

Trabalho de Conclusão de Curso
Graduação em Geologia

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO PELO MÉTODO DA
GAMAESPECTROMETRIA COMO GUIA PROSPECTIVO EM OCORRÊNCIAS
DE COBRE NO ESCUDO SUL RIO-GRANDENSE, LAVRAS DO SUL-RS

Isabela Oliveira Gouveia

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ISABELA OLIVEIRA GOUVEIA

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO PELO MÉTODO DA GAMAESPECTROMETRIA
COMO GUIA PROSPECTIVO EM OCORRÊNCIAS DE COBRE NO ESCUDO SUL
RIO-GRANDENSE, LAVRAS DO SUL-RS

Trabalho de Graduação apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Rio Claro - SP
2025

G719I	Gouveia, Isabela Oliveira Levantamento geofísico pelo método da gamaespectrometria como guia prospectivo em ocorrências de cobre no Escudo Sul Rio-Grandense, Lavras do Sul-RS / Isabela Oliveira Gouveia. -- Rio Claro, 2025 57 p. : tabs., fotos, mapas Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: César Augusto Moreira 1. Geofísica. 2. Gamaespectrometria. 3. Prospeção mineral. 4. Cobre. 5. Hidrotermalismo. I. Título.
-------	--

ISABELA OLIVEIRA GOUVEIA

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO PELO MÉTODO DA GAMAESPECTROMETRIA
COMO GUIA PROSPECTIVO EM OCORRÊNCIAS DE COBRE NO ESCUDO SUL
RIO-GRANDENSE, LAVRAS DO SUL-RS

Trabalho de Graduação apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Dra. Marina Fernandes Sanches Barros (UNESP - pós-doutoranda)

MsC. Luiza Lima Alves (Doutoranda - PP/GMA)

Rio Claro, 01 de dezembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus amados pais, Neiva e Francisco, por todo o apoio, amor, carinho e principalmente por toda a confiança que depositaram em mim ao longo dos últimos anos (obs.: e ao Vinícius, por ser o melhor irmão do mundo). Sem vocês todos nada disto seria possível.

Agradeço ao Matheus, por toda a sua parceria, companheirismo, amor e todo o apoio que me deu estes anos. Jamais me esquecerei disso, não importa o que aconteça.

Agradeço ao querido Prof. Dr. César Augusto Moreira por todos os ensinamentos, ajuda, boas conversas e principalmente por sua paciência não só para me orientar neste trabalho, mas também ao longo de todo o curso, e pelas melhores e mais didáticas aulas.

Agradeço à Giovana, especialmente neste último ano, mesmo que esteja comigo desde o início do curso, por ser uma ótima amiga e que com toda certeza levarei para a vida toda. Obrigada pelas risadas, conversas e toda a ajuda e generosidade que me deu, além da paciência (embora eu saiba que não tenha nenhuma).

Também agradeço ao Leandro pelas risadas (temos o humor duvidoso), ajuda, conversas reflexivas, ensinamentos e por também ser meu amigo desde o princípio, nas aulas EAD.

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Misson Godoy por todos os ensinamentos, pela paciência em sanar minhas dúvidas (sobretudo em aulas de lâminas petrográficas), pelas boas risadas e pelo carinho. Juntamente, agradeço a todos os professores e professoras do curso de Geologia pelas aulas e aprendizado e agradeço à UNESP e ao IGCE por possibilitar este curso.

Agradeço à Thaís, por ter sido uma grande amiga, embora tenhamos nos afastado ao longo do curso.

Por fim, agradeço à Larissa Martins pelas saídas e diversões, também à Larissa Tinti pela ajuda, alguns pequenos surtos e ótimas conversas sobre livros.

