UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIELLA MARIOTO VARELA

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA APLICADOS NA OCORRÊNCIA DE OURO ALUVIAL A OESTE DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL (RS)

CAÇAPAVA DO SUL

2026

GABRIELLA MARIOTO VARELA

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA APLICADOS NA OCORRÊNCIA DE OURO ALUVIAL A OESTE DO 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. Marco Antonio Fontoura Hansen

CAÇAPAVA DO SUL

2026

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) .

V293s Varela, Gabriella Marioto
SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA APLICADOS NA OCORRÊNCIA DE OURO ALUVIAL A OESTE DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS / Gabriella Marioto Varela.
68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2026.
"Orientação: Marco Antonio Fontoura Hansen".

1. Prospecção Mineral. 2. Sensor LIDAR. 3. Sensoriamento remoto. 4. Álgebra de mapas. 5. Ouro aluvial . I. Título.

GABRIELLA MARIOTO VARELA

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA APLICADOS NA OCORRÊNCIA DE OURO ALUVIAL A OESTE DO 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: 08/07/2026

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen
ORIENTADOR
UNIPAMPA

Profa. Dra. Cristiane Heredia Gomes
UNIPAMPA

Prof. Dr. José Pedro Rebés Lima
UNIPAMPA

Assinado eletronicamente por **CRISTIANE HEREDIA GOMES**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 14:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **JOSE PEDRO REBES LIMA**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 18:24, 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 **2095925** e o código CRC **3F7DD5CA**.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria, perseverança e por iluminar meu caminho em todos os momentos, especialmente diante dos desafios encontrados ao longo desta jornada.

Primeiramente, agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, apoio, incentivo e compreensão durante toda a minha trajetória acadêmica. Aos meus pais, Adriana e Sérgio Roberto, expresso minha eterna gratidão por acreditarem nos meus sonhos, por todos os esforços realizados e por subsidiarem meus estudos, tornando possível a concretização desta conquista. À minha irmã, Beatriz, agradeço pelo carinho, companheirismo e incentivo constante. *In memoriam* à minha avó, Maria Neide, meu muito obrigada pelo amor, pelas orações e por sempre torcer pelo meu sucesso. Esta conquista também pertence a vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Hansen, agradeço pela confiança, dedicação, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao Prof. Dr. Felipe Guadagnin, expresso meus sinceros agradecimentos pela colaboração nos levantamentos aéreos e pelas orientações, ao LabModel (Laboratorio de Modelagem Geológica) onde foram gerados os modelos, agradeço ao Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM) junto a Angela Cristina Bertoi Fleck, por toda paciência e compreensão durante o auxílio na etapa da análise das amostras.

A todos os professores e servidores que fizeram parte da minha formação acadêmica, deixo meu sincero agradecimento pelos conhecimentos transmitidos, pelo incentivo e pela contribuição para o meu crescimento profissional e pessoal. Aos meus colegas de graduação, agradeço pela amizade, companheirismo e paciência ao longo desses anos. Em especial, agradeço a Kayo, Flávia, Ingrid, Thainã, Geovanna, Guilherme, Miguel, João Pedro, Eduardo, Bruna, Andyara, Ana Luiza, Renan e Isis por compartilharem momentos de aprendizado, desafios, conquistas e muitas alegrias, tornando essa caminhada muito mais leve e inesquecível.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

"Alegrem-se na esperança, sejam pacientes na tribulação, perseverem na oração."
Romanos 12:12

RESUMO

A crescente demanda por minerais estratégicos impulsiona o desenvolvimento de métodos avançados e de baixo custo operacional para a prospecção mineral em alvos complexos. Este trabalho teve como objetivo investigar os controles geológicos e delimitar eixos de favorabilidade para o ouro aluvial na bacia hidrográfica do Arroio Camaquã das Lavras, porção oeste do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), no Escudo Sul-rio-grandense (RS). O distrito é marcado por mineralizações primárias do tipo Au-Cu-Pb-Zn-Ag associadas a veios hidrotermais e zonas de alteração rúpteis ricas em sulfetos. A metodologia integrada consistiu em uma abordagem multiescala, iniciando-se com o mapeamento regional de lineamentos rúpteis e anomalias de alteração mineral via Álgebra de Mapas (índices RN, RI e RG) a partir de dados dos sensores orbitais Landsat-8. O detalhamento de alvo foi executado por meio de aerolevantamento com o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) DJI Matrice 300 RTK, embarcando de forma síncrona um sensor ativo LiDAR e uma câmera óptica digital RGB. Os dados altimétricos do laser geraram um Modelo Digital do Terreno (MDT) centimétrico livre de vegetação (*bare earth*), expondo com alta acurácia descontinuidades e anomalias topográficas como rupturas de declive (*knickpoints*). O processamento estatístico de lineamentos em diagramas de rosetas comprovou o controle estrutural de primeira ordem exercido pelas famílias Nordeste-Sudoeste (NE-SW) e Noroeste-Sudeste (NW-SE) sobre o entalhamento e as inflexões do canal. A validação geoquímica de campo foi conduzida por espectrometria de fluorescência de raios X portátil (pXRF) em frações finas (<177 μm) de sedimentos de corrente. O teste estatístico multivariado do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) isolou a forte afinidade mecânica e deposicional de metais pesados detríticos densos (Fe-Ti-Mn), confirmando a deposição conjunta de ilmenita e magnetita titanífera concentradas por seletividade hidráulica em feições de baixa energia, como a barra de pontal mapeada no ortomosaico do VANT. A análise quantificou ainda o efeito de diluição por sílica na relação inversa Fe-Si. Os resultados integrados em ambiente SIG revelaram aderência geométrica perfeita entre as fraturas do LiDAR, as anomalias geoquímicas e os halos espectrais de enriquecimento em hematita. Conclui-se que o protocolo metodológico integrado otimiza a identificação de alvos prospectivos secundários, reduz custos e mitiga riscos exploratórios em províncias vulcano-plutônicas.

Palavras-chave: Prospecção Mineral; LiDAR; pXRF; Álgebra de Mapas; Ouro Aluvial.

ABSTRACT

The growing demand for strategic minerals drives the development of advanced, low-operating-cost methods for mineral exploration in complex targets. This study aimed to investigate geological controls and delineate zones of favorability for alluvial gold in the Camaquã das Lavras Stream watershed, located in the western portion of the Lavras do Sul Intrusive Complex (CILS) within the Sul-rio-grandense Shield (RS). The district is characterized by primary Au-Cu-Pb-Zn-Ag mineralization associated with hydrothermal veins and sulfide-rich brittle alteration zones. The integrated methodology employed a multiscale approach, beginning with regional mapping of brittle lineaments and mineral alteration anomalies using Map Algebra (RN, RI, and RG indices) applied to Landsat-8 orbital sensor data. Target-scale analysis was conducted via aerial surveys using a DJI Matrice 300 RTK Unmanned Aerial Vehicle (UAV), simultaneously carrying an active LiDAR sensor and an RGB digital optical camera. Laser-derived elevation data generated a centimeter-scale, vegetation-free Digital Terrain Model (DTM), revealing with high accuracy discontinuities and topographic anomalies such as slope breaks (knickpoints). Statistical processing of lineaments using rose diagrams confirmed the first-order structural control exerted by Northeast-Southwest (NE-SW) and Northwest-Southeast (NW-SE) lineament sets on channel incision and inflections. Field geochemical validation was performed using portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry on fine fractions (<177 μm) of stream sediments. The multivariate statistical analysis using Pearson's correlation coefficient (r) isolated the strong mechanical and depositional affinity of dense detrital heavy metals (Fe-Ti-Mn), confirming the co-deposition of ilmenite and titaniferous magnetite concentrated via hydraulic sorting in low-energy features, such as the point bar mapped in the UAV orthomosaic. The analysis further quantified the silica dilution effect observed in the inverse Fe-Si relationship. Results integrated within a GIS environment revealed a perfect geometric match between LiDAR-detected fractures, geochemical anomalies, and spectral halos of hematite enrichment. It is concluded that this integrated methodological protocol optimizes the identification of secondary exploration targets, reduces costs, and mitigates exploration risks in volcano-plutonic provinces.

Keywords: Mineral Exploration; LiDAR; pXRF; Map Algebra; Alluvial Gold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de ocorrências minerais cadastradas pela CPRM e os pontos de coleta de sedimentos de corrente na área de estudo
Figura 2- Mapa de localização da área de estudo
Figura 3 – Mapa geológico simplificado da Folha Lavras do Sul com as unidades litoestratigráficas agrupados nos principais domínios geotectônicos e com delimitação dos principais lineamentos estruturais presentes na quadrícula do projeto
Figura 4 – Mapa geológico simplificado da região do Distrito Mineral de Lavras do Sul e da Mina do Seival, como localização dos principais prospectos e substâncias associadas.
Figura 5 – Contexto Geotectônico do cinturão Dom Feliciano e suas relações com Gondwana Ocidental
Figura 6 – Mapa Geológico da área de estudo
Figura 7 – Modelo conceitual da evolução dos depósitos auríferos aluviais, desde a mineralização primária até a concentração em barras de pontal.Figura 8 – Modelos conceituais de alojamento, ressurgência e evolução magmática das fácies do Complexo Intrusivo Lavras do Sul.
Figura 9 – Pulsos (fullwave) sensores de emissão continua permitem o registro completo dos retornos.
Figura 10 – Diagrama conceitual do processamento de dados LIDAR e geração de produtos altimétricos e métricas utilizados na análise morfológica da paisagem
Figura 11 – Curvas de reflectância espectral para os minerais de óxidos de ferro (goethita, hematita e jarosita) e suas relações com as bandas orbitais do sensor Landsat- 8 (OLI)
Figura 12 – Diagrama esquemático mostrando a configuração de componentes, fluxo de processamento de sinal e geometria de amostragem de um analisador portátil de fluorescência de raios X (pXRF).
Figura 13 – Fluxograma metodológico integrado para a aquisição de dados espaciais, fusão de planos de informação em ambiente SIG e geração de modelos de favorabilidade mineral.
Figura 14 – Fluxograma metodológico sequencial dividindo as etapas de pré-campo, campo e pós-campo executadas no desenvolvimento da pesquisa

Figura 15 – Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de asa rotativa DJI Matrice 300 RTK acoplado com sensor ativo LiDAR e câmera RGB em base de campo
Figura 16 – Antena/Estação móvel GNSS RTK externa montada em campo sobre tripé para correção e acurácia posicional centimétrica do aerolevantamento
Figura 17 – Diagrama de roseta de frequência de lineamentos estruturais regionais obtidos a partir da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM)
Figura 18 – Diagrama de roseta de frequência de lineamentos estruturais locais delimitados manualmente sobre a área do vale do Arroio Camaquã da Lavras
Figura 19– Modelo Digital de Ortoimagem (MDO) de alta resolução centimétrica obtido por meio de levantamento aerofotogramétrico com VANT
Figura 20 – Modelo Digital do Terreno (MDT) sombreado com resolução centimétrica derivado de pulsos laser ativos (LiDAR)
Figura 21 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Fe-Si
Figura 22 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Al-Si
Figura 23 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Ti-Fe
Figura 24 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Fe-Mn
Figura 25 – Diagramas bivariados de dispersão (scatterplots) que mostram as retas de tendência azul para as relações Ti-Fe, Fe-Mn, Ti-Mn, Fe-Si e Al-Si)
Figura 26– Matriz de correlação linear multivariada (heatmap) evidenciando os graus de afinidade geoquímica positiva (vermelho) e negativa (azul) entre os elementos analisados.
Figura 27 – Painel comparativo multiescala exibindo os produtos dos índices espectrais RN, RI e RG calculados para o sensor orbital Landsat 8 e para o imageamento

LISTA DE TABELA

Tabela 1– Associações minerais e elementos-traço (*pathfinders*) aplicados à exploração 30
Tabela 2: Matriz de correlação linear multivariada bruta para a totalidade dos elementos químicos analisados na fração fina dos sedimentos de corrente.....58
Tabela 3: Coeficientes de correlação de Pearson para os elementos químicos farejadores principais na bacia do Arroio Camaquã das Lavras..... 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

As – Arsênio

Au – Ouro

CDF – Cinturão Dom Feliciano

CGL – Complexo Granítico Lavras

CGSMC – Complexo Granulítico Santa Maria Chico

Cu – Cobre

ESRG – Escudo Sul-Rio-Grandense

Fe – Ferro

FRX – Fluorescência de Raios X

Hg – Mercúrio

IDW – Inverso da Distância Ponderada

IL – Lineamento Ibaré

LATRAM – Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios

LiDAR – *Light Detecto and Ranging*

MDT – Modelo Digital do Terreno

Mo – Molibdênio

MSI – *Multispectral Instrument*

OLI – Operational Land Imager (Imageador Operacional Landsat 8)

Pb – Chumbo

pXRF – Espectrometria Portátil de Fluorescência de Raios X

Sb – Antimônio

SIG – Sistema de Informação Geográfica (Geographic Information System)

SILS – Suíte Intrusiva Lavras do Sul

SIS – Suíte Intrusiva Saibro

TSG – Terreno São Gabriel

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

W – Tungstênio

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 JUSTIFICATIVA 3
1.2 ÁREA DE ESTUDO 4
2 OBJETIVOS 5
2.1 OBJETIVO GERAL 6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL 7
3.1 UNIDADES GEOTECTÔNICAS DO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE (ESRG) 8
3.1.1 Bloco Taquarembó 9
3.1.2 Bloco São Gabriel 9
3.1.3 Terreno Tijucas 10
3.1.4 Batólito Pelotas 10
3.1.5 Bacias Sedimentares Pós-Orogênicas 10
3.2 CINTURÃO DOM FELICIANO (CDF) 10
3.3 A BACIA DO CAMAQUÃ 10
3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL 11
4 REVISÃO DA LITERATURA 13
4.1 METALOGÊNESE E AFINIDADE GEOQUÍMICA DO OURO 13
4.2 SENSORIAMENTO REMOTO NA PROSPECÇÃO MINERAL 17
4.3 ÁLGEBRA DE MAPAS E RAZÕES DE BANDAS NA DETECÇÃO DE ALVOS MINERAIS 20
4.4 ESPECTROMETRIA DE FRX PORTÁTIL E PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA AURÍFERA 23
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA E CORRELAÇÃO ELEMENTAR 25
4.6 INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA 26
5. METODOLOGIA 29
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
6.1 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS E ANÁLISE MORFOESTRUTURAL 34
6.2 ANOMALIAS GEOQUÍMICAS NOS SEDIMENTOS DE CORRENTE 39
6.3 ANÁLISE ESPECTRAL E RAZÕES DE BANDAS EM MULTIESCALA 47
7. CONCLUSÕES 50

INTRODUÇÃO

O estudo de ocorrências auríferas, especialmente de caráter aluvial, tem grande importância para a prospecção mineral. A combinação de técnicas avançadas com a compreensão detalhada da geologia local constitui um fator essencial para a descoberta de jazidas com elevado valor econômico (GROVES *et al*., 2003; HARTMANN *et al*., 2011).

O uso de tecnologias de sensoriamento remoto, em conjunto com a análise geoquímica, tem se consolidado como uma alternativa eficiente na exploração mineral, sobretudo em regiões de difícil acesso ou com restrições ambientais (VAN DER MEER *et al*., 2012). Essa integração de dados permite identificar alvos geológicos promissores a partir da combinação não invasiva de análises estruturais, litológicas e geoquímicas, otimizando os processos investigativos.

A área de estudo está inserida no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (604 – 590 Ma) e da sequência vulcânica da Formação Hilário, unidades portadoras de mineralização de Au-Cu (Pb-Ag) que ocorrem no oeste do Escudo Sul-rio-grandense e são consideradas pós-colisionais à Orogênese Dom Feliciano (640 – 620 Ma) (SILVA *et al*., 2005). O plúton granítico, compõe a porção sul do complexo. As hipóteses para seu alojamento, seja por subsidência de caldeira em profundidade (NARDI, 1984) ou por ressurgência pós-colapso (GASTAL *et al*., 2006), são consistentes com a evolução de um centro vulcano-plutônico.

A região de Lavras do Sul, situada no Escudo Sul-rio-grandense, é uma área de relevância para a investigação de depósitos auríferos. Sua complexidade tectônica, associada a lineamentos estruturais bem definidos e a sistemas de drenagem que atuam como concentradores secundários de ouro, a torna um alvo estratégico (PHILIPP *et al*., 2004; HARTMANN *et al*., 2011).

Este estudo permitirá uma análise integrada dos lineamentos tectônicos e das redes de drenagem para investigar a potencialidade aurífera da região, com foco no Arroio Camaquã das Lavras. A abordagem metodológica fundamenta-se na clássica integração entre sensoriamento remoto e geoquímica (SABINS, 1999; VAN DER MEER *et al*., 2012), aqui atualizada pela combinação de imagens de satélite e sensores embarcados em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs/drones) com análises geoquímicas de sedimentos via Fluorescência de Raios X (FRX). Adicionalmente, a análise dos padrões estruturais permitirá compreender a influência dos processos tectônicos na formação e concentração

dos depósitosmminerais.

A metodologia proposta visa não apenas à identificação de potenciais alvos para exploração mineral, mas também à compreensão dos processos geológicos responsáveis pela formação, transporte e concentração dos depósitos auríferos secundários.

1.1 JUSTIFICATIVA

A otimização de métodos exploratórios aplicados a depósitos secundários é uma demanda latente na mineração contemporânea. Nesse cenário, a região de Lavras do Sul destaca-se por seu expressivo potencial aurífero aluvial, condicionado por uma complexa evolução tectônica e estrutural associada ao Cinturão Dom Feliciano (PHILIP *et al.*, 2004; HARTMANN *et al.*, 2011; LAUX *et al.*, 2020), o que exige ferramentas de investigação de alta resolução para a delimitação de alvos.

A distribuição das ocorrências minerais registradas pela CPRM, associada aos principais lineamentos estruturais e à rede de drenagem da área de estudo (Figura 1), evidencia a relação entre o controle estrutural e a concentração de depósitos auríferos secundários. Além disso, a localização dos pontos de coleta de sedimentos de corrente demonstra a estratégia de amostragem adotada neste trabalho, direcionada às principais drenagens com potencial para concentração de ouro aluvial.

Figura 1 – Ocorrências minerais cadastradas pela CPRM, pontos de coleta de sedimentos de corrente, lineamentos estruturais e rede de drenagem na área de estudo, em Lavras do Sul (RS).



Fonte: Autora (2026)

Dessa forma, este estudo justifica-se pelo desenvolvimento e validação de um fluxo metodológico de baixo impacto ambiental e alta eficiência econômica para a prospecção mineral em regiões de geologia complexa. Os resultados gerados fornecem subsídios para o avanço da pesquisa científica de detalhe e buscam disseminar conhecimento técnico-científico aplicável tanto à comunidade acadêmica quanto a iniciativas públicas e privadas, integrando imageamento LiDAR, sensoriamento remoto por VANT e geoquímica via pXRF em uma abordagem multiescala.

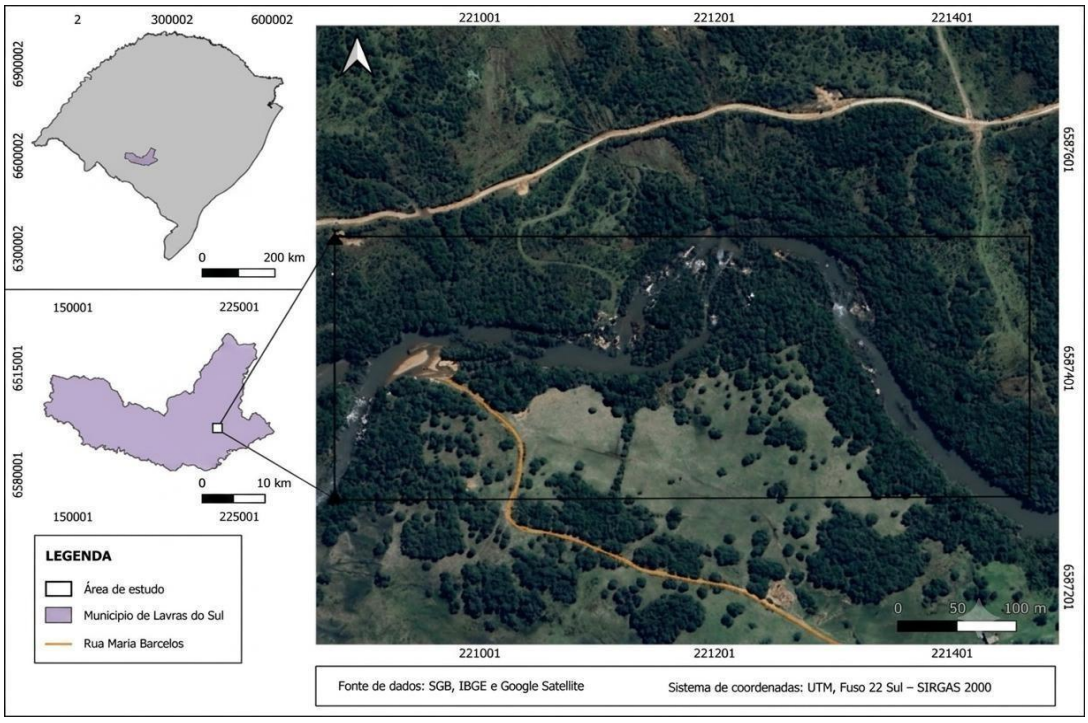
1.2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Lavras do Sul está localizado na porção sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, integrado à região fisiográfica da Campanha Gaúcha. O acesso à sede municipal, a partir da capital Porto Alegre, realiza-se predominantemente pelo eixo da rodovia BR-290 no sentido oeste, seguido pelo entroncamento com a BR-392 em direção a Caçapava do Sul, de onde se acessa a rodovia RS-357 que conduz diretamente ao município.

Sob a perspectiva hidrográfica, o território municipal está subdividido entre duas importantes bacias: a do Rio Santa Maria e a do rio Camaquã. Aproximadamente 47% da área do município integra a bacia hidrográfica do rio Santa Maria, enquanto os 53% restantes pertencem à bacia hidrográfica do rio Camaquã. A rede de drenagem local é estruturada por cursos d'água principais como o arroio das Lavras, o arroio Ivaró e o arroio Santo Antônio, os quais atuam como tributários diretos dessas duas macrobacias.

O foco desta pesquisa recai sobre o arroio Camaquã das Lavras, cujas coordenadas geográficas centrais correspondem a 30°48'51.22"S e 53°54'57.65"W (Figura 2). O acesso específico a este setor da área de estudo ocorre a partir do entroncamento da rodovia BR-392 com a rodovia RS-357, seguindo em direção oeste rumo ao perímetro de Lavras do Sul.

Figura 2 – Mapa de situação e localização da área de estudo



Fonte: Autora (2026)

OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência dos lineamentos tectônicos no controle das redes de drenagem associadas a potenciais ocorrências auríferas na região de Lavras do Sul (RS), por meio da integração de dados multiespectrais orbitais, altimetria laser de alta resolução (*LIDAR*) e assinaturas geoquímicas obtidas por fluorescência de raios X portátil (pXRF).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, busca-se:

- Mapear e caracterizar os lineamentos estruturais da área de estudo, integrando dados orbitais (Landsat-8 e Sentinel-2) a Modelos Digitais do Terreno (MDT) de alta resolução gerados por sensor *LIDAR* embarcado em VANT;

- Identificar e analisar o padrão das redes de drenagem, avaliando sua relação com as estruturas geológicas e com os sítios de deposição de depósitos secundários;

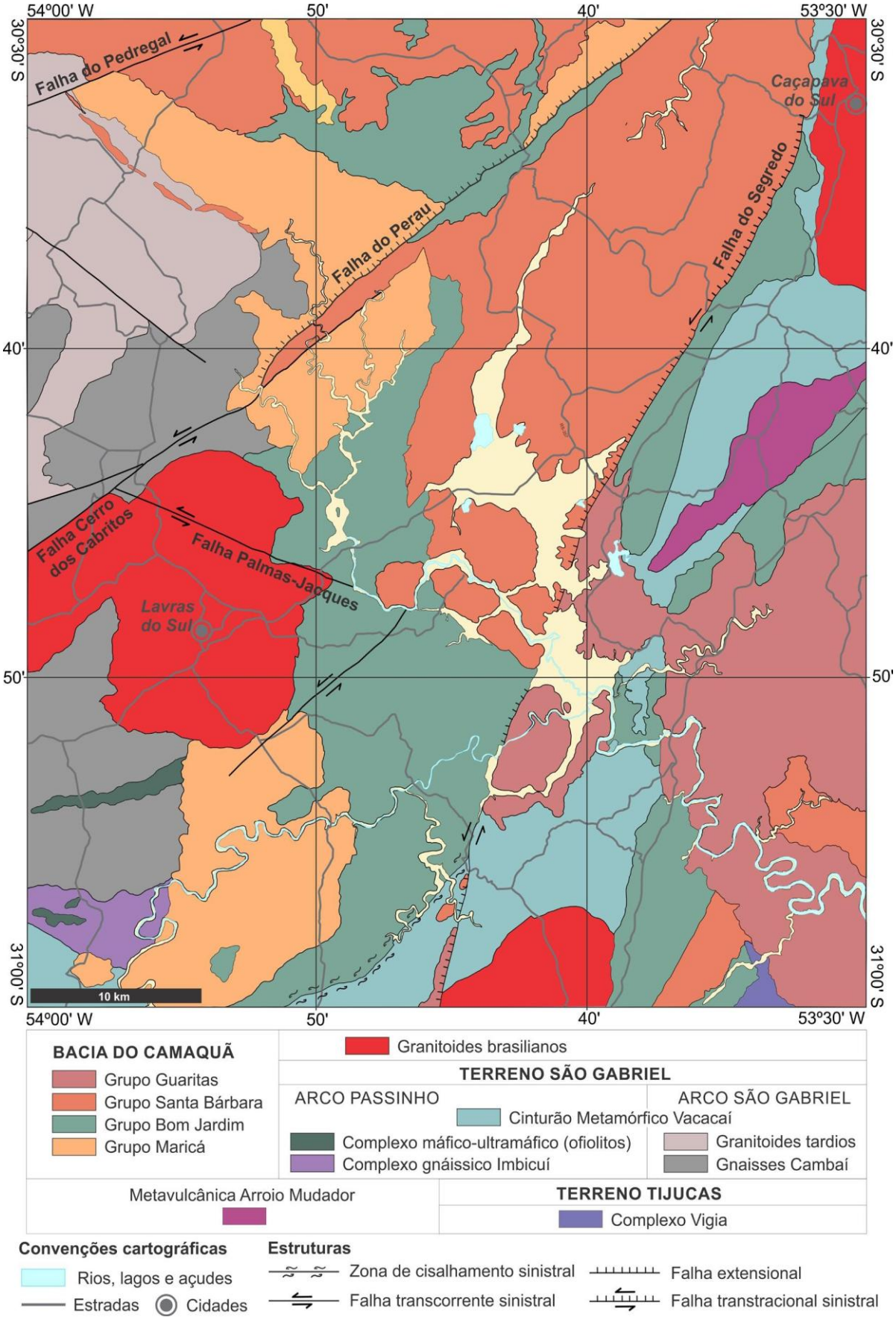
- Realizar análises geoquímicas de solos e sedimentos por fluorescência de raios X portátil (pXRF), visando identificar elementos-guia e avaliar padrões de dispersão geoquímica associados à mineralização aurífera; e,

- Integrar os dados estruturais, de sensoriamento remoto e geoquímicos em ambiente SIG para delimitar e classificar zonas com assinaturas favoráveis à prospecção aurífera aluvial no Arroio Camaquã das Lavras.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

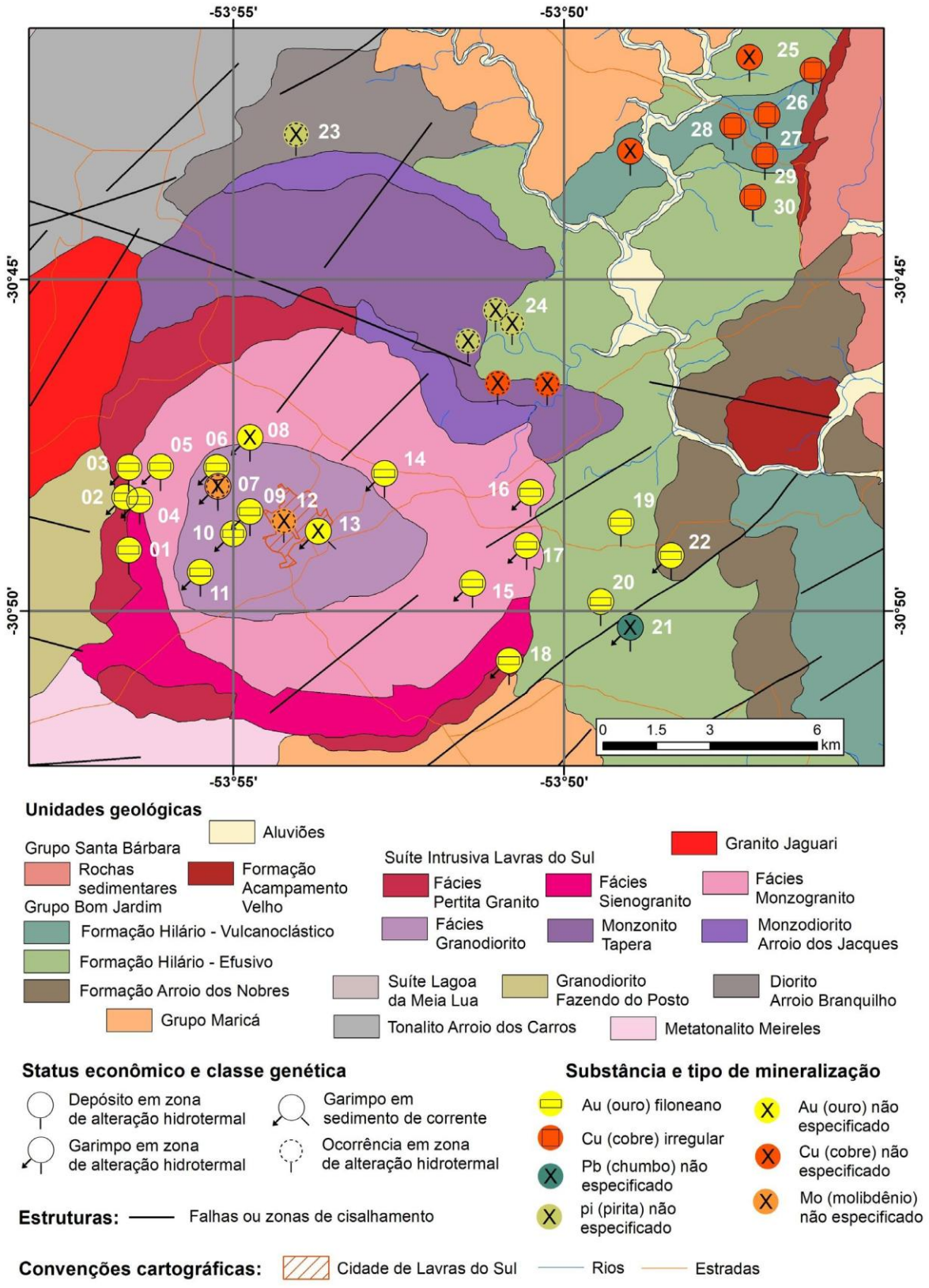
A região de Lavras do Sul está geologicamente situada no Escudo Sul-rio-grandense, localizado na porção centro-sul do estado do Rio Grande do Sul (figuras 3 e 4). Este escudo integra a Província Mantiqueira, uma extensa faixa orogênica associada ao Ciclo Brasiliano (900–540 Ma), que abrange formações paleo, meso e neoproterozóicas vinculadas a relevantes eventos tectônicos, magmáticos e sedimentares (CHEMALE *et al*., 2012; PHILIPP *et al*., 2016).

Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Folha Lavras do Sul com as unidades litoestratigráficas agrupados nos principais domínios geotectônicos e com delimitação dos principais lineamentos estruturais presentes na quadrícula do projeto.



Fonte: Cruz e Horn, 2020. Programa Geologia do Brasil. Folha Lavras do Sul

Figura 4 - Mapa geológico simplificado da região do Distrito Mineral de Lavras do Sul e da Mina do Seival, como localização dos principais prospectos e substâncias associadas.



Toponímias: Distrito Mineral de Lavras do Sul: 01 - Bloco Butiá; 02 - Galvão; 03 - Zeca Souza; 04 - Caneleira; 05 - Taruman; 06 - Olaria; 07 - Pitangueira; 08 - Santo Expedito; 09 - Paredão; 10 - São José; 11 - Virgínia; 12 - Lavras do Sul; 13 - Arroio das Lavras; 14 - Cerrito (Pires e Resende); 15 - Mato Feio; 16 - Dourada; 17 - Aurora; 18 - Waldo Teixeira; 19 - Cerro Rico; 20 - Volta Grande; 21 - Saraiva; 22 - Merita; 23 - Passo das Carretas; 24 - Arroio dos Jacques.
Mina do Seival: 25 - Barita; 26 - João Dahne; 27 - Morcego; 28 - Meio; 29 - Cruzeta; 30 - Alcides

Fonte: Cruz e Horn, 2020. Programa Geologia do Brasil. Folha Lavras do Sul

3.1 UNIDADES GEOTECTÔNICAS DO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE (ESRG)

O Escudo Sul-rio-grandense (ESRG) constitui uma porção do Cinturão Dom Feliciano (CDF) e representa um segmento importante da margem oeste do supercontinente Gondwana durante o Neoproterozoico. O escudo é classicamente dividido em cinco unidades geotectônicas principais: o Bloco Taquarembó, o Terreno São Gabriel, o Terreno Tijucas, o Batólito Pelotas e as Bacias Sedimentares Pós-Orogênicas. Cada uma dessas unidades é distinta por suas características litológicas, estruturais, geoquímicas e geocronológicas (SAALMANN *et al*., 2005; BASEI *et al*., 2008; CHEMALE *et al*., 2012; PHILIPP *et al*., 2016).

3.1.1 Bloco Taquarembó

O Bloco Taquarembó, situado na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense, é formado por rochas arqueanas a paleoproterozoicas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, associadas ao Cráton Rio de La Plata. Durante o Neoproterozoico, foi retrabalhado por eventos do Ciclo Brasiliano e interagiu com os terrenos do Cinturão Dom Feliciano, contribuindo para a evolução tectônica regional e para a consolidação do Gondwana (HARTMANN *et al*., 2001; BASEI *et al*., 2008; CHEMALE *et al*., 2012).

3.1.2 Bloco São Gabriel

Segundo DE TONI *et al*., 2024, o Bloco São Gabriel corresponde a um terreno juvenil neoproterozoico limitado pelo Lineamento Ibaré e pela Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul. Sua evolução é marcada pela formação de ofiolitos, desenvolvimento de arcos magmáticos juvenis, metamorfismo e intrusões granitoides relacionadas ao Ciclo Brasiliano (BABINSKI *et al*., 1996; HARTMANN *et al*., 2011; PHILIPP *et al*., 2021). Após os eventos colisionais, a instalação da Bacia do Camaquã registrou os estágios finais da Orogenia Dom Feliciano, com deposição dos grupos Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas, acompanhada por magmatismo pós-colisional e sistemas plutono-vulcânicos associados a mineralizações de Cu-Au (FRAGOSO CÉSAR *et al*., 2000; PAIM *et al*., 2014; GASTAL *et al*., 2015).

3.1.3 Terreno Tijucas

O Terreno Tijucas ocupa a porção central do ESRG, delimitado pela Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro a norte e pela Dorsal de Canguçu, a sul. Sua evolução abrange idades desde o Paleoproterozoico (~2,2 Ga) até o Neoproterozoico (~0,8 Ga) (BASEI *et al*., 2008; PHILIPP *et al*., 2016). É constituído principalmente pelo Complexo Encantadas, de natureza gnáissico-tonalítica, e pelo Complexo Porongos, caracterizado por metassedimentos e metavulcânicas. Este último abriga mineralizações auríferas associadas a veios de quartzo e zonas de cisalhamento HARTMANN *et al*., 2008; PHILIPP *et al*., 2016). O terreno registra intensa deformação e metamorfismo progressivo, associados aos eventos colisionais neoproterozoicos (CHEMALE *et al*., 2012).

3.1.4 Batólito Pelotas

O Batólito Pelotas corresponde a uma importante província granítica neoproterozoica relacionada aos estágios finais da Orogenia Dom Feliciano, sendo constituído por granitos sintectônicos e pós-colisionais controlados por grandes zonas de cisalhamento regionais (BASEI *et al*., 2008; PHILIPP *et al*., 2016).

3.1.5 Bacias Sedimentares Pós-Orogênicas

As bacias sedimentares pós-orogênicas, com destaque para a Bacia do Camaquã, formaram-se durante a fase de colapso e relaxamento tectônico que sucedeu a Orogenia Dom Feliciano, com sedimentação ativa entre 590 e 530 Ma (BASEI *et al*., 2008; CHEMALE *et al*., 2012). A Bacia do Camaquã é subdividida nos grupos Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas, compostos por depósitos de conglomerados, arenitos e siltitos, intercalados com rochas vulcânicas.

3.2 CINTURÃO DOM FELICIANO (CDF)

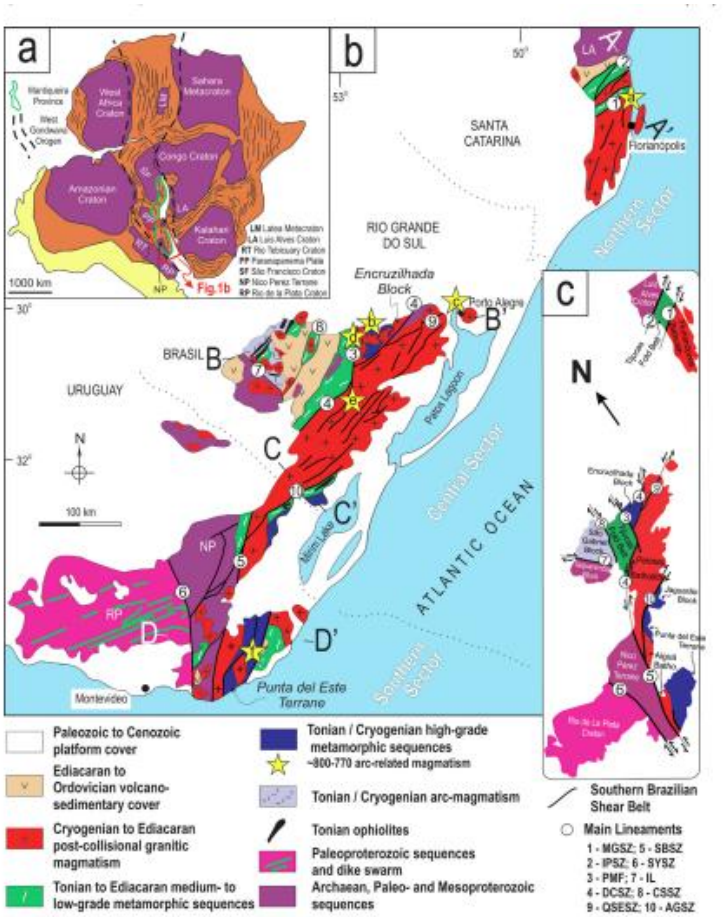
O Cinturão Dom Feliciano, parte do sistema orogênico Dom Feliciano é composto por terrenos de arcos magmáticos e bacias associadas (figura 5). Este cinturão evidencia processos de convergência tectônica, seguidos por extensão crustal pós-orogênica, que resultaram na formação de extensas intrusões graníticas e bacias sedimentares (PAIM *et al*., 2000).

3.3 A BACIA DO CAMAQUÃ

A Bacia do Camaquã, depositada sobre o embasamento ígneo-metamórfico do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG), representa um registro fundamental das fases tardi a pós-colisionais do Ciclo Brasiliano. Sua arquitetura estrutural, dominada por depocentros do tipo *strike-slip pull-apart* (FRAGOSO-CÉSAR *et al*., 2000; PAIM *et al*., 2000), exerceu um controle direto sobre a circulação de fluidos hidrotermais e o alojamento de mineralizações.

O preenchimento da bacia, organizado no Alosupergrupo Camaquã (WILDNER *et al*., 2008), reflete uma evolução tectônica que transita de regimes compressivos para transpressivos. Sob a perspectiva metalogenética, destacam-se os episódios de vulcanismo shoshonítico e alcalino associados aos grupos Bom Jardim e Guaritas, respectivamente (NARDI; LIMA, 1985; PAIM *et al*., 2014). Esses eventos magmáticos são frequentemente acompanhados por anomalias geoquímicas e zonas de alteração hidrotermal que constituem as fontes primárias para o ouro aluvial investigado neste estudo.

Figura 5 - Contexto Geotectônico do cinturão Dom Feliciano e suas relações com o Gondwana Ocidental



Fonte: Adaptado de Oriolo *et al*. (2017)

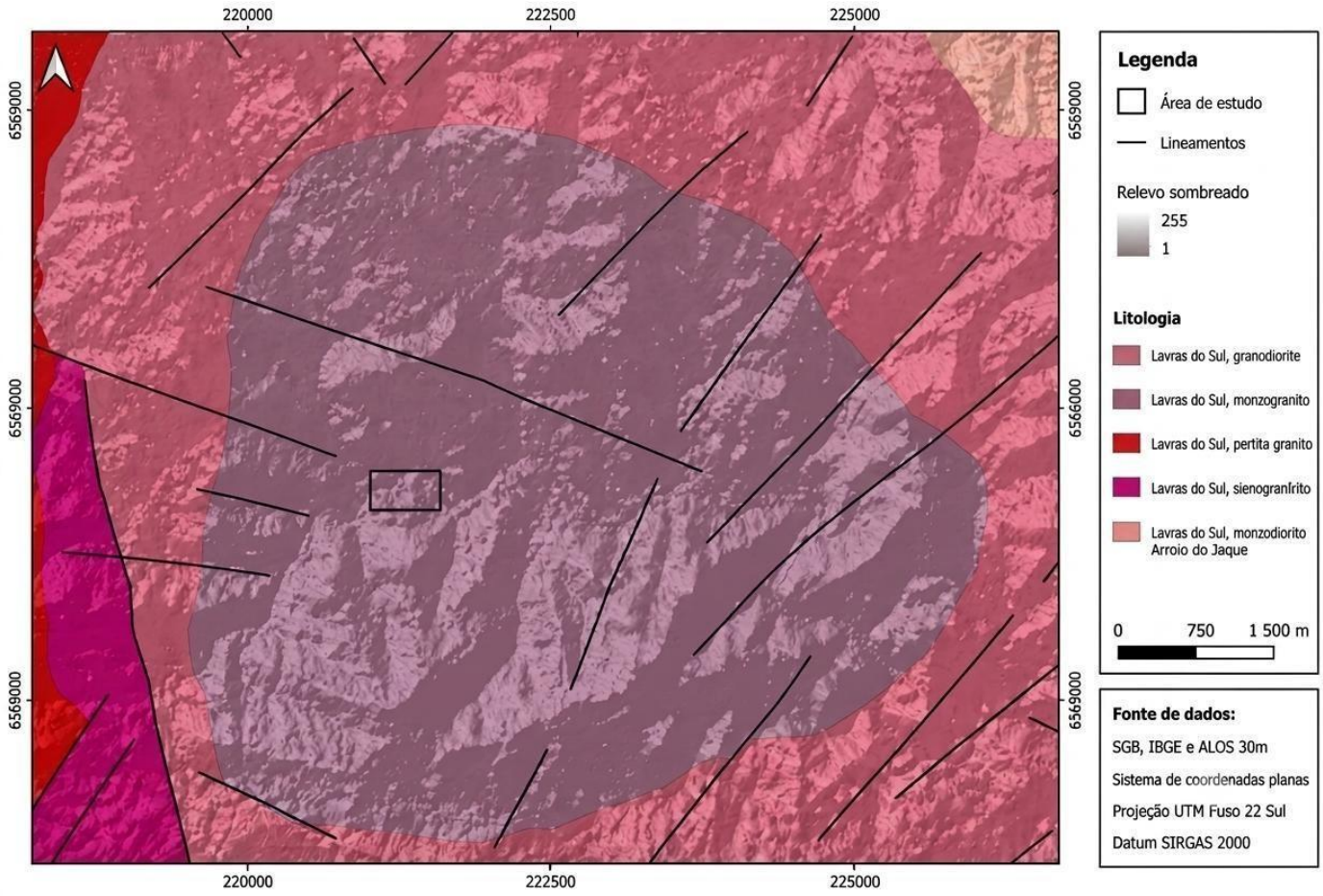
Nota: O esquema ilustra: (A) a localização da área no Gondwana Ocidental; (B) o mapa geotectônico do Cinturão Dom Feliciano e seus blocos cratônicos adjacentes; e (C) a estrutura cinemática simplificada dos principais domínios e lineamentos. Acrônimos: MGSZ – Zona de Cisalhamento Major Gercino; IPSZ – Zona

de Cisalhamento Itajaí-Perimbó; PMF – Falha Passo do Marinheiro; DCSZ – Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu; SBSZ – Zona de Cisalhamento Sierra Ballena; SYS - Zona de Cisalhamento Sarandi del Yi; IL – Lineamento Ibaré; CSSZ – Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul.

3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

A geologia local é dominada pelo Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), um corpo de geometria subcircular com aproximadamente 216 km² de extensão espacial. O complexo é composto pelas fácies monzodiorito, monzogranito, quartzo monzonito e pertita granito (GASTAL *et al*., 2015), cuja distribuição espacial e relações de contato na área de estudo estão sintetizadas no mapa geológico local (Figura 6)

Figura 6 - Mapa Geológico da área de estudo



Fonte: Autora (2026) com dados de relevo Copernicos Global DSM 30

PORCHER; LOPES (2000) apontam que esse corpo intrusivo ocorre em discordância com as unidades basais da Bacia do Camaquã, configurando-se dentro de um sistema porfirítico de cobre, no qual as rochas ígneas porfiríticas submetidas a processos hidrotermais intensos apresentam enriquecimento em sulfetos. RIBEIRO *et al*. (1966) relatam que o corpo apresenta comportamento intrusivo em ortognaisses e granitoides pré-tectônicos nas porções W–SW e N–NW, sendo delimitado ao S–SE pela Formação São Rafael, cujo contato é controlado por uma zona de falha de direção NE–SW, denominada Falha São Domingos, e a leste pela Formação Hilário. Essas duas formações se sobrepõem em ângulo, indicando relações tectônicas importantes para a configuração da área.

A leste do CILS ocorre a Formação Hilário, composta essencialmente por lavas andesíticas e rochas piroclásticas. Ao Sul, a Formação Maricá é representada por sequências sedimentares siliciclásticas e turbidíticas, incluindo arenitos, siltitos e grauvacas (MATOS NETO *et al*., 1980; RIBEIRO, 1983). O complexo estabelece ainda contato com as rochas gnáissicas do Grupo Cambaí e com o Granito Jaguari, sendo este último mapeado como uma intrusão mais jovem (GASTAL; LAFON, 1998)

Os eventos de alteração hidrotermal que afetaram o CILS e a Formação Hilário geraram depósitos de Au-Cu (Pb-Ag) controlados por falhas e zonas de cisalhamento. O intemperismo químico e físico contínuo sobre essas mineralizações primárias promoveu a liberação do ouro de sua matriz rochosa. Posteriormente, o transporte hidráulico e a gravidade reconcentraram o metal ao longo da rede de drenagem atual. Esse processo gerou os depósitos secundários auríferos aluviais no leito do Arroio Camaquã das Lavras, justificando a delimitação da área de estudo.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda os conceitos fundamentais que sustentam a metodologia aplicada neste trabalho. Serão discutidos os processos metalogenéticos do ouro, com ênfase em sua afinidade geoquímica, bem como a revisão da literatura das técnicas de sensoriamento remoto e geoquímica aplicadas à prospecção mineral. A integração dessas abordagens constitui uma estratégia a ocorrência aurífera.

4.1 METALOGÊNESE E AFINIDADE GEOQUÍMICA DO OURO

Os depósitos auríferos da região de Lavras do Sul apresentam características compatíveis com sistemas auríferos relacionados a intrusões (*Intrusive-Related Gold Systems* - IRGS), marcados por alteração hidrotermal disseminada, controle estrutural e associação com plútons graníticos alcalinos (GASTAL *et al*., 2015; LAUX *et al*., 2020).

A compreensão dos processos metalogenéticos é crucial para a prospecção de ouro. Em ambientes superficiais, a mobilidade e a concentração do metal são fortemente influenciadas por sua afinidade geoquímica com outros elementos e minerais. Em depósitos aluviais, o ouro é frequentemente encontrado associado a argilominerais, como a caulinita e a esmectita, que, devido à sua elevada área de superfície e carga iônica negativa, atuam como um meio de adsorção física e química, retendo partículas finas do metal durante os processos de erosão e transporte fluvial (BUTT; ZEEGERS, 1992; ANAND *et al*., 2019).

De maneira análoga, os óxidos e hidróxidos de ferro (e.g., hematita, goethita) desempenham um papel significativo na geoquímica do ouro (BALARAM; SAWANT, 2023). O metal, frequentemente transportado em solução como complexos de tiossulfato ou cloreto em águas superficiais, pode ser desestabilizado e precipitado na superfície desses minerais de ferro (CRAW *et al*., 2002). (Tabela- 1) sintetiza as principais associações minerais e elementos-guia (*pathfinders*).

Desse modo, a presença de zonas enriquecidas em ferro e argila, como os perfis lateríticos e os horizontes argilosos em planícies de inundação, pode indicar ambientes geoquimicamente favoráveis à concentração de ouro, servindo como guias prospectivos.

Tabela 1– Associações minerais e elementos-traço(*pathfinders*) aplicados à exploração

Alvo Mineral	Principais Minerais Farejadores	Principais Elementos Farejadores
Ouro	Pirita, calcopirita, arsenopirita, bismutinita, magnetita, teluretos, tetraedrita, 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 e Sawant (2023).

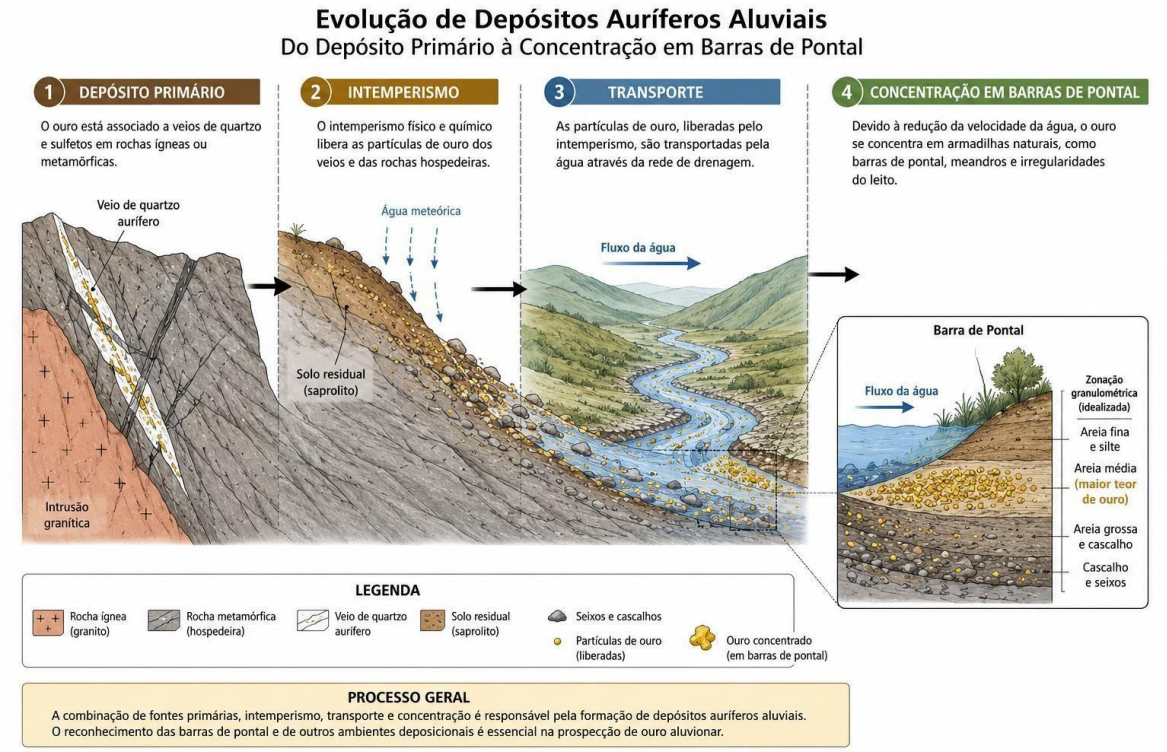
A mobilidade do ouro em ambientes de superfície não se restringe apenas ao transporte de partículas detríticas. Estudos têm demonstrado a importância do transporte de ouro na forma coloidal ou como nanopartículas, que podem permanecer em suspensão por longos períodos e distâncias (FAIRBROTHER *et al*., 2012). A agregação e precipitação dessas nanopartículas, frequentemente mediadas por mudanças no pH, potencial redox ou pela atividade microbiana, são mecanismos fundamentais para a formação de ouro secundário em perfis de intemperismo e sedimentos, contribuindo para o enriquecimento de depósitos superficiais (REITH *et al*., 2010).

Além da concentração química e biológica, a formação de depósitos aluvionares é governada por processos de concentração mecânica. Devido à sua altíssima densidade (19,3 g/cm³), as partículas de ouro são seletivamente depositadas em zonas de baixa energia do sistema fluvial. Essas armadilhas hidráulicas incluem a base de canais, barras de cascalho e irregularidades no leito rochoso (*bedrock*), onde a velocidade do fluxo de água diminui abruptamente, permitindo que o ouro se deposite enquanto minerais mais leves continuam a ser transportados (SUTHERLAND, 1982; YOUNGSON; CRAW, 1999; ANDRIOTTI; BINOTTO, 2015).

Um fenômeno de extrema importância em depósitos aluvionares é o o chamado "efeito pepita", partículas de ouro dissolvidas em águas intersticiais podem precipitar sobre a superfície de grãos de ouro detríticos já existentes, aumentando seu tamanho e pureza. Esse processo de crescimento autigênico é frequentemente mediado por biofilmes microbianos que se formam na superfície dos grãos, criando um microambiente redutor que favorece a acreção de ouro (YOUNGSON; CRAW, 1993; REITH *et al*., 2007). Isso explica por que partículas encontradas em aluviões são frequentemente mais puras e arredondadas do que o ouro encontrado na rocha-fonte.

No caso específico de Lavras do Sul, a desagregação das rochas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e das rochas vulcânicas da Formação Hilário, conhecidas por abrigar mineralizações primárias de Au-Cu, representa a fonte inicial do ouro. O intemperismo químico dessas rochas libera o ouro, juntamente com sulfetos associados e minerais de alteração, introduzindo-os no sistema de drenagem do Arroio Camaquã das Lavras (Figura 7).

Figura 7 – Modelo conceitual da evolução dos depósitos auríferos aluviais, desde a mineralização primária até a concentração em barras de pontal.

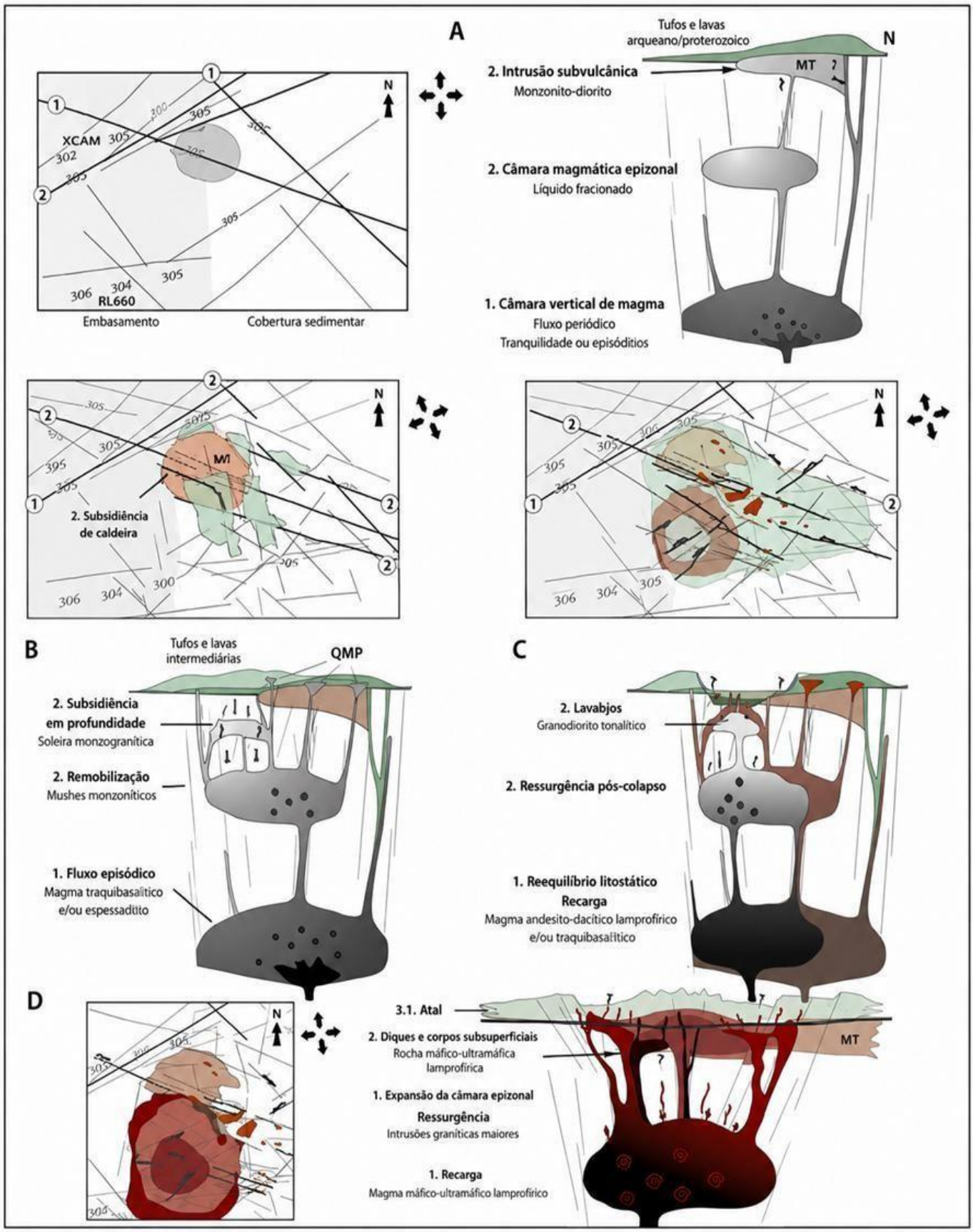


Fonte: Adaptado de Sutherland (1982), Youngson e Craw (1993, 1999), Reith et al. (2007), Craw et al. (2017) e Andriotti e Binotto (2015); modificado pela autora (2026).

O arcabouço tectônico regional desempenha um papel duplo nessa dinâmica. As mesmas falhas e zonas de cisalhamento que originalmente serviram como condutos para os fluidos hidrotermais mineralizantes também atuam como zonas de fraqueza na crosta, onde o intemperismo instala-se de forma mais intensa e profunda (HARTMANN *et al.*, 2011). A geometria e a origem dessas estruturas geradoras das fraturas associadas à evolução magmática e aos mecanismos de subsidência e ressurgência do plúton granítico, conforme ilustrado na (figura 8). Consequentemente, vales fluviais controlados por essas direções estruturais possuem maior probabilidade de erodir as rochas-fonte primárias, apresentando elevado potencial prospectivo para a concentração mecânica e química de minerais pesados e ouro secundário ao longo de canais de drenagem

ativos e depósitos aluvionares recentes.

Figura 8 - Modelos conceituais de alojamento, ressurgência e evolução magmática das fácies do Complexo Intrusivo Lavras do Sul



Fonte: modificado de Gastal *et al.,* 2015

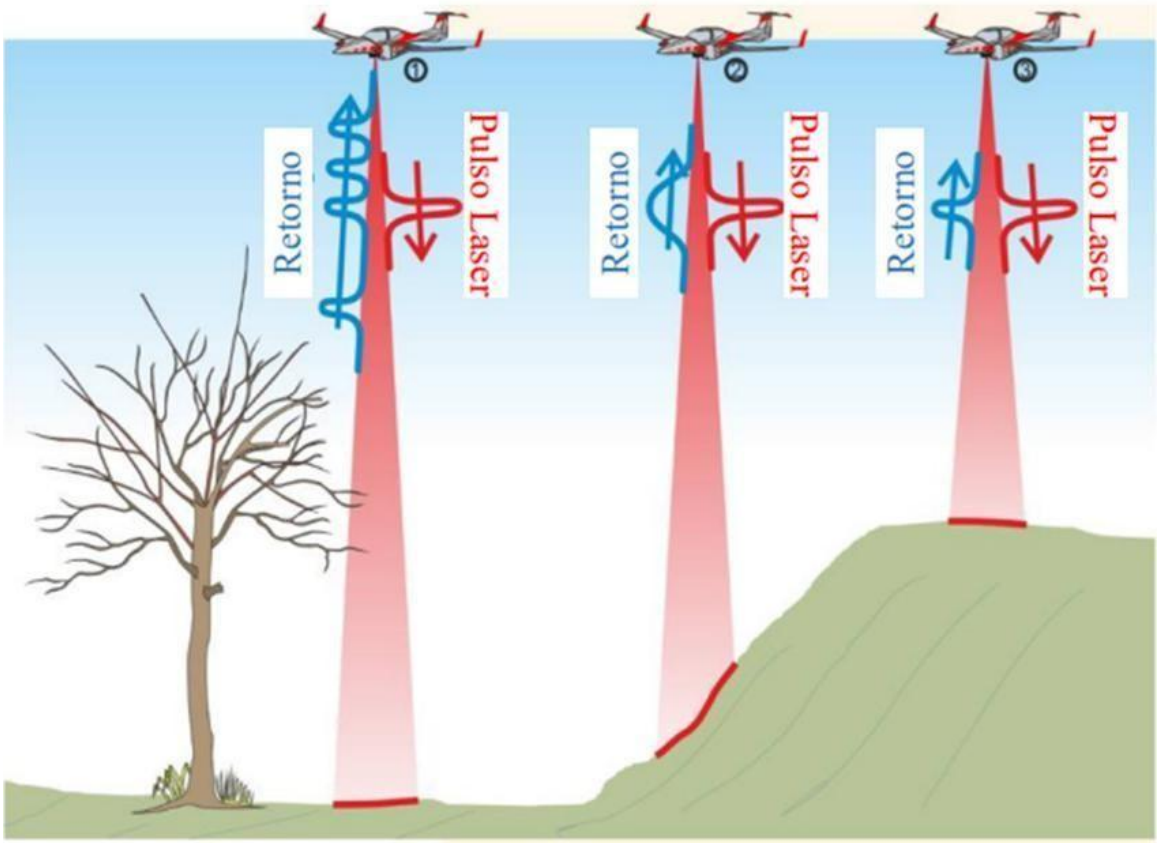
4.2 SENSORIAMENTO REMOTO NA PROSPECÇÃO MINERAL

O uso de sensoriamento remoto para a exploração mineral consolidou-se a partir de trabalhos que demonstraram a capacidade de identificar feições geológicas estruturais e mineralógicas associadas a depósitos minerais (SABINS, 1999). A evolução tecnológica recente integrou o imageamento orbital clássico à flexibilidade operacional de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), permitindo um avanço notável na resolução espacial dos aerolevantamentos através da geração de modelos digitais de alta resolução (VAN DER MEER *et al*., 2012; SILVA *et al*., 2021).

No âmbito do mapeamento geológico superficial com plataformas aéreas de baixa altitude, destaca-se o emprego do sistema DJI Matrice 300 RTK. O diferencial dessa tecnologia reside na capacidade de embarcar múltiplos sensores síncronos e na acurácia centimétrica do posicionamento por Cinemático em Tempo Real (*Real-Time Kinematic*-RTK), mitigando erros de georreferenciamento (SILVA *et al*., 2021). Os levantamentos aerofotogramétricos e altimétricos com essa plataforma resultam em dois produtos geoespaciais fundamentais primários: o Modelo Digital do Terreno (MDT), que traduz a topografia nua do terreno, e o Modelo Digital de Ortoimagem (DOM/Ortomosaico), constituído pelo mosaico de imagens corrigidas geometricamente.

Em paralelo, a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tornou-se indispensável para a análise morfoestrutural. Como um sensor ativo que emite seus próprios pulsos de laser, o LiDAR calcula o tempo de retorno da luz refletida para gerar nuvens de pontos tridimensionais densas. A principal vantagem dessa tecnologia na prospecção mineral reside na capacidade de filtrar os retornos da vegetação (algoritmos de classificação *last return*), permitindo a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) nus (*bare earth*). O princípio físico de emissão de pulsos e o mecanismo de múltiplos retornos para a separação entre o topo do dossel vegetal e a superfície do solo encontram-se representados (Figura 9). Esse produto final expõe feições estruturais sutis, lineamentos tectônicos e canais de drenagem que ficavam ocultos sob a cobertura vegetal em imagens ópticas orbitais convencionais.

Figura 9 – Pulsos (*fullwave*) sensores de emissão continua permitem o registro completo dos retornos

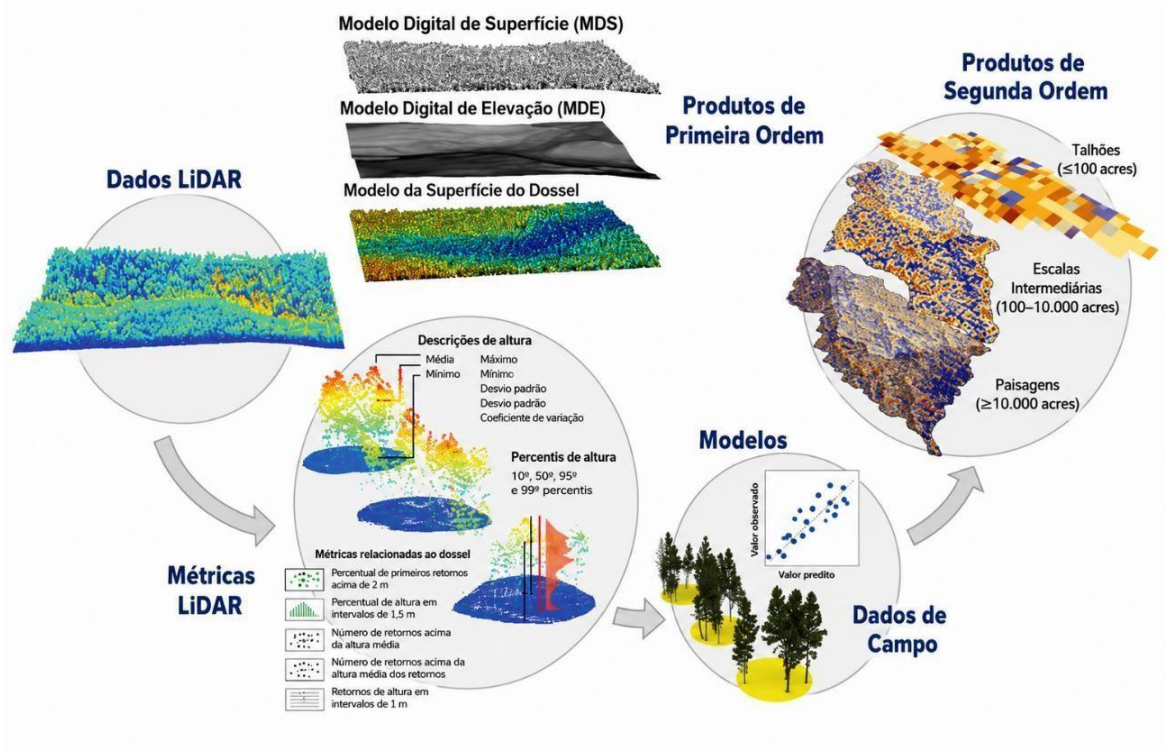


Fonte: Rieg, *Laser Measurement Systems*

O fluxo de processamento para a derivação desses produtos tridimensionais de primeira e segunda ordem a partir da nuvem de pontos, bem como a sua aplicação em diferentes escalas morfológicas de terreno podem ser observados na (Figura 10). O imageamento óptico obtido por câmeras RGB convencionais, embora restrito ao espectro visível, constitui uma ferramenta poderosa para a prospecção indireta quando submetido a técnicas de processamento digital de imagens (PDI).

A literatura demonstra que óxidos e hidróxidos de ferro secundários (como hematita e goethita), comuns em zonas de alteração hidrotermal e halos de dispersão supergena, apresentam comportamento espectral diagnóstico na faixa do visível, com forte absorção no comprimento de onda do verde (~550 nm), devido às transições eletrônicas do íon Fe^{3+} e alta reflectância na região do vermelho (~650 nm) (MADEIRA NETTO, 1996; SABINS, 1999).

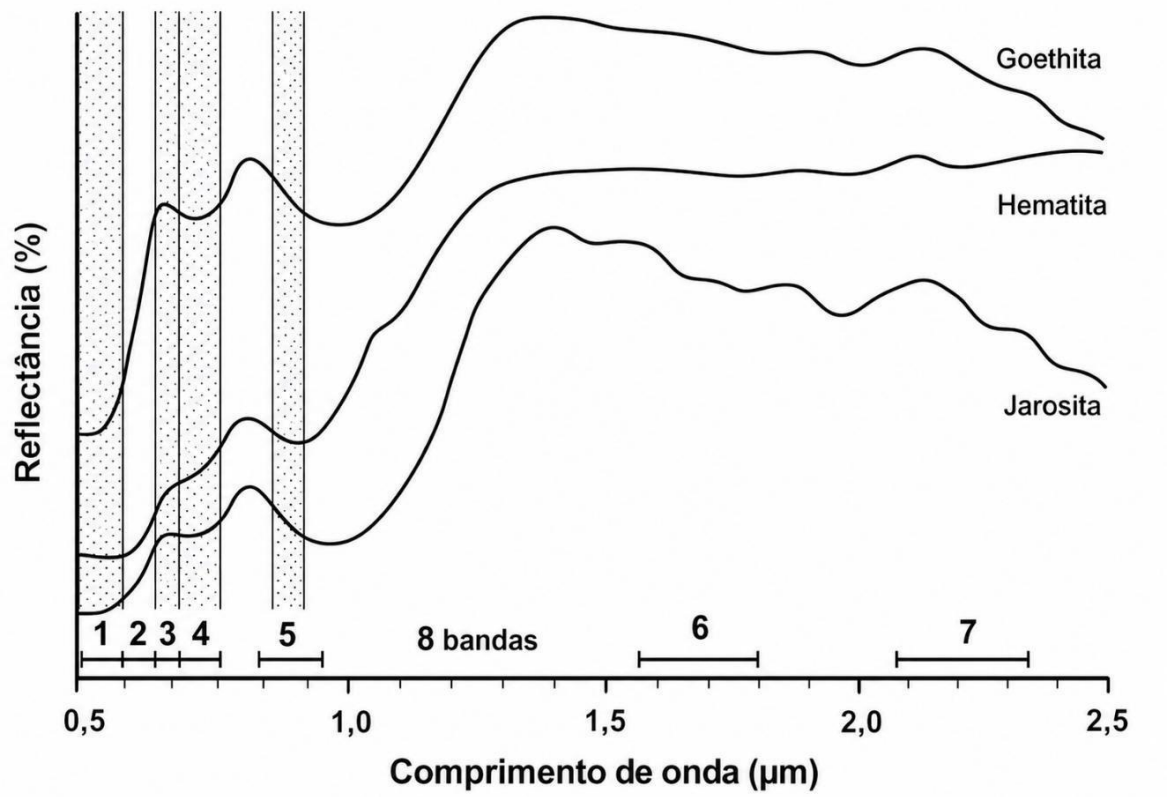
Figura 10 – Diagrama conceitual do processamento de dados LiDAR e geração de produtos altimétricos e métricas utilizados na análise morfológica da paisagem.



Fonte: Adaptado de Donager e Sánchez Meador (2019), modificada pelo autor.

As curvas de reflectância espectral típicas dessas fases minerais ferruginosas e o posicionamento das bandas espectrais no espectro do visível estão ilustrados na (Figura 11). Dessa forma, a aplicação de algoritmos de Álgebra de Mapas (razões de bandas) na calculadora *raster* sobre as bandas espectrais discretas do ortomosaico RGB (DOM) permite isolar e intensificar essas assinaturas de cor. Algorítmos matemáticos como o Índice de Vermelhão (*Redness Index* - RI) e a Razão Vermelho/Verde (*Red/Green Ratio*) exploram esse contraste, isolando anomalias de solo intemperizado enriquecidas em óxidos de ferro que atuam como guias prospectivos para o ouro aluvial (MADEIRA NETTO, 1996; CHICA-OLMA *et al*., 2002)

Figura 11 - Curvas de reflectância espectral para os minerais de óxidos de ferro (goethita, hematita e jarosita) e suas relações com as bandas orbitais do sensor Landsat 8 (OLI).



Fonte: Adaptado de Van der Meer et al. (2012).

4.3 ÁLGEBRA DE MAPAS E RAZÕES DE BANDAS NA DETECÇÃO DE ALVOS MINERAIS

A discriminação de alvos litológicos e zonas de alteração hidrotermal por sensoriamento remoto baseia-se na exploração do comportamento espectral contrastante dos minerais ao longo do espectro eletromagnético.

A Álgebra de Mapas, executada em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) por meio da Calculadora *Raster*, viabiliza o processamento digital banda a banda, permitindo realçar feições espectrais diagnósticas e atenuar ruídos ambientais, como o sombreamento topográfico e efeitos atmosféricos (SABINS, 1999).

As razões e índices de bandas consistem em operações de divisão matemática pixel a pixel entre os valores de reflectância de comprimentos de onda distintos. O método fundamenta-se na seleção de uma banda posicionada na região de máxima reflectância do mineral de interesse e outra banda situada em sua região de máxima absorção (VAN DER MEER *et al*., 2012). O quociente

resultante maximiza essas diferenças, tornando áreas enriquecidas naquele mineral específico altamente brilhantes na imagem *raster* final. No âmbito da investigação de depósitos associados a zonas de alteração superficial, três índices baseados no espectro visível (RGB) destacam-se no imageamento de guias mineralógicos

1- Vermelho Normalizado (*Normalized Red* - RN): Avalia a proporção da resposta espectral da banda do vermelho em relação ao somatório do espectro visível. A operação espacializa áreas com forte expressão cromática no comprimento de onda visível longo, servindo de base para a triagem inicial de solos expostos e contrastes litológicos superficiais, sendo expressa matematicamente pela Equação 1:

$$RN = \frac{R}{R+G+B} \quad (1)$$

2- Índice de Vermelho (*Redness Index* - RI): Configura-se como um índice matemático altamente sensível à intensidade da coloração avermelhada controlada pelo intemperismo supérgeno. Na prospecção mineral, o RI responde de forma direta à presença de óxidos de ferro secundários, notadamente a hematita (Fe_2O_3), que resulta frequentemente da oxidação superficial de sulfetos primários (MADEIRA NETTO, 1996). O índice é calculado por meio da diferença normalizada quadrática ou linear entre as bandas do vermelho e do verde, conforme a Equação 2:

$$RI = \frac{R-G}{R+G} \quad (2)$$

3- Razão Vermelho/Verde (*Red/Green Ratio* - RG): Corresponde a uma razão litológica clássica na exploração mineral (Sabins, 1999). Os óxidos e hidróxidos de ferro exibem elevada reflectância no comprimento de onda do vermelho e uma banda de forte absorção diagnóstica na região do verde, devido às transições de elétrons do íon Fe^{3+}. A divisão matemática da banda do vermelho pela banda do verde gera um raster de alta intensidade sobre chapéus de ferro (gossans) e solos alterados, permitindo mapear os halos de dispersão que guiam a localização do ouro aluvial (Equação 3).

$$RG = \frac{R}{G}$$

A aplicação dessas equações sobre os pixels submétricos do Modelo Digital de Ortoimagem (MDO), gerado por câmeras RGB a bordo de VANTs, eleva a precisão do mapeamento em níveis de detalhamento difícil de serem atingidos por sensores orbitais convencionais (SILVA *et al.*, 2021). Essa aproximação espectral fornece o vetor físico de superfície que, quando integrado aos lineamentos estruturais do *LiDAR* e validado pelos teores de ferro e titânio obtidos via pXRF, consolida a delimitação geométrica dos alvos prospectivos no Arroio Camaquã das Lavras

4.4 ESPECTROMETRIA DE FRX PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA AURÍFERA

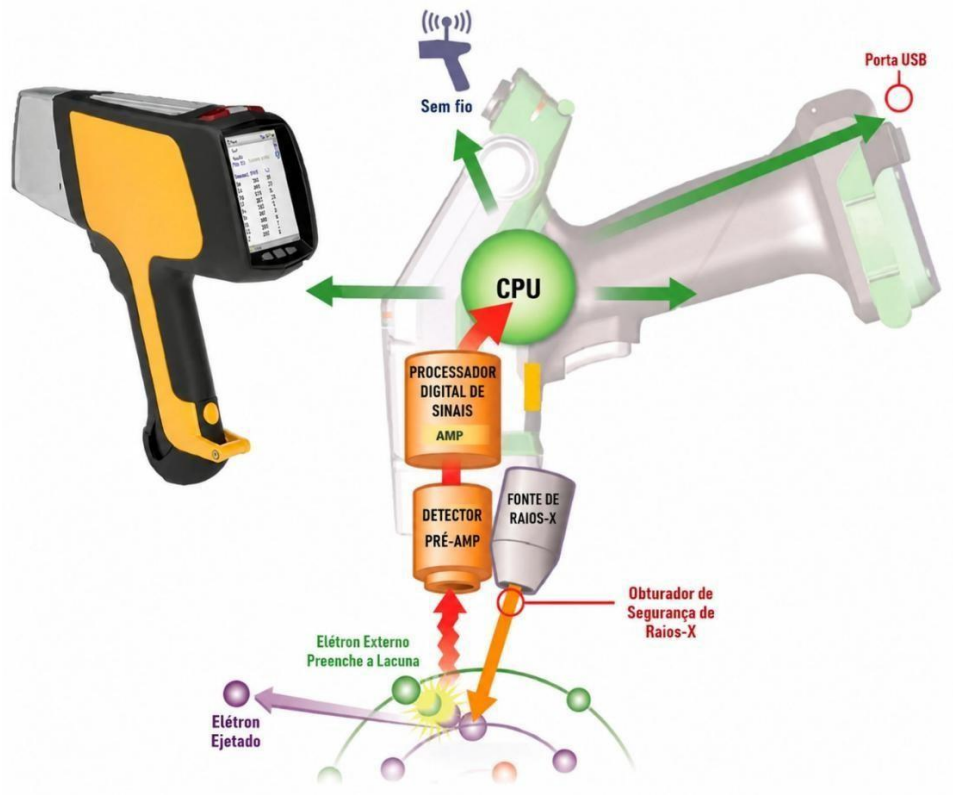
A análise geoquímica constitui um pilar fundamental para a compreensão da ocorrência e concentração de metais preciosos. Métodos analíticos baseados na técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (pXRF) têm sido amplamente empregados na determinação da composição química de sedimentos e solos, fornecendo dados rápidos sobre a presença de elementos-traço e óxidos maiores. Em ambiente de drenagem, esse imageamento químico espacializa as variações de ferro, titânio e manganês associadas a halos de alteração saprolítica e argilominerais (ANDRIOTTI; BINOTTO, 2015).

A eficácia da prospecção geoquímica é ampliada pelo uso de elementos-traço associados, conhecidos na literatura como elementos farejadores ou *pathfinders*. O ouro, por sua natureza química inerte e por ocorrer em baixas concentrações de partes por bilhão (ppb) em matrizes aluviais, pode apresentar desafios à detecção analítica direta em campo. Elementos menos nobres e mais

abundantes no sistema hidrotermal original (como arsênio, antimônio, tungstênio e mercúrio) possuem maior mobilidade geoquímica e geram halos de dispersão mais amplos em torno do depósito primário, tornando-se guias indiretos eficientes para o rastreamento da mineralização (COHEN *et al*., 2017).

A tecnologia de pXRF permitiu avanços na prospecção ao viabilizar a aquisição de dados e a tomada de decisões em tempo real diretamente na área de estudo. A capacidade de fornecer análises multielementares instantâneas otimiza as rotinas de campo, permitindo o adensamento imediato da malha de amostragem sobre anomalias químicas detectadas. A configuração instrumentalinterna de um espectrômetro portátil e a geometria de interação física entre a fonte primária de radiação e a amostra analisada estão esquematizadas na (figura 12). Contudo, o método exige o reconhecimento de suas limitações intrínsecas, notadamente os elevados limites de detecção instrumental para o ouro em sua forma nativa. Conforme destacado por LEMIÈRE (2015), a aplicação de analisadores portáteis de FRX em programas exploratórios auríferos demonstra eficácia máxima, quando direcionada ao mapeamento vetorial da arquitetura geoquímica e das rochas de alteração por meio de seus elementos associados, em detrimento da busca pela quantificação direta do metal precioso.

Figura 12 - Diagrama esquemático mostrando a configuração de componentes, fluxo de processamento de sinal e geometria de amostragem de um analisador portátil de fluorescência de raios X (pXRF).



Fonte: Adaptado de Lemière (2015) e Innov-X Systems (2005)

A interpretação desses dados geoquímicos em amostras de sedimentos de corrente depende do mapeamento das tendências de dispersão, caracterizadas por sequências de amostras fluviais que exibem variações sistemáticas na sua composição química a jusante da área mineralizada. A extensão e a intensidade da tendência de dispersão são controladas diretamente pelo relevo, pela energia hidráulica do sistema fluvial, além da mineralogia e granulometria das frações sedimentares coletadas. Anomalias fortes e bem delimitadas em frações granulométricas grossas sugerem a proximidade da rocha-fonte primária, ao passo que assinaturas geoquímicas fracas ou difusas apontam para fontes distais ou processos complexos de retrabalhamento superficial (ROSE; HAWKES; WEBB, 1979)

A distinção precisa entre os valores de fundo (*background*) e os valores anômalos representa uma etapa estatística crítica na exploração. Os valores de fundo definem a concentração natural e basal de um elemento químico dentro de um determinado domínio geológico. As anomalias geoquímicas correspondem a desvios estatisticamente significativos desse limiar normal, calculados na rotina de processamento como a média amostral acrescida de dois ou três desvios-padrão. A desconsideração da variabilidade geoquímica natural do substrato rochoso local pode induzir a interpretações errôneas e à identificação de falsas anomalias nas planícies de inundação (CARRANZA, 2008).

Finalmente, as condições físico-químicas do ambiente supérgeno, com ênfase no potencial redox (Eh) e no pH, exercem controle de primeira ordem sobre a estabilidade, transporte e posterior deposição do ouro e de seus elementos-guia. Em águas superficiais ácidas e de caráter oxidante, comuns em zonas expostas à oxidação de sulfetos, o ouro pode ser mobilizado e transportado na forma de complexos químicos de cloreto ou tiossulfato (CRAW *et al*., 2002).

A transição abrupta para um ambiente de caráter redutor, como o leito de drenagens ricas em matéria orgânica ou horizontes argilosos profundos, quebra a estabilidade desses complexos, forçando a rápida precipitação mecânica e química do ouro secundário. No cenário do Escudo Sul-rio-grandense, essa dinâmica hidrogeoquímica fundamenta o enriquecimento e a presença de anomalias auríferas ao longo do leito do Arroio Camaquã das Lavras (ANDRIOTTI; BINOTTO, 2015).

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA E CORRELAÇÃO ELEMENTAR

A interpretação de dados geoquímicos qualitativos obtidos por espectrometria de pXRF exige a aplicação de métodos estatísticos computacionais para converter valores elementares brutos em vetores de prospecção mineral confiáveis (CARRANZA, 2008). Em programas de exploração geoquímica, a análise estatística bivariada constitui uma etapa fundamental para identificar associações mineralógicas e quantificar a força da relação linear existente entre diferentes pares de elementos químicos na malha amostral (DAVIS, 2002).

O método estatístico padrão empregado na literatura para essa finalidade é o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), o qual mensura o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas contínuas. Matematicamente, o coeficiente é calculado dividindo-se a covariância das duas variáveis pelo produto de seus respectivos desvios-padrão, conforme expresso pela Equação 4:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

Onde:

Xi e Yi: representam os valores individuais das amostras para os dois elementos analisados;

X e Y: correspondem às médias aritméticas das respectivas variáveis; e,

n: é o número total de amostras geoquímicas coletadas na malha.

O valor de (r) varia estritamente no intervalo de -1 a +1. Na interpretação de dados de sedimentos de corrente e solos intemperizados, a literatura geocientífica divide essas interações em três comportamentos principais (DAVIS, 2002; REIMANN *et al*., 2008)

1- Correlação Linear Positiva Forte**:** Indica que ambas as variáveis aumentam de forma proporcional na matriz. Em depósitos secundários, esse alinhamento matemático, comprova que esses elementos compartilham a mesma herança quimiolitológica ou o mesmo mecanismo de concentração física.

2- Correlação Linear Negativa Forte**:** Ocorre quando o incremento de uma variável implica na redução proporcional da outra. Esse comportamento é controlado comumente pelo efeito de diluição geoquímica.
3- Ausência de Correlação: Aponta que as variáveis se comportam de maneira independente no perfil de solo ou sedimento, indicando fontes de dispersão supérgena distintas ou processos mineralógicos sem qualquer relação genética.

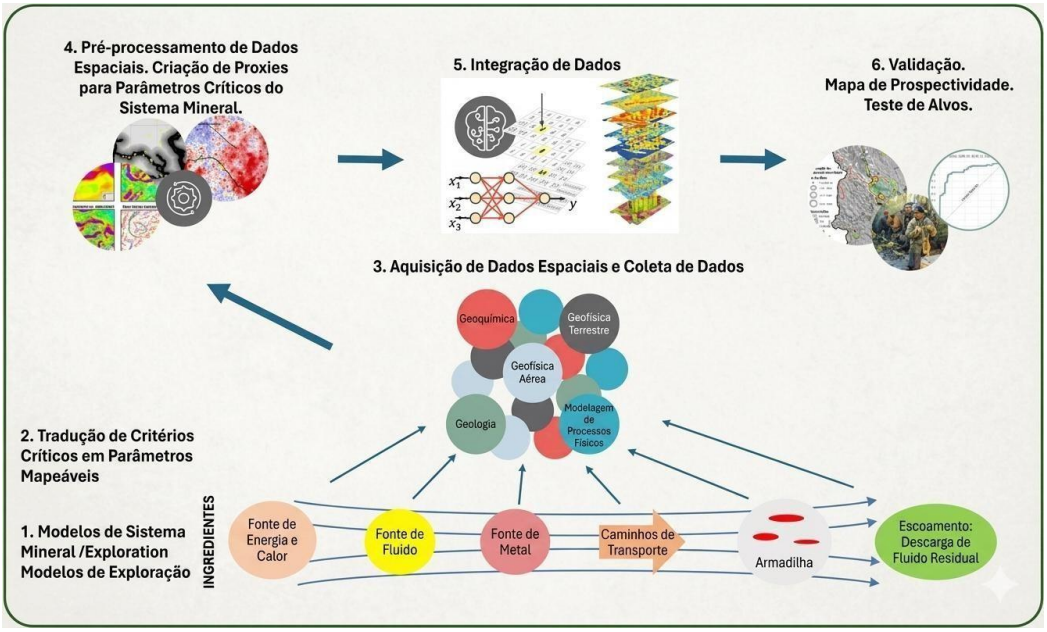
A plotagem e interpretação desses coeficientes em diagramas binários de dispersão (*scatterplots*) com a inserção de linhas de regressão linear permitem validar estatisticamente as assinaturas espectrais detectadas à distância pelo sensoriamento remoto (Carranza, 2008). O cruzamento matricial desses dados matemáticos funciona como a validação geoquímica necessária para atestar o zoneamento mineral e delimitar alvos de potencialidade aurífera ao longo de canais de drenagem ativos.

4.6 INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOQUÍMICA

O produto final da integração de dados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é a geração de modelos preditivos e mapas de favorabilidade mineral (CARRANZA, 2008). Esses mapas são construídos por meio da combinação ponderada de diferentes camadas de evidência geoespacial, incluindo mapas de lineamentos estruturais, produtos espectrais orbitais e dados pontuais de amostragem geoquímica de semidetalhe. O fluxo sistêmico que rege essa modelagem, englobando desde a tradução dos critérios geológicos conceituais, a aquisição multiescala de dados, até o processamento digital para validação das anomalias de alvos, esquematizado na (Figura 13).

A definição dos pesos de cada camada de evidência pode seguir modelos conceituais, baseados no conhecimento de especialistas, ou modelos empíricos, guiados estritamente pela análise computacional dos dados estatísticos disponíveis (CARRANZA, 2009)

Figura 13 – Fluxograma metodológico integrado para a aquisição de dados espaciais, fusão de planos de informação em ambiente SIG e geração de modelos de favorabilidade mineral.



Fonte: Adaptado de Sadek et al. (2025)

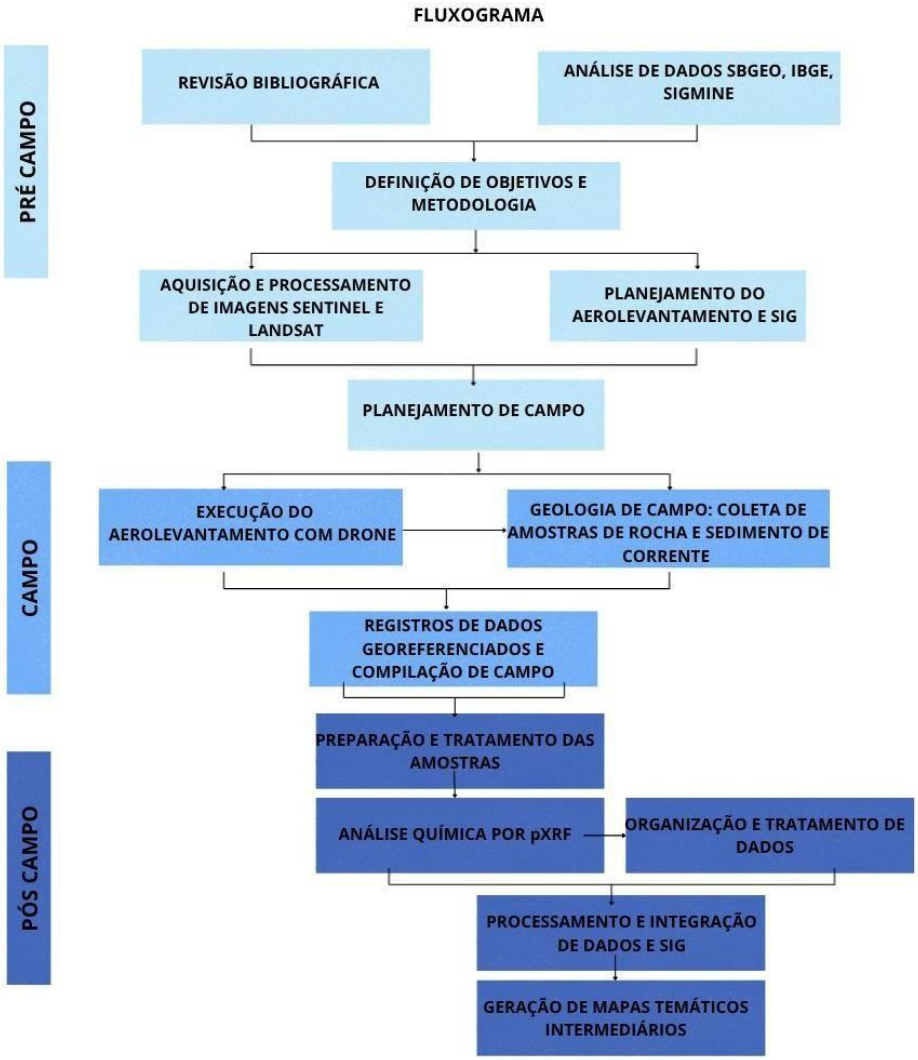
A fusão de dados em ambiente computacional moderno transcendeu a simples sobreposição geométrica de mapas, buscando decifrar a assinatura multidimensional de um alvo exploratório, onde cada sensor contribui com dados físicos ou químicos únicos para um modelo diagnóstico integrado (VAN DER MEER *et al.*, 2012). A aplicação de uma metodologia multiescala garante a otimização dos recursos em campo. A investigação inicia-se em escala regional por meio de dados de satélite de média resolução espacial para delimitar grandes corredores estruturais. Os alvos selecionados nessa fase são refinados em escala de detalhe por imageamentos submétricos de plataformas aéreas de baixa altitude combinados à amostragem geoquímica adensada de solos e sedimentos (ANDRIOTTI; BINOTTO, 2015)

Essa abordagem garante que os métodos que demandam maior tempo e custo operacional em campo sejam aplicados estritamente sobre as áreas de maior interesse previamente filtradas pela análise remota. Em bacias hidrográficas inseridas em terrenos graníticos e complexos intrusivos com forte controle tectônico e desenvolvimento de perfis saprolíticos, a integração de dados mostra-se essencial. A combinação da análise morfoestrutural com o mapeamento geoquímico direto permite desvendar os controles das mineralizações secundárias de forma sistemática, gerando modelos prospectivos e aplicáveis a províncias minerais de elevada complexidade geológica.

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em três fases cronológicas principais, subdivididas em quatro etapas operacionais que se complementam de forma integrada: (i) etapa pré-campo, focada no sensoriamento remoto orbital e preparo cartográfico; (ii) etapa de campo, compreendendo o aerolevantamento com VANT e a amostragem de sedimentos de corrente; e (iii) etapa de pós-campo, abrangendo o tratamento analítico em laboratório, processamento estatístico e fusão de dados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). O sequenciamento lógico e a interconexão dessas atividades técnicas executadas ao longo da pesquisa estão sintetizados no fluxograma metodológico apresentado na (Figura 14).

Figura 14 – Fluxograma metodológico sequencial dividindo as etapas de pré-campo, campo e pós-campo executadas no desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autora (2026)

A etapa inicial consistiu no levantamento de dados de sensoriamento remoto em escala regional para a caracterização morfoestrutural preliminar da bacia de drenagem. Foram adquiridas imagens ópticas orbitais dos satélites Landsat-8 (resolução espacial de 30 metros) e Sentinel-2 (resolução espacial de 10 metros), obtidas de forma gratuita através das plataformas de dados geospaciais *USGS EarthExplorer* e *Copernicus Open Access Hub*, respectivamente.

O processamento digital dessas imagens foi realizado no *software* livre QGIS (versão 3.28), no qual foram geradas composições coloridas e aplicados filtros direcionais de convolução para o realce de feições lineares e descontinuidades do relevo associadas a falhas estruturais. Concomitantemente, utilizou-se a base de dados pré-existentes de lineamentos geológicos estruturais regionais e informações sobre requerimentos e concessões de lavra disponibilizadas pelo sistema SIGMINE da Agência Nacional de Mineração (ANM), para orientar a delimitação tridimensional da malha de amostragem na bacia do Arroio Camaquã das Lavras.

A etapa de campo integrou a aquisição de dados físicos de alta resolução espacial por meio de plataformas aéreas de baixa altitude e a coleta de materiais geológicos no leito dos rios. Para a análise morfoestrutural e de reflectância de detalhe, realizou-se um aerolevantamento sistemático utilizando o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de asa rotativa DJI Matrice 300 RTK (Figura 15).

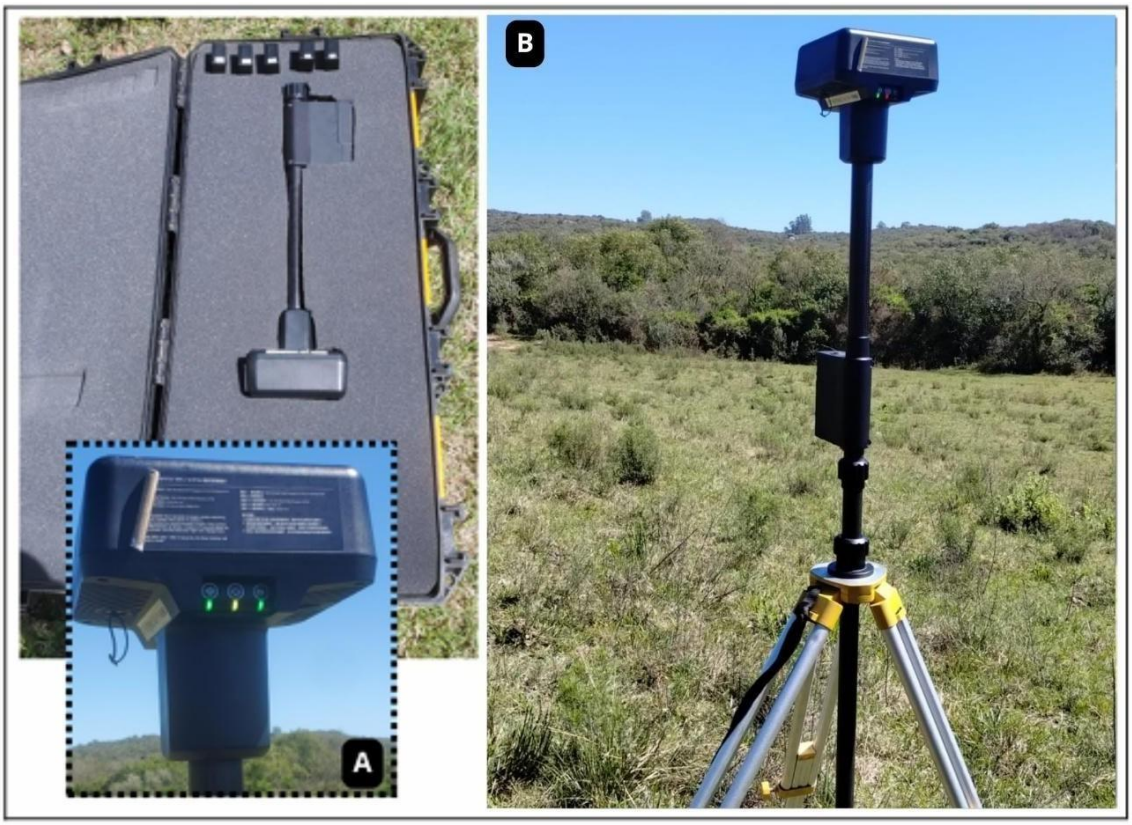
Figura 15 – Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de asa rotativa DJI Matrice 300 RTK acoplado com sensor ativo LiDAR e câmera RGB em base de campo.



Fonte: Autora (2026)

A aeronave operou com sistema de posicionamento Cinemático em Tempo Real (*Real-Time Kinematic - RTK*) (Figura 16) ativado, garantindo acurácia centimétrica nas coordenadas tridimensionais dos pixels. O VANT foi equipado com sensor ativo *LiDAR* e sua própria câmera digital óptica convencional com sensores nas faixas do visível (RGB).

Figura 16- A) Antena RTK B) Estação móvel GNSS externa montada em campo sobre tripé para correção e acurácia posicional centimétrica do aerolevantamento.



Fonte: Autora (2026)

Em paralelo às linhas de voo, foi executada a campanha de campo para a amostragem sistemática e georreferenciada de sedimentos de corrente ativos. Os pontos de coleta foram distribuídos ao longo do leito do Arroio Camaquã das Lavras, priorizando confluências de canais secundários, trechos situados imediatamente a jusante de cruzamentos com as falhas geológicas mapeadas e zonas com variações abruptas de gradiente topográfico que atuam como armadilhas hidráulicas naturais. Em cada sítio deposicional, coletou-se uma amostra composta de aproximadamente 1,5 kg de sedimento ativo do fundo da calha fluvial, priorizando as frações clásticas mais finas de areia e silte. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de alta densidade,

devidamente etiquetadas e georreferenciadas por meio de um receptor GPS de navegação, registrando-se as características fisiográficas de cada local.

A etapa de pós-campo compreendeu o processamento dos dados digitais e o tratamento analítico das amostras físicas no laboratório. Os dados altimétricos brutos obtidos pelo sensor *LiDAR* foram submetidos a algoritmos de classificação e filtragem estatística da nuvem de pontos, separando os retornos do dossel vegetal para a geração de um Modelo Digital do Terreno (MDT) puramente nu (*bare earth*). A partir desse relevo filtrado, extraiu-se de forma automatizada a rede de drenagem de alta precisão e as quebras de gradiente do vale. Em paralelo, as imagens da câmera RGB foram ortorretificadas e mosaicadas para a geração do Modelo Digital de Ortoimagem (DMO). Sobre as bandas discretas do visível (Vermelho, Verde e Azul) desse ortomosaico, aplicou-se a Álgebra de Mapas por meio da Calculadora Raster do QGIS, computando-se as equações matemáticas do Vermelho Normalizado (RN), Índice de Vermelho (RI) e a Razão Vermelho/Verde (RG) para o realce de solos intemperizados enriquecidos em óxidos de ferro.

Para a caracterização química, as amostras físicas de sedimento de corrente foram submetidas ao preparo mecânico padrão no Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Caçapava do Sul. O material coletado foi seco em estufa a uma temperatura constante de 60 °C por um período de 24 horas para a eliminação completa da umidade. Após a secagem, os sedimentos foram homogeneizados, quarteados e peneirados mecanicamente para o isolamento estrito da fração inferior a 177 µm (malha 80 mesh), conforme procedimento padrão adotado em estudos geoquímicos de sedimentos de corrente (ANDRIOTTI; BINOTTO, 2015).

A determinação quantitativa das concentrações elementares foi realizada por meio de um analisador portátil de fluorescência de raios X (pXRF). As análises químicas focaram na quantificação das concentrações de Ferro (Fe), Titânio (Ti), Manganês (Mn) e Silício (Si), atuantes como elementos-guia para o imageamento de halos supérgenos e fases minerais pesadas. Para assegurar a representatividade dos dados e mitigar efeitos de heterogeneidade da matriz arenosa, foram executadas três leituras instrumentais distintas de 60 segundos em posições alternadas para cada amostra de sedimento, adotando-se a média aritmética como valor final. O controle de qualidade analítico foi mantido por meio da leitura sistemática de materiais de referência geológicos certificados (padrões).

Os dados numéricos e as matrizes matriciais foram consolidados de forma integrada. Os teores brutos obtidos via pXRF para os elementos de interesse foram tabulados e submetidos a algoritmos de interpolação geoestatística determinística pelo método do Inverso da Distância Ponderada (IDP) no ambiente QGIS, gerando superfícies *raster* contínuas de dispersão geoquímica elementar ao longo da sub-bacia.

Para avaliar o comportamento mineralógico e as afinidades químicas dos sedimentos do leito do rio, os dados numéricos de óxidos foram exportados para ambiente de análise de dados, no qual aplicou-se o teste bivariado do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), gerando os diagramas binários de dispersão (*scatterplots*) com linhas de regressão e tendência linear. Por fim, realizou-se a sobreposição espacial definitiva das camadas de evidência (mapas de densidade de lineamentos estruturais derivados do *LiDAR*, *rasters* de razões de bandas RGB do drone e gradientes térmicos das anomalias geoquímicas interpoladas por IDP, correlacionando os eixos de fraturas, os padrões hidráulicos de deposição e o imageamento químico do solo para a confecção do mapa preditivo final de favorabilidade para a prospecção aurífera secundária.

Considerando o número limitado de amostras e a distribuição espacial irregular, optou-se pelo método do Inverso da Distância Ponderada (IDP), amplamente empregado em estudos geoquímicos exploratórios.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A execução da metodologia proposta neste trabalho culminou em um conjunto de produtos e análises integradas para atingir os objetivos, cujo resultado final obtido é a elaboração de um estudo para ouro aluvial na região de Lavras do Sul. Antecipa-se que a combinação de dados de sensoriamento remoto, em escala regional de 1:25.000 com análises geoquímicas de campo permitiu não apenas a identificação de alvos exploratórios, mas também a validação da hipótese central de que a distribuição do ouro aluvial é diretamente controlada pela interação entre o arcabouço estrutural regional, a litologia e os processos geomorfológicos locais.

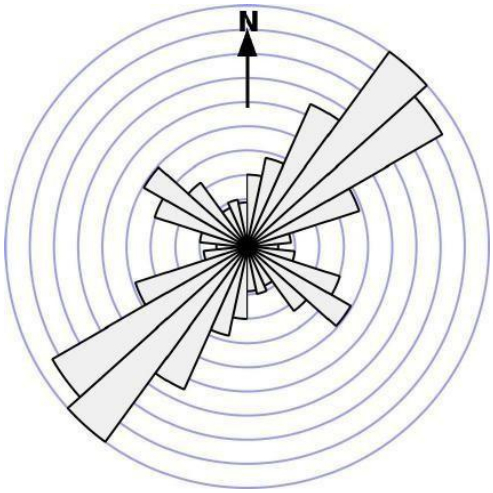
6.1 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS E ANÁLISE MORFOESTRUTURAL

O arcabouço morfoestrutural e a compartimentação fisiográfica da área foram caracterizados por meio da integração sinérgica entre produtos ópticos, altimétricos e vetoriais de alta resolução espacial. O processamento digital desses dados integrados permitiu decifrar o controle exercido pela tectônica rúptil sobre a evolução do relevo de coxilhas e sobre a dinâmica deposicional recente da rede de drenagem ativa do Arroio Camaquã das Lavras.

6.1.1 Análise Estatística de Lineamentos

A dinâmica estrutural regional buscou avaliar comparativamente os lineamentos geológicos mapeados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e as estruturas lineares de detalhe delimitadas manualmente nesta pesquisa. O tratamento estatístico dessas descontinuidades gerou diagramas de rosetas de frequência e comprimento que revelaram o padrão de fraturamento da crosta. O diagrama baseado na base de dados da CPRM, apresentado na (Figura 17) evidenciou a clara dominância regional de estruturas de grande porte orientadas preferencialmente na direção Nordeste-Sudoeste (NE-SW), estendendo-se secundariamente para o quadrante Norte-Nordeste/Sul-Sudoeste (NNE-SSW) (Esses eixos principais refletem os grandes estruturas de cisalhamento geradas durante a evolução orogênica do Cinturão Dom Feliciano.

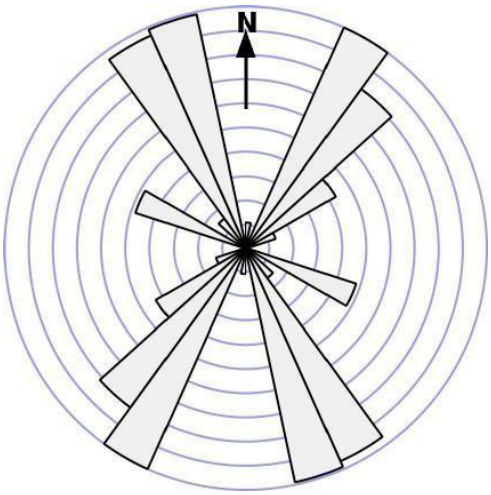
Figura 17 – Diagrama de roseta de frequência de lineamentos estruturais regionais obtidos a partir da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM).



Fonte: Autora (2026)

Em contrapartida, os lineamentos locais extraídos na sub-bacia mantiveram a concentração máxima no mesmo vetor NE-SW, conforme ilustrado na (Figura 18**)**, revelando uma correspondência geométrica exata com a tendência regional. Ao confrontar esse arranjo com o modelo evolutivo proposto por Gastal *et al*. (2006, 2015), essa simetria estrutural ganha uma robusta justificativa geológica. De acordo com os modelos tectono-magmáticos estabelecidos para o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), o alojamento e a posterior ressurgência do plúton granítico alcalino induziram o desenvolvimento de falhas de caráter transcorrente e zonas de fraqueza rúptil que acompanham as direções pré-existentes do embasamento metassedimentar regional.

Figura 18– Diagrama de roseta de frequência de lineamentos estruturais locais delimitados manualmente sobre a área do vale do Arroio Camaquã das Lavras.



Fonte: Autora (2026)

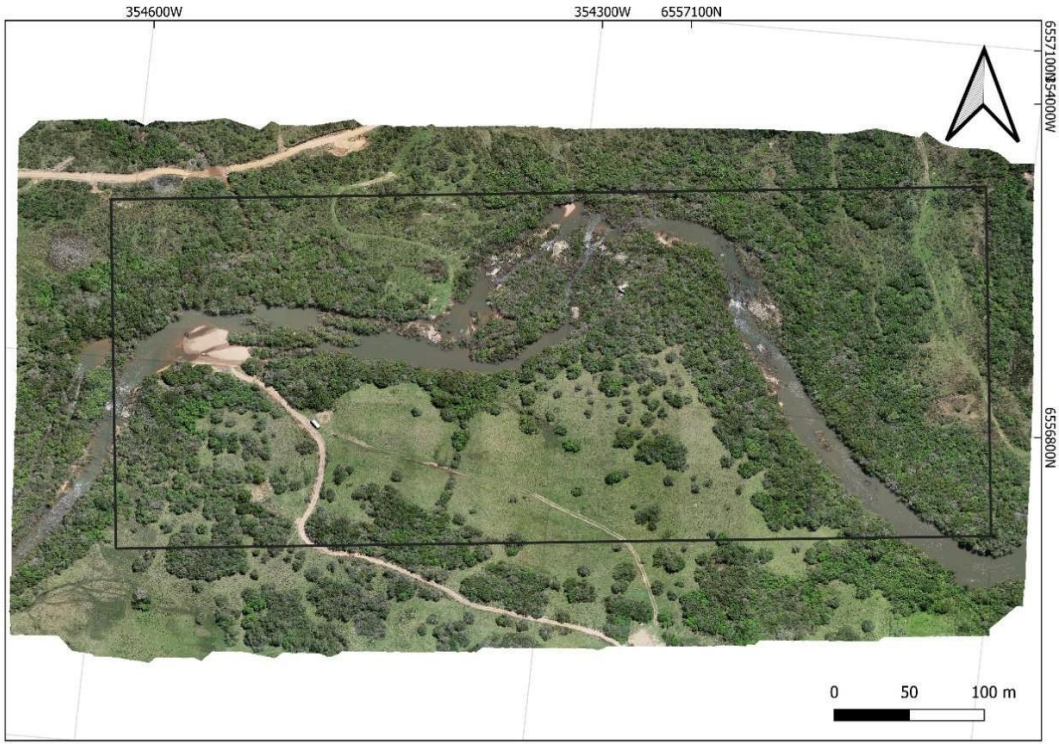
As zonas de cisalhamento que controlam as fácies plutônicas e vulcânicas do complexo funcionam como eixos preferenciais, onde o intemperismo químico subtropical atuou de forma mais intensa e profunda, facilitando a erosão remontante e forçando o entalhamento das drenagens ao longo dessas direções O gráfico registrou ainda uma família menor e subordinada de fraturas na direção Noroeste-Sudeste (NW-SE). Na arquitetura do CILS, esse arranjo ortogonal (NE-SW cruzando com NW-SE) pode representar fraturas de alívio e falhas normais geradas durante os episódios de subsidência e colapso da câmara magmática epizonal. Na paisagem atual, esse cruzamento estrutural dita a geometria das inflexões angulares e curvas abruptas observadas nos canais secundários, que abandonam temporariamente o curso principal para seguir fraturas subordinadas.

6.1.2 Dinâmica de Deposição Aluvionar no MDO (Modelo Digital de Ortoimagem)

O Modelo Digital de Ortoimagem (MDO), apresentado na (Figura 19), forneceu a validação visual necessária para comprovar a influência do arcabouço estrutural descrito sobre a geomorfologia do rio. O ortomosaico centimétrico expôs com precisão a sinuosidade e a anatomia do canal ativo do Arroio Camaquã das Lavras. O curso d'água exibe trechos retilíneos alongados que acompanham rigorosamente a direção dos lineamentos rúpteis principais do CILS, confirmando que a calha atual aproveita essas zonas de fraqueza geológica.

A feição de maior relevância prospectiva identificada no MDO corresponde ao desenvolvimento de uma proeminente barra de pontal arenosa (*point bar*) localizada na porção oeste da imagem. Essa feição morfológica desenvolveu-se na margem interna de uma inflexão acentuada do canal fluvial, ponto onde o rio perde velocidade de forma abrupta. Conforme estabelecido pelos modelos físicos de transporte de sedimentos, as barras de pontal configuram armadilhas hidráulicas de baixa energia ideais para a deposição seletiva de frações clásticas finas e concentração residual de fases minerais pesadas e estáveis de alta gravidade específica.

Figura 19 – Modelo Digital de Ortoimagem (MDO) de alta resolução centimétrica obtido por meio de levantamento aerofotogramétrico com VANT.



Fonte: Autora (2026)

A desagregação das rochas graníticas do CILS e das vulcânicas da Formação Hilário libera o ferro e o ouro nativo primário dos veios hidrotermais. Uma vez inseridos no Arroio Camaquã das Lavras, a hidráulica fluvial atua como um classificador natural: os minerais leves (como o quartzo e os feldspatos) continuam a ser transportados em suspensão ou saltação pela correnteza, enquanto os óxidos pesados de ferro e o ouro secundário precipitam e acumulam-se confinados nessas barras arenosas e nos horizontes saprolíticos marginais, cuja geometria visual foi perfeitamente delimitada pelo imageamento de alta resolução do VANT.

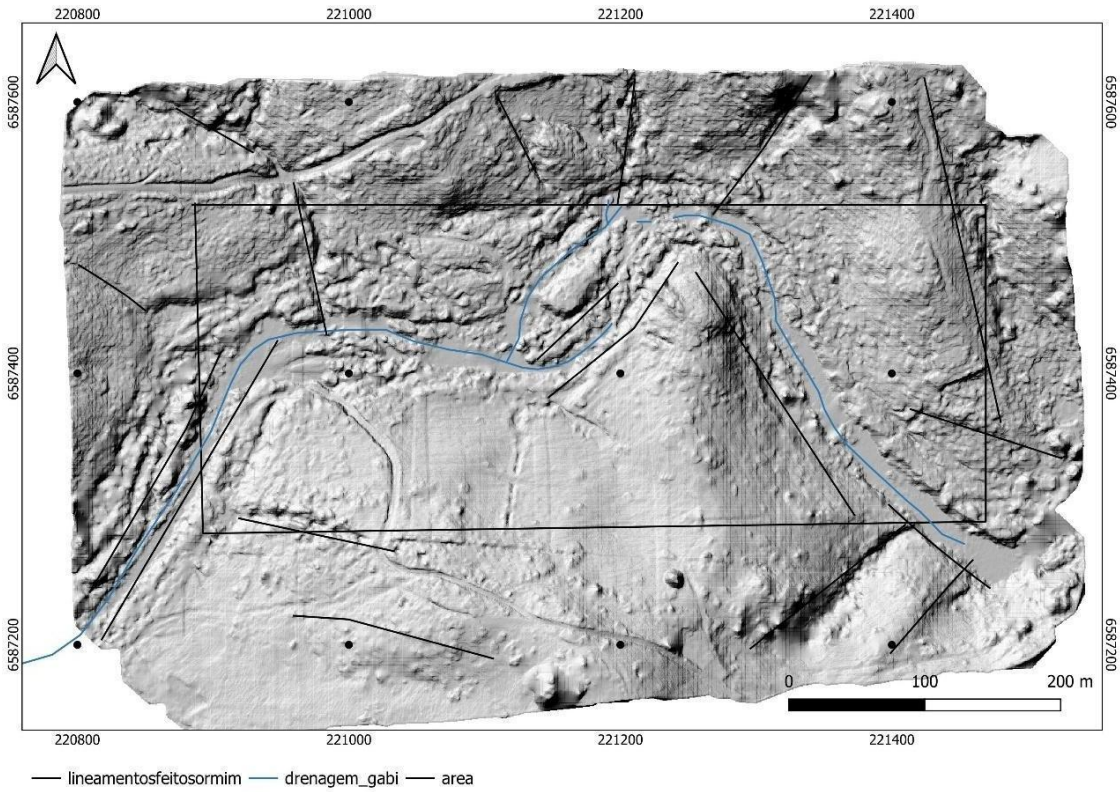
6.1.3 Modelo Digital do Terreno (MDT) e Anomalias Altimétricas via LiDAR

O Modelo Digital do Terreno (MDT) centimétrico obtido por meio do sensor ativo LiDAR está apresentado na (Figura 20). A modelagem altimétrica tridimensional com técnica de relevo sombreado expôs com precisão a geomorfologia nua (*bare earth*) do vale, removendo com total eficiência o ruído provocado pela densa cobertura vegetal nativa e revelando descontinuidades topográficas sutis do terreno.

A análise detalhada do MDT revelou que a topografia local é fortemente acidentada nas cabeceiras e margens do vale, exibindo encostas íngremes e cristas lineares que delimitam o confinamento do Arroio Camaquã das Lavras. O modelo altimétrico evidenciou a presença de expressivas rupturas de declive (*knickpoints*) no perfil longitudinal do canal, associadas a zonas de forte incisão vertical e rejuvenescimento fluvial sobre o leito rochoso (*bedrock*). Essas quebras de gradiente representam setores de altíssima energia hidráulica, onde ocorre a dissolução e desagregação das rochas mineralizadas primárias do (CILS) e da Formação Hilário.

Imediatamente a jusante dessas rupturas e nos pontos de alargamento do vale visíveis no centro do modelo altimétrico, a perda brusca de gradiente topográfico induz a uma desaceleração drástica do fluxo d'água. Esse comportamento físico-hidráulico estabelece os sítios ideais para a decantação e o acúmulo seletivo de frações sedimentares mais finas de alta gravidade específica. Além disso, o traçado retilíneo dos canais perfeitamente delineado no MDT confirma que a rede de drenagem é geometricamente condicionada e adaptada aos planos de falhas e fraturas rúpteis subsuperficiais.

Figura 20 – Modelo Digital do Terreno (MDT) sombreado com resolução centimétrica derivado de pulsos laser ativos (*LiDAR*).



Fonte: Autora (2026)

6.2 ANOMALIAS GEOQUÍMICAS NOS SEDIMENTOS DE CORRENTE

A caracterização geoquímica e a modelagem estatística das frações finas de sedimentos de corrente ativos coletados no Arroio Camaquã das Lavras foram realizadas por meio de diagramas de dispersão bivariados (*scatterplots*) e matrizes de correlação linear. O processamento quantitativo dos teores instrumentais brutos obtidos via pXRF permitiu calcular as equações de regressão e os coeficientes de determinação (R^2), cujos gráficos individuais encontram-se consolidados no painel da (Figura 21).

Os coeficientes de Pearson foram classificados como fraco (<0,3), moderado (0,3–0,7) e forte (>0,7).

Figura 21 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Ti-Mn

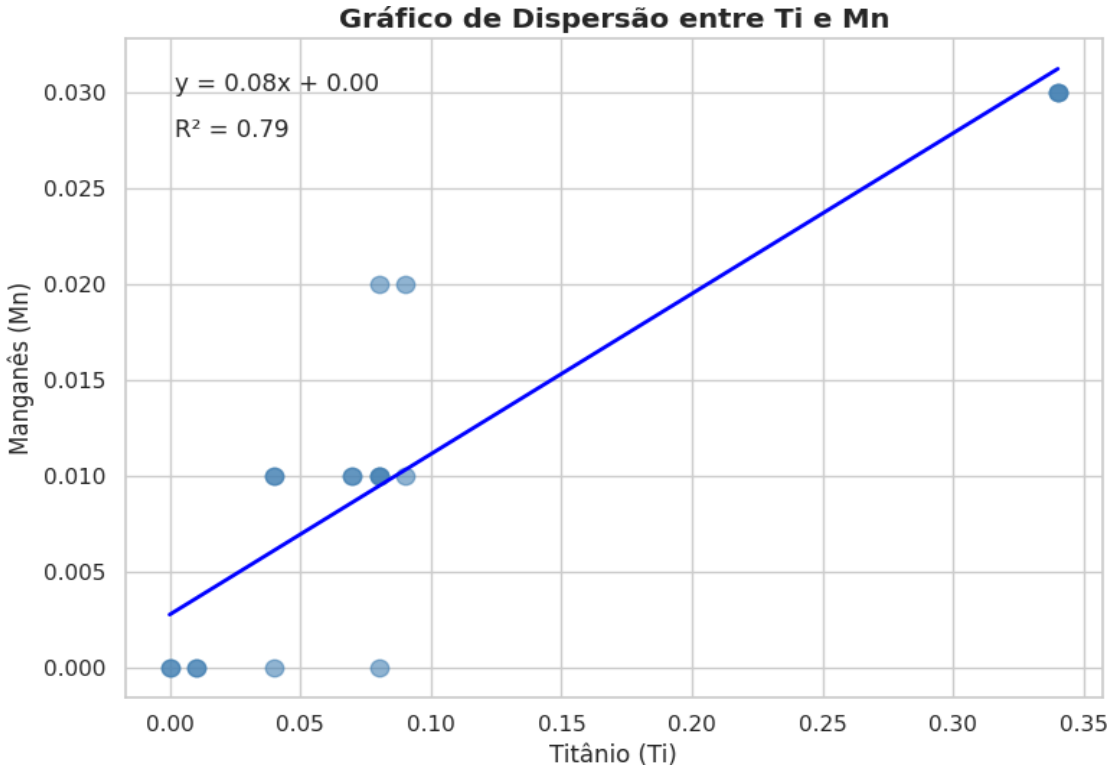


Figura 22 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência

azul para as relações Fe-Si

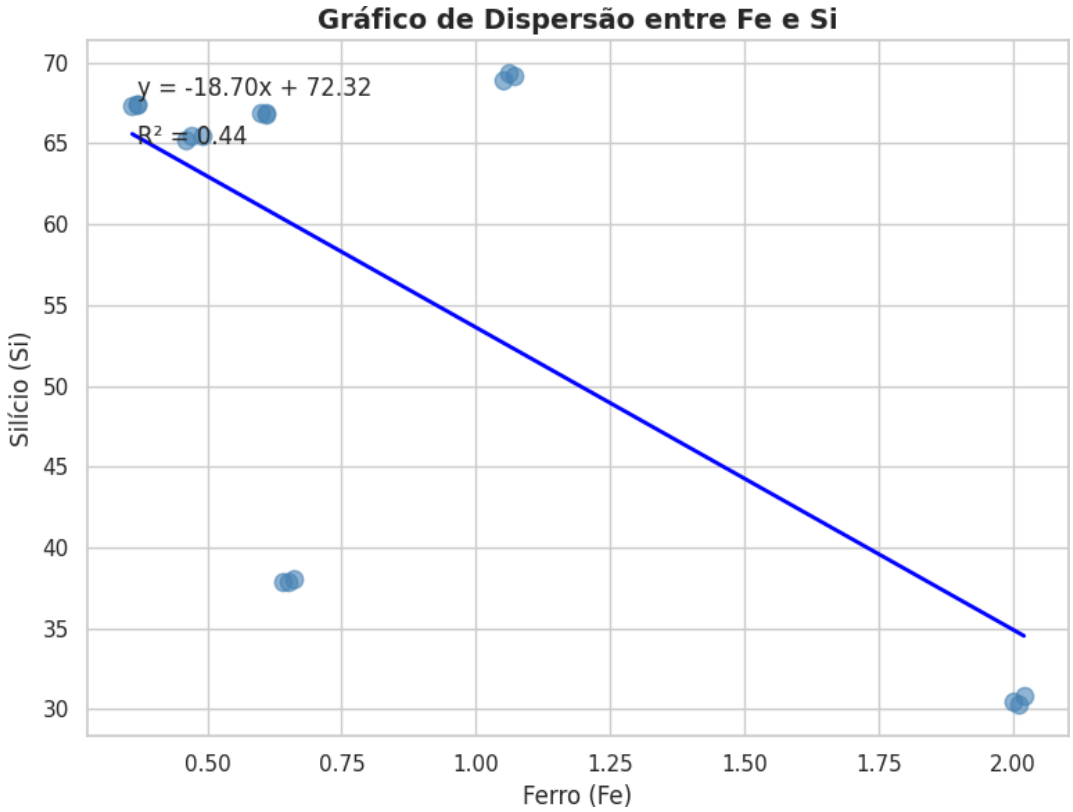


Figura 23- Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Al-Si

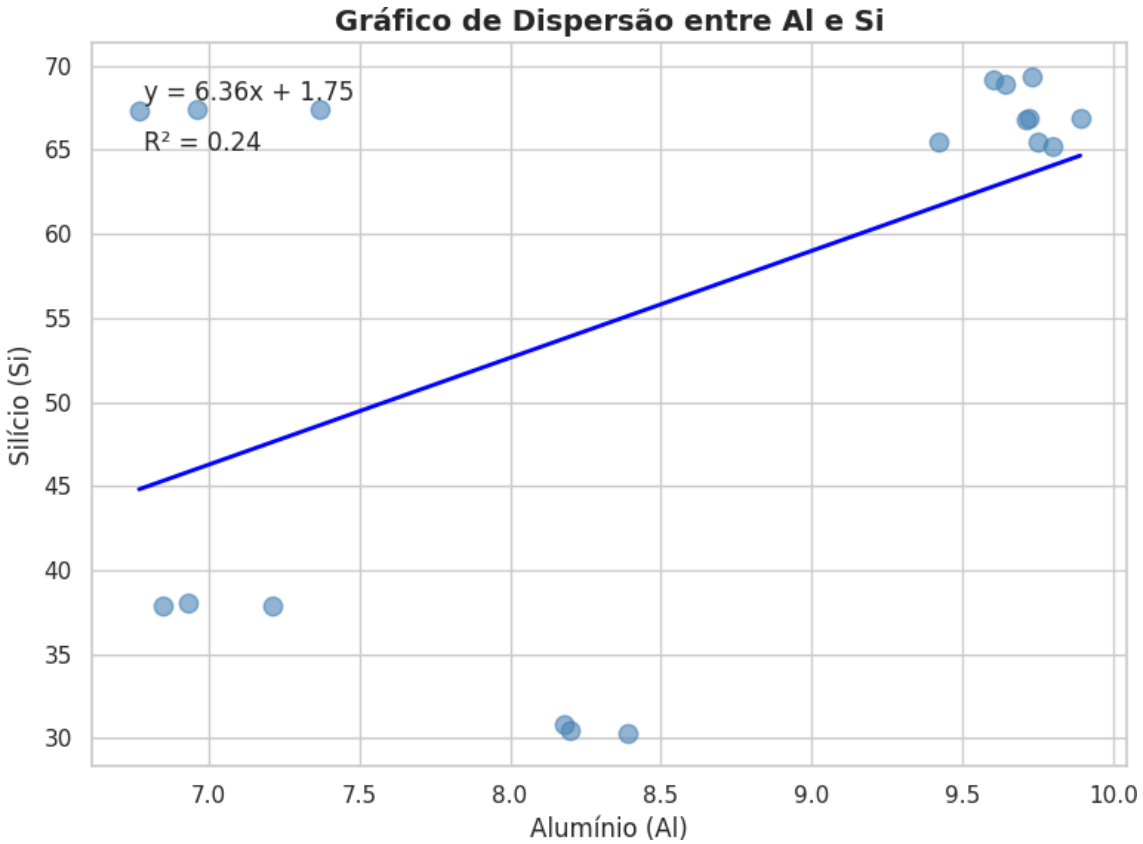


Figura 24 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Ti-Fe

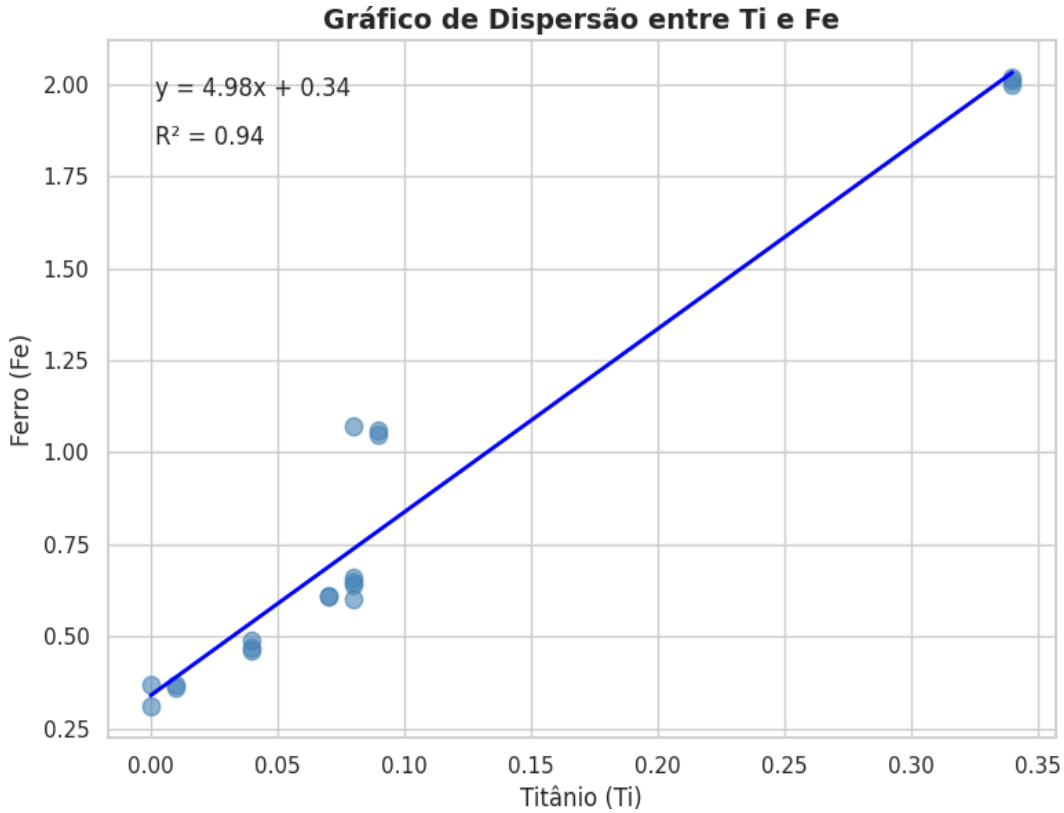
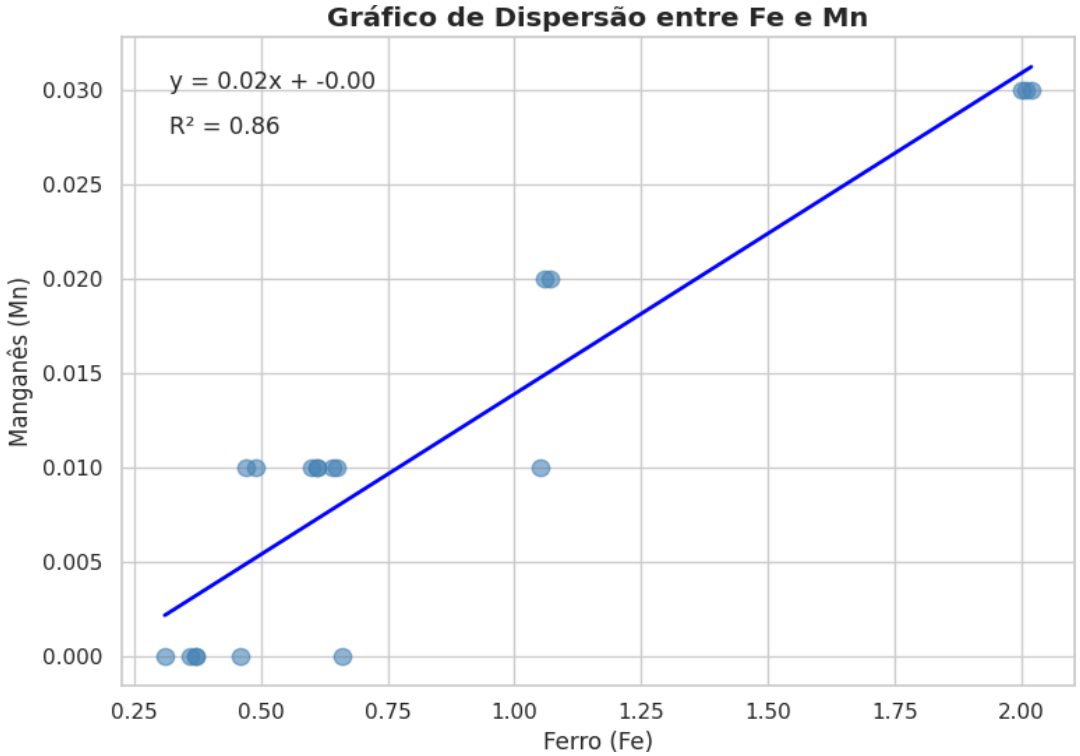


Figura 25 - Gráfico de dispersão (*scatterplots*) que mostram as retas de tendência azul para as relações Fe- Mn



6.2.1 Efeito de Diluição Quartzosa (Fe-Si) e a Assinatura Saprolítica (Al-Si)

A caracterização geoquímica e a modelagem estatística das frações finas de sedimentos de corrente ativos coletados no Arroio Camaquã das Lavras foram realizadas por meio de diagramas de dispersão bivariados (*scatterplots*) e matrizes de correlação linear. Esse tratamento estatístico teve como objetivo quantificar o grau de associação linear entre os pares de elementos químicos analisados, permitindo identificar afinidades geoquímicas relacionadas ao transporte e deposição conjunta de minerais pesados, bem como possíveis efeitos de diluição por frações quartzosas. O processamento quantitativo dos teores instrumentais brutos obtidos via pXRF permitiu calcular as equações de regressão linear e os coeficientes de determinação (R^2) para os pares Ti-Fe, Fe-Mn, Ti-Mn, Fe-Si e Al-Si, cujos gráficos individuais, com as respectivas retas de tendência, encontram-se consolidados no painel da (Figura 21).

Os coeficientes de Pearson foram classificados como fraco (<0,3), moderado (0,3–0,7) e forte (>0,7), de acordo com a intensidade da relação linear entre as variáveis, servindo de base para a interpretação das associações geoquímicas discutidas nas seções seguintes. Os pares Ti-Fe (R^2 = 0,94) e Fe-Mn (R^2 = 0,86) apresentaram as correlações mais fortes, indicando forte afinidade geoquímica e comportamento hidrodinâmico conjunto entre esses elementos. O par Ti-Mn (R^2 = 0,79) também exibiu correlação forte, reforçando a associação entre os óxidos metálicos detríticos. Já o par Fe-Si (R^2 = 0,44) mostrou correlação moderada e inversa, associada ao efeito de diluição por quartzo detrítico, enquanto o par Al-Si (R^2 = 0,24) apresentou correlação fraca a moderada, relacionada à fração argilosa/saprolítica do sedimento.

6.2.2 Matriz de Correlação Linear Multivariada (Heatmap)

Para compreender as relações de interdependência mineralógica e os processos sedimentares dominantes na bacia hidrográfica do Arroio Camaquã das Lavras, realizou-se a modelagem estatística multivariada de todas analises quantificados por pXRF. Inicialmente, os coeficientes de correlação linear de Pearson foram calculados para o conjunto total de variáveis elementares, gerando uma matriz de dados brutos consolidada na Tabela 2.

Tabela 2: Matriz de correlação linear multivariada bruta para a totalidade dos

elementos químicos analisados na fração fina dos sedimentos de corrente.

Si	Al	K	Cl	Ca	Ti	Co	Rh	Ce	Cd	Mo	Co2	Fe	Mn
1	49.226.425.737.	-6.260.846.894.(	-9.352.677.238.	-5.637.263.565.(	-7.640.735.815.(	-45.666.246.678	-882.117.812.28	-8.792.691.386.(	-4.807.383.444.(	-523.667.001.04	-4.056.769.433.	-37.267.729.632	-28.489.295.377
49.226.425.737.	1	4.363.077.710.3	-5.458.860.499.(	21.798.873.054.	-1.634.778.077.(	2.553.284.211.1	-6.179.477.531.(	-3.830.100.030.(	-10.883.417.013	-15.918.982.138	-6.249.751.628.(	12.627.375.807.	3.148.745.232.4
-6.260.846.894.(	4.363.077.710.3	1	6.356.459.579.3	2.559.482.119.1	34.434.400.590.	19.955.009.054.	5.467.318.887.9	6.942.919.875.6	4.247.160.946.1	12.473.359.656.	13.351.557.473.	1.682.866.386.9	21.436.774.810
-9.352.677.238.(	-5.458.860.499.(	6.356.459.579.3	1	3.450.125.622.5	5.909.065.245.4	20.696.058.225.	8.850.847.874.0	7.923.971.174.9	37.394.002.535.	5.214.666.979.4	36.507.782.616.	1.661.658.771.3	12.951.986.753
-5.637.263.565.(	21.798.873.054.	2.559.482.119.1	3.450.125.622.5	1	9.393.573.663.7	9.696.848.338.8	24.441.260.274.	516.025.625.55(	46.255.773.415.	5.465.914.197.8	5.104.914.933.0	6.465.070.850.9	678.133.931.77
-7.640.735.815.(	-1.634.778.077.(	34.434.400.590.	5.909.065.245.4	9.393.573.663.7	1	8.563.818.643.7	5.046.094.221.2	6.299.845.214.1	5.041.972.579.0	6.595.887.702.2	5.543.869.032.9	5.893.685.626.6	5.681.812.266.3
-45.666.246.678	2.553.284.211.1	19.955.009.054.	20.696.058.225.	9.696.848.338.8	8.563.818.643.7	1	11.737.499.682.	4.721.592.010.9	4.630.608.384.3	4.403.096.356.9	45.764.087.181.	6.567.799.993.2	6.835.149.530.4
-882.117.812.28	-6.179.477.531.(	5.467.318.887.9	8.850.847.874.0	24.441.260.274.	5.046.094.221.2	11.737.499.682.	1	8.366.005.187.4	49.026.667.519.	23.058.521.718.	4.663.944.985.2	3.548.789.360.4	1.766.134.816.2
-8.792.691.386.(	-3.830.100.030.(	6.942.919.875.6	7.923.971.174.9	516.025.625.55(	6.299.845.214.1	4.721.592.010.9	8.366.005.187.4	1	6.172.939.110.3	21.397.839.876.	123.211.691.62(	5.481.259.795.2	4.591.469.505.4
-4.807.383.444.(	-10.883.417.013	4.247.160.946.1	37.394.002.535.	46.255.773.415.	5.041.972.579.0	4.630.608.384.3	49.026.667.519.	6.172.939.110.3	1	-6.897.399.095.(	-12.484.651.295	6.941.032.777.6	5.317.351.321.5
-523.667.001.04	-15.918.982.138	12.473.359.656.	5.214.666.979.4	5.465.914.197.8	6.595.887.702.2	4.403.096.356.9	23.058.521.718.	21.397.839.876.	-6.897.399.095.(	1	9.408.110.294.3	-19.110.771.536	-10.102.798.239
-4.056.769.433.	-6.249.751.628.(	13.351.557.473.	36.507.782.616.	5.104.914.933.0	5.543.869.032.9	45.764.087.181.	4.663.944.985.2	123.211.691.62(	-12.484.651.295	9.408.110.294.3	1	-3.029.848.569.(	-21.943.109.640
-37.267.729.632	12.627.375.807.	1.682.866.386.9	1.661.658.771.3	6.465.070.850.9	5.893.685.626.6	6.567.799.993.2	3.548.789.360.4	5.481.259.795.2	6.941.032.777.6	-19.110.771.536	-3.029.848.569.(	1	9.090.776.002.9
-28.489.295.377	3.148.745.232.4	21.436.774.810.	12.951.986.753.	678.133.931.77(	5.681.812.266.3	6.835.149.530.4	1.766.134.816.2	4.591.469.505.4	5.317.351.321.5	-10.102.798.239	-21.943.109.640	9.090.776.002.9	1

Fonte: Autora (2026)

Com o objetivo de refinar a interpretação metalogenética e focar estritamente nos elementos químicos caracterizados como indicadores ("farejadores") de mineralizações associadas ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e seu entorno, isolou-se a matriz de correlação específica apresentada na Tabela 3.

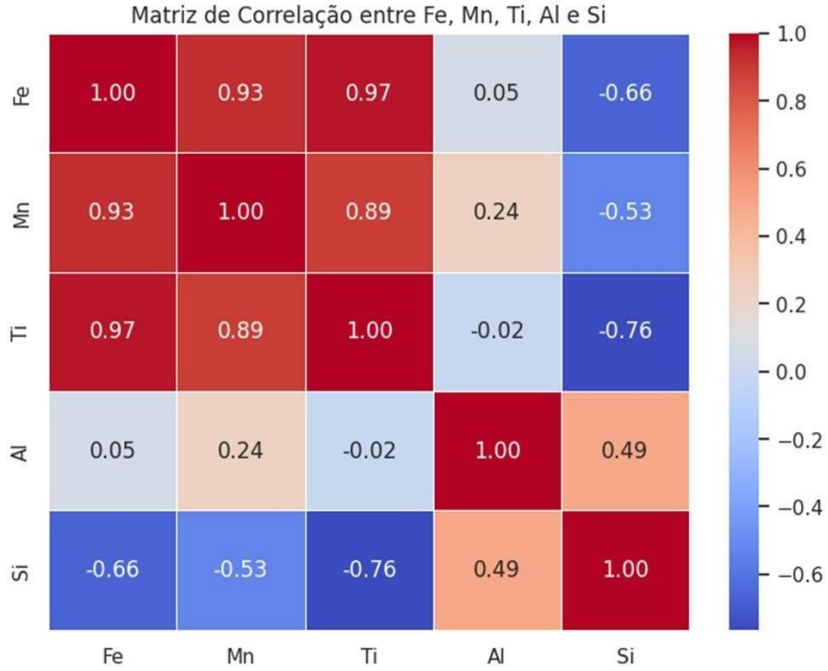
Tabela 3: Coeficientes de correlação de Pearson para os elementos químicos farejadores principais na bacia do Arroio Camaquã das Lavras.

	Fe	Mn	Ti	Al	Si
Fe	1.00	0.93	0.97	0.05	-0.66
Mn	0.93	1.00	0.89	0.24	-0.53
Ti	0.97	0.89	1.00	-0.02	-0.76
Al	0.05	0.24	-0.02	1.00	0.49
Si	-0.66	-0.53	-0.76	0.49	1.00

Fonte: Autora (2026)

A integração visual dos coeficientes descritos na Tabela 5 foi executada por meio da confecção de um mapa de calor (*heatmap*), expresso na (Figura 26), o qual corrobora graficamente a compartimentação e a dinâmica deposicional dessas analises ao longo do perfil amostrado.

Figura 26 – Matriz de correlação linear multivariada (*heatmap*) evidenciando os graus de afinidade geoquímica positiva (vermelho) e negativa (azul) entre os elementos analisados.



Fonte: Autora (2026).

A análise integrada das Tabelas 2 e 3, validada pela Figura 26, quantifica com robustez matemática a tripla compartimentação geoquímica atuante nos sedimentos fluviais:

1. O Domínio dos Óxidos Detríticos e Minerais Pesados (Fe-Ti-Mn): Observa-se um bloco de forte afinidade positiva na tríade Ferro, Titânio e Manganês, com destaque para a associação íntima entre o par Fe-Ti (r = 0,97) e Ti-Mn (r = 0,89). Essa altíssima correlação cruzada atesta o comportamento hidrodinâmico síncrono de minerais densos e resistentes (como ilmenita, magnetita e titanomagnetita), os quais se concentram preferencialmente em sítios de alta energia hidráulica após sofrerem desagregação mecânica das rochas hospedeiras do CILS.

2. O Domínio Antagônico da Diluição Quartzosa (Si**):** Em contrapartida, o Silício (Si) manifesta um comportamento fortemente oposto a esse grupo metálico detrítico, estabelecendo correlações marcadamente negativas com o Titânio (r = -0,76), o Ferro (r = -0,66) e o Manganês (r = -0,53). Estatisticamente, essa tendência inversa traduz o efeito de diluição mineralógica por frações de areia quartzosa grossa de baixa densidade, que mascaram a assinatura dos óxidos pesados guias nas porções

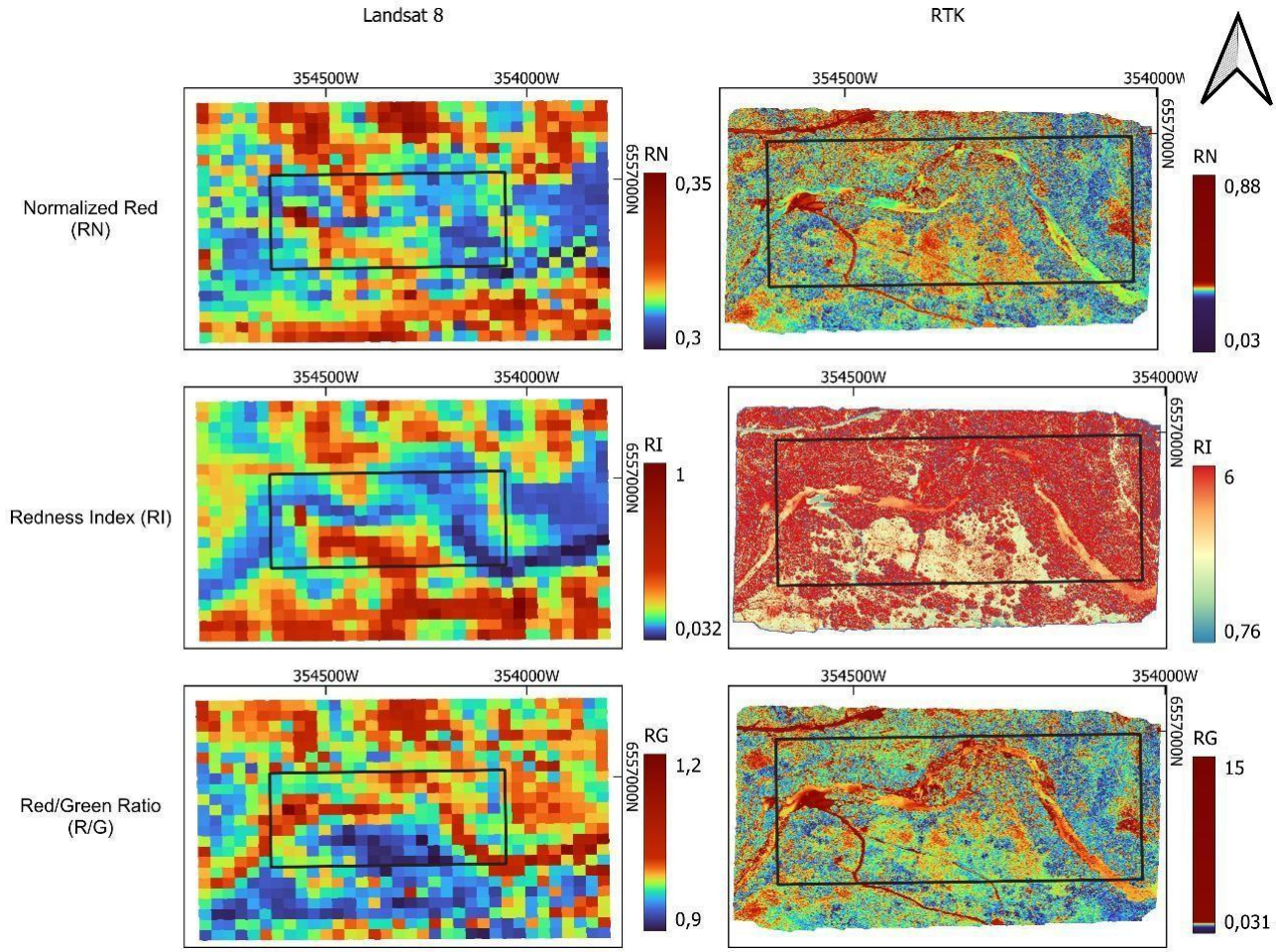
energeticamente distintas do leito.

3. O Domínio da Fração Argilosa Fina / Saprolítica (Al): De maneira independente, o Alumínio (Al) exibe correlações virtualmente nulas com o Ferro (r = 0,05) e com o Titânio (r = -0,02), mas sustenta uma correlação positiva moderada com o Silício (r = 0,49). Essa falta de afinidade mecânica com os óxidos detríticos densos confirma que o Alumínio está restrito quimicamente à assembleia de filossilicatos secundários (caulinita e esmectitas).

6.3 ANÁLISE ESPECTRAL E RAZÕES DE BANDAS EM MULTIESCALA

A investigação remota de guias mineralógicos associados a halos de alteração supérgena foi realizada por meio da aplicação de algoritmos de Álgebra de Mapas em duas escalas de resolução espacial. O painel comparativo apresentado na (Figura 27) confronta os produtos derivados do sensor orbital Landsat 8 (pixel de 30 metros) com os mapas submétricos gerados a partir do Modelo Digital de Ortoimagem (MDO) obtido pelo VANT com tecnologia RTK.

Figura 27 – Painel comparativo multiescala exibindo os produtos dos índices espectrais RN, RI e RG calculados para o sensor orbital Landsat 8 e para o imageamento.



Fonte: Autora (2026)

A análise integrada do painel revelou um incremento substancial no detalhamento morfológico e na delimitação geométrica das anomalias superficiais na bacia. Na escala orbital (coluna da esquerda), o efeito de pixelização decorrente da resolução moderada restringe a interpretação a grandes tendências regionais mistas. Em contrapartida, o imageamento por VANT (coluna da direita)

removeu o efeito de mistura de alvos por pixel, individualizando os eixos de dispersão secundária com precisão centimétrica.

O Índice do Vermelho (RI) destacou-se como o indicador de maior sensibilidade e contraste espectral na área piloto. Na modelagem de detalhe por VANT, o RI isolou uma proeminente anomalia de forte intensidade (tons claros/brancos com valores ascendendo a 6) concentrada na porção centro-sul do setor imageado. Sob a ótica físico-química dos minerais de alteração, esse

comportamento traduz a resposta diagnóstica de horizontes saprolíticos e solos expostos altamente intemperizados com enriquecimento relativo de hematita. O Landsat 8 identificou o mesmo halo ferruginoso (expressado em tons quentes avermelhados), porém de forma difusa e sem definição perimetral.

Os mapas da Razão Vermelho/Verde (RG) e do Vermelho Normalizado (RN) atuaram de forma complementar, mapeando as rotas de transporte de encosta. Os eixos anômalos de alta reflectância na banda do vermelho (tons quentes no mapa RG com valores de até 15) delineiam com fidelidade a distribuição de óxidos e hidróxidos de ferro secundários (hematita e goethita) gerados pela oxidação supérgena de sulfetos.

A distribuição espacial dessas anomalias espectrais no modelo RTK exibe uma aderência geométrica perfeita com o traçado das fraturas rúpteis NE-SW validadas pelo *LiDAR* e com os altos teores de Ferro quantificados na planilha analítica do pXRF. Esse cruzamento multidimensional comprova que as assinaturas ópticas do drone discriminam com sucesso os halos ferruginosos que funcionam como os guias prospectivos e vetores superficiais para a localização do ouro aluvial no arroio Camaquã das Lavras.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A integração metodológica multiescala aplicada nesta pesquisa permitiu delimitar os controles geológicos e os vetores de favorabilidade para a prospecção de ouro aluvial em um setor da bacia do Arroio Camaquã das Lavras. A integração de dados altimétricos obtidos por LiDAR, produtos ópticos submétricos adquiridos por VANT e análises geoquímicas quantitativas por fluorescência de raios X portátil (pXRF) demonstrou que a distribuição do ouro secundário e dos minerais pesados associados é controlada pela interação entre a tectônica rúptil regional e os processos hidráulicos superficiais que atuam no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS).

Os lineamentos estruturais obtidos a partir dos modelos digitais de terreno e representados em diagramas de rosetas evidenciaram a predominância das direções Nordeste-Sudoeste (NE-SW) e Noroeste-Sudeste (NW-SE), relacionadas aos processos de alojamento, subsidência e ressurgência do plúton granítico. O Modelo Digital do Terreno (MDT) revelou que o padrão retilíneo dos canais e suas inflexões angulares acompanham essas direções estruturais, enquanto a análise do relevo sombreado permitiu individualizar rupturas de declive e setores de alargamento do vale que funcionam como armadilhas hidráulicas favoráveis à concentração mecânica de minerais pesados e partículas de ouro detrítico.

Os dados geoquímicos obtidos por pXRF permitiram caracterizar os halos de dispersão secundária associados aos sedimentos de corrente. A análise estatística evidenciou forte correlação positiva entre Fe, Ti e Mn, indicando transporte e deposição conjunta de minerais pesados detríticos, como ilmenita e magnetita titanífera. Por outro lado, a correlação inversa observada entre Fe e Si demonstrou o efeito de diluição provocado pelas frações quartzosas, permitindo diferenciar setores estéreis das zonas de deposição de baixa energia, como barras de pontal e áreas de acúmulo sedimentar.

O processamento digital das imagens RGB obtidas por VANT demonstrou que a aplicação da Álgebra de Mapas por meio dos índices espectrais RN, RI e RG possibilitou a individualização de halos superficiais enriquecidos em óxidos de ferro. A integração espacial dessas informações com os lineamentos estruturais derivados do LiDAR e com as anomalias geoquímicas de campo evidenciou forte associação entre os controles estruturais, as feições geomorfológicas e os setores de maior favorabilidade prospectiva.

Os resultados obtidos confirmam a hipótese de que a distribuição do ouro aluvial no Arroio Camaquã das Lavras é condicionada pelo arcabouço estrutural regional e pelos processos de transporte e deposição fluvial. A metodologia integrada baseada em sensoriamento remoto, LiDAR, VANT e geoquímica por pXRF mostrou-se eficiente para a identificação de áreas favoráveis à concentração de ouro secundário, constituindo uma ferramenta de baixo impacto ambiental e potencialmente aplicável a outras regiões do Escudo Sul-rio-grandense e a ambientes geológicos semelhantes.

De forma geral, os resultados obtidos reforçam que a distribuição do ouro aluvial no Arroio Camaquã das Lavras não é aleatória, mas reflete a interação entre a herança tectônica do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, os processos intempéricos e a dinâmica sedimentar fluvial. A integração entre sensoriamento remoto, LiDAR, VANT e geoquímica por pXRF mostrou-se uma ferramenta eficiente para a identificação de áreas favoráveis à concentração de ouro secundário, fornecendo subsídios para futuras campanhas exploratórias e contribuindo para o desenvolvimento de metodologias aplicáveis a outras províncias auríferas do Escudo Sul-rio-grandense.

Os resultados obtidos demonstraram a eficiência da integração entre dados estruturais, geomorfológicos, espectrais e geoquímicos na identificação de áreas favoráveis à concentração de ouro aluvial. Entretanto, recomenda-se o aprofundamento das investigações por meio do aumento da densidade amostral dos sedimentos de corrente e da realização de análises químicas quantitativas para ouro por *Fire Assay* associado à ICP-MS, permitindo a validação direta das anomalias inferidas por meio dos elementos-guia e dos minerais pesados.

Sugere-se ainda a aplicação de métodos geoestatísticos mais robustos, como a krigagem ordinária, análise de componentes principais (PCA) e técnicas de agrupamento multivariado, visando aperfeiçoar a interpretação das associações geoquímicas e a definição de domínios de favorabilidade mineral. A incorporação de dados aerogeofísicos, especialmente magnetometria e gamaespectrometria em alta resolução embarcadas em VANT, poderá fornecer informações complementares sobre as estruturas subsuperficiais e a distribuição das zonas hidrotermalizadas associadas ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

Recomenda-se, igualmente, o emprego de modelos preditivos baseados em lógica fuzzy, pesos de evidência (*Weights of Evidence*) ou algoritmos de aprendizado de máquina, como Random Forest, para a integração quantitativa

das diferentes camadas de informação e elaboração de mapas de favorabilidade mineral mais robustos.

Do ponto de vista geológico e geomorfológico, investigações mais detalhadas das barras de pontal, terraços fluviais, paleocanais e depósitos coluvio-aluvionares podem contribuir para a compreensão dos processos de transporte, retrabalhamento e concentração do ouro secundário ao longo da evolução quaternária da drenagem. A abertura de trincheiras rasas e a realização de concentrações gravimétricas em bateia ou mesa vibratória constituem ferramentas complementares importantes para a validação das anomalias identificadas.

Por fim, a metodologia integrada empregada nesta pesquisa apresenta potencial de aplicação em outras áreas mineralizadas do Escudo Sul-rio-grandense, especialmente em regiões associadas aos sistemas plutono-vulcânicos do Cinturão Dom Feliciano, representando uma alternativa de baixo impacto ambiental, elevada resolução espacial e custo relativamente reduzido para programas de prospecção mineral em depósitos auríferos secundários.

Os resultados obtidos evidenciam que a integração entre sensoriamento remoto, LiDAR, geoquímica e análise estrutural constitui uma abordagem eficiente para a prospecção de depósitos auríferos secundários, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias exploratórias mais precisas, sustentáveis e economicamente viáveis em províncias minerais de elevada complexidade geológica.

REFERÊNCIAS

ANAND, R. R. et al. Ferruginous duricrust and gravel geochemistry in gold exploration, Yilgarn Craton, Western Australia**. Ore Geology Reviews**, v. 112, p. 103-115, 2019.

ANDRIOTTI, J. L. S.; BINOTTO, R. B. **Prospecção Mineral: princípios, métodos e aplicações**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2015.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W. R.; HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C. U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Neoproterozoic Passo Feio Gabbroic Anorthosite, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences,** v. 9, n. 3-4, p. 263-274, 1996.

BASEI, M. A. S. et al. The connection between the Dom Feliciano Belt, the Kaoko Belt and the Gariep Belt of southwestern Africa. **Precambrian Research**, v. 159, n. 3-4, p. 307-327, 2008.

BALARAM, V.; SAWANT, S. S. Role of iron oxides and associated minerals in the geochemistry and exploration of gold: a review. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 248, p. 107185, 2023.

BUTT, C. R. M.; ZEEGERS, H. (ed.). **Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains**. Amsterdam: Elsevier, 1992. 607 p. (Handbook of Exploration Geochemistry, v. 4).

CARRANZA, E. J. M. Controls on mineral deposit occurrence: mineral prospectivity mapping. Amsterdam: Elsevier, 2009. 544 p.

CARRANZA, E. J. M. Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS. Amsterdam: Elsevier, 2008. 351 p.

CRUZ, J. F.; HORN, A. H. **Geologia e recursos minerais da Folha Lavras do Sul - SH.22-Y-A-IV**. Porto Alegre: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2020. 1v. (Programa Geologia do Brasil)

CHEMALE JR., F. et al. Orogenic systems of southern Brazil. **Precambrian Research**, v. 220-221, p. 91-115, 2012.

COHEN, D. R. et al. A review of the use of pathfinder elements and geochemical dispersion in mineral exploration. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 180, p. 1-19, 2017.

CRAW, D.; REITH, F.; YOUNGSON, J. H. **The role of biogeochemical processes in the formation of alluvial gold deposits**. *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 1110-1125, 2017.

CRAW, D.; YOUNGSON, J. H.; FAURE, K. The role of microbial biofilms in the formation of gold grains. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, n. 15A, A165, 2002.

CHICA-OLMA, M. et al. Application of remote sensing to the study of iron oxide mineralizations in the Almería province (SE Spain). **Environmental Geology**, v. 42, n. 6, p. 644-652, 2002.

DAVIS, J. C. Statistics and data analysis in geology. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. 656 p. (Nota: O livro-texto clássico mundial de geoestatística, Pearson e análise multivariada em geociências)

DE TONI, G. B.; COSTA, J. A. L. Structural mapping, kinematic analysis and tectonic evolution of the transpressional systems in the São Gabriel Block, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 145, p. 104996, 2024.

DONAGER, J.; SÁNCHEZ MEADOR, A. J. **Understanding LiDAR for Forest Applications**: fact sheet. Flagstaff: Ecological Restoration Institute, Northern Arizona University, 2019. 4 p.

FAIRBROTHER, A. et al. Supergene gold transformation and nanoparticle formation in weathering profiles**. Chemical Geology**, v. 310, p. 112-125, 2012.

FRAGOSO-CÉSAR, A. R. S. et al. A Bacia Camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de rifts do Neoproterozoico III-Eopaleozoico no Rio Grande do Sul. **Geologia USP**. Série Científica, v. 0, n. 0, p. 1-15, 2000.

GASTAL, M. C. P. et al. Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS: geologia,

petrografia e idade dos plútons graníticos. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 3, p. 395-416, 2015.

GASTAL, M. C. P. et al. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 1: Geologia, geofísica e geocronologia (207Pb/206Pb e 206Pb/238U). **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 19-32, 2006

GASTAL, M. C. P.; LAFON, J. M. Gênese e evolução dos granitoides neoproterozoicos da região de Lavras do Sul, RS: dados geoquímicos e isotópicos (Rb-Sr e Pb-Pb). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 1, p. 3-18, 1998.

GROVES, D. I. et al. Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits in the Earth's crust. Ore **Geology Reviews**, v. 23, n. 1-2, p. 1-38, 2003.

HARTMANN, L. A. et al. Structural and tectonic control of gold deposits in the Sul-rio-grandense Shield. Journal of **South American Earth Sciences**, v. 32, n. 4, p. 410-425, 2011.

HARTMANN, L. A. et al. Tectonic framework of southernmost Brazil during the Neoproterozoic. **Gondwana Research,** v. 13, n. 1, p. 53-65, 2008.

HARTMANN, L. A. et al. Zircon and titanite U-Pb ages of Neoproterozoic granitic magmatism in southern Brazil: Implications for the evolution of the Dom Feliciano Belt. **Precambrian Research**, v. 112, n. 3-4, p. 289-306, 2001

HARTMANN, L. A. et al**. Geology and Metallogeny** of the Santana da Boa Vista Region, Southern Brazil. Porto Alegre: UFRGS, 2019.

INNOV-X SYSTEMS. **Innovative Technology for In-situ Elemental Analysis**: portable XRF handbook. Woburn: Innov-X Systems, Inc., 2005. 32 p.

LAUX, J. H. et al. Revisão dos depósitos auríferos do Escudo Sul-Rio Grandense e implicações para prospecção**. Revista Brasileira de Geociências**, v. 50, n. 1, e20190089, 2020.

LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S. The Lavras do Sul Shoshonitic Association: implications for the origin and evolution of Shoshonitic Magmatism**. Journal of**

South American Earth Sciences, v. 11, n. 1, p. 67-77, 1998

LEITES, S. R. D. et al. O Grupo Maricá na região de Caçapava do Sul-RS: uma associação de leques submarinos do tipo APP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. Anais [...]. **Natal: SBG**, v. 4, 1990. p. 1762-1772.

LEMIÈRE, B. A review of pXRF applications for changes in mineral exploration. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 15, n. 1, p. 13-22, 2015 [10.1201/b21326-17].

MADEIRA NETTO, J. S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interprétation**, Paris, v. 34, n. 2, p. 59-76, 1996.

MATOS NETO, J. B. de et al. Contribuição à estratigrafia do Grupo Maricá na região de Lavras do Sul, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camboriú. **Anais...** Camboriú: SBG, 1980. v. 5, p. 2802-2815.

NARDI, L. V. S. Complexo Granítico Lavras e suas relações tectônicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 14, n. 3, p. 113-120, 1984.

NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 15, n. 2, p. 139-146, 1985.

ORIOLO, S.; OYHANTÇABAL, P.; WEMMER, K.; SIEGESMUND, S. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: implications for the supercontinent cycle. **Geoscience Frontiers**, v. 8, n. 6, p. 1431-1445, 2017.

PAIM, P. S. G. et al. A Bacia do Camaquã: evolução sedimentar e tectônica. **Boletim de Geologia da UFRGS**, v. 30, n. 2, p. 45-60, 2000.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR., F.; WILDNER, W. Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 183-193, 2014.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C**.** *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: Cachoeira do Sul, folha SH. 22-Y-A do Estado do Rio Grande do Sul*. Brasília: CPRM, 2000. 131 p. + mapas.

PHILIPP, R. P. et al. The Pelotas Batholith, southernmost Brazil: Petrology, geochemistry and geochronology of Neoproterozoic syn-collisional to post-collisional granitic magmatism**. Lithos,** v. 266-267, p. 27-49, 2016. (Nota: Esta obra de 2016 é a referência base frequentemente citada em trabalhos posteriores de 2018).

PHILIPP, R. P. et al. O magmatismo toniano do terreno São Gabriel e a evolução do cinturão Dom Feliciano. In: **Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2021. p. 115-135.

PHILIPP, R. P. et al. Evolução geológica e potencial mineral da região de Lavras do Sul, RS. Geologia USP. **Série Científica**, v. 4, n. 2, p. 1-15, 2004.

PHILIPP, R. P. et al. The Pelotas Batholith, southernmost Brazil: Petrology, geochemistry and geochronology of Neoproterozoic syn-collisional to post-collisional granitic magmatism**. Lithos**, v. 266-267, p. 27-49, 2016.

REIMANN, C. et al. Statistical data analysis for data as patterns: geochemical modeling and mapping. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 316 p. (Nota: O principal livro do mundo usado por geólogos para interpretar gráficos de dispersão de solos e rios).

RIEGL Laser Measurement Systems. **LMS-Q780: Full Waveform Digitizing Airborne Laser Scanner for Wide Area Mapping**. [S. l.]: RIEGL, 2013.

REITH, F. et al. Biogeochemical cycling of gold: from primary deposit to alluvial pebbles. **Geochimica et Cosmochimica** Acta, v. 71, n. 3, p. 567-583, 2007.

REITH, F. et al. Mechanisms of gold nanoparticle formation and aggregation in surface environments. **Chemical Geology**, v. 270, n. 1, p. 130-143, 2010.

RIBEIRO, M. et al. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia**, n. 231, p. 1-232, 1966.

RIBEIRO, C. Metamorfismo de contato no Complexo Granítico Lavras. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 13, n. 4, p. 235-247, 1983.

ROSE, A. W.; HAWKES, H. E.; WEBB, J. S. Geochemistry in Mineral Exploration.2. ed. London: Academic Press, 1979. 657 p.

SAALMANN, K. et al. Structural evolution of the Neoproterozoic São Gabriel orogen in southern Brazil: Implications for the assembly of Western Gondwana. **Precambrian Research**, v. 136, n. 1-2, p. 139-172, 2005.

SADEK, M. F. et al. Integration of multispectral remote sensing and geochemical data for mineral favorability mapping. **Remote Sensing**, v. 17, n. 2, p. 145-163, 2025.

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

SILVA, L. C. et al. A evolução crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a perspectiva dos sistemas isotópicos Sr-Nd. In: **Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2021. p. 85-105

SILVA, C. A. et al. UAV-LiDAR for monitoring forest ecosystems: Challenges and opportunities. **Remote Sensing of Environment**, v. 254, p. 112250, 2021.

SILVA, L. C. et al. Age and tectonic setting of the Neoproterozoic Lavras do Sul intrusive complex, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 18, p. 753-766, 2005.

SOMMER, C. A. et al. Evolução do vulcanismo alcalino na Bacia do Camaquã, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 1, p. 41-53, 2006

SUTHERLAND, D. G. Fluvial transport of placer gold and the formation of placers. **Economic Geology**, v. 77, n. 1, p. 161-176, 1982.

VAN DER MEER, F. D. et al. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: a review. **International Journal of Applied Earth Observation**

VAN DER MEER, F. D. et al. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 14, p. 112-128, 2012

WILDNER, W. et al. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2002.

YOUNGSON, J. H.; CRAW, D. **Gold nugget growth during tectonically induced sedimentary recycling, Otago, New Zealand**. *Ore Geology Reviews*, v. 8, p. 57-70, 1993.

YOUNGSON, J. H.; CRAW, D. **Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel-bed rivers, New Zealand**. *Economic Geology*, v. 94, p. 615-634, 168