetais (Franceschi; Nakata, 2005). Estes cristais são formados pela combinação de íons Ca^{2+} com ácido oxálico produzido metabolicamente pela planta, resultando em estruturas cristalinas insolúveis que podem apresentar diferentes morfologias, incluindo ráfides, drusas (agregados esféricos), estilóides e cristais de areia.

Figura 4 - Cristal de CaC_2O_4 observado no tecido foliar de *Eucalyptos spp.*



Fonte: Autor.

A formação dos cristais de CaC_2O_4 em plantas é um processo altamente regulado, ocorrendo em células especializadas denominadas idioblastos. Segundo Franceschi e Nakata (2005), a biogênese destes cristais envolve a síntese e secreção de ácido oxálico, o transporte de íons Ca para o local de cristalização, e a nucleação e crescimento controlado dos cristais dentro de uma matriz orgânica que determina sua morfologia final.

As funções biológicas dos cristais de CaC_2O_4 em plantas são variadas e incluem a regulação dos níveis de Ca nos tecidos, a proteção contra herbivoria, a desintoxicação de metais pesados e o suporte estrutural (Moreira et al., 2018). Particularmente relevante para a

prospecção mineral é a capacidade destes cristais de incorporar e sequestrar metais e outros elementos-traço durante sua formação.

Malajczuk e Cromack (1982) documentaram a ocorrência natural de cristais de CaC_2O_4 em ecossistemas florestais dominados por *Eucalyptus diversicolor* na Austrália Ocidental. Os autores observaram que a formação e distribuição dos cristais variavam sazonalmente e em resposta a diferentes condições edáficas, sugerindo uma relação dinâmica entre a biomineralização de CaC_2O_4 e o ambiente geoquímico.

Estudos mais recentes, em raízes de *Eucalyptus*, como o de Silva et al. (2018), demonstraram que a formação de cristais de CaC_2O_4 é significativamente influenciada pela presença de fungos ectomicorrízicos, que aumentam a produção de ácido oxálico e, conseqüentemente, a precipitação de cristais. Esta relação simbiótica tem implicações para a biogeoquímica do solo e para a capacidade das plantas de absorver, acumular e adsorver elementos-traço, incluindo metais preciosos como o ouro.

2.3.2 Relação entre CaC_2O_4 e mineralizações metálicas

A relação entre os cristais de CaC_2O_4 e as mineralizações metálicas representa um dos aspectos mais promissores da biogeoquímica. Diversos estudos têm demonstrado que estes cristais podem incorporar e sequestrar metais e elementos-traço durante sua formação, atuando como indicadores geoquímicos da composição do solo em que a planta se desenvolve (Moreira et al., 2018).

O mecanismo de incorporação de metais nos cristais de CaC_2O_4 envolve principalmente a substituição isomórfica de íons Ca por outros cátions metálicos com raio iônico e carga similares, bem como a adsorção de íons metálicos na superfície dos cristais ou sua oclusão durante o crescimento cristalino (Franceschi; Nakata, 2005). Além disso, complexos metálicos podem ser incorporados na matriz orgânica que envolve os cristais, contribuindo para a assinatura geoquímica total.

Lintern et al. (2013) demonstrou a presença de nanopartículas de ouro em cristais de CaC_2O_4 extraídos de folhas de *Eucalyptus*, estabelecendo uma ligação direta entre a biomineralização de CaC_2O_4 e a detecção de depósitos auríferos ocultos.

Segundo He et al. (2021), a capacidade dos cristais de CaC_2O_4 de incorporar e preservar assinaturas geoquímicas do substrato oferece vantagens significativas para a prospecção mineral, uma vez que estes cristais são relativamente estáveis e podem acumular elementos-traço ao longo do tempo, amplificando sinais geoquímicos fracos e facilitando sua detecção. Além disso, a análise dos cristais permite isolar a assinatura geoquímica de interesse de possíveis contaminações superficiais ou interferências atmosféricas que poderiam afetar a interpretação dos resultados, uma vez que os mecanismos de translocação e distribuição destes elementos estão ligados as partes mais inferiores do corpo vegetal.

2.3.3 O potencial da *D. viscosa* como bioindicadora

A espécie *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq., uma planta com notável rusticidade, possui uma distribuição global que se estende por diversas regiões tropicais, subtropicais e temperadas quentes, conferindo-lhe uma grande vantagem como objeto de estudo em diferentes contextos biogeoquímicos. Essa ampla ocorrência está intrinsecamente ligada à sua capacidade de atuar como uma espécie pioneira, sendo frequentemente encontrada em estágios de sucessão ecológica primária e secundária. Essa característica a torna fundamental na recuperação de áreas degradadas. A robustez e a profundidade de suas raízes permitem que a planta acesse nutrientes e água em camadas mais profundas do solo, ao mesmo tempo que interage com um volume maior de substrato, o que potencializa seu significativo potencial como bioindicadora, particularmente em solos contaminados por metais pesados, onde a capacidade de fitoestabilização ou fitoextração é influenciada diretamente pela arquitetura radicular.

Estudos recentes evidenciam a capacidade de *D. viscosa* de prosperar em ambientes poluídos, como áreas de rejeitos de mineração. Uma pesquisa conduzida por Castañeda-Espinoza et al. (2023) demonstrou que *D. viscosa* não apenas sobrevive, mas acumula eficientemente metais como cobre (Cu), cádmio (Cd), ferro (Fe), chumbo (Pb) e zinco (Zn) em suas raízes e folhas. A pesquisa concluiu que a espécie possui potencial tanto para a fitoextração (translocando Zn, Cu e Cd para a parte aérea) quanto para a fitoestabilização (imobilizando Cu, Cd, Fe, Pb e Zn nas raízes). Essa habilidade de bioacumulação, aliada à sua abundância e estabelecimento natural em solos contaminados, a qualifica como uma candidata ideal para programas de fitorremediação e, conseqüentemente, como um organismo bioindicador da presença desses poluentes no ambiente.

Um dos mecanismos fisiológicos que podem explicar a tolerância de certas plantas a altas concentrações de metais pesados é a formação de cristais de oxalato de cálcio (CaC_2O_4).

A literatura científica, no entanto, apresenta resultados divergentes e espécie-específicos sobre esse papel. Por exemplo, Mazen e El Maghraby (1997) observaram, em *Eichhornia crassipes*, que metais como Cd e Pb eram incorporados aos cristais de CaC_2O_4 , sugerindo uma função direta na tolerância. De forma semelhante, Pongrac et al. (2018) demonstraram em *Gomphrena claussenii*, uma bioindicadora de cádmio, que o Cd se liga quimicamente ao oxalato nos cristais. Em contrapartida, um estudo com *Phaseolus vulgaris* (feijão) indicou que o estresse por metais pesados, na verdade, reduziu a deposição de cristais de CaC_2O_4 , e os metais não foram detectados em sua composição, sugerindo que, para essa espécie, os cristais não desempenham um papel central na desintoxicação (jáuregui-zúñiga et al., 2005).

A conexão entre a capacidade bioindicadora de *D. viscosa* e a presença de cristais de oxalato de cálcio é fortalecida por estudos anatômicos. Análises farmacológicas da folha de *D. viscosa* confirmam a presença abundante de cristais de oxalato de cálcio, especificamente do tipo drusa, nos tecidos foliares, especialmente ao redor dos feixes vasculares (shanthi et al., 2016). Embora estudos diretos de microanálise que comprovem o sequestro de metais pesados nos cristais de *D. viscosa* ainda sejam necessários, a coexistência de uma alta capacidade de acumulação de metais e a presença massiva desses cristais sugere fortemente que a formação de oxalato de cálcio é um dos mecanismos fisiológicos que conferem a esta espécie sua tolerância e seu potencial como bioindicadora. A capacidade de mobilizar metais tóxicos em cristais de oxalato nas folhas e raízes pode ser a chave para sua sobrevivência e dominância em ambientes severamente contaminados.

2.4 Sensoriamento remoto aplicado à identificação de zonas de alteração hidrotermal

A identificação espectral de zonas de alteração hidrotermal baseia-se nos princípios da espectroscopia de reflectância, que estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria. Diferentes minerais absorvem e refletem a radiação em comprimentos de onda específicos, criando assinaturas espectrais características que podem ser utilizadas para sua identificação (Sabins, 1999). Estas assinaturas resultam de processos eletrônicos e

vibracionais nas estruturas cristalinas dos minerais, sendo influenciadas por sua composição química e estrutura cristalográfica.

Os minerais de alteração hidrotermal comumente associados a depósitos auríferos, como argilominerais: caulinita, illita, montmorilonita, muscovita, sericita, cloritas, carbonatos e óxidos/hidróxidos de ferro como hematita, goethita, jarosita, apresentam feições de absorção diagnósticas em diferentes regiões do espectro eletromagnético (Crósta *et al.*, 2003). Estas feições são particularmente pronunciadas nas regiões do visível e infravermelho próximo (VNIR, 0,4-1,0 μm), infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1,0-2,5 μm) e infravermelho termal (TIR, 8,0-14,0 μm). Na região do VNIR, as feições de absorção são dominadas por processos eletrônicos, principalmente relacionados à presença de metais de transição como Fe, Mn, Cu e Cr. Óxidos e hidróxidos de ferro, frequentemente associados a zonas de alteração hidrotermal, apresentam feições de absorção diagnósticas nesta região, permitindo sua identificação e, em alguns casos, discriminação entre diferentes espécies (Binotto *et al.*, 2015). A hematita, por exemplo, apresenta feições de absorção em aproximadamente 0,85 μm , enquanto a goethita em cerca de 0,93 μm . Na região do SWIR, as feições de absorção resultam principalmente de processos vibracionais envolvendo ligações OH, H₂O, CO₃, NH₄ e Al-OH, Si-OH, Mg-OH, entre outras. Esta região é particularmente importante para a identificação de argilominerais, micas, cloritas e carbonatos, que são minerais indicadores comuns de alteração hidrotermal (Crósta *et al.*, 2003).

A caulinita, apresenta uma dupla absorção característica em 2,16 e 2,20 μm , enquanto a muscovita/sericita mostra uma absorção em 2,20 μm , e a calcita em 2,33 μm . Na região do TIR, as feições espectrais são dominadas por processos vibracionais fundamentais de estiramento e flexão de ligações Si-O, Al-O, Mg-O e outros componentes estruturais dos silicatos. Esta região é particularmente útil para a discriminação de silicatos, como quartzo, feldspatos e outros minerais formadores de rochas, bem como para a identificação de carbonatos e sulfatos (Sabins, 1999).

O conhecimento detalhado das assinaturas espectrais dos minerais de alteração hidrotermal é um pilar para a interpretação de dados de sensoriamento remoto e para o desenvolvimento de metodologias de processamento de imagens que permitam realçar e mapear estas zonas de alteração. No entanto, diversos fatores podem complicar esta interpretação, incluindo a mistura espectral (presença de múltiplos minerais em um único pixel), interferências atmosféricas, efeitos topográficos, cobertura vegetal e intemperismo (Frutuoso *et al.*, 2021).

2.4.1 Criação de *rasters* por razões de bandas.

Para a identificação de alvos prospectivos de ouro no CILS, técnicas de processamento digital de imagens multiespectrais obtidas com sensores aerotransportados e orbitais permitem a criação de produtos derivados com foco em razões de banda (*band ratios*) sensíveis a produtos de alteração hidrotermal e enriquecimento supergênico. As razões de banda são operações aritméticas que realçam a resposta espectral de materiais específicos enquanto minimizam efeitos de iluminação e topografia, sendo uma ferramenta valiosa na prospecção mineral por sensoriamento remoto (Rockwell, 2012). Tradicionalmente aplicadas a dados de sensores orbitais como *OLI* e *MSI*, essas técnicas podem ser adaptadas para sensores multiespectrais embarcados em VANTs, como o *DJI Mavic 3M*, permitindo levantamentos de maior resolução espacial e temporal sobre áreas de interesse específico.

Neste trabalho, foram selecionados três índices espectrais complementares derivados das bandas do espectro visível: *Red/Green Ratio* (R/G), *Redness Index* (RI) e *Normalized Red* (RN) cujas formulações e funções são detalhadas a seguir.

O *Red/Green Ratio* (R/G), ou Razão Vermelho/Verde, é um índice de razão simples, calculado pela (Fórmula 1):

$$R/G = \rho_{\text{vermelho}} / \rho_{\text{verde}} \quad (1)$$

Onde ρ_{vermelho} e ρ_{verde} representam a reflectância normalizada nas bandas do vermelho (650 ± 16 nm) e do verde (560 ± 16 nm), respectivamente. A função deste índice é realçar superfícies que apresentam maior reflectância na porção vermelha do espectro em detrimento da verde, característica típica de rochas que sofreram oxidação e desenvolveram minerais de ferro férrico (Fe^{3+}), como hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$). Estes minerais são constituintes comuns de zonas de alteração hidrotermal e gossans (chapéus de ferro), frequentemente associados a depósitos de sulfetos metálicos, incluindo mineralizações auríferas (Sabins, 1999). Valores de R/G superiores a 1,0 indicam predominância da reflectância vermelha, sugerindo a presença de óxidos de ferro, enquanto valores inferiores a 1,0 são típicos de áreas com cobertura vegetal ou solos pobres em ferro. A aplicação deste índice visa a detecção direta dessas feições de "vermelhidão" (*redness*) como um primeiro indicador de áreas potencialmente mineralizadas ou alteradas hidrotermalmente.

De forma complementar, o *Redness Index* (RI), ou Índice de Vermelhidão, aprimora a detecção de óxidos de ferro através de uma formulação não-linear que amplifica a componente vermelha em relação às componentes verde e azul do espectro. O RI é calculado pela (Fórmula 2):

$$RI = \rho_{\text{vermelho}}^2 / (\rho_{\text{azul}} \times \rho_{\text{verde}}^3) \quad (2)$$

Onde ρ_{vermelho} , ρ_{verde} e ρ_{azul} representam as reflectâncias normalizadas nas bandas vermelha, verde e azul, respectivamente. Esta formulação, proposta por Madeira Netto (1996), foi desenvolvida especificamente para quantificar o grau de vermelhidão de solos e rochas, sendo particularmente sensível a variações no conteúdo de óxidos de ferro. A elevação ao quadrado da componente vermelha e ao cubo da componente verde amplifica as diferenças espectrais, resultando em valores de RI significativamente mais altos em áreas ricas em hematita e goethita. Valores elevados de RI (tipicamente superiores a 10-20) indicam forte presença de óxidos de ferro, enquanto valores baixos (próximos de 1) são característicos de solos neutros ou acinzentados. A utilização deste índice no presente estudo justifica-se pela sua maior sensibilidade em relação ao R/G simples, permitindo a identificação de anomalias de alteração mais sutis que poderiam passar despercebidas em análises baseadas apenas em razões lineares. O terceiro índice, RN, ou Vermelho Normalizado, foi obtido pela (Fórmula 3):

$$RN = \rho_{\text{vermelho}} / (\rho_{\text{vermelho}} + \rho_{\text{verde}} + \rho_{\text{azul}}) \quad (3)$$

Este índice expressa a contribuição relativa da banda vermelha em relação ao total da reflectância no espectro visível, gerando valores entre 0 e 1. A normalização pela soma das três bandas minimiza os efeitos de variações de iluminação, sombras topográficas e diferenças de albedo entre diferentes materiais, permitindo uma comparação robusta e consistente entre diferentes áreas da cena (Viscarra Rossel et al., 2006). Valores de RN superiores a 0,40 indicam forte predominância da reflectância vermelha, característica de solos lateríticos e rochas ricas em óxidos de ferro, enquanto valores inferiores a 0,33 sugerem distribuição espectral mais uniforme, típica de solos neutros ou com alto conteúdo de matéria orgânica. A vantagem do RN em relação aos índices anteriores reside na sua menor sensibilidade a variações de brilho absoluto, tornando-o particularmente útil para gerar mapas de anomalias de alteração mais consistentes em áreas com topografia acidentada ou condições de iluminação heterogêneas.

A escolha destes três índices fundamentou-se em múltiplos critérios. Primeiramente, todos são diretamente calculáveis a partir das bandas espectrais da câmera RGB do sensor *DJI Mavic 3M* (Verde: 560 ± 16 nm; Vermelho: 650 ± 16 nm; Azul: 475 ± 25 nm), sem necessidade de bandas adicionais no infravermelho de ondas curtas (SWIR), que não estão disponíveis neste sensor. Em segundo lugar, os três índices são altamente eficazes na identificação de óxidos de ferro, que atuam como importantes guias prospectivos para a mineralização de ouro no contexto geológico do CILS, onde processos de alteração hidrotermal e oxidação supergênica são reconhecidamente associados a depósitos auríferos (Remus et al., 2000). Em terceiro lugar, a utilização conjunta dos três índices fornece informações complementares: o R/G oferece uma primeira aproximação rápida e intuitiva; o RI amplifica anomalias sutis através de sua formulação não-linear; e o RN fornece uma medida normalizada e robusta, menos suscetível a artefatos de iluminação. Os mapas gerados a partir dessas razões de banda fornecem camadas de informação espacial contínuas que, integradas aos dados geoquímicos de solo, às análises petrográficas e às informações de bioindicadores vegetais, permitem uma delimitação mais precisa e eficiente de alvos para exploração detalhada, reduzindo custos e otimizando os esforços de prospecção em campo.

Cabe ressaltar, que a faixa espectral limitada do sensor *DJI Mavic 3M* (450-886 nm) impõe restrições à capacidade de discriminação entre diferentes espécies de óxidos de ferro e outros minerais de alteração hidrotermal. As principais feições de absorção diagnósticas dos óxidos de ferro, bem como de minerais indicadores de alteração como argilominerais e micas, ocorrem predominantemente na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR, 900-2500 nm), não coberta por este sensor (Hunt, 1977). Assim, os índices aqui empregados baseiam-se em correlações indiretas entre a coloração vermelha do solo/rocha e o conteúdo de ferro total, sem capacidade de distinguir entre estados de oxidação (Fe^{2+} vs. Fe^{3+}) ou mineralogia específica (hematita vs. goethita vs. magnetita). Apesar dessas limitações, os resultados obtidos demonstram que os índices de cor do solo derivados de sensores RGB de alta resolução espacial pode fornecer informações para a prospecção mineral em escala de detalhe, quando integrados a outras fontes de dados geológicos e geoquímicos, constituindo uma ferramenta complementar para a identificação de alvos prospectivos em terrenos com cobertura de solo desenvolvida.

2.5 Métodos estatísticos aplicados à prospecção multielementar

A prospecção geoquímica multielementar gera conjuntos de dados complexos, onde a distribuição espacial dos elementos químicos é de fundamental importância para a identificação de anomalias e a compreensão dos processos mineralizantes. A estatística clássica, embora útil para análises exploratórias e descritivas, não considera explicitamente a localização espacial das amostras e a dependência espacial entre elas (Isaaks e Srivastava, 1989). É neste contexto que a análise de variáveis regionalizadas se torna uma ferramenta indispensável, fornecendo um conjunto de métodos que incorporam a estrutura espacial dos dados na análise, estimativa e simulação de variáveis regionalizadas (Andriotti, 2014).

Uma variável regionalizada é uma variável que assume valores em diferentes pontos no espaço, exibindo tanto um componente aleatório quanto um componente estruturado que reflete a correlação espacial entre amostras próximas (Isaaks; Srivastava, 1989). Em prospecção geoquímica, as concentrações elementares em amostras de solo, rocha ou sedimento são exemplos típicos de variáveis regionalizadas. A modelagem de dependência espacial busca modelar e quantificar esta dependência espacial para realizar estimativas mais precisas e avaliar a incerteza associada a essas estimativas (Rossi e Deutsch, 2014).

A aplicação de técnicas de interpolação espacial permite ir além da simples identificação de valores anômalos, possibilitando a criação de mapas de distribuição espacial contínua das concentrações elementares, a quantificação da continuidade espacial das anomalias, a identificação de padrões de zoneamento geoquímico e a avaliação da incerteza associada ao mapeamento (Carranza, 2009). Na prospecção multielementar, a análise de dados espaciais oferece ferramentas para analisar as correlações espaciais entre diferentes elementos, ajudando a identificar associações geoquímicas significativas e a definir vetores de exploração (Mapa, 2015).

3 – ESTUDO DE CASO

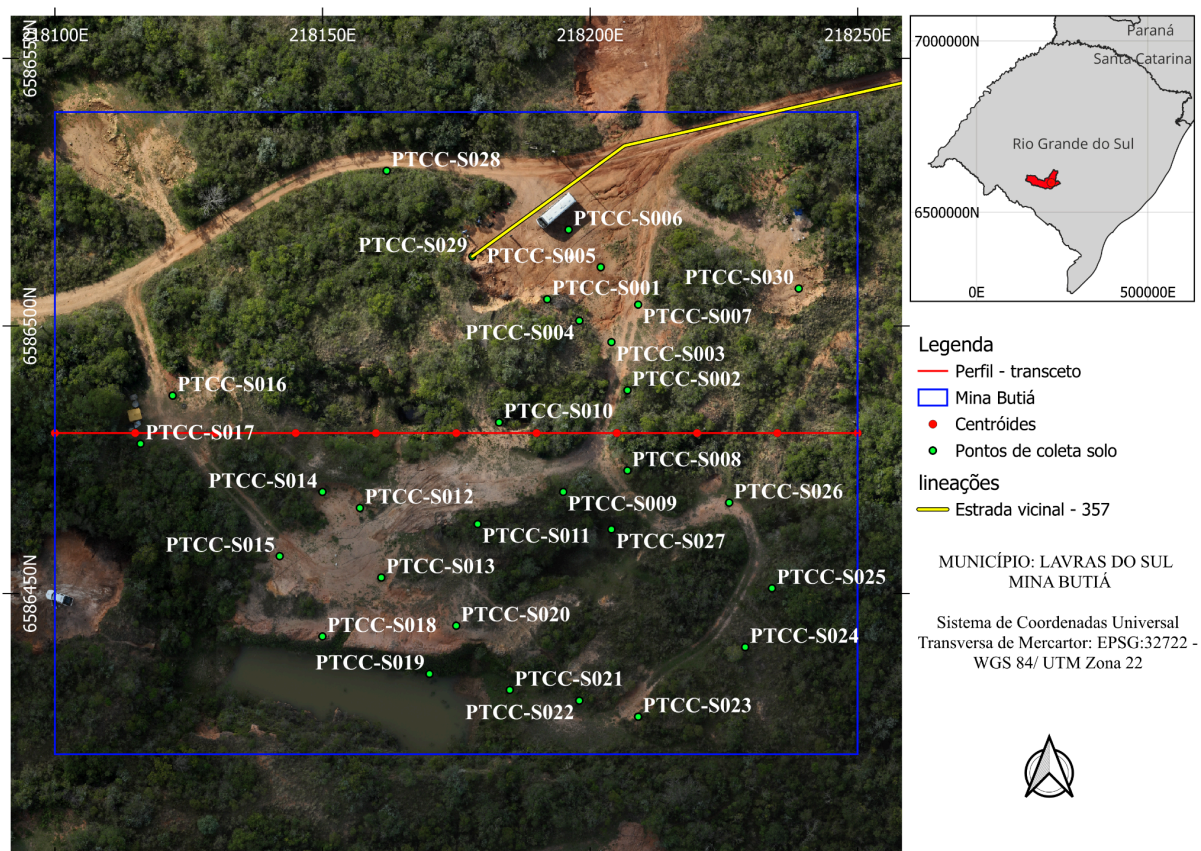
Neste capítulo são apresentados e discutidos os mapas de localização, mapas geológicos e, por fim, os mapas gerados pelas razões de bandas que destacam as mineralizações e discretizam a pedologia local.

3.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Lavras do Sul, Rio Grande do Sul, a aproximadamente 320 km a sudoeste de Porto Alegre. O acesso à região é realizado pela rodovia BR-290 até o município de Caçapava do Sul, seguido pela RS-357. O foco da pesquisa é a antiga área de mineração da Mina do Butiá, cujo acesso final é feito por uma estrada não pavimentada de 5 km. Esta área corresponde ao antigo alvará de pesquisa do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) nº 810.138/1987.

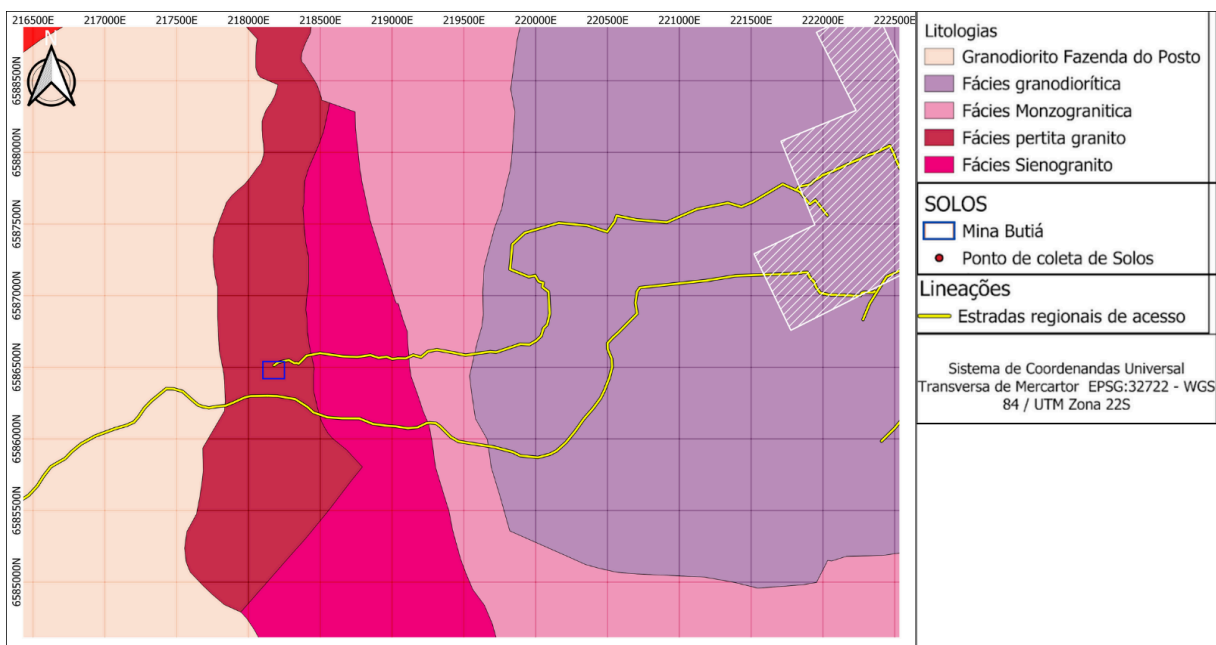
A Mina do Butiá esteve em operação por catorze anos, com as atividades encerradas em 1949. Durante seu período de funcionamento, a extração de ouro era realizada manualmente nas cavas Boa Vista e Bloco do Butiá. O distrito aurífero de Lavras do Sul possui um histórico de exploração que remonta a 1790, com período de maior intensidade entre 1935 e 1950. Nessa época, aproximadamente setenta garimpeiros atuavam nas duas cavas principais, utilizando métodos que incluíam britagem, moagem, uso de mesa vibratória e purificação do ouro com mercúrio e ácidos (HNO_3 e H_2SO_4), resultando em produção mensal de cerca de 5 kg de ouro.

Figura 5 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 - Mapa geológico da borda oeste do CILS



Fonte: Extraído e adaptado de Serviço geológico do Brasil (2021).

3.2 Geologia regional

A área de estudo, localizada no município de Lavras do Sul, insere-se na porção oeste do ESRG (Figura 6). Esta região está compreendida no domínio do Arco São Gabriel, uma importante feição geotectônica que se destaca por sua complexidade litológica e estrutural.

O embasamento da área é representado pelo Complexo Cambaí, que engloba uma diversidade de litotipos, incluindo metaultramafitos do tipo Cerro da Mantiqueira, além da Sequência Marmeleiro, caracterizada por rochas metassedimentares, metagranitoides e gnaisses cálcio-alcalinos. Sobrejacentes ao Complexo Cambaí, encontram-se os metamorfitos Arroio da Porteira, que, por sua vez, são recobertos pelas rochas arcoseanas da Formação Maricá. Acima desta formação, ocorrem depósitos vulcânicos pertencentes às formações Hilário e Acampamento Velho, que se distinguem pela presença de rochas de composição shoshoníticas e alcalinas. A sequência encerra-se pelas rochas sedimentares da Formação Santa Bárbara (Liz, 2008).

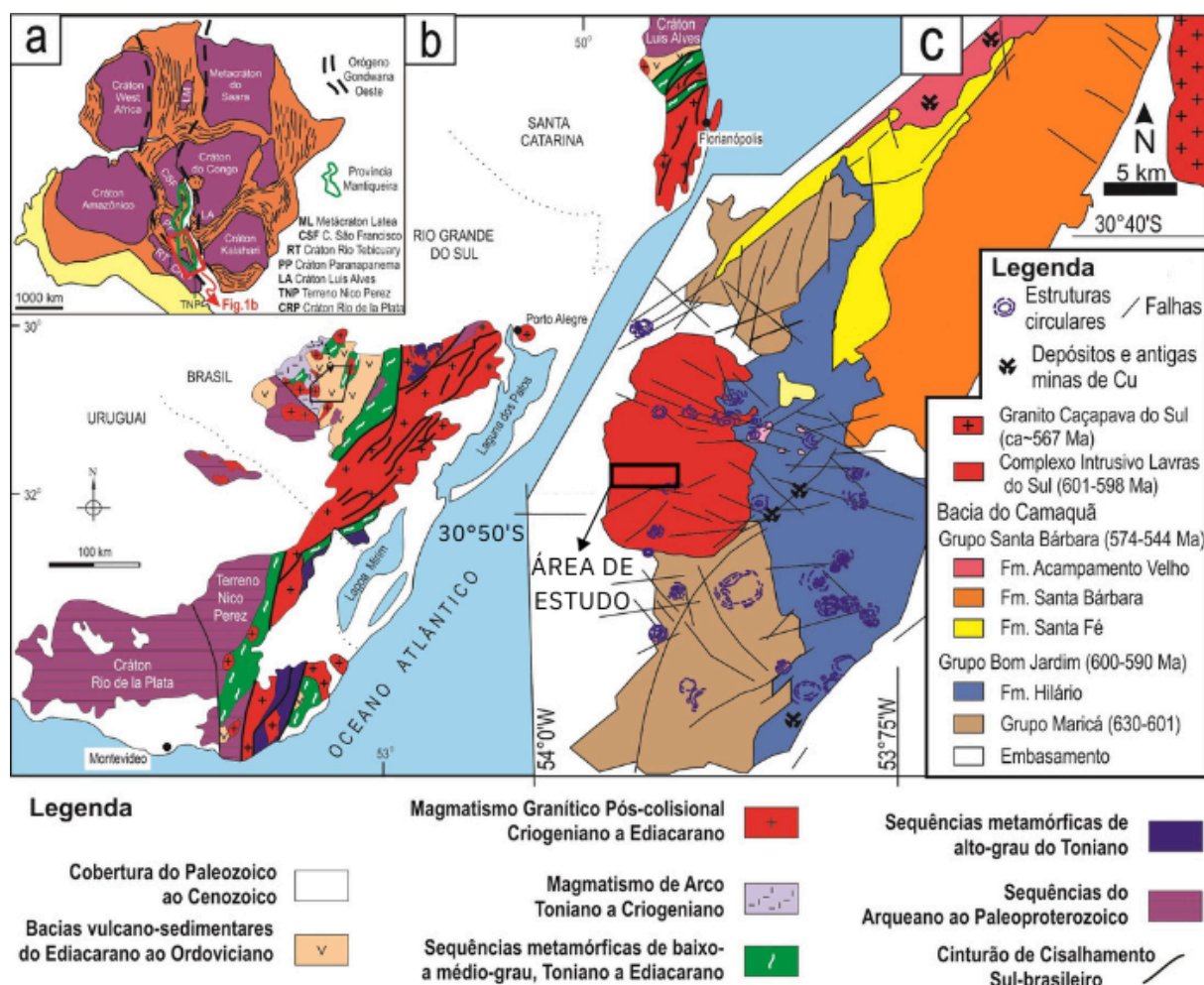
O ESRG, conforme a divisão proposta por Chemale Jr. (2000), é segmentado em quatro terrenos ígneos e metamórficos expressivos. O Complexo Granulítico Santa Maria Chico é composto por rochas metamórficas que sofreram retrabalhamento durante o

Neoproterozoico. O Bloco São Gabriel é caracterizado por rochas gnáissicas e vulcanossedimentares. O Cinturão Tijucas apresenta rochas granito-gnáissicas, graníticas e anfibolíticas de idade Paleoproterozoica, além de rochas vulcano-sedimentares com idades em torno de 800-770 Ma. Por fim, o Cinturão Dom Feliciano é constituído por unidades gnáissicas, graníticas e migmatitos, resultantes de um magmatismo datado entre 650-590 Ma e do retrabalhamento da crosta Paleoproterozoica.

A Bacia do Camaquã, uma proeminente sequência vulcano -sedimentar aflorante no Escudo Sul-rio-grandense, foi depositada durante as fases tardi a pós-colisionais do Ciclo Brasileiro, inserida no contexto do Cinturão Dom Feliciano (Paim; Chemale Jr; Lopes, 2000). Esta bacia é delimitada a leste pelos cinturões Tijucas e Dom Feliciano, e a oeste pelo Terreno São Gabriel e pelo Cráton Rio de La Plata, apresentando uma orientação geral NE-SW (Paim; Chemale Jr; Wildner, 2014).

Segundo Paim, Chemale Jr. e Lopes (2000), a Bacia do Camaquã representa um lócus deposicional que evoluiu em quatro estágios tectônicos distintos. Estes estágios foram marcados por eventos vulcânicos e ciclos de sedimentação específicos, limitados por discordâncias angulares e associados a diferentes ambientes tectônicos. A distribuição estratigráfica da bacia é subdividida em cinco alogrupos: Boicí-Piquiri, Guaritas, Santa Bárbara, Ramada e Taquarembó. Esta subdivisão reflete a sobreposição de registros de sedimentação em bacias de antepaís de retroarco (Alogrupo Maricá), bacias transcorrentes (Bom Jardim Oeste e Leste), e rifts (Santa Bárbara Oeste e Leste, e Guaritas). Os alogrupos mais antigos, Maricá e Bom Jardim, tiveram sua deposição influenciada por um ambiente dúctil-rúptil, possivelmente sob um regime compressivo ou transpressivo, evidenciado pela presença de dobras moderadamente apertadas (Paim; Chemale Jr; Lopes, 2000). Em contraste, os alogrupos mais jovens, Santa Bárbara e Guaritas, caracterizam-se por uma deposição de origem continental, influenciada pelo estágio final da tectônica transcorrente sinistral, manifestada por dobras de arraste amplas e suaves (Chemale Jr., 2000).

Figura 7: Mapas geotectônicos e de localização da área de estudo. A) Esboço tectônico do Gondwana Oeste; B) Mapa geotectônico do Cinturão Dom Feliciano (modificado de Bitencourt & Nardi, 2000; De Toni et al., 2020); C) Mapa da Bacia do Camaquã na região entre Lavras do Sul e Caçapava do Sul (RS).



Fonte: Modificado de Lopes et al., 2019.

3.3 Geologia local

A área de estudo (Figura 6) compreende rochas constituídas por um núcleo monzogranítico a granodiorítico, gerado por assimilação parcial de magmas graníticos mais jovens, responsáveis por gerar pertita granitos que ocorrem nas bordas sul, oeste e norte do pluton possuindo assinatura geoquímicas de rochas shoshoníticas (Nardi, 1984).

Gastal et al. (2006) divide o CILS em dois setores, norte e sul. Ao norte está o monzonito Tapera, constituído por quartzo monzonito, monzonito, monzodiorito e diorito. Ao sul, encontra-se o Monzodiorito Arroio do Jacques composto por dioritos e monzodioritos, que circundam o corpo granítico principal (Gastal et al., 2006).

A área que compreende o maior número de amostras na área de estudo corresponde a uma intrusão granítica com zonalidade reversa de fácies, álcali-cálcicas e alcalinas, sendo composta por granodioritos, monzogranitos, sienogranitos e pertita granitos (Gastal et al., 2006).

No que diz respeito à petrografia dos granitos do núcleo, os granodioritos apresentam textura seriada a porfirítica com grãos variando de grossos a finos, contendo contrastes texturais e exsolução de voláteis em algumas feições (Gastal et al., 2006). Os monzogranitos possuem dois tipos de textura, equigranular média ou seriada, variando de média a fina e com feições de dissolução de plagioclásio (Gastal et al., 2006).

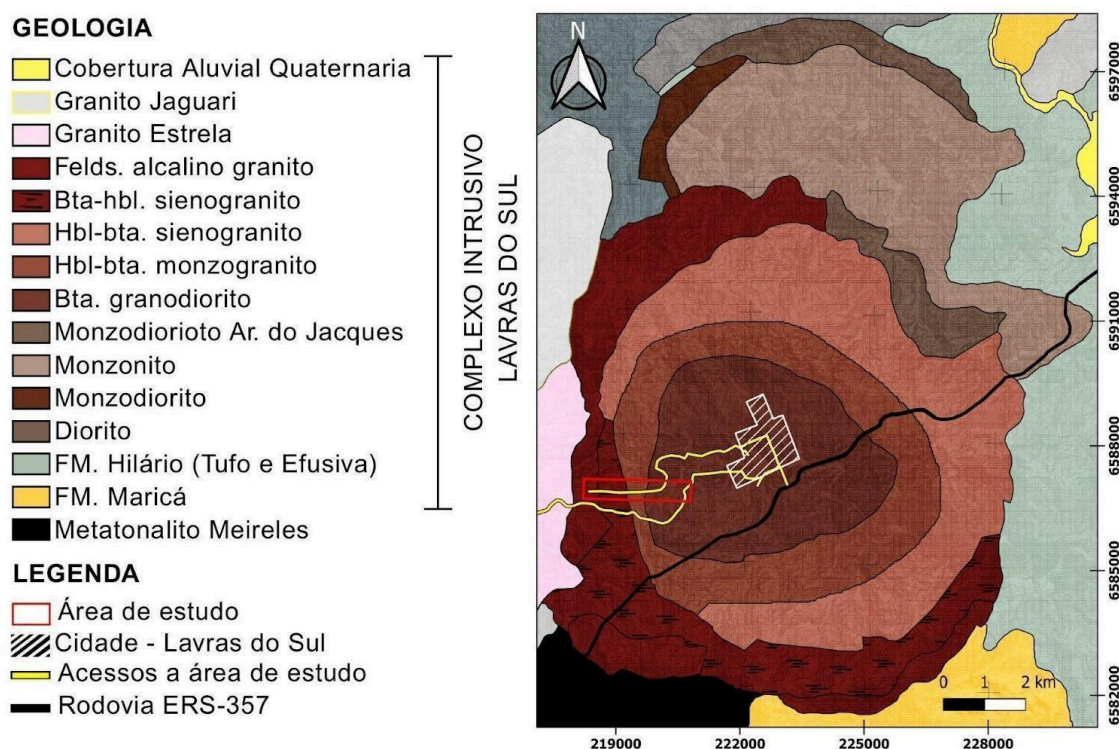
De acordo com Wollmann. (2024), as rochas do CILS apresentam as seguintes características:

- I. granodioritos: exibem textura seriada a porfirítica, com granulação variando de grossa a fina, e feições que indicam exsolução de voláteis.
- II. monzogranitos: apresentam textura equigranular média ou seriada (média a fina), com evidências de dissolução de plagioclásio.
- III. sienogranitos: caracterizam-se por uma bimodalidade textural (grossa a média) e feições de hibridismo restritas, contendo oligoclásio a albita cálcica em sua associação mineral.

IV. pertita granitos: possuem textura equigranular média a grossa e são compostos essencialmente por K-feldspato com textura pertítica, cristais de quartzo irregulares e anédricos, e anfibólios subédricos. Este litotipo é frequentemente associado à mineralização de ouro na Mina do Butiá, especialmente onde ocorrem zonas de alteração hidrotermal (silicificação, sericitização, cloritização e carbonatação) e sulfetos disseminados (pirita).

A mineralização aurífera no CILS está associada a sistemas de veios de quartzo e zonas de alteração hidrotermal, controladas por estruturas rúpteis. O ouro ocorre frequentemente associado a sulfetos, como pirita, calcopirita e galena, e está hospedado tanto nos corpos graníticos quanto nas rochas vulcânicas encaixantes (Lopes, et al. 2018).

Figura 8: Mapa geológico do CILS



Fonte: Extraído e adaptado de Serviço geológico do Brasil (2021); Adaptado de Gastal, M.C. et al. Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator: EPSG:32.722 – WGS 84 / UTM Zona 22S. Fonte: SGB (2021), elaborado por Autor.

3.4 Apresentação dos dados

Esta seção apresenta os resultados do processamento de dados de sensoriamento remoto, especificamente os mapas de índices espectrais derivados de imagens Sentinel, e a distribuição das amostras de campo coletadas.

3.4.1 Área da mina Butiá

A Figura 9 ilustra os mapas de índices espectrais para a área da Mina Butiá, com os pontos de coleta de solo, gerados a partir de imagens Sentinel nas resoluções de 20 metros e 10 metros. São apresentados três índices principais: o Índice de Ferro Ferrífero (*Ferric*), o Índice de Ferro Ferroso (*Ferrous*) e o Índice de Alteração Argílica (*Clay Index*). A variação de cores nos mapas de calor, indica a intensidade de cada índice, com tons quentes (vermelho/laranja) representando valores mais altos e tons frios (azul/verde) indicando valores mais baixos.

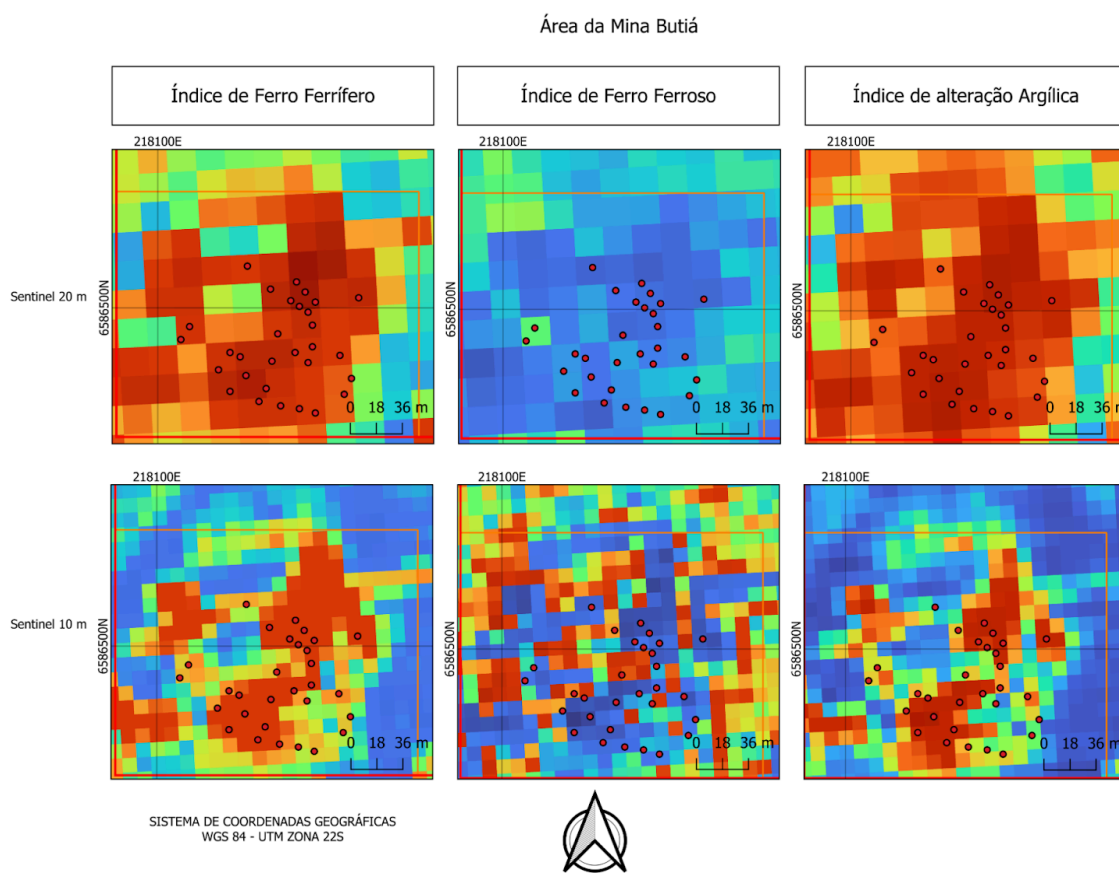
O Índice de Ferro Ferrífero destaca a presença de óxidos de ferro Fe^{3+} , como hematita e goethita, que são indicadores comuns de alteração hidrotermal e mineralização. Na área da Mina Butiá, observa-se predominância de valores elevados para este índice, especialmente na porção central e leste da área mapeada, sugerindo forte presença de minerais férricos. O aumento da resolução de 20m para 10m permite uma visualização mais detalhada dessas anomalias.

O Índice de Ferro Ferroso é sensível a minerais contendo ferro em estado reduzido Fe^{2+} , frequentemente associados a rochas máficas ou a zonas de alteração menos oxidativas. Os mapas para a Mina Butiá mostram uma distribuição mais heterogênea, com algumas áreas apresentando valores mais elevados, o que pode indicar a presença de minerais primários ou zonas de alteração específicas.

O Índice de Alteração Argílica é fundamental para identificar minerais de argila, como caulinitas e esmectitas, que são produtos típicos de alteração hidrotermal. Na Mina do Butiá, os mapas revelam áreas com alta intensidade de alteração argílica, especialmente nas proximidades das ocorrências de ferro ferrífero, o que reforça a hipótese de processos hidrotermais atuantes na área.

Sobrepostos a estes mapas, estão representados os pontos de coleta de amostras de campo. Foram coletadas 30 amostras de solo e 10 de biomassa na área da mina. As análises geoquímicas destas amostras de solo e de tecido vegetal foram correlacionadas aos valores dos índices espectrais para identificar a relação entre a assinatura espectral e a concentração de elementos de interesse, incluindo os elementos e minerais farejadores.

Figura 9 - Mapas temáticos - área da mina Butiá.



Fonte: elaborado pelo autor.

4 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O presente capítulo detalha o desenvolvimento do trabalho, abrangendo todas as etapas metodológicas executadas para atingir os objetivos propostos. A metodologia foi estruturada de forma a integrar dados de diferentes fontes – geoquímica de solo e de tecido vegetal, e sensoriamento remoto.

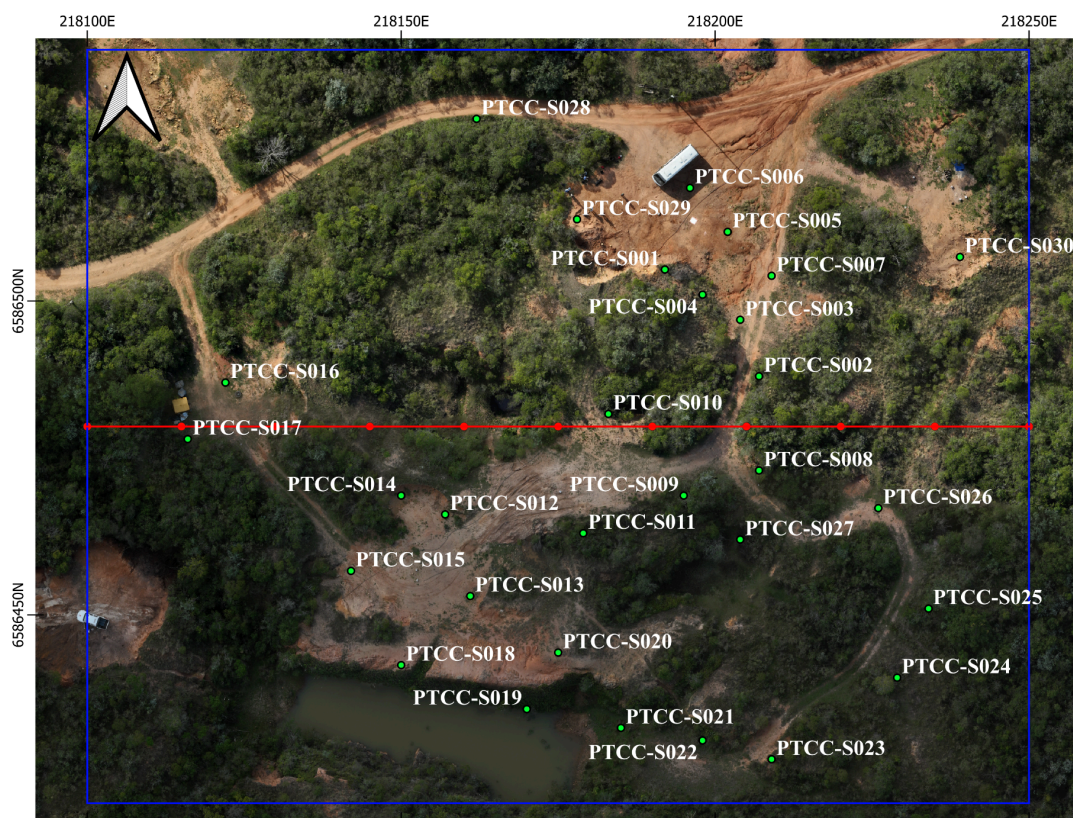
4.1 Coleta e preparação de amostras

A etapa de campo envolveu três frentes paralelas de coleta de dados, executadas de forma integrada para maximizar a eficiência e a representatividade das informações obtidas.

4.1.1 Amostragem de solo

Foram coletadas 30 amostras de solo, correspondentes ao horizonte B, em pontos distribuídos aleatórios na área. A escolha do horizonte B justifica-se por este representar uma camada pedológica mais estável e menos influenciada por processos superficiais recentes, permitindo uma melhor caracterização da assinatura geoquímica da rocha subjacente. As amostras foram coletadas com auxílio de ferramentas apropriadas (pá e trado), acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados com a numeração do ponto e as coordenadas geográficas, e transportadas para o Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM).

Figura 10 - Pontos de coleta de solo na mina Butiá.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.2 Amostragem de tecido vegetal

Paralelamente à amostragem de solo, foram coletadas 10 amostras de tecido vegetal, especificamente material foliar da planta *D. viscosa*, a planta apresentava 3 m de altura, sem presença de flores, folhagem bem esverdeada, provavelmente em fase reprodutiva. As folhas foram coletadas de indivíduos da mesma espécie, preferencialmente em estágio de maturidade semelhante, para minimizar variações decorrentes de diferenças fisiológicas.

Outras plantas rasteiras foram observadas no local, principalmente carquejas e outras variedades locais.

Figura 11 - Pontos de coleta de material foliar na Mina Butiá.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.3 Aquisição de imagens multiespectrais

O levantamento aéreo foi realizado utilizando o *DJI Mavic 3M (Multispectral Edition)*, um VANT equipado com sistema de imageamento multiespectral integrado. O sensor multiespectral possui quatro bandas espectrais: *Green* (560 ± 16 nm), *Red* (650 ± 16 nm), *Red Edge* (730 ± 16 nm) e *Near Infrared* (860 ± 26 nm), além de uma câmera *RGB* de 20 MP para imageamento em cores verdadeiras. As imagens de alta resolução foram utilizadas para detalhar e refinar as anomalias espectrais inicialmente identificadas em imagens de menor resolução dos satélites *OLI* e *MSI*.

O voo foi planejado de forma a cobrir toda a área de estudo com sobreposição lateral e frontal adequadas para a geração de ortomosaicos de alta qualidade. Os dados brutos foram armazenados e, posteriormente, processados para a extração de informações espectrais.

Figura 12 - As 15 ortoimagens adquiridas no levantamento nos arredores da Mina Butiá.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Análises geoquímicas por FRX

As 40 amostras coletadas em campo foram submetidas a procedimentos de preparação laboratorial, visando garantir a qualidade e a representatividade dos dados analíticos.

4.2.1 Preparação das amostras de solo

O processamento das amostras de solo seguiu as seguintes etapas:

- I. secagem em estufa a temperatura controlada para remoção da umidade;
- II. quarteamento, para obtenção de alíquotas representativas;
- III. maceração em almofariz porcelana, para homogeneização e redução granulométrica;
- IV. ensaio de peneiramento, para obtenção da fração granulométrica adequada às análises químicas subsequentes.

4.2.2 Preparação das amostras de tecido vegetal

Todas as amostras de tecido vegetal foram lavadas para remover qualquer material particulado aderido à superfície das folhas, garantindo que as concentrações medidas fossem representativas da absorção e não de contaminação superficial. Após a lavagem, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a temperatura controlada, seguida de maceração para homogeneização do material. As amostras específicas (F1, F6, F8 e F10) foram submetidas, a umidificação com água destilada, para facilitar a leitura do equipamento.

4.2.3 Análise por FRX

As amostras preparadas foram submetidas à análise pela técnica de FRX para a determinação da concentração de diversos elementos de interesse para a prospecção de ouro. 14 elementos apresentaram concentrações significativas nas amostras de solo, expressos na forma de óxidos ou elementos: óxido de magnésio (MgO), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de silício (SiO_2), cloro (Cl), óxido de potássio (K_2O), óxido de manganês (MnO), óxido de ferro (Fe_2O_3), cobalto (Co), molibdênio (Mo), ródio (Rh), cádmio (Cd), cério (Ce), háfnio (Hf) e tório (Th).

Nas amostras de tecido vegetal, 12 elementos apresentaram concentrações significativas: MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , óxido de fósforo (P_2O_5), enxofre (S), Cl, K_2O , óxido de cálcio (CaO), MnO, Fe_2O_3 , Cd e Rh.

O Fe_2O_3 foi considerado a variável dependente principal, uma vez que o ferro é frequentemente utilizado como elemento *pathfinder* para ouro em muitos sistemas minerais, devido à sua associação com processos hidrotermais e de alteração.

4.4 Planejamento amostral e definição do *grid*

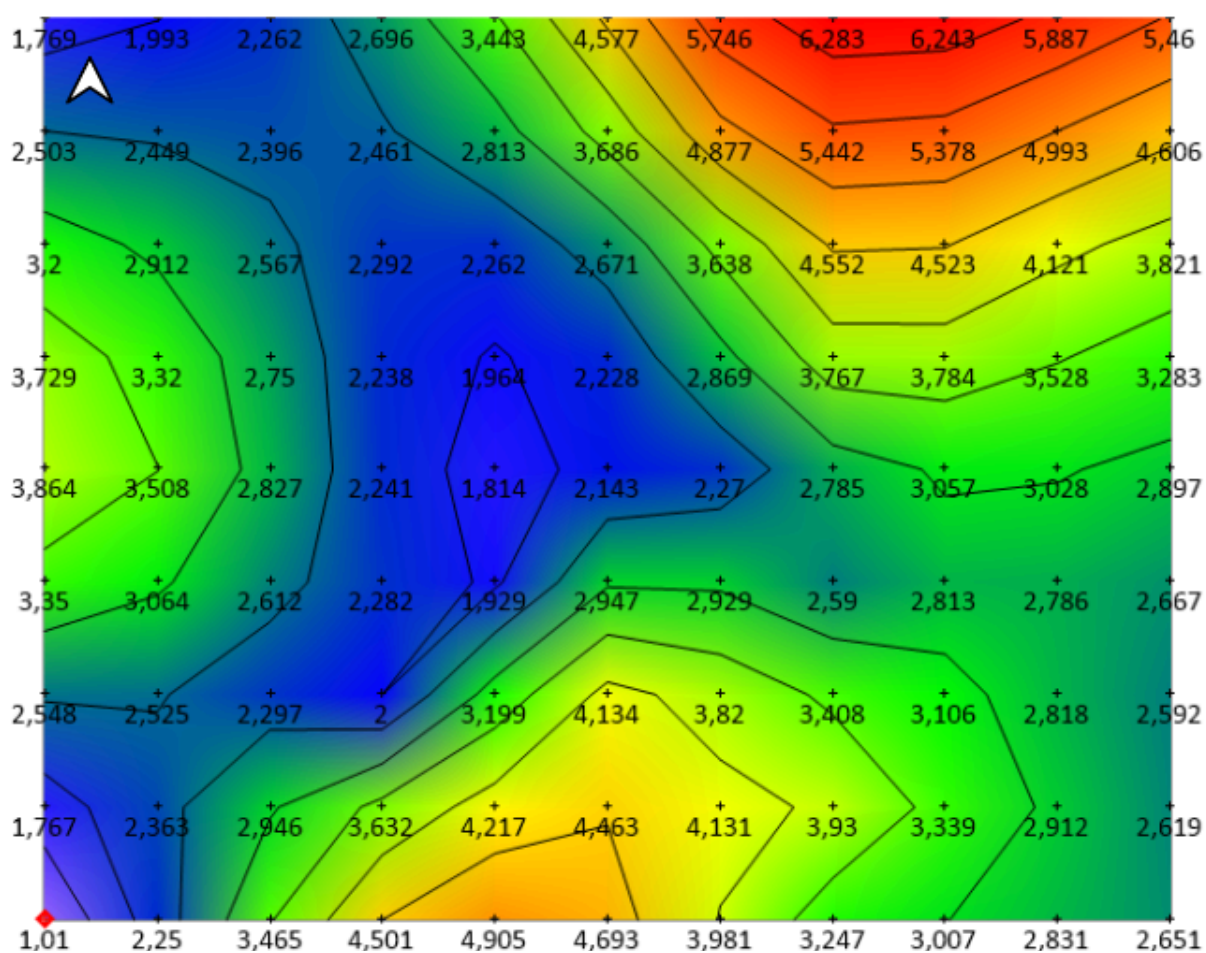
A primeira etapa do trabalho consistiu no planejamento da estratégia de amostragem espacial sobre a área de estudo, fundamentados no sistema de coordenadas EPSG 32722, que corresponde ao WGS 84 / UTM Zone 22S. A coleta dos pontos amostrais foi conduzida de forma linear, iniciando-se no ponto de referência com coordenadas de latitude: -21.8100° e longitude -65.86480° . A partir deste ponto inicial, uma série de 12 pontos foi definida, seguindo um incremento de distância não uniforme ao longo do eixo X, até atingir a coordenada final latitude: 21.8250° . As distâncias acumuladas em metros a partir do ponto inicial (Ponto 1) para cada ponto subsequente foram: Ponto 1 (0 m), Ponto 2 (7,5 m), Ponto 3 (22,5 m), Ponto 4 (37,5 m), Ponto 5 (52,5 m), Ponto 6 (67,5 m), Ponto 7 (82,5 m), Ponto 8 (97,5 m), Ponto 9 (112,5 m), Ponto 10 (127,5 m), Ponto 11 (142,5 m) e Ponto 12 (150 m). Este arranjo amostral, que cobre uma extensão de 150 metros, foi concebido para capturar a variabilidade espacial dos atributos de interesse dentro do limite definido pelo intervalo de coordenadas, permitindo a análise e garantindo a representativa da área.

Foi definido um *grid* regular de amostragem cobrindo uma área total de 18.000 m^2 , configurado com 11 nós na direção horizontal (Leste-Oeste) e 9 nós na direção vertical (Norte-Sul), resultando em um espaçamento de 15 metros entre os pontos. Esta malha amostral foi concebida para garantir uma cobertura espacial adequada da área de interesse, permitindo a caracterização das variações geoquímicas e espectrais em escala compatível com os objetivos da prospecção mineral.

A definição do *grid* de amostragem pelo método da poligonal considerou a necessidade de obter uma densidade amostral suficiente para capturar a variabilidade espacial

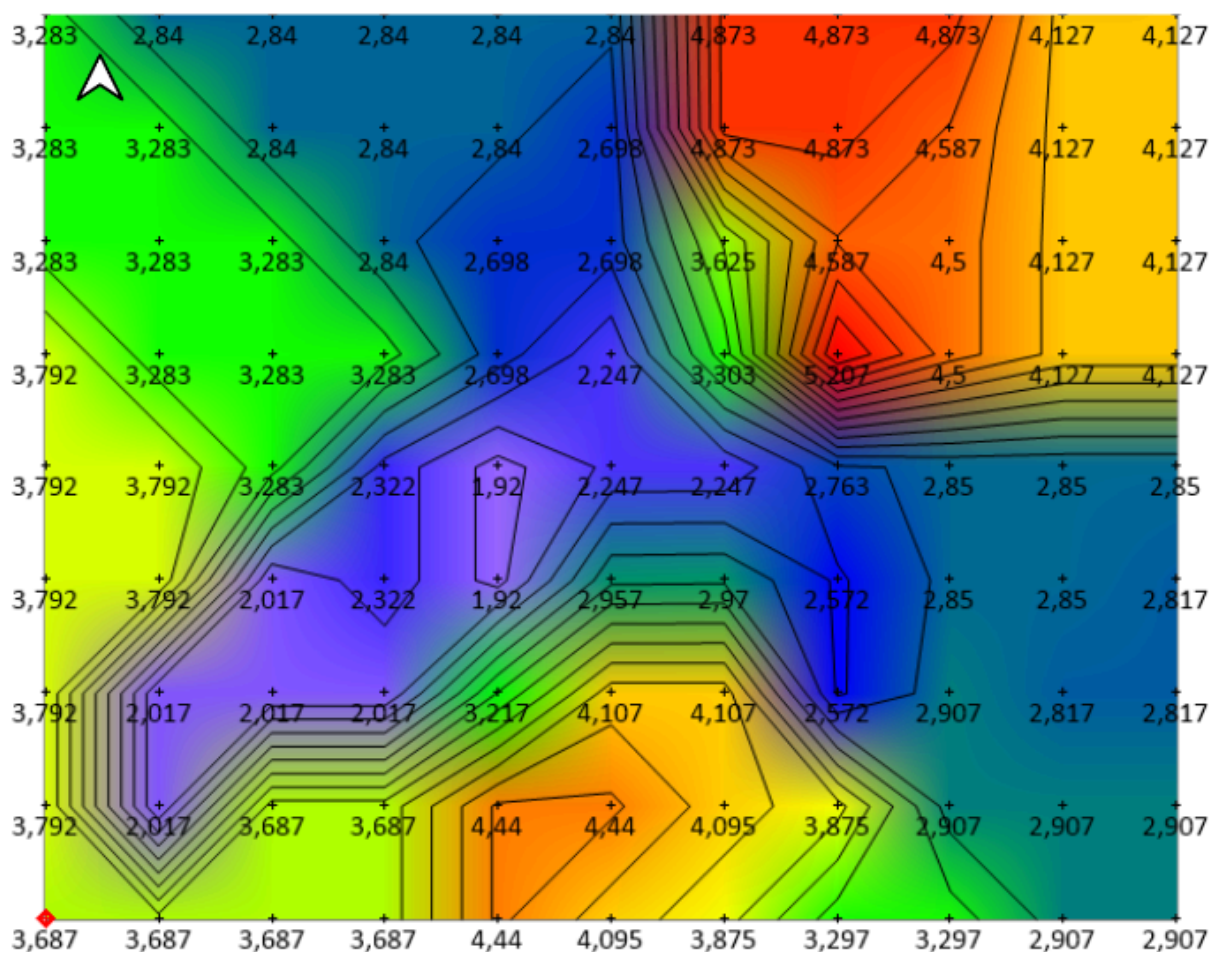
dos teores de elementos de interesse. O espaçamento médio de 15 m entre os pontos estimados, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11, foi determinado a partir do cálculo do perímetro total da área de estudo (97,797 m) dividido pelo número de lados da poligonal (4), resultando em uma malha regular que assegura a representatividade espacial das amostras. Essa configuração geométrica demonstrada pelas Figuras 13 e 14 permitiu a cobertura sistemática da área, a Figura 13 apresenta a malha amostral de valores estimados pelo método da mínima curvatura, enquanto a Figura 14 utiliza o método do vizinho mais próximo, minimizando a possibilidade de subamostragem e garantindo a confiabilidade dos dados geoquímicos obtidos.

Figura 13 – Malha amostral com valores estimados de Fe_2O_3 , pelo método: mínima curvatura.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 – Malha amostral com valores estimados de Fe_2O_3 , pelo método: vizinho mais próximo.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.5 Processamento dos dados do VANT

As imagens multiespectrais e *RGB* obtidas com o VANT foram processadas utilizando o *software* de fotogrametria *Agisoft Metashape Professional Edition*, versão 1.8 (Agisoft, 2022). O fluxo de trabalho geral para a geração dos produtos cartográficos, como o ortomosaico e seus subprodutos, seguiu as seguintes etapas principais:

- I. carregamento das imagens no *Metashape*: importação de todas as imagens multiespectrais e *RGB* coletadas;
- II. inspeção das imagens carregadas: análise visual e remoção de imagens com falhas de foco, movimento excessivo ou obstruções que pudessem comprometer a qualidade do modelo;
- III. alinhamento das câmeras: etapa crucial onde o *software* identifica pontos comuns entre as imagens e calcula a posição e orientação exatas de cada câmera no momento da captura, gerando a nuvem de pontos esparsa;
- IV. construção da nuvem de pontos densa: refinamento da nuvem esparsa, gerando milhões de pontos com coordenadas 3D, que representam a geometria detalhada da área;
- V. construção da malha (modelo poligonal 3D): criação de uma superfície tridimensional a partir da nuvem de pontos densa;
- VI. geração da textura: aplicação das cores reais (*RGB*) ou dos valores espectrais na malha 3D;
- VII. construção do modelo em mosaico (*tiled model*): organização do modelo para visualização e processamento eficiente de grandes áreas;
- VIII. construção do Modelo Digital de Elevação (MDE): geração de um *raster* que representa a elevação da superfície do terreno;
- IX. construção do ortomosaico: geração de uma imagem georreferenciada de alta resolução, onde as distorções geométricas e de perspectiva foram corrigidas, permitindo medições precisas;

- X. exportação dos resultados: exportação do ortomosaico e do MDE para formatos compatíveis com o *software* QGIS, onde foram realizadas as análises de razão de bandas e a extração de valores de reflectância.

4.5.1 Processamento de imagens de sensoriamento remoto

As imagens de satélite e do VANT foram processadas digitalmente para conversão dos valores brutos de Número Digital (DN) em valores de reflectância de superfície, normalizados em uma escala de 0 a 1. Este procedimento é fundamental para a comparabilidade entre diferentes imagens e para a extração de assinaturas espectrais consistentes. As bandas espectrais foram normalizadas utilizando os seguintes valores de referência: banda do vermelho (*RED*) = 54.750 e banda do infravermelho próximo (*NIR*) = 39.647.

A partir das imagens processadas, foram calculados diversos índices espectrais que permitem caracterizar as propriedades da superfície e sua relação com a composição geoquímica. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calculado utilizando a fórmula canônica (Fórmula 4):

$$NDVI = NIR - RED / NIR + RED \quad (4)$$

Este índice é amplamente utilizado para avaliar o vigor e a densidade da vegetação, variando de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 indicam vegetação vigorosa e valores próximos de 0 ou negativos indicam solo exposto ou vegetação estressada.

Além do NDVI, foram calculados os seguintes índices e componentes espectrais: *Red Index* (RI), que enfatiza a reflectância na banda do vermelho; *Red/Green Ratio* (R/G), que expressa a razão entre as bandas do vermelho e do verde; *Redness Normalized* (RN), que representa a reflectância normalizada na banda do vermelho; e as próprias bandas R, G e B normalizadas, que correspondem às reflectâncias nas faixas do vermelho, verde e azul, respectivamente.

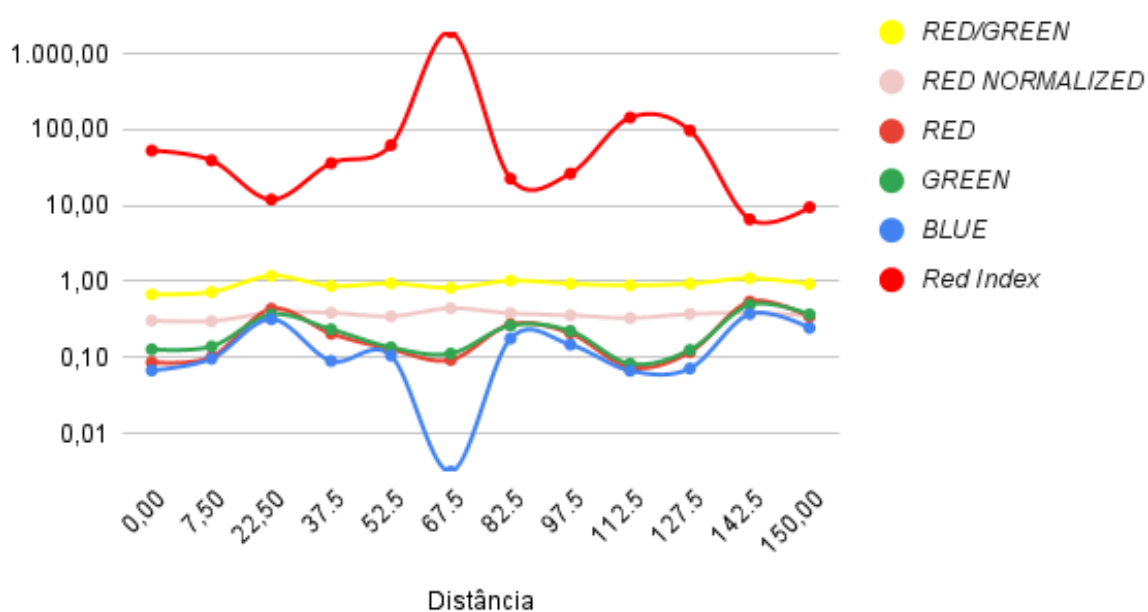
4.6 Tratamento estatístico dos dados

Para garantir a qualidade e a representatividade dos dados geoquímicos, foi aplicado um tratamento estatístico. Foram calculados os parâmetros de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio padrão) para cada elemento em cada meio amostral (solo e vegetal). Para a identificação e remoção de valores discrepantes (*outliers*), foi utilizado o método do intervalo interquartil, definido pela diferença entre o quartil superior (Q3) e o quartil inferior (Q1). Valores que se encontravam fora do intervalo Q1-Q3 foram considerados *outliers* e excluídos do conjunto de dados. Calculou-se então a média dos dados remanescentes que estavam contidos nos intervalos estipulados, assegurando a integridade do conjunto de dados para as etapas posteriores de modelagem estatística.

4.7 Análise de correlação Fe_2O_3 vs assinaturas espectrais

Uma etapa crucial da metodologia consistiu na análise de correlação entre a variável dependente (Fe_2O_3) e as variáveis independentes (assinaturas espectrais), realizada separadamente para os dois meios amostrais (solo e vegetal). Foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson entre o teor de Fe_2O_3 e cada um dos índices espectrais: RI, R/G, RN, e as bandas R, G e B normalizadas.

Figura 15 – Gráfico das assinaturas espectrais do perfil que transecta a área.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esta análise permitiu identificar qual índice espectral apresentava a melhor correlação com o teor de Fe_2O_3 em ambos os meios amostrais. O índice RN foi selecionado como o melhor preditor, apresentando um coeficiente de correlação de $R = -0.633$ para o solo (correlação negativa moderada a forte) e $R = 0.603$ para o vegetal (correlação positiva moderada a forte). A correlação negativa no solo indica que, neste meio, quanto maior o valor de RN, menor o teor de Fe_2O_3 , possivelmente devido à influência de óxidos de ferro na assinatura espectral. Já a correlação positiva no vegetal sugere que o estresse causado pela absorção de ferro pode alterar a reflectância do tecido foliar.

4.8 Análise de regressão linear múltipla

Para investigar a relação entre a variável dependente VD, Valores estimados de Fe_2O_3 no perfil - Mínima curvatura (MC), e o conjunto de variáveis independentes VIs ou predictoras, foi empregada a técnica de Regressão Linear Múltipla. A análise foi conduzida utilizando o *software* estatístico jamovi (The jamovi project, 2022). O objetivo deste método é modelar a VD como uma combinação linear das VIs, permitindo quantificar o efeito individual de cada preditor sobre a variável de resposta, enquanto se controla o efeito dos demais preditores incluídos no modelo.

4.8.1 Cálculo dos coeficientes pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO)

O método padrão para a estimação dos coeficientes em um modelo de regressão linear é o de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), ou *Ordinary Least Squares* (OLS). O princípio fundamental do MQO é encontrar os coeficientes que minimizam a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), onde um resíduo é a diferença entre o valor observado da variável dependente e o valor previsto pelo modelo (Gujarati; Porter, 2011).

A forma mais precisa de descrever este cálculo, é a que é implementada computacionalmente, é através da álgebra matricial. A equação geral do modelo de regressão linear múltipla é (Fórmula 5):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (5)$$

Onde Y representa a variável dependente, X_1, X_2, \dots, X_k são as k variáveis preditoras, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os coeficientes de regressão associados a cada preditor, ε é o termo de erro aleatório, e β_0 é o intercepto do modelo. Para estimar os coeficientes, os dados são organizados da seguinte forma:

- I. vetor Y : um vetor-coluna contendo as n observações da variável dependente.
- II. matriz X : uma matriz de dimensão $n \times (k+1)$, denominada matriz de delineamento. Esta matriz contém os valores das k variáveis preditoras para cada uma das n observações. Crucialmente, a primeira coluna desta matriz é preenchida inteiramente com o número 1.
- III. vetor b : um vetor-coluna contendo os $k+1$ coeficientes a serem estimados (b_0, b_1, \dots, b_k).

A inclusão de uma coluna de 1s na matriz X é um procedimento padrão que permite que o intercepto (β_0) seja tratado como um coeficiente cujo preditor associado tem um valor constante igual a 1 para todas as observações. Isso garante que o termo β_0 seja estimado simultaneamente aos demais coeficientes dentro da mesma estrutura matricial (Hair J.R. et al., 2009). Sem esta coluna, o modelo seria forçado a passar pela origem, uma restrição raramente justificável em análises práticas. A solução do MQO para o vetor de coeficientes b é obtida através da resolução da "Equação Normal" (Fórmula 6):

$$(X'X)b = X'Y \quad (6)$$

Onde X' é a matriz transposta de X . Para isolar o vetor b , multiplica-se ambos os lados pela inversa da matriz $(X'X)$, resultando na fórmula final para o cálculo das estimativas (Fórmula 7):

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \quad (7)$$

O vetor b resultante contém as estimativas dos coeficientes, incluindo o intercepto (b_0) e os coeficientes para cada uma das k variáveis preditoras (b_1 a b_k). Estes são os valores apresentados na coluna "Estimativas" do relatório de regressão, representando a solução que minimiza a soma dos quadrados das distâncias verticais entre os pontos de dados observados e o hiperplano de regressão ajustado.

4.8.2 Seleção de pontos para modelagem

Para a construção dos modelos de regressão, foram selecionados 12 pontos dentre os 30 pontos de amostragem de solo. A seleção destes pontos foi realizada seguindo a posição dos nós do *grid* de amostragem, garantindo uma distribuição espacial representativa e minimizando vieses relacionados à cobertura vegetal ou a obstruções antrópicas que pudessem comprometer a qualidade dos dados de sensoriamento remoto, ao mesmo tempo que permitiu a comparação com o perfil estimado através da MC.

4.8.3 Modelo univariável (*red normalized*)

O primeiro modelo, denominado modelo univariável, utiliza apenas o índice RN como variável independente. Este modelo é expresso pela (Fórmula 8):

$$Z^* = 6,47 - 9,96 * RN \quad (8)$$

Onde Z^* representa o teor estimado de Fe_2O_3 (em %) e RN é o valor do RN. Este modelo apresentou um coeficiente de correlação $R = 0.633$, indicando uma capacidade preditiva moderada. A principal vantagem deste modelo reside em sua simplicidade e parcimônia, utilizando apenas a variável que apresentou a melhor correlação individual com Fe_2O_3 .

Tabela 2: Medidas de Ajustamento do Modelo

Modelo	R	R ²	N
1	0.663	0.439	12

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3: Coeficientes do Modelo – Modelo Univariável

Preditor	Estimativa	Erro-padrão	t	p
Intercepto	6.47	1.31	4.96	< .001
Normalized RED	-9.96	3.56	-2.80	0.019

Fonte: elaborado pelo autor.

4.8.4 Modelo geral multivariável

O segundo modelo, denominado modelo geral multivariável, incorpora todas as assinaturas espectrais disponíveis como variáveis independentes. Este modelo é expresso pela (Fórmula 9):

$$Z^* = 13,75 + 0,00026 * RI - 3,58 R/G - 22,20 * RN + 28,16 * R - 17,09 * G - 12,76 * B \quad (9)$$

Este modelo apresentou um coeficiente de correlação $R = 0.875$, indicando uma capacidade preditiva consideravelmente superior ao modelo univariável. A complexidade adicional deste modelo é justificada pelo ganho em precisão, capturando relações multivariadas entre as assinaturas espectrais e o teor de Fe_2O_3 .

Tabela 4: Medidas de Ajustamento do Modelo

Modelo	R	R ²	N
2	0.875	0.765	12

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5: Coeficientes do Modelo – Modelo Geral Multivariável

Preditor	Estimativa	Erro-padrão	t	p
Intercepto	13.75	8.82401	1.559	0.180
<i>Red Index</i>	2.60e-4	0.00179	0.145	0.891
<i>RED/GREEN</i>	-3.58	9.77971	-0.366	0.729
<i>Normalized RED</i>	-22.20	49.18555	-0.451	0.671
<i>RED</i>	28.16	22.09082	1.275	0.258
<i>GREEN</i>	-17.09	13.55106	-1.261	0.263
<i>BLUE</i>	-12.76	36.60897	-0.348	0.742

Fonte: elaborado pelo autor.

4.8.5 Validação dos modelos

Os dois modelos de regressão construídos foram submetidos a procedimentos de validação para avaliar sua qualidade preditiva e sua aplicabilidade na prospecção mineral. A validação envolveu a análise dos resíduos, a verificação da significância estatística dos coeficientes e a comparação dos valores preditos com valores obtidos por métodos independentes.

4.9 Interpolação espacial e perfis E-W

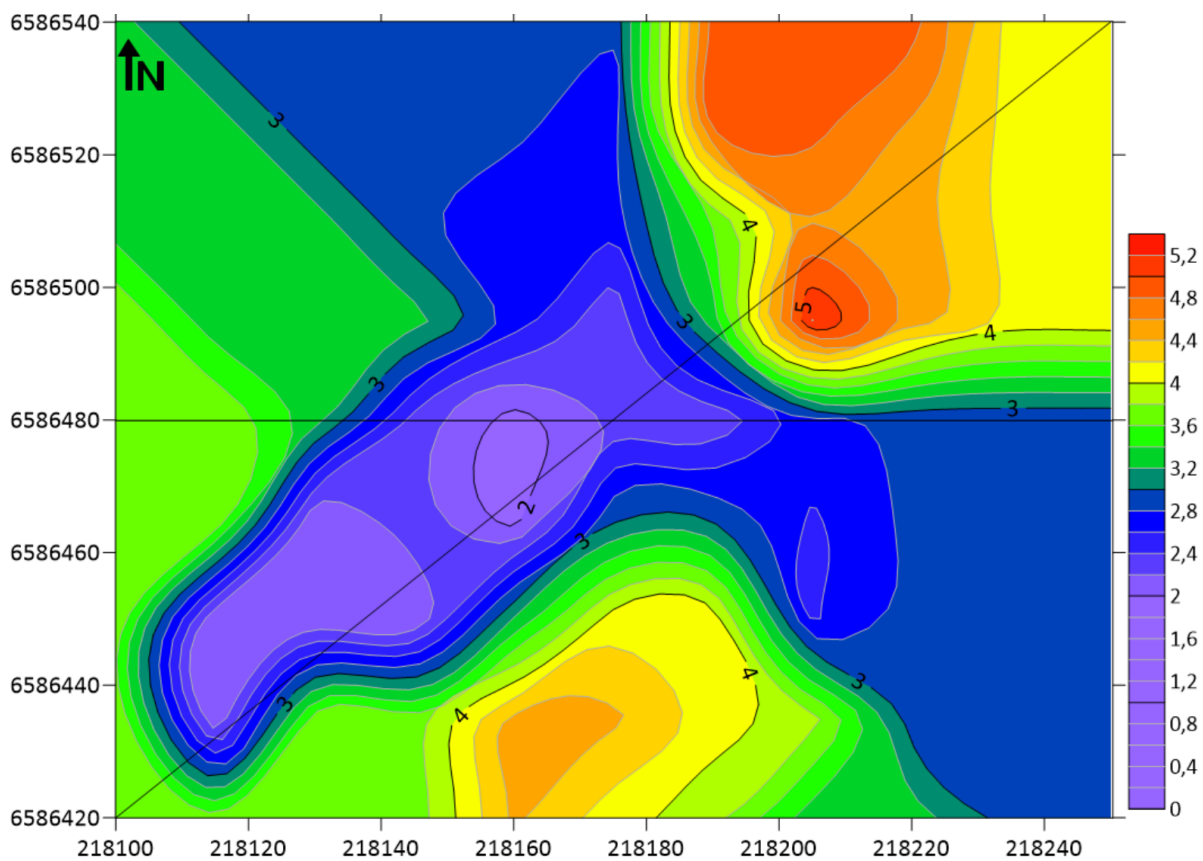
Para a visualização da distribuição espacial do Fe_2O_3 e a criação de perfis contínuos a partir dos dados pontuais, foram aplicados dois métodos de interpolação.

4.9.1 Método *nearest neighbour*

O método do *Nearest Neighbour* (NN) ou Vizinho Mais Próximo foi aplicado para gerar um perfil horizontal na direção Leste-Oeste (E-W). Este método atribui a cada ponto do *grid* o valor da amostra de solo mais próxima, resultando em uma superfície com zonas

homogêneas e bordas abruptas. Embora seja um método simples, o NN é útil para delimitar zonas anômalas de forma direta.

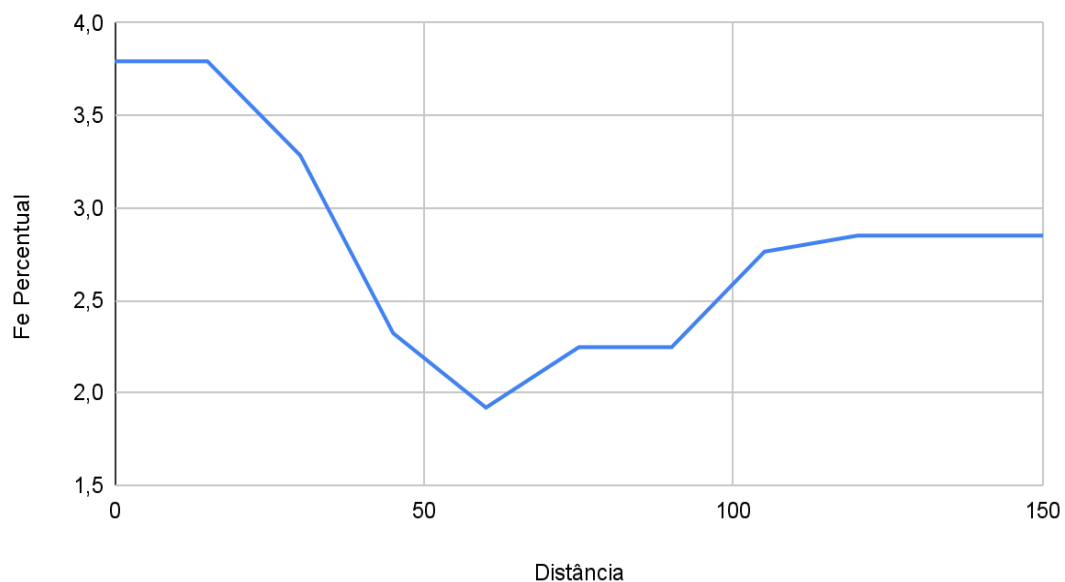
Figura 16 – Mapa de anomalia dos valores de $\text{Fe}_2\text{O}_3\%$ – por meio da interpolação vizinho mais próximo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 17 – Gráfico da variação do percentual de Fe_2O_3 estimado no perfil transversal.

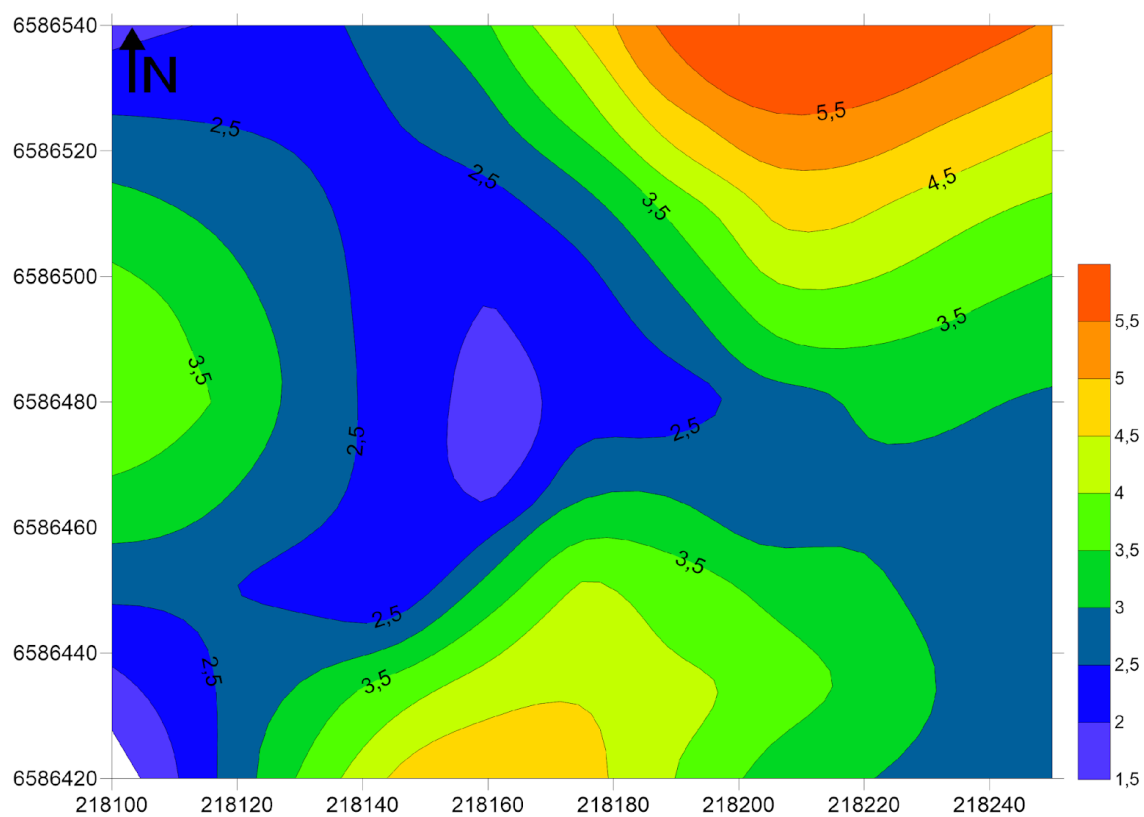
Z* Percentual de Fe versus Distância



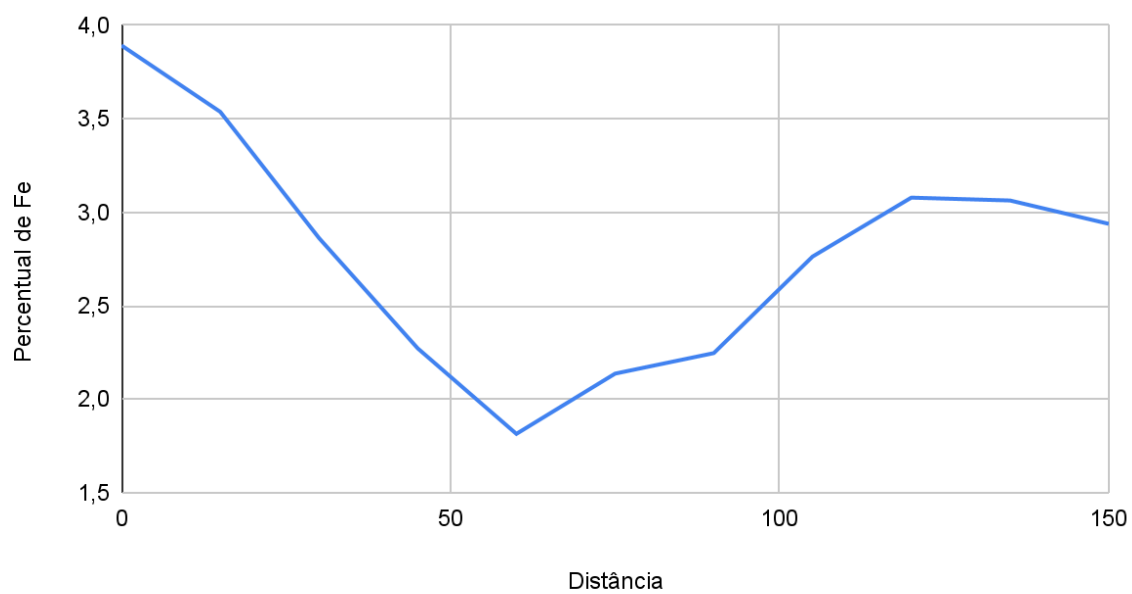
Fonte: elaborado pelo autor.

4.9.2 Método mínima curvatura

O método da MC foi aplicado para gerar uma superfície suavizada dos valores de Fe_2O_3 . Este método minimiza a curvatura total da superfície interpolada, produzindo estimativas contínuas e suaves, como demonstra a Figura 18, com valores acima da média na porção NE do mapa. O perfil MC, Figura 19, foi utilizado como referência para a validação dos modelos de regressão baseados em sensoriamento remoto.

Figura 18 – Mapa de anomalia dos valores percentuais de Fe_2O_3 .

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Gráfico demonstrando a variação de $\text{Fe}_2\text{O}_3\%$ estimado no perfil transversal.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.9.3 Comparação dos perfis

Uma etapa fundamental da validação metodológica consistiu na comparação entre três abordagens distintas para a estimativa do teor de Fe_2O_3 ao longo do perfil E-W:

- I. os valores preditos pelo modelo univariável (Z^* univariável);
- II. os valores preditos pelo modelo geral multivariável (Z^* multivariável);
- III. os valores estimados pelo método de interpolação de MC (Z^* perfil MC). Esta comparação tripla permite avaliar a concordância entre os métodos e validar a capacidade preditiva dos modelos baseados em sensoriamento remoto contra um método modelagem espacial tradicional.

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 4. Os resultados são organizados em seções temáticas, abordando dados geoquímicos, sensoriamento remoto, análise de correlação, modelos de regressão e perfis espaciais. A discussão é realizada de forma integrada, correlacionando as diferentes frentes de investigação e contextualizando-as no âmbito da prospecção mineral.

5.1 Resultados geoquímicos

A análise geoquímica das amostras de solo e de tecido vegetal revelou a composição elementar e permitiu a comparação entre ambos, fornecendo a base para a identificação de anomalias e para a modelagem estatística.

5.1.1 Estatística descritiva - solo

A análise estatística descritiva das 30 amostras de solo, para os 14 elementos selecionados, forneceu os parâmetros centrais e de dispersão. A tabela apresentada no anexo 1 resume os valores de média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo para os principais elementos em ppm.

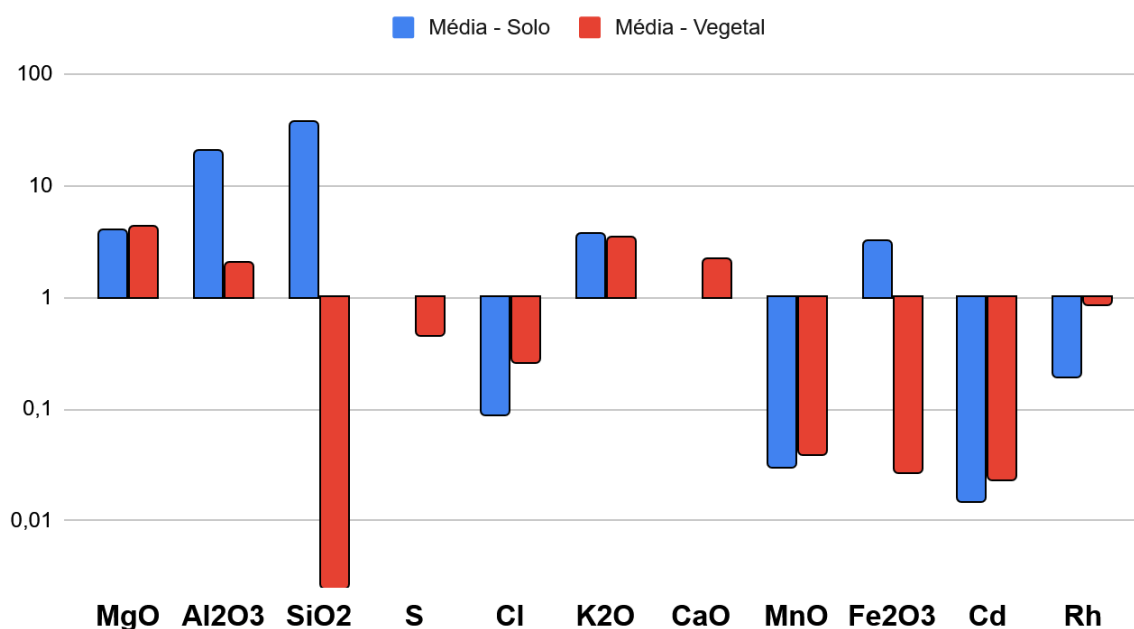
5.1.2 Estatística descritiva - vegetal

A análise estatística descritiva das 10 amostras de tecido foliar para os 14 elementos selecionados forneceu os parâmetros centrais e de dispersão. A tabela apresentada no anexo 2 resume os valores de média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo para os principais elementos.

5.1.3 Comparação solo – vegetal

A comparação entre as concentrações médias dos elementos no solo e no tecido vegetal indicou diferenças significativas. Elementos como Al_2O_3 e SiO_2 apresentaram concentrações notavelmente mais altas no solo, refletindo a composição mineralógica da rocha subjacente. Por outro lado, elementos como K_2O e CaO mostraram-se mais concentrados no tecido vegetal. A Figura 20 e a tabela 8 presente nos anexos demonstram essas diferenças de forma clara.

Figura 20 – Gráfico mostrando as concentrações médias de elementos comuns em ambos os meios.



Fonte: elaborado pelo autor.

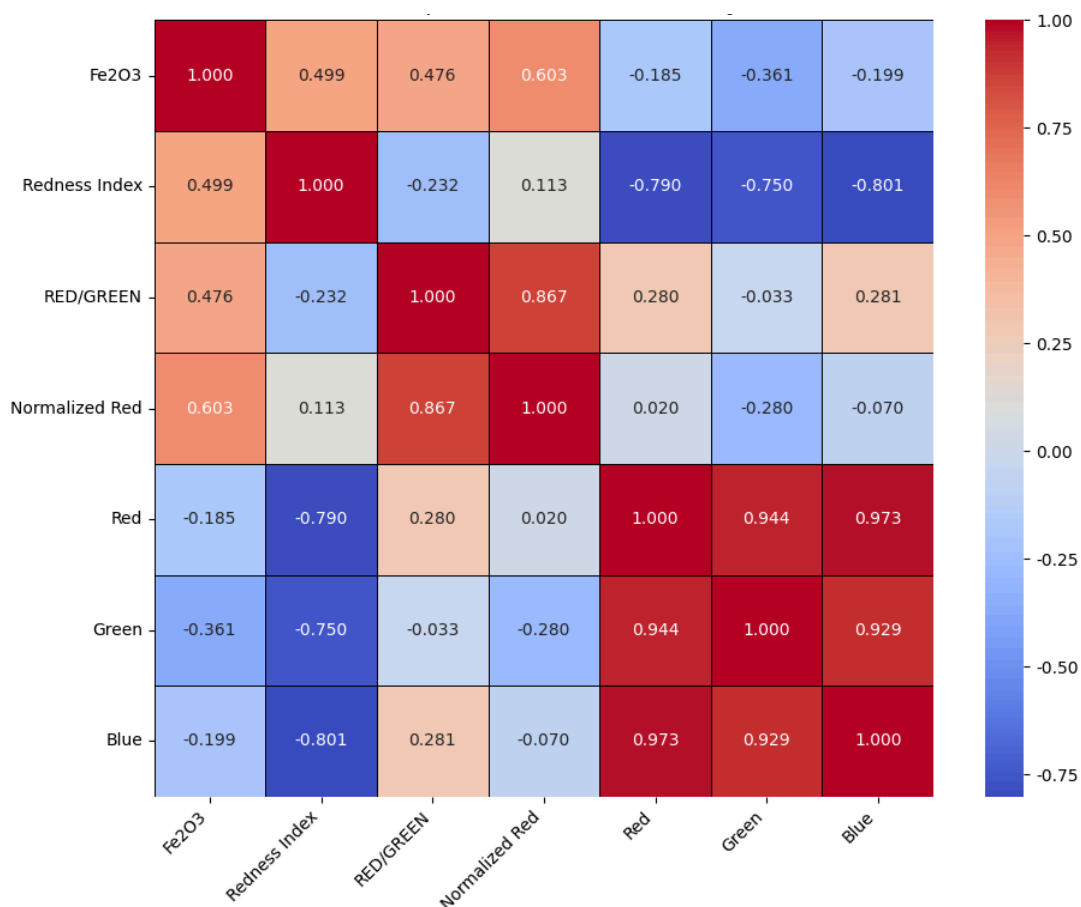
Essa condição limita a absorção do Fe pelas plantas, uma vez que o ferro oxidado apresenta baixa mobilidade no solo e dificuldade de translocação para os tecidos superiores. Ademais, a *D. viscosa* apresenta um mecanismo de fitoestabilização, no qual elementos como Fe, Cu, Zn e Cd tendem a ser retidos no sistema radicular. Esse comportamento reduz a transferência desses elementos para os tecidos foliares, refletindo concentrações relativamente baixas no material vegetal analisado.

Dessa forma, a ausência de enriquecimento significativo de Fe nos tecidos vegetais não contradiz os princípios da bioquímica vegetal, mas reforça a influência da especiação química do elemento e das estratégias fisiológicas da planta. Os resultados observados indicam que o ferro permanece majoritariamente imobilizado no solo e nas raízes, compatibilizando-se com processos de fitoestabilização e com a limitada biodisponibilidade do Fe sob condições oxidantes.

5.2 Análise de correlação Fe_2O_3 vs assinaturas espectrais

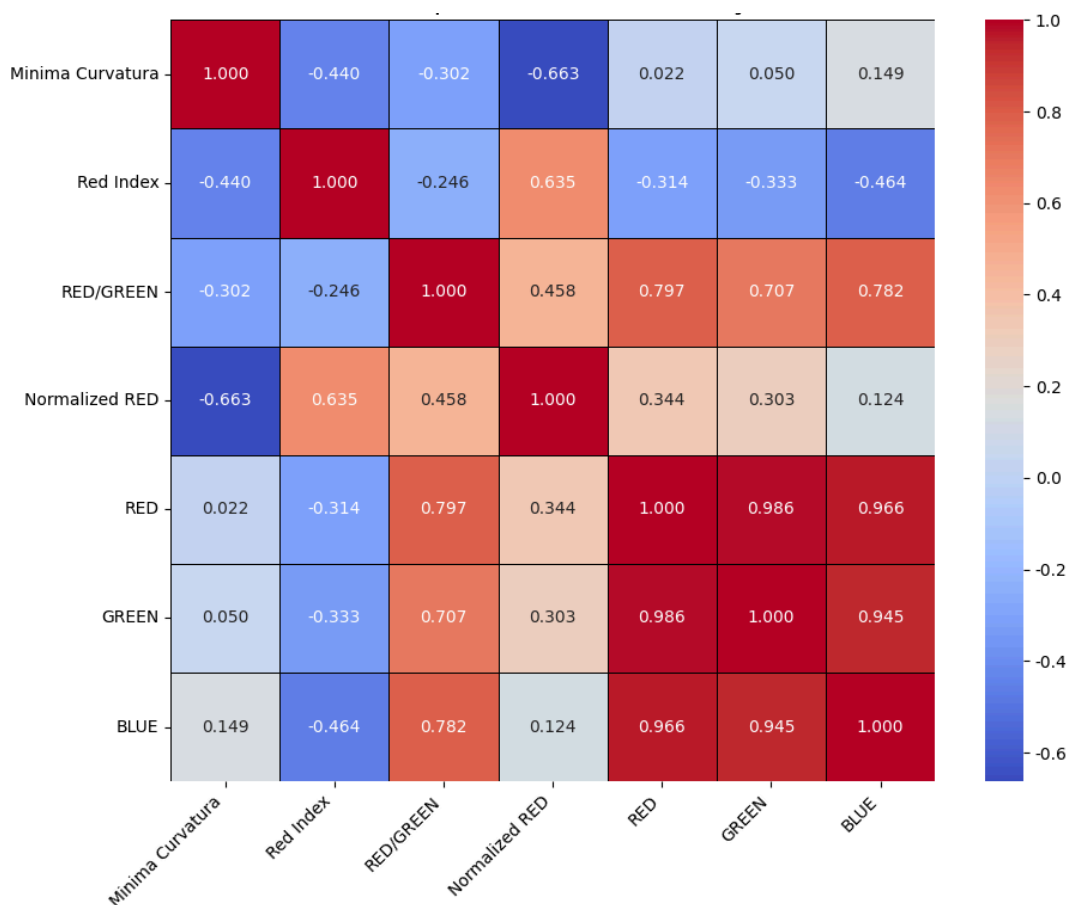
A análise de correlação entre o teor de Fe_2O_3 e as assinaturas espectrais foi uma etapa fundamental para a seleção das variáveis predictoras para os modelos de regressão. A Figura 21 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson para as estimativas de Fe_2O_3 no meio amostral vegetal e os seus respectivos índices de correlação com as assinaturas espectrais, ao passo que a Figura 22 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson para as estimativas de Fe_2O_3 solo, as estimativas provêm do perfil extraído do modelo de MC.

Figura 21 – Heatmap das correlações de Pearson (Fe_2O_3 – percentual foliar vs assinaturas espectrais do perfil).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 – *Heatmap* das correlações de Pearson (Fe_2O_3 – Percentual do solo vs assinaturas espectrais do perfil).



Fonte: elaborado pelo autor.

O índice RN destacou-se por apresentar a melhor correlação com o teor de Fe_2O_3 em ambos os meios. No solo, a correlação foi de $R = -0.633$, indicando uma relação inversa moderada a forte. Esta correlação negativa pode ser explicada pela influência dos óxidos de ferro na assinatura espectral do solo. Os óxidos de ferro, especialmente a hematita (Fe_2O_3) e a goethita (FeOOH), possuem bandas de absorção características na faixa do visível, particularmente no vermelho, o que reduz a reflectância nesta banda. Assim, solos com maiores teores de Fe_2O_3 tendem a apresentar menor reflectância normalizada no vermelho.

No tecido vegetal, a correlação foi de $R = 0.603$, indicando uma relação direta moderada a forte. Este comportamento pode estar associado ao estresse fisiológico da planta causado da absorção de ferro em concentrações elevadas. O estresse pode alterar a composição de pigmentos (clorofila e carotenoides) e a estrutura celular das folhas, resultando em mudanças na reflectância. Em particular, o estresse pode reduzir a absorção de luz no

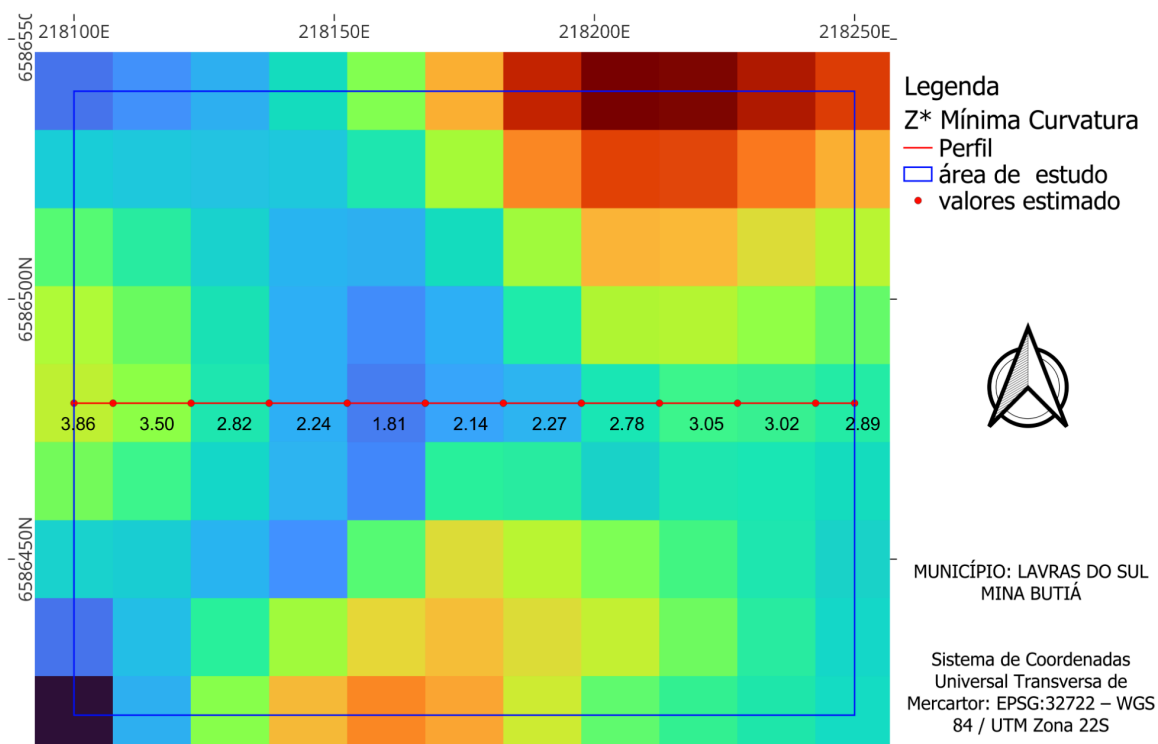
vermelho pela clorofila, aumentando a reflectância nesta banda e, conseqüentemente, o valor do RN.

5.3 Modelos de regressão linear

A quantificação de óxidos de ferro, como o trióxido de ferro (Fe_2O_3), em amostras geológicas é fundamental para diversas aplicações. Neste contexto, a modelagem estatística por meio de regressão linear foi empregada para estabelecer uma relação preditiva entre as características espectrais das amostras e o teor percentual correspondente de Fe_2O_3 .

Para o desenvolvimento dos modelos, foi utilizado um conjunto de dados composto por 12 pontos amostrais. A Figura 23 apresenta a estimativa de Fe_2O_3 do perfil MC, correspondente às distâncias do primeiro nó do grid, como explicado no subcapítulo 4.4. A partir das assinaturas espectrais obtidas para cada um desses pontos, foram construídos dois modelos de regressão linear distintos. A decisão por desenvolver dois modelos visa explorar diferentes abordagens na análise dos dados espectrais, como o uso de diferentes bandas de absorção.

Figura 23 – Percentual de Fe_2O_3 em perfil – (Z)* MC.

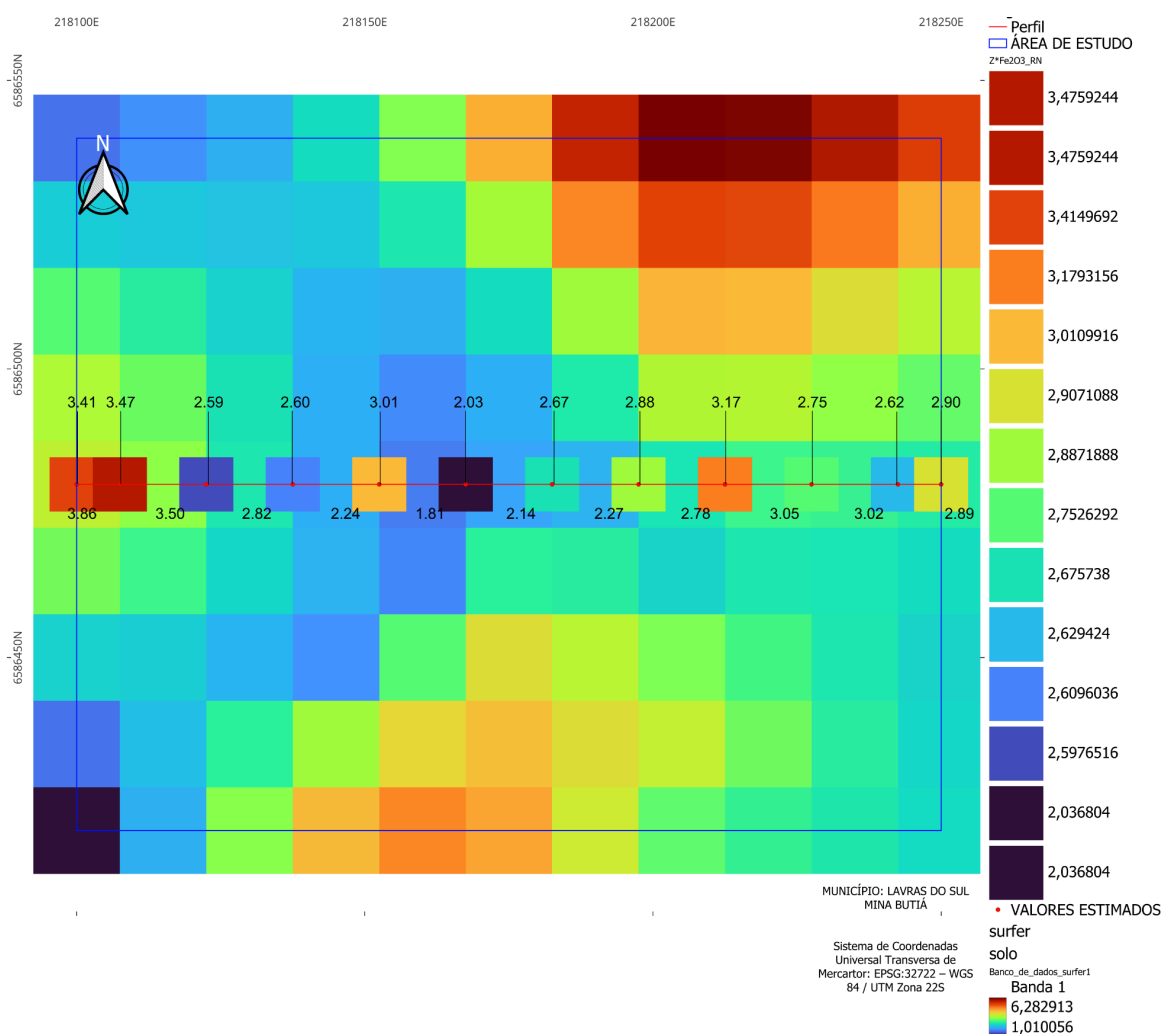


Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.1 Desempenho dos modelos

O Modelo Univariável, que utiliza apenas o RN como variável preditora, apresentou um coeficiente de correlação de $R = 0.633$. Embora seja um modelo simples e de fácil interpretação, sua capacidade preditiva é moderada. O modelo é capaz de explicar aproximadamente 63.3% da variabilidade nos teores de $Fe_2O_3\%$, o que é considerado aceitável para uma primeira aproximação, especialmente considerando que utiliza apenas uma variável.

Figura 24 – Sobreposição do modelo estimado – perfil univariável vs (Z) * MC.

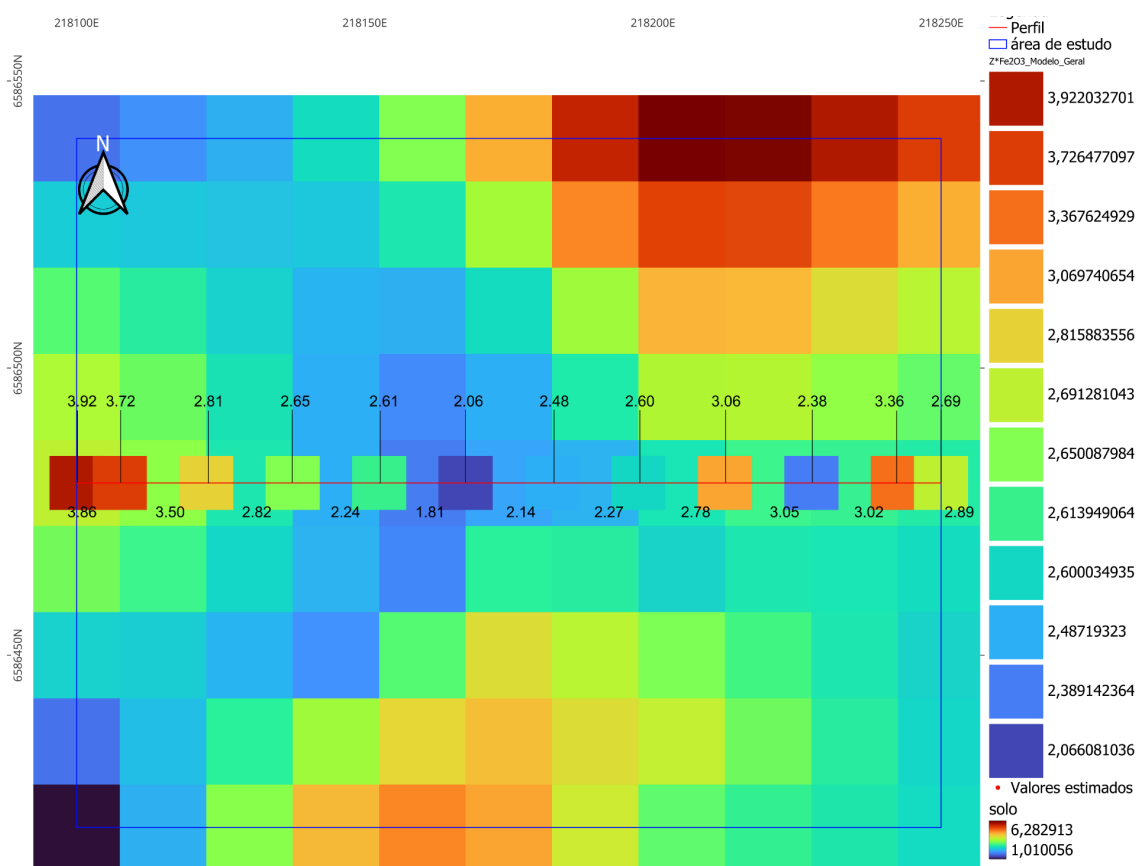


Fonte: elaborado pelo autor.

O Modelo geral multivariável, que incorpora todas as assinaturas espectrais (RI, R/G, RN, R, G, B), apresentou um coeficiente de correlação de $R = 0.875$, demonstrando uma

capacidade preditiva significativamente superior. O alto valor de R indica que o modelo multivariável é capaz de explicar aproximadamente 87.5% da variabilidade nos teores de Fe_2O_3 , constituindo uma ferramenta robusta para a prospecção. A inclusão de múltiplas variáveis permite capturar relações mais complexas entre as assinaturas espectrais e a composição geoquímica, resultando em previsões mais precisas.

Figura 25 – Sobreposição do modelo estimado - perfil multivariável vs (Z)* MC.

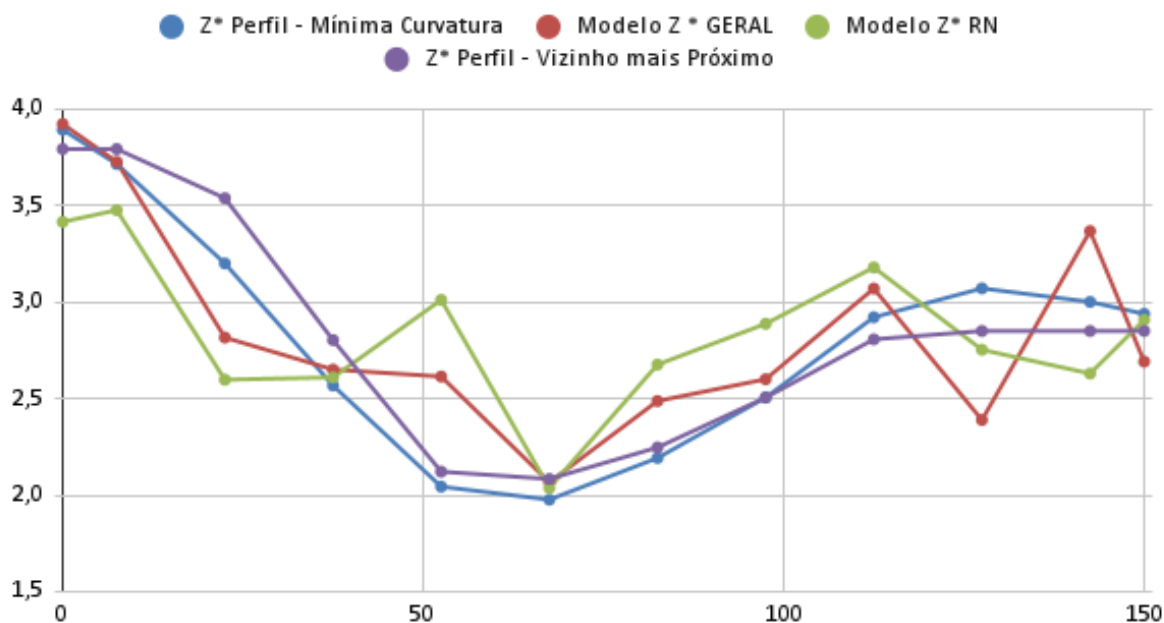


Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.2 Validação e comparação dos perfis

A validação dos modelos foi realizada através da comparação dos perfis de Fe_2O_3 estimados ao longo do transecto E-W. A Figura 26 compara os valores preditos pelo modelo univariável, pelo modelo geral multivariável geral e pelo método de interpolação de MC.

Figura 26 – Gráfico comparativo entre os modelos estimados pelas assinaturas e os modelos convencionais.



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise dos dados dos modelos, conforme detalhado na Tabela 12 em anexo, revela que, embora os valores médios de $(Z)^*$ para os quatro modelos: MC (2,8352), NN (2,8532), Geral (2,8666) e RN (2,8481), sejam relativamente próximos, existem diferenças em sua variabilidade. O modelo RN exibe a menor dispersão, com um desvio padrão de 0.3956, sugerindo uma maior consistência nos resultados em diferentes distâncias. Enquanto, o modelo de MC apresenta maior variabilidade. Observa-se também que os valores de $(Z)^*$ para os modelos de MC e NN tendem a diminuir até uma distância de aproximadamente 67,50, para então voltarem a subir, indicando uma relação não linear com a distância.

A discrepância observada na estimativa, é atribuída à falta de suporte amostral. Este fenômeno resulta em uma divergência entre as estimativas obtidas por diferentes metodologias. Especificamente, a agregação de informações espectrais que refletem o grau de composição granulométrica do meio, introduz uma variabilidade que não é totalmente compatível com a estimativa base, gerando a anomalia pontual

Observa-se uma boa concordância entre o perfil estimado pelo Modelo Geral Multivariável e o perfil gerado pela MC, que representa a distribuição espacial suavizada dos dados geoquímicos medidos em campo. Esta concordância valida a capacidade do modelo de regressão em reproduzir as tendências espaciais do teor de Fe_2O_3 , utilizando apenas dados de sensoriamento remoto. O modelo univariável, por sua vez, apresentou maior divergência em

relação ao perfil de MC, especialmente em regiões com variações abruptas nos teores, reforçando a superioridade do modelo multivariável.

A análise visual dos perfis revela que o modelo geral multivariável é capaz de capturar tanto as tendências gerais quanto as variações locais nos teores de Fe_2O_3 , demonstrando sua aplicabilidade prática na prospecção mineral. A capacidade de estimar a distribuição espacial de um elemento *pathfinder* a partir de imagens de VANT representa um avanço, permitindo a identificação de áreas-alvo para investigação detalhada de campo de forma rápida e econômica.

5.4 Discussão integrada

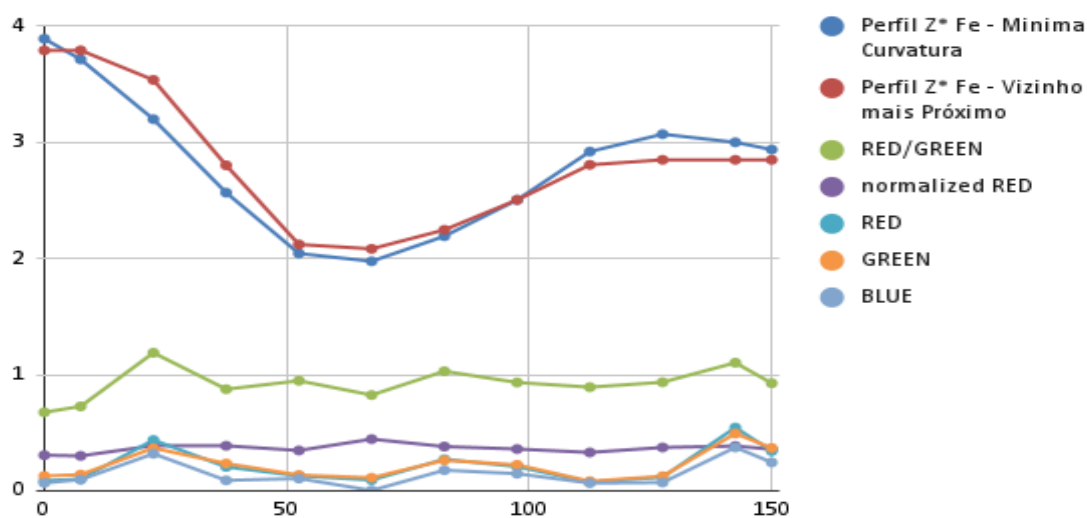
A integração dos resultados geoquímicos, de sensoriamento remoto e de modelagem estatística permite uma discussão aprofundada sobre a eficácia da metodologia e suas implicações para a prospecção de ouro no CILS.

5.4.1 Eficácia da integração de dados

Os resultados demonstram o sucesso da integração de múltiplas fontes de dados para a prospecção mineral. A geoquímica de solo forneceu a base de verdade de campo, permitindo a quantificação dos teores de Fe_2O_3 e de outros elementos de interesse. O sensoriamento remoto, permitiu a extrapolação espacial das informações pontuais, cobrindo toda a área de estudo de forma contínua. A correlação significativa entre as assinaturas espectrais e os teores de Fe_2O_3 validou o uso do sensoriamento remoto como ferramenta de prospecção.

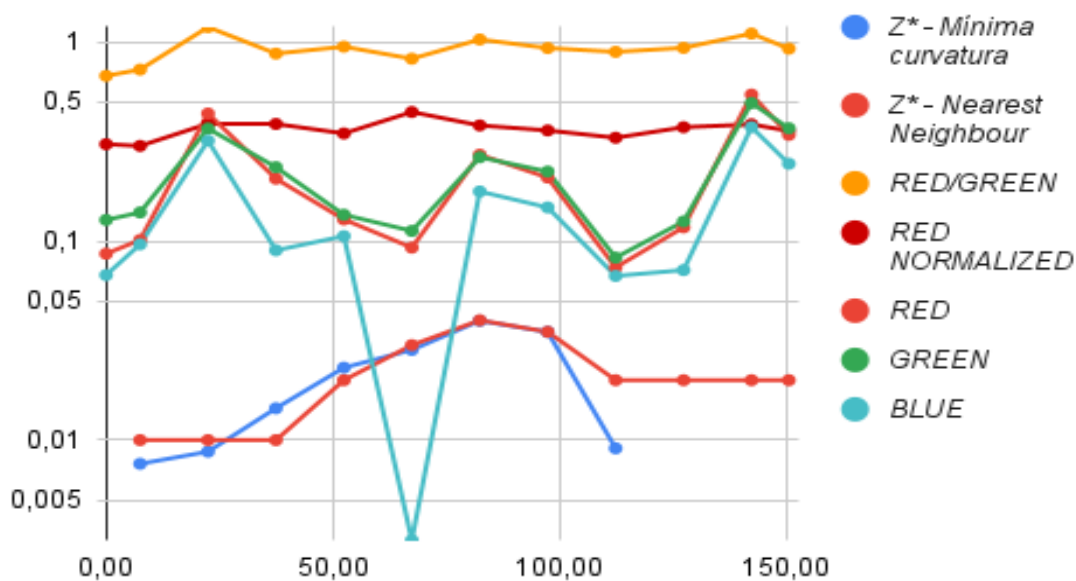
O uso da *D. viscosa* como bioindicador se mostrou promissor, uma vez que a planta refletiu em sua composição química as anomalias presentes no solo, como é possível observar na Figura 28. O comportamento semelhante nos pontos 82,5 e 97,5 poderia estar associado ao adensamento vegetal e, por consequência, a um acúmulo anômalo na concentração do Fe_2O_3 , sendo refletido. A correlação positiva entre o RN e o teor de Fe_2O_3 no tecido vegetal abre caminho para o desenvolvimento de métodos de prospecção baseados em assinaturas espectrais da vegetação, uma abordagem ainda incipiente e pouco explorada na literatura.

Figura 27 – Gráfico comparativo entre as assinaturas espectrais e os perfis estimados de Fe_2O_3 no solo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 28 – Gráfico comparativo entre as assinaturas espectrais e os perfis estimados de Fe_2O_3 no tecido foliar.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.4.2 Potencial dos modelos preditivos

O modelo geral multivariável ($R = 0.875$) representa a melhor adequação de dados ao modelo, oferecendo uma ferramenta de alta eficiência para a predição de teores de Fe_2O_3 em áreas extensas. A capacidade de estimar a distribuição de elemento *pathfinder* a partir de imagens de VANT otimiza o processo de exploração mineral, permitindo o direcionamento de campanhas de campo para áreas de maior potencial.

A metodologia proposta pode ser aplicada em outras regiões com características geológicas similares, desde que sejam realizadas calibrações locais dos modelos. A abordagem de realizar uma análise de correlação prévia para selecionar o índice espectral mais relevante confere maior robustez estatística ao processo e pode ser adaptada para outros elementos de interesse.

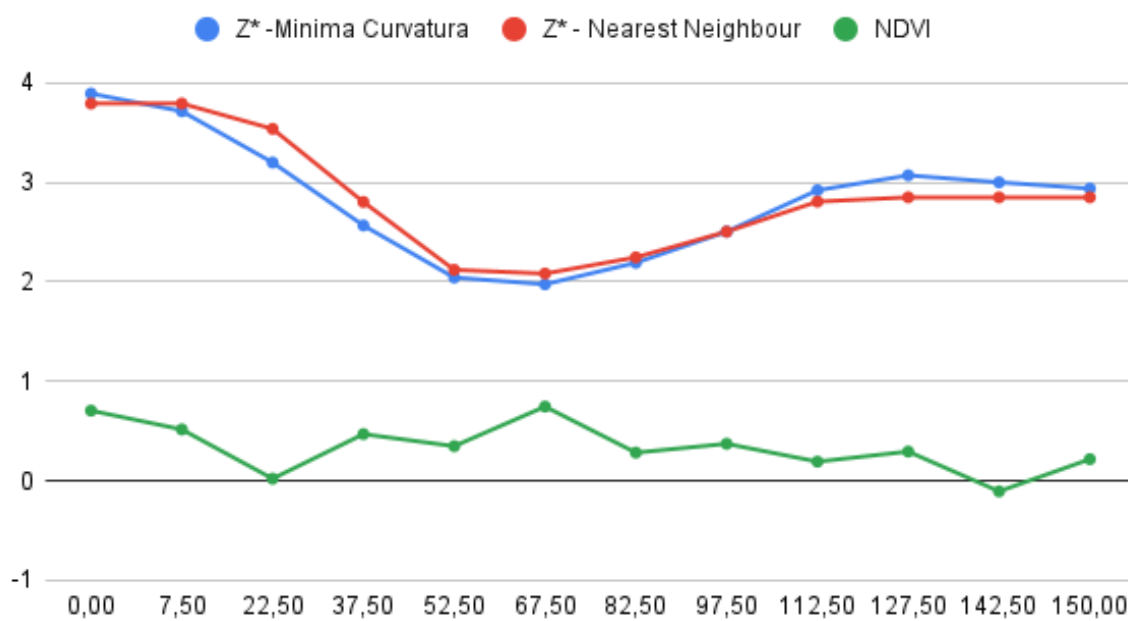
5.4.3 Biogeoquímica: solo vs vegetal

A análise comparativa entre a composição química do solo e do tecido vegetal evidenciou características dos processos de absorção e bioacumulação. A presença de elementos-traço associados à mineralização, como Fe_2O_3 , Cd e Rh, em ambas as matrizes, valida o uso de bioindicadores na prospecção. As diferenças nas concentrações médias e nos desvios padrão entre solo e vegetal refletem os processos biogeoquímicos de absorção seletiva, transporte e acumulação.

A *D. viscosa* demonstrou ser uma espécie adequada para estudos de biogeoquímica na região do CILS, apresentando capacidade de absorver e acumular elementos de interesse.

5.4.4 Aplicabilidade do NDVI na prospecção mineral

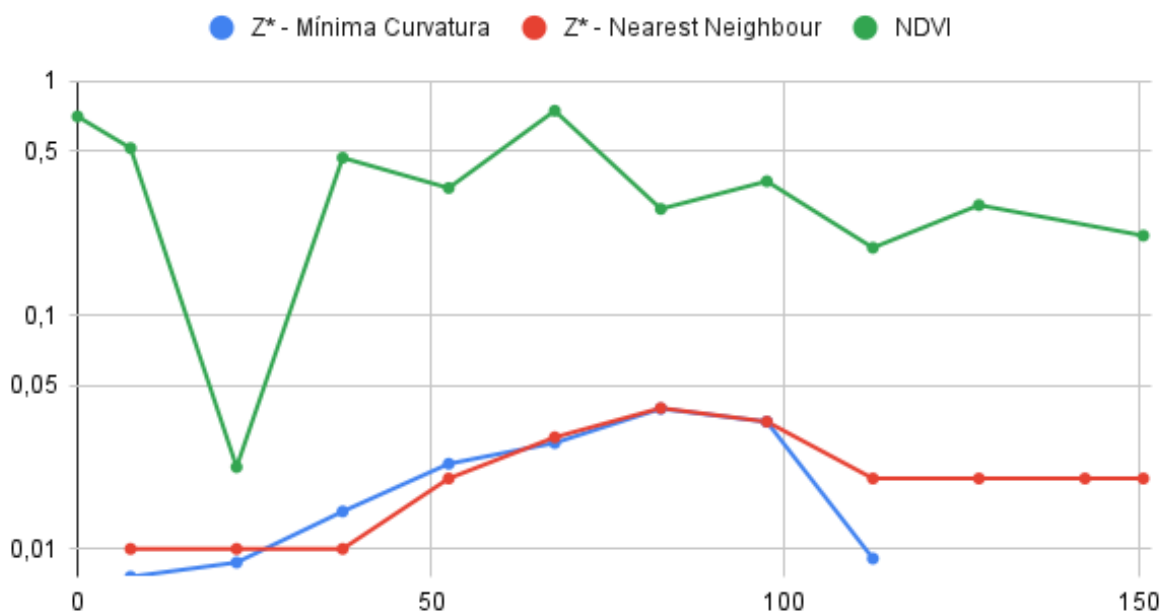
O NDVI, tradicionalmente usado em estudos de agricultura e meio ambiente, mostrou-se uma ferramenta útil, embora indireta, na prospecção mineral. As variações no NDVI podem indicar estresse na vegetação, que por sua vez pode ser causado pela presença de altas concentrações de metais no solo. Além disso, o NDVI ajuda a discriminar áreas de solo exposto de áreas vegetadas, o que é crucial para a interpretação correta das assinaturas espectrais do solo.

Figura 29 – Gráfico comparativo entre a assinatura do NDVI e os perfis de Fe_2O_3 percentual do solo.

Fonte: elaborado pelo autor.

Como observado na Figura 29, no ponto 67.5 do perfil, o índice NDVI, atinge seu ápice, isso acontece pois a cobertura vegetal é extremamente densa nessa porção.

Figura 30 – Gráfico comparativo entre a assinatura do NDVI e os perfis de Fe_2O_3 percentual do tecido foliar.



Fonte: elaborado pelo autor.

A relação entre o NDVI e o teor de Fe_2O_3 observada sugere que áreas com menor NDVI podem estar associadas a anomalias geoquímicas no tecido vegetal.

5.4.5 Limitações e desafios metodológicos

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. O número de amostras (30 de solo e 10 de vegetal) é relativamente pequeno para uma análise estatística robusta em uma área geologicamente complexa. Um maior número de amostras aumentaria a confiabilidade dos modelos e permitiria uma validação mais rigorosa.

A presença de cobertura vegetal densa e de obstruções antrópicas pode introduzir ruído nos dados de sensoriamento remoto, como evidenciado pelas anomalias espectrais observadas em algumas áreas. A resolução espacial das imagens, embora alta, pode não ser suficiente para detectar alvos de menor dimensão. Futuros trabalhos poderiam se beneficiar do uso de imagens hiperespectrais, que possuem maior resolução espectral e podem permitir a identificação direta de minerais de alteração.

A aplicação de técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*) para a modelagem preditiva é uma perspectiva promissora.

5.4.6 Implicações para prospecção de ouro no CILS

Os resultados deste trabalho demonstram o potencial da integração de técnicas de baixo custo e ampla cobertura, como o sensoriamento remoto, com a prospecção geoquímica tradicional. A metodologia desenvolvida permite otimizar o processo de exploração mineral, direcionando os esforços de campo para áreas com maior potencial, identificadas por meio de análise integrada, com suas limitações inerentes.

Os modelos e mapas gerados constituem uma ferramenta para a tomada de decisão nas fases iniciais da prospecção de ouro no CILS, contribuindo para a redução de custos. A identificação de áreas-alvo com base em dados de sensoriamento remoto permite que as campanhas de campo sejam mais focadas e eficientes, aumentando as chances de descoberta de novas mineralizações.

6 – CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a desenvolver e validar uma metodologia integrada para a prospecção de ouro no CILS, combinando dados de geoquímica de solo e de bioindicadores vegetais com técnicas de sensoriamento remoto. A partir da análise e interpretação dos dados coletados e processados, foi possível alcançar os objetivos propostos e chegar a conclusões relevantes para a exploração mineral na região.

6.1 Síntese dos principais resultados

Os principais resultados obtidos neste estudo podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

A metodologia de integração de dados geoquímicos de campo com informações obtidas por sensoriamento remoto de alta resolução VANT mostrou-se eficaz. A correlação entre as anomalias geoquímicas no solo e as assinaturas espectrais da superfície permitiu a identificação de áreas-alvo com maior potencial para a ocorrência de mineralizações de ouro. A abordagem multidisciplinar proposta demonstrou ser capaz de otimizar o processo exploratório.

Foi possível construir um modelo de regressão linear multivariável que estima, com precisão $R = 0.875$, a concentração de Fe_2O_3 , a partir de dados de reflectância. Este resultado valida o uso do sensoriamento remoto como uma ferramenta de prospecção em escala de detalhe, capaz de fornecer informações quantitativas sobre a distribuição espacial de elementos de interesse. O modelo desenvolvido pode ser aplicado em outras áreas com características geológicas similares, desde que sejam realizadas calibrações locais.

A análise comparativa entre a geoquímica do solo e do tecido vegetal da espécie *D. viscosa*, apresentado nos anexos, confirmou que a planta absorve e acumula elementos-traço associados à mineralização, validando seu uso como bioindicador. A correlação positiva ($R = 0.603$) entre o Fe_2O_3 e o índice *Normalized Red* no tecido vegetal reforça esta conclusão.

A análise de correlação prévia demonstrou que o índice RN foi o que apresentou a melhor correlação com o teor de Fe_2O_3 tanto no solo $R = -0.633$, quanto na vegetação $R = 0.603$, justificando sua utilização como principal variável preditora no modelo univariável.

A comparação entre o perfil de Fe_2O_3 estimado pelo modelo de regressão multivariável e o perfil gerado pelo método MC apresentou alta concordância, validando a robustez do modelo preditivo e sua capacidade de reproduzir as tendências espaciais dos dados geoquímicos. Esta validação cruzada é fundamental para assegurar a confiabilidade dos resultados.

6.2 Atendimento aos objetivos

Os objetivos propostos para este trabalho foram parcialmente alcançados. O objetivo geral de desenvolver uma metodologia integrada para a prospecção de ouro no CILS foi cumprido através da execução de todas as etapas descritas nas tabelas 6, 7 e 8, desde o planejamento amostral até a geração de produtos finais. Os objetivos específicos, como a caracterização geoquímica do solo e do tecido vegetal, a utilização de bioindicadores, a aplicação do sensoriamento remoto de alta resolução e a criação de modelos preditivos, foram igualmente atendidos, culminando na identificação de áreas-alvo para futuras investigações.

Porém a relação entre os cristais de CaC_2O_4 , e seu papel como “veículo de transporte” destes elementos permaneceu no campo teórico, uma vez que uma vez que a comprovação empírica dessa interação exigiria análises que estavam além do escopo instrumental deste estudo.

6.3 Balanço do projeto: análise do percurso metodológico

O plano inicial foi concebido com uma meta abrangente; explorar um vasto conjunto de técnicas de prospecção geoquímica. A proposta contemplava a aplicação de métodos de modelagem espacial, a análise de múltiplos elementos *pathfinders*, o uso de bioindicadores e a integração com dados de sensoriamento remoto. O objetivo revisto focou em verificar a possibilidade de construir um modelo preditivo e multifacetado para a detecção de mineralizações.

No decorrer da execução, a realidade temporal e a complexidade inerente a cada etapa

exigiram uma reavaliação estratégica do escopo. A principal adaptação consistiu em priorizar a profundidade em detrimento da amplitude. Em vez de aplicar superficialmente todas as técnicas propostas, optou-se por focar naquelas que se mostraram mais promissoras e viáveis dentro do cronograma: a caracterização pedogeoquímica por FRX e a aplicação focada de técnicas de análise da distribuição espacial de elementos para mapear anomalias.

6.4 Contribuições metodológicas

A principal contribuição metodológica deste estudo é a sistematização de um fluxo de trabalho que integra, de forma coerente e estatisticamente validada, múltiplas fontes de dados geocientíficos para a prospecção mineral. O trabalho apresenta um caminho para otimizar a exploração mineral, tornando-a mais rápida e custo-efetiva, ao permitir que as investigações de campo, mais onerosas e demoradas, sejam direcionadas para áreas de alta probabilidade, previamente selecionadas por meio de análises de sensoriamento remoto e modelagem.

A realização de uma análise de correlação prévia para selecionar o índice espectral mais representativo constitui uma inovação metodológica que reduz o ruído associado a múltiplas assinaturas espectrais e confere maior robustez estatística ao processo de modelagem. Ao invés de testar múltiplas combinações de variáveis de forma empírica, o método proposto identifica de forma objetiva o índice com maior poder preditivo, otimizando o processo de modelagem.

Adicionalmente, a validação cruzada do modelo de regressão com um método modelagem espacial tradicional (MC) reforça a confiabilidade da metodologia proposta. Esta abordagem de validação independente é fundamental para assegurar que os modelos desenvolvidos não são apenas ajustes estatísticos, mas representam as relações físico-químicas subjacentes.

Tabela 6: Fase 1: coleta e análise.

Pilar	Etapa	Descrição
Geoquímica	Amostragem de Solo	Coleta de 30 ou mais amostras de solo (Horizonte B) em grade sistemática.
	Análise FRX	Determinação da concentração percentual de elementos pathfinders (Fe_2O_3 , MnO, Co, Rh).
Biogeoquímica	Amostragem de Tecido Foliar	Coleta de 10 amostras ou mais da flora bioindicadora.
	Análise FRX	Determinação da concentração de elementos (Fe_2O_3 , MnO, Rh) para avaliar a capacidade de bioacumulação.
Sensoriamento Remoto	Aquisição VANT	Obtenção de imagens multiespectrais (NIR, <i>Red</i> , <i>Green</i> , <i>Red Edge</i>) e RGB de alta resolução.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7: Fase 2: tratamento e modelagem.

Pilar	Etapa	Descrição
Geoquímica	Estatística	Tratamento estatístico dos dados de solo (exclusão de <i>outliers</i>). Interpolação dos valores de Fe para gerar o Mapa de Anomalias.
Biogeoquímica	Correlação	Cálculo da Matriz de Correlação de Pearson entre os elementos no tecido vegetal e no solo.
Sensoriamento Remoto	Processamento	Processamento fotogramétrico para gerar Ortomosaico e MDE. Cálculo de índices espectrais (NDVI, RI).
	Modelagem Preditiva	Desenvolvimento de Modelos (Regressão Linear) para prever o teor de Fe_2O_3 no solo a partir das assinaturas espectrais (R, G, B, RI, RN, R/G <i>Ratio</i>).

Fonte: elaborado pelo autor.

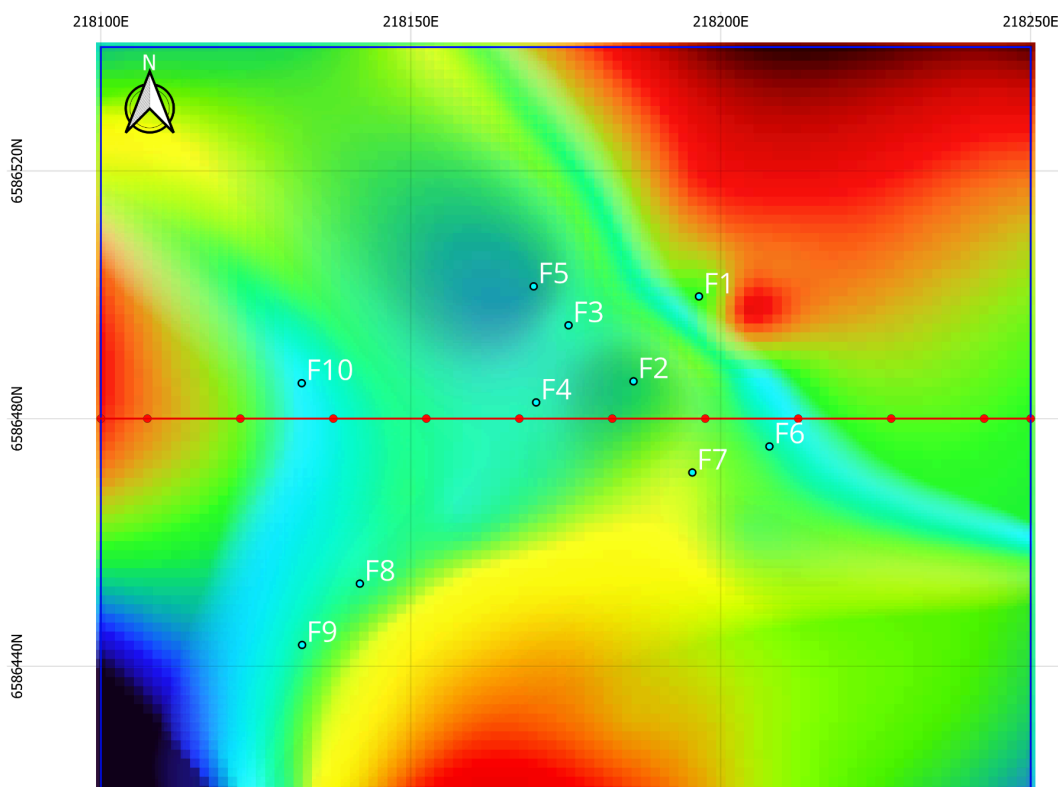
Tabela 8: Fase 3: integração e conclusão

Etapa	Descrição
Validação Biogeoquímica	Comparação das concentrações de <i>pathfinders</i> (Fe_2O_3 , MnO) no solo e na planta para validar a flora como bioindicador.
Sobreposição de Anomalias	Mapeamento das áreas onde as anomalias geoquímicas (alto Fe_2O_3 no solo), biogeoquímicas (alto $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ na planta) e espectrais (alto RI, baixo NDVI) se sobrepõem.
Resultado Final	Definição dos alvos de prospecção de maior prioridade.

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nesse protocolo, mais especificamente na etapa 3, observamos que ao sobrepor as estimativas em diferentes meios Solo/Planta, obtém-se um maior destaque para as anomalias, como é demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Mapa da mina do Butiá: sobreposição de anomalias Fe_2O_3 percentual solo/planta.



Fonte: elaborado pelo autor.

A similitude, da Figura 31 com o modelo univariável, Figura 24, consolida e amplia o conhecimento da distribuição dos óxidos de ferro na área da mina do Butiá, é importante

frisar que as concentrações de Fe_2O_3 no meio vegetal, não ultrapassam os 0.05%, ao passo que em amostras de solo, as concentrações beiram 5.2%, quase 100 vezes maior.

6.5 Recomendações para trabalhos futuros

Com base nos resultados e nas limitações identificadas, recomendam-se as seguintes ações para a continuidade e aprofundamento desta linha de pesquisa:

- I. adensamento amostral: aumentar o número de amostras de solo e de tecido vegetal para conferir maior robustez estatística aos modelos e permitir uma validação mais rigorosa dos resultados.
- II. uso de imagens de alta resolução: empregar imagens de satélite com maior resolução espacial e espectral (hiperespectral), o que pode permitir a identificação direta de minerais de alteração e a construção de modelos ainda mais precisos o que aumentaria significativamente a precisão dos modelos preditivos.
- III. aplicação de aprendizado de máquina: explorar o uso de algoritmos de *machine learning* (e.g., *Random Forest*, *Support Vector Machines*, Redes Neurais) para a classificação de alvos e modelagem preditiva, que podem capturar relações não-lineares complexas entre as variáveis.

Em suma, este trabalho confirma o uso de uma abordagem multidisciplinar na prospecção mineral e fornece bases para futuras investigações no CILS, contribuindo para o avanço do conhecimento geocientífico e para o desenvolvimento de técnicas de exploração mais inteligentes e sustentáveis.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAY, H. H. et al. *Mapping of ferric (Fe^{3+}) and ferrous (Fe^{2+}) iron oxides distribution using ASTER and Landsat 8 OLI data, in Negash Lateritic iron deposit, Northern Ethiopia. **Geology, Ecology and Landscapes**, v. 8, n. 3, p. 223–240, out. 2022. DOI: 10.1080/24749508.2022.2130556.*

AGISOFT LLC. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8*. Saint Petersburg: Agisoft LLC, 2022.

ALSHAGHDARI, M. *Geochemistry of elements as pathfinders and proxies in geological environments*. ResearchGate, out. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374386513>. Acesso em: 25 out. 2025.

ANDRADE, A. B. Elementos farejadores em prospecção geoquímica: princípios e aplicações. **Revista Brasileira de Geoexploração**, v. 12, n. 1, p. 45–62, 2021.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Interpretação de dados de prospecção geoquímica**. Rio de Janeiro: CPRM, 2010.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Tratamento estatístico de dados geoquímicos: uma revisão**. Rio de Janeiro: CPRM, 2022.

BALARAM, V.; SAWANT, S. S. *Indicator Minerals, Pathfinder Elements, and Portable Analytical Instruments in Mineral Exploration Studies*. **Journal of the Geological Society of India**, v. 96, n. 4, p. 361–368, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1473-0>.

BARREIRO, A. I. S. **Comportamento biogeoquímico de elementos traços com ênfase nas terras raras no sistema planta-rocha – Lavras do Sul/RS**. 2017. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

BINOTTO, R. B. et al. Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS) utilizando espectros de reflectância experimental. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 173-186, 2015.

BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

BITENCOURT, M. F.; NARDI, L. V. S. *Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt*. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 184-187, 2000.

BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford: Pergamon, 1994.

BOYLE, R. W. *The geochemistry of gold and its deposits*. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1979.

CASTAÑEDA-ESPINOZA, J. et al. *Dodonaea viscosa (Sapindaceae) as a phytoremediator for soils contaminated by heavy metals in abandoned mines*. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 30, n. 2, p. 2509-2529, jan. 2023.

CHAKRABORTY, R. et al. *Mineral prospecting from biogeochemical and geological information using hyperspectral remote sensing: Feasibility and challenges*. **Journal of Geochemical Exploration**, [S.l.], v. 106900, 2021.

CRAW, D.; MACKENZIE, D. J. *Macraes Orogenic Gold Deposit (New Zealand): origin and development of a world class gold mine*. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-35158-2. ISBN 978-3-319-35157-5.

CRÓSTA, A. P. et al. Sensoriamento remoto hiperespectral aplicado à exploração mineral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1807–1814.

DE TONI, G. B. et al. *Dom Feliciano Belt orogenic cycle tracked by its pre-collisional magmatism: The Tonian (ca. 800 Ma) Porto Belo Complex and its correlations in southern Brazil and Uruguay*. **Precambrian Research**, v. 342, 105702, 2020. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105702.

DUNN, C. E. **Biogeochemistry in mineral exploration**. Amsterdam: Elsevier, 2007. (*Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, v. 9).

FRANCESCHI, V. R.; NAKATA, P. A. *Calcium oxalate in plants: formation and function*. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, p. 41-71, 2005.

FRUTUOSO, R.; LIMA, A.; TEODORO, A. C. *Application of remote sensing data in gold exploration: targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal*. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, art. 459, 2021.

GASTAL, M. C. P. et al. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte I: Geologia, geofísica e geocronologia 207Pb/206Pb e 206Pb/238U. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 1, p. 99-113, 2006.

GASTAL, M. C.; LAFON, J. M. Gênese e evolução dos granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção oeste do escudo sul-rio-grandense: Geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 1, p. 11–28, fev. 1998. DOI: 10.25249/0375-7536.19981128.

GASTAL, M. C.; LAFON, J. M.; CHEMALE JR., F. Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais. **Brazilian Journal of Geology**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 681–698, 2015.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. Oxford: Oxford University Press, 1997.

- GOPINATHAN, P. *Mapping of ferric (Fe³⁺) and ferrous (Fe²⁺) iron oxides distribution using ASTER satellite images analysis*. **Journal of King Saud University - Science**, v. 32, n. 2, p. 1609-1616, 2020.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- HAIR JR., J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HALE, M. *Pathfinder Applications of Arsenic, Antimony and Bismuth in Geochemical Exploration*. **Developments in Economic Geology**, v. 15, p. 381-395, 1981.
- HAXEL, G. B. **Rare earth elements: critical resources for high technology**. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2002.
- HE, J. et al. *Applications of Eucalyptus in Environmental Biogeochemical Prospecting: A Review*. **Minerals**, v. 11, n. 3, p. 268, 2021.
- HUNT, G. R. *Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared*. **Geophysics**, v. 42, n. 3, p. 501-513, 1977.
- JÁUREGUI-ZÚÑIGA, D. et al. *Heavy metal stress reduces the deposition of calcium oxalate crystals in leaves of Phaseolus vulgaris*. **Journal of Plant Physiology**, v. 162, n. 10, p. 1183-1187, out. 2005.
- JENKINS, R. **X-Ray Fluorescence Spectrometry**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- JONES, V.; DROZD, R. J. *Prediction of oil or gas potential by near-surface geochemistry*. **AAPG Bulletin**, v. 67, n. 6, p. 932-952, June 1983.
- KORSHUNOVA, V. A. *Mobile Forms of Gold and Pathfinder Elements in Surface Sediments at the Novye Peski Gold Deposit and in the Piilola Prospecting Area (Karelia Region)*. **Minerals**, v. 9, n. 1, p. 34, Jan. 2019. DOI: 10.3390/min9010034.
- LACERDA, M. P. C.; ANDRADE, H.; QUÉMÉNEUR, J. J. G. *Pedogeoquímica em perfis de alteração na região de Lavras (MG). I – Elementos maiores - óxidos constituintes*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 75-85, 2002.
- LICHT, O. A. B. **Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos**. Rio de Janeiro: CPRM, 1998.
- LINTERN, M. et al. *Natural gold particles in Eucalyptus leaves and their relevance to exploration for buried gold deposits*. **Nature Communications**, v. 4, art. 2274, p. 1-6, 2013. DOI: 10.1038/ncomms3614.
- LIZ, J. D. **Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS): petrologia, geoquímica de elementos-traço em zircão e aplicação de *sliding normalization* na avaliação de fontes magmáticas**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

LOPES, R. W. et al. Assinatura Geofísica e Geoquímica do Depósito Pb-Zn-(Cu-Ag) Santa Maria – RS, Brasil. In: CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA, 12.; SEMANA DA GEOQUÍMICA, 20., 2019, Évora. **Resumos Expandidos**. Évora: Universidade de Évora, 2019.

MADEIRA NETTO, J. S. *Spectral reflectance properties of soils*. **Photo Interprétation**, v. 34, n. 2, p. 59-70, 1996.

MALAJCZUK, N.; CROMACK, K. *Occurrence of calcium oxalate in karri (Eucalyptus diversicolor F. Muell.) forest ecosystems of south western Australia*. **Plant and Soil**, v. 69, p. 113-121, 1982.

MAZEN, A. M. A.; EL MAGHRABY, O. M. O. *Accumulation of cadmium, lead and strontium, and a role of calcium oxalate in water hyacinth tolerance*. **Biologia Plantarum**, v. 40, n. 4, p. 411-417, nov. 1997.

MEXIAS, A. S. et al. Modelamento geoquímico das condições de precipitação de ouro na mina do Bloco do Butiá, Lavras do Sul, RS. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 77, n. 4, p. 717–728, 2005.

MOREIRA, F. R. et al. *Extraction and concentration of biogenic calcium oxalate from plant material*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170111, 2018.

MOREIRA, M. O. **Fechamento de mina–resgate histórico e levantamento do passivo ambiental da Mina do Butiá–Lavras do Sul**. 2015. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Mineração) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

OLIVEIRA, F. S. et al. Alteração supergênica e morfogênese tropical no complexo máfico-ultramáfico acamadado de Barro Alto, GO. **Geociências**, v. 33, n. 3, p. 373-388, 2014.

PARSONS, C. et al. *Quantification of trace arsenic in soils by field-portable X-ray fluorescence spectrometry: Considerations for sample preparation and measurement conditions*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, p. 1213-1222, 2013.

PONGRAC, P. et al. *Cadmium associates with oxalate in calcium oxalate crystals and competes with calcium for translocation to stems in the cadmium bioindicator Gomphrena claussenii*. **Metallomics**, v. 10, n. 11, p. 1576-1584, nov. 2018.

POTTS, P. J.; WEST, M. **Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for In Situ Analysis**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008.

REMUS, M. V. D. et al. *Distal magmatic-hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) deposits, southern Brazil*. **Gondwana Research**, v. 3, n. 2, p. 155-174, 2000.

REIS, J. B. B. **Utilização de análise composicional de componentes principais na identificação de elementos farejadores – Um estudo de caso nos depósitos de ouro**. 2018. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

REINPRECHT, V.; KIEFFER, D. S. *Application of UAV photogrammetry and multispectral image analysis for identifying land use and vegetation cover succession in former mining areas*. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 405, 2025.

ROCKWELL, B. W. *Description and validation of an automated methodology for mapping mineralogy, vegetation, and hydrothermal alteration type from ASTER satellite imagery with examples from the San Juan Mountains, Colorado*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3190, 35 p., 5 map sheets, scale 1:100,000. 2012.

RODRIGUES, L. G. **Prospecção de ouro em zonas de cisalhamento na região de Lavras do Sul**. 2017. [Número de páginas] f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

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

ROUILLON, M.; TAYLOR, M. P. *Can field portable X-ray fluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research?* **Environmental Pollution**, v. 214, p. 255-264, 2016.

SABINS, F. F. *Remote sensing for mineral exploration*. **Ore Geology Reviews**, v. 14, n. 3-4, p. 157-183, 1999.

SHANTHI, S. et al. *Pharmacognostical Studies on the Leaves of Dodonaea viscosa (L.) Jacq.* **International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research**, v. 8, n. 11, p. 1877-1880, nov. 2016.

SILVA, I. R. et al. Acúmulo de ácido oxálico e cristais de cálcio em ectomicorrizas de eucalipto. I - Produção de ácido oxálico e concentração de nutrientes em raízes laterais finas intactas e não micorrizadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1153-1161, 2009.

SILVA, E. A. et al. *Portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry applied to the prediction of chemical attributes in Inceptisols under different land uses*. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 5, p. 501-512, 2018.

SILLITOE, R. H. *Porphyry copper systems*. **Economic Geology**, v. 105, n. 1, p. 3-41, 2010.

SOMARIN, A. K. et al. *Portable XRF in mineral exploration: another tool in the toolkit*. **Explore**, v. 154, p. 1-8, 2012.

THE JAMOVI PROJECT. *jamovi* (Version 2.3) [Computer Software]. [S.l.]: The jamovi Project, 2022. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 18 ago. 2025.

TONIOLO, J. A.; GIL, C. A. A.; SANDER, A. **Metalogênese das províncias metálicas do Brasil: área de Lavras do Sul-Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: CPRM, 2010. (Série Províncias Metalogenéticas do Brasil, n. 2).

VISCARRA ROSSEL, R. A. et al. *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. **Geoderma**, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006.

WOLLMANN, F. S. **Análise da correlação e comportamento de elementos-traço em amostras de solo e rocha na região de Lavras do Sul/RS**. 2024. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2024.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à Econometria: Uma Abordagem Moderna**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

8. ANEXOS

Nesta seção do trabalho são apresentadas Figuras e Tabelas, que auxiliaram o entendimento da dispersão dos elementos na área, utilizando o substrato de dados produzidos nas diferentes fases do projeto.

Tabela 9: estatística descritiva – amostras de solo PPM

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl	K ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	Co	Mo	Rh	Cd	Ce	Hf	Th	RI	R/G	RN	R	G	B
N	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Média	4.03	20.4	37.4	0.0899	3.48	0.0305	3.36	0.179	0.0389	0.198	0.0274	0.209	0.0397	0.109	63.3	8.46	0.498	0.284	0.245	0.185
Mediana	3.94	20.3	37.4	0.0900	3.72	0.0300	3.25	0.170	0.0380	0.197	0.0150	0.193	0.0313	0.112	24.3	1.08	0.388	0.206	0.218	0.151
Desvio-padrão	0.977	2.73	4.70	0.0072	1.06	0.0140	0.857	0.0478	0.0151	0.0329	0.0294	0.0591	0.0151	0.0398	102	22.7	0.338	0.205	0.146	0.121
Mínimo	2.63	12.3	24.2	0.0800	1.16	0.00	1.92	0.100	0.0200	0.145	0.00	0.133	0.0200	0.00	0.393	0.655	0.293	0.0308	0.0470	0.0230
Máximo	6.56	26.2	46.0	0.110	5.19	0.0600	5.21	0.275	0.0850	0.310	0.103	0.315	0.0700	0.190	398	103	1.52	0.788	0.639	0.499

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10: estatística descritiva – análise foliar PPM

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	S	Cl	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Zn	Zr	Rh	Cd	RI	R/G	RN	R	G	B
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Média	4.29	2.82	0.040 2	0.224	0.507	0.770	4.88	2.59	0.073 7	0.026 5	0.009 00	0.003 50	1.17	0.132	78.5	0.961	0.370	0.203	0.211	0.136
Mediana	4.26	2.04	0.002 50	0.133	0.455	0.262	3.41	2.24	0.040 0	0.027 5	0.00	0.00	0.867	0.023 8	36.1	0.950	0.363	0.195	0.204	0.129
Desvio-padrão	2.16	2.75	0.070 4	0.295	0.425	1.07	4.62	1.71	0.112	0.015 6	0.018 5	0.006 69	0.481	0.162	92.8	0.191	0.024 1	0.094 9	0.098 3	0.076 2
Mínimo	0.142	0.00	0.00	0.00	0.062 5	0.060 0	0.775	0.860	0.010 0	0.00	0.00	0.00	0.720	0.00	8.11	0.584	0.345	0.064 7	0.087 5	0.012 0
Máximo	7.30	8.11	0.187	0.985	1.25	2.93	13.4	6.19	0.387	0.050 0	0.060 0	0.020 0	1.83	0.357	258	1.33	0.421	0.367	0.397	0.266

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 11: média e desvio padrão das análises PPM

Elementos	MgO	Al2O3	SiO2	S	Cl	K2O	CaO	MnO	Fe2O3	Cd	Rh
Média - Solo	3,94375	20,29166 667	37,3625	0	0,09	3,721666 667	0	0,03	3,25	0,015	0,197
Média - Vegetal	4,256666 667	2,038333 334	0,0025	0,455	0,261666 6667	3,406666 667	2,238333 333	0,04	0,0275	0,02375	0,8675
Desvio Padrão - Solo	0,976993 7623	2,728844 847	4,704330 676	0,008103 585839	0,007247 450778	1,064451 493	0,020083 16044	0,014017 44147	0,857458 9654	0,029429 22327	0,032886 77118
Desvio Padrão - Vegetal	2,156994 83	2,745850 069	0,070354 92034	0,425444 0763	1,065458 807	4,622690 589	1,710989 931	0,111824 9293	0,015643 60004	0,161542 2631	0,481113 9097

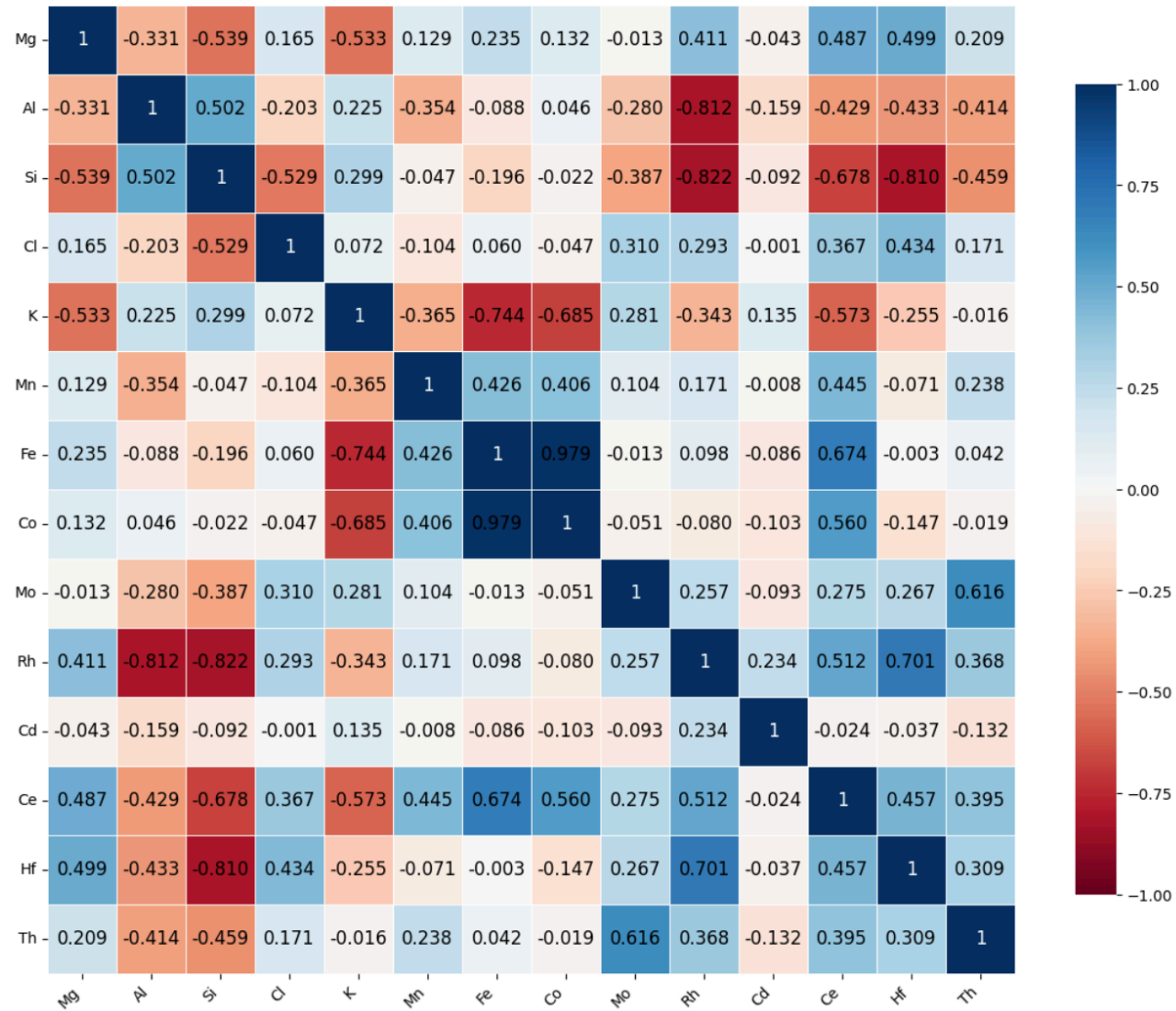
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12: Dados dos modelos criados.

Distância	(Z)* Mínima Curvatura	(Z)* - Vizinho mais Próximo	(Z)* GERAL	(Z)* RN
0	3,892330707	3,7925	3,922032701	3,4149692
7,50	3,714839758	3,7925	3,726477097	3,4759244
22,50	3,199837621	3,537917174	2,815883556	2,5976516
37,50	2,567380048	2,802916847	2,650087984	2,6096036
52,50	2,043585176	2,12124975	2,613949064	3,0109916
67,50	1,976190167	2,0833338	2,066081036	2,036804
82,50	2,192059873	2,246666667	2,48719323	2,675738
97,50	2,505180196	2,505001574	2,600034935	2,8871888
112,50	2,920927749	2,806667001	3,069740654	3,1793156
127,50	3,070759576	2,85	2,389142364	2,7526292
142,50	3,000705856	2,85	3,367624929	2,629424
150,0	2,938315932	2,85	2,691281043	2,9071088
Média	2,929621841	2,8283335	2,670684514	2,819909
Desvio Padrão	0,6093167866	0,5920458347	0,5537837274	0,3955663655

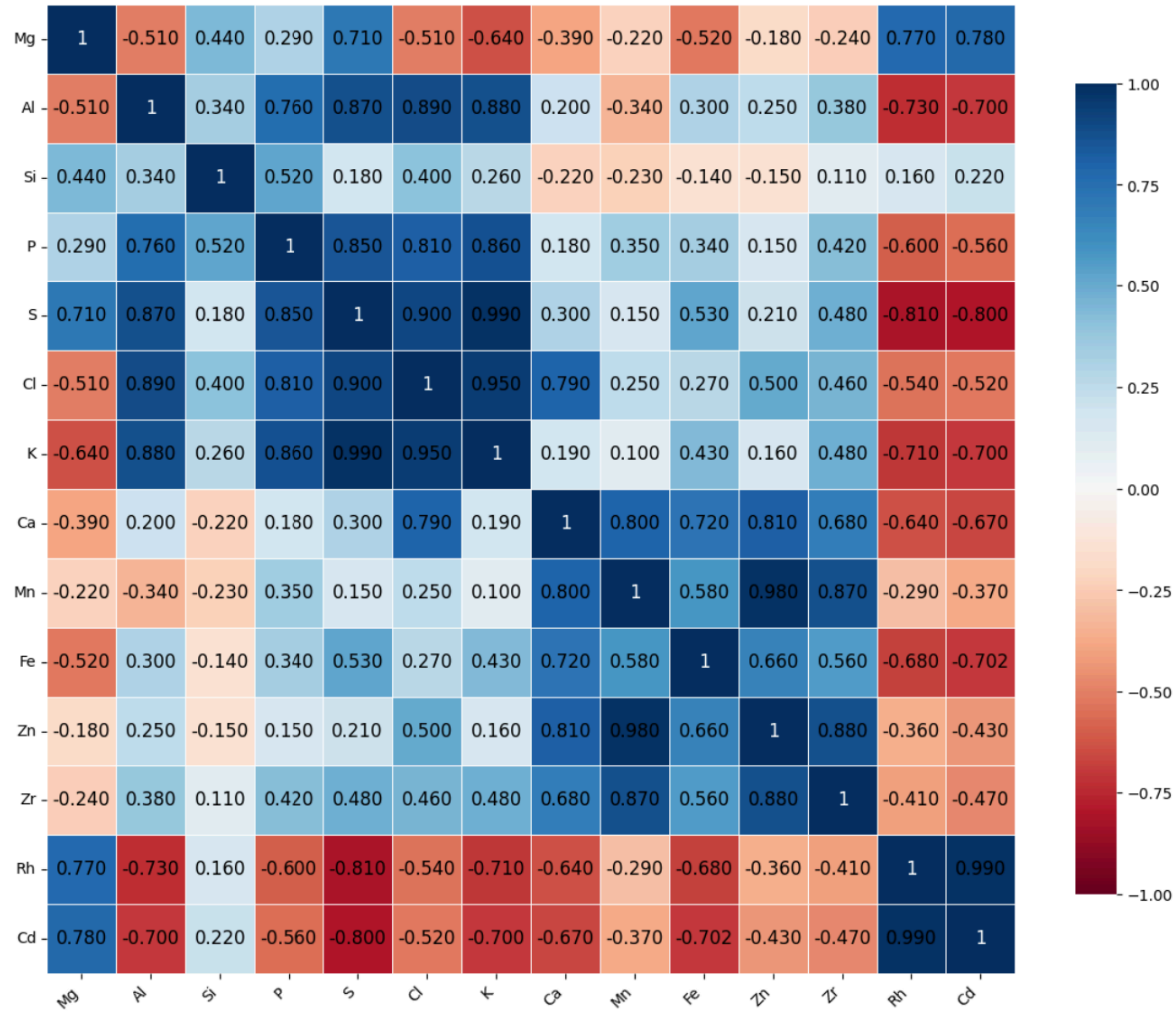
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32 – Heatmap das correlações de Pearson (elementos presentes no solo).



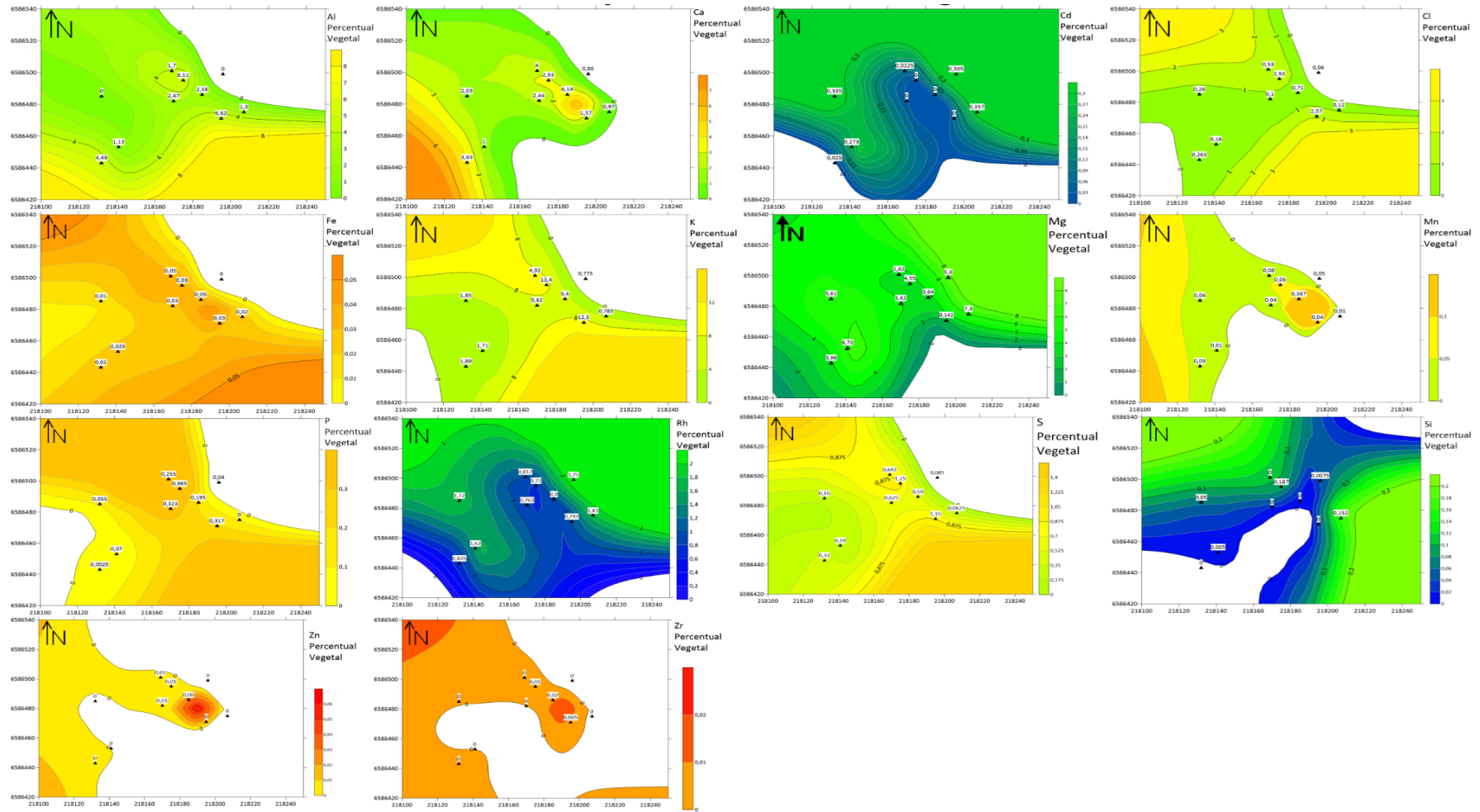
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 33 – Heatmap das correlações de Pearson (elementos presentes no tecido foliar).



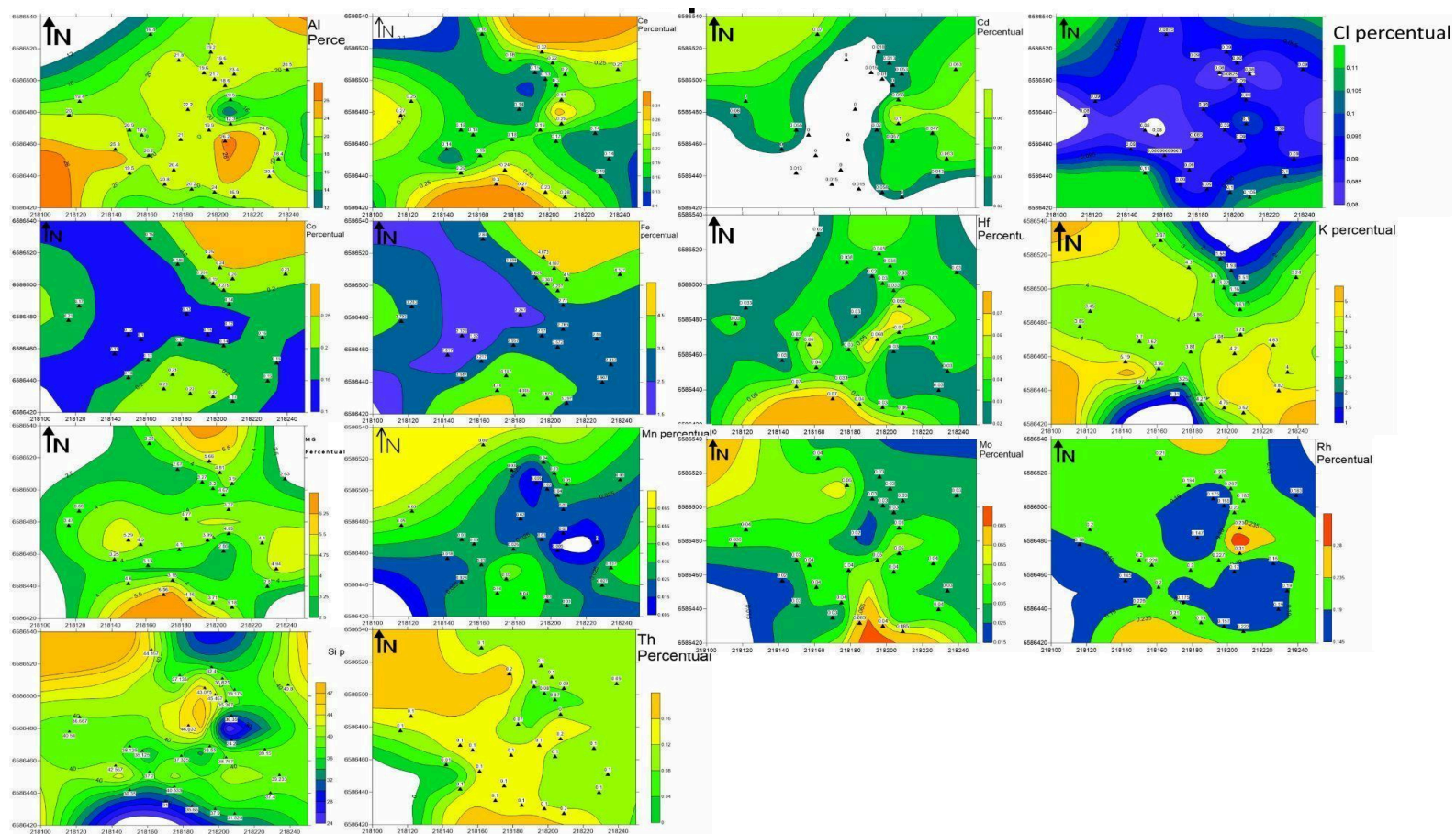
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 34 - Disposição espacial das concentrações elementares no tecido foliar



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 35 - Disposição espacial das concentrações elementares no solo



Fonte: elaborado pelo autor.