RESUMO

A exploração mineral possui papel essencial para a economia e o desenvolvimento do Brasil, sendo responsável pela descoberta e ampliação de jazidas que abastecem a indústria e sustentam o crescimento nacional. O cobre (Cu) é um minério de destaque entre os principais metais estratégicos, amplamente utilizado na fabricação de fios elétricos e em aplicações industriais. Diante da crescente demanda mundial e da necessidade de ampliação das reservas nacionais, são fundamentais novas pesquisas em regiões com potencial mineral. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo aplicar o método da gamaespectrometria terrestre para identificar possíveis depósitos ocultos em ocorrências de Cu no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG) na região das Minas do Seival, em Lavras do Sul (RS), com foco na Mina Alcides, uma das seis minas históricas do local. Essa área está inserida na Bacia do Camaquã, que integra o Escudo Sul-Rio-Grandense, pertencente ao segmento meridional da Província Mantiqueira. A bacia é composta por sequências vulcanossedimentares formadas em ambiente pós-colisional neoproterozoico, associadas à Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS), caracterizada por rochas vulcânicas e intrusivas de composição intermediária a ácida. O contexto geológico local é marcado pela presença de brechas vulcânicas, tufos e andesitos da Formação Hilário. As mineralizações de cobre ocorrem associadas a zonas de fraturas e falhas, pois são controladas por eventos tectônicos ligados à Orogênese Brasileira, que condicionaram a circulação de fluidos hidrotermais e a formação de veios mineralizados. Foram realizadas medidas radiométricas em uma área aproximada de 58 hectares. As análises abrangeram as concentrações naturais dos elementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th), provenientes dos meios geológicos. Os resultados indicaram anomalias significativas na porção noroeste da área, com valores elevados e coincidentes dos três elementos, associados a zonas de falhas e fraturas com direções E–W e NE–SW. A integração dos dados radiométricos e estruturais, aliada ao modelo digital de terreno obtido por drone, permitiu delimitar dois alvos prioritários com potencial mineral. Além disso, é recomendada a aplicação de métodos geofísicos complementares, também terrestres, como Polarização Induzida (IP) e Eletroresistividade.

Palavras-chave: gamaespectrometria, geofísica, prospecção mineral, cobre, hidrotermalismo

ABSTRACT

Mineral exploration plays a crucial role in Brazil's economy and development, driving the discovery and expansion of ore deposits that supply industry and support national growth. Copper (Cu) stands out among strategic metals, being widely used in electrical wiring and various industrial applications. In response to growing global demand and the need to expand national reserves, further research in regions with mineral potential is essential. This study aimed to apply terrestrial gamma-ray spectrometry to identify potential hidden Cu deposits in the Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), specifically within the Seival Mines region of Lavras do Sul (RS), with emphasis on the Alcides Mine, one of the six historical mines in the area. The study area is located within the Camaquã Basin, part of the ESRG in the southern segment of the Mantiqueira Province. The basin comprises Neoproterozoic post-collisional volcanosedimentary sequences, associated with the Lavras do Sul Shoshonitic Association (ASLS), which is characterized by intermediate to acidic volcanic and intrusive rocks. The local geology is marked by volcanic breccias, tuffs, and andesites of the Hilário Formation. Copper mineralization is associated with fracture and fault zones, controlled by tectonic events related to the Brasiliano Orogenic Cycle that facilitated hydrothermal fluid circulation and vein formation. Radiometric measurements were conducted over an area of approximately 58 hectares. Analyses focused on the natural concentrations of potassium (K), uranium (U) and thorium (Th), derived from the geological matrix. Results revealed significant anomalies in the northwestern sector of the study area, characterized by elevated and coincident values of all three elements, corresponding to fault and fracture zones trending E–W and NE–SW. Integration of radiometric and structural data, combined with a drone-derived digital terrain model, enabled the delineation of two priority targets with mineral potential. Additionally, the application of complementary terrestrial geophysical methods, such as Induced Polarization (IP) and Electrical Resistivity, is recommended to further refine exploration.

Keywords: gamma-ray spectrometry, geophysics, mineral exploration, copper, hydrothermal systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Mina Alcides no município de Lavras da Sul/RS. A posição da mina no mapa está caracterizada pelo ponto vermelho.....	13
Figura 2 - Mapa tectônico da Província Mantiqueira com destaque às faixas Araçuaí, Ribeira e Dom Feliciano ao sul.....	15
Figura 3 - Mapa geológico esquemático mostrando os quatro terrenos pertencentes ao ESRG e a Bacia do Camaquã em sua cobertura.....	17
Figura 4 - Contexto geológico da Bacia do Camaquã no Rio Grande do Sul.....	19
Figura 5 - Mapa geológico regional onde estão inseridas as seis pequenas minas da Mina do Seival. A Mina Alcides é informada pelo número 6.....	24
Figura 6 - Mina Alcides	25
Figura 7 - Amostra de lapili tufo com malaquita.....	25
Figura 8 - Diagrama demonstra a relação em função do tempo do número de átomos no decaimento radioativo e meia-vida, assim apresenta a relação das curvas entre os núcleos-pais e núcleos-filhos.....	28
Figura 9 - Alterações no número atômico (Z) e no número de nêutrons (N) associadas ao decaimento radioativo. (a) Esquema com as mudanças associadas às emissões α e β e à captura-K (não há alterações em Z e N na emissão γ); (b) linhas espectrais do ^{40}K ; (c) série do ^{238}U ; e (d) série do ^{232}Th	30
Figura 10 - Atenuação dos raios gama em diferentes meios.....	35
Figura 11 - Gamaespectrômetro RS-332 usado no levantamento geofísico.....	39
Figura 12 – Drone modelo MAVIC 3T da fabricante DJI usado nos voos.....	40
Figura 13 - Mapa de pontos. Os círculos são os pontos levantados e no retângulo vermelho está a localização da Mina Alcides.....	41
Figura 14 - Mapa 2D de interpolação de concentração de urânio (U). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa	45
Figura 15 - Mapa 2D de interpolação de concentração de tório (Th). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa	46
Figura 16 - Mapa 2D de interpolação de concentração de potássio (K). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa	47
Figura 17 - Mapa integrado com valores anômalos relevantes de cada elemento radioativo. Os círculos vermelhos pontilhados representam os alvos de interesse e o retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa. Os valores anômalos no extremo NW da área foram extrapolados para os três elementos	48

Figura 18 - Mapa de sobreposição demonstrando os resultados lineados em sentido E-W existentes nos altos halos anômalos observados nos mapas 2D também. Essa orientação é notada tanto na mina quanto nos alvos de interesse.....	49
Figura 19 - Modelo digital de elevação (MDE) da área obtido por meio do levantamento de drone	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS.....	12
3	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E CONTEXTO HISTÓRICO	13
4	CONTEXTO TECTÔNICO E GEOLÓGICO REGIONAL	15
4.1	PROVÍNCIA MANTIQUEIRA	15
4.2	ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE (ESRG).....	16
4.2.1	<i>Compartimentação tectônica.....</i>	<i>16</i>
4.3	BACIA DO CAMAQUÃ (BC).....	18
4.3.1	<i>Estratigrafia</i>	<i>19</i>
4.4	ASSOCIAÇÃO SHOSHONÍTICA DE LAVRAS DO SUL (ASLS)	20
4.4.1	<i>Complexo Granítico Lavras (CGL)</i>	<i>21</i>
4.5	METALOGÊNESE	21
5	GEOLOGIA DA MINA DO SEIVAL.....	23
6	MATERIAL E MÉTODOS	26
6.1	FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DA GAMAESPECTROMETRIA.....	26
6.1.1	<i>Radioatividade e decaimento radioativo.....</i>	<i>26</i>
6.1.2	<i>Elementos radioativos no meio geológico</i>	<i>32</i>
6.1.3	<i>Atenuação e absorção da radiação</i>	<i>34</i>
6.1.4	<i>Mobilidade do U, Th e K.....</i>	<i>35</i>
6.2	GAMAESPECTROMETRIA	37
6.2.1	<i>Gamaespectrometria para depósitos associados a hidrotermalismo</i>	<i>37</i>
6.3	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	39
6.3.1	<i>Gamaespectrômetro.....</i>	<i>39</i>
6.3.2	<i>Aquisição dos dados</i>	<i>40</i>
6.3.3	<i>Processamento dos dados radiométricos.....</i>	<i>42</i>
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
7.1	MAPA 2D DE URÂNIO (U).....	44
7.2	MAPA 2D DE TÓRIO (Th)	45
7.3	MAPA 2D DE POTÁSSIO (K).....	46
7.4	MAPA INTEGRADO DOS RESULTADOS DOS TRÊS ELEMENTOS	47
8	CONCLUSÕES.....	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

A exploração mineral é de grande importância para a economia, desenvolvimento e manutenção do país, e atrelado a isso está a pesquisa mineral, que é responsável pela descoberta de novas ocorrências e depósitos minerais, fora as pesquisas geológicas básicas para ampliação de jazidas conhecidas e em processo de lavra. Tais estudos passam por uma série de etapas, como o planejamento e estratégias baseadas no minério de interesse, que configuram o aumento de investimento e a diminuição do risco na fase exploratória (MOON *et al.*, 2006).

Na maioria dos países, os depósitos facilmente visíveis na superfície foram descobertos. Por isso, atualmente, são buscados principalmente os que estão ocultos sob coberturas de intemperismo, solo, ou outros materiais, o que exige métodos de exploração avançados para sua localização (MOON *et al.*, 2006). Depósitos de cobre, alvos de interesse deste trabalho, estão classificados neste contexto.

Devido aos avanços tecnológicos das últimas décadas, o cobre tem uma estimativa progressiva de consumo mundial para os próximos 25 anos (JULIANI *et al.*, 2016). No Brasil, por exemplo, é previsto que a produção do minério nos próximos anos seja maior do que toda a produção histórica desde o século passado (DOGGET, 2014; HEITHERSAY, 2014); inclusive, a demanda por essa *commodity* no país sempre foi maior do que sua oferta, com implicação negativa há anos na balança comercial brasileira (LIMA; NEVES, 2014).

Ainda que haja algumas novas minas a serem abertas em algumas províncias como a de Carajás, no Pará (onde está localizado o maior depósito de cobre já encontrado no país e a maior produção), é necessária a constante exploração do minério para aumento das reservas nacionais, seja pelo desenvolvimento de depósitos já conhecidos e explorados ou por novas descobertas. Essa necessidade de um programa prospectivo para o cobre também está ligada ao fato de que os depósitos explorados nas últimas décadas tiveram uma vida média de produção de 20 anos (JULIANI *et al.*, 2016).

Os métodos geofísicos são amplamente empregados em diversas aplicações, mas a principal delas é a determinação das características em subsuperfície sem a necessidade de realizar sondagens ou escavações. Cada técnica geofísica está

associada à diferença de uma propriedade física entre alvos de interesse e rochas em redor, como densidade, magnetismo, condutividade elétrica ou radioatividade. Atualmente, os métodos geofísicos são de suma importância para a prospecção mineral (NASCIMENTO *et al.*, 2005).

A área de estudo está inserida no Escudo Sul-Rio-Grandense, um domínio geológico que apresenta ocorrências de sulfetos de metais base que foram explorados no passado, dentre os quais a região das Minas do Seival, onde ocorreu a exploração de cobre em seis pequenas minas entre 1910 e 1960 em depósitos aflorantes, antes das principais descobertas de depósitos do minério que ocorreram a partir de 1970 no Brasil.

Diante do significativo potencial mineral dessa região do Rio Grande do Sul, este trabalho tem como objetivo realizar estudos geofísicos voltados à identificação de possíveis depósitos ocultos de cobre. Para isso, serão utilizados levantamentos de gamaespectrometria — baseados na detecção de radiação de U, Th e K — integrados ao reconhecimento geológico e à análise de lineamentos estruturais regionais. O foco da investigação está concentrado no entorno da Mina Alcides, uma das seis pequenas minas que compõem as Minas do Seival, em Lavras do Sul (RS).

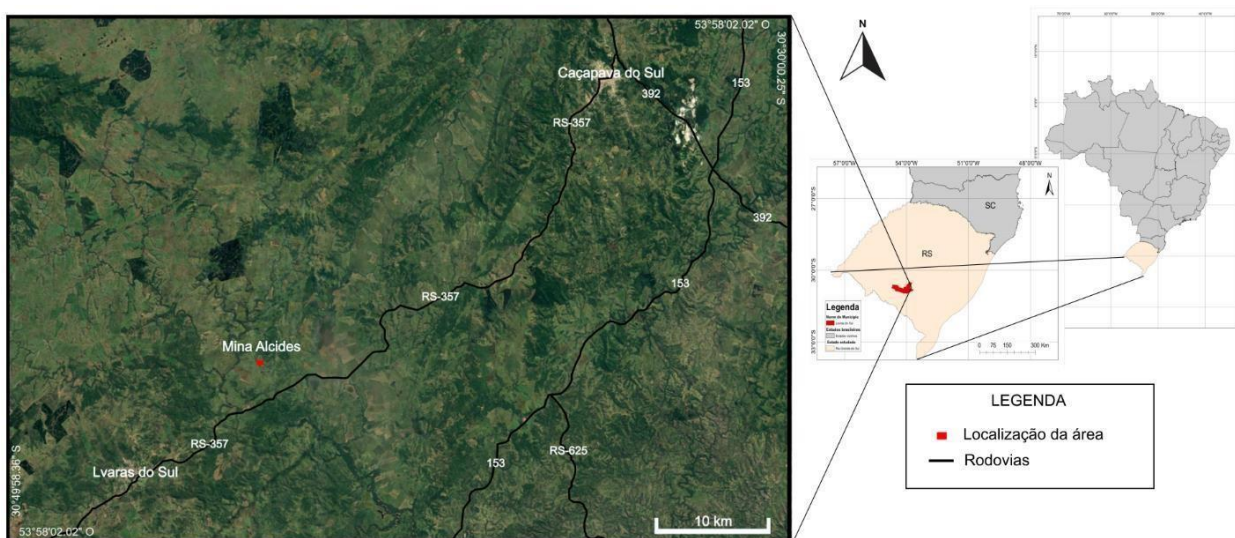
2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é realizar um levantamento geofísico pelo método da gamaespectrometria terrestre como guia prospectivo em ocorrências de cobre (Cu) em mina desativada no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG).

3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E CONTEXTO HISTÓRICO

A Mina Alcides é uma das seis minas que foram exploradas no passado e estão localizadas a nordeste do município de Lavras do Sul, no Rio Grande do Sul (RS), a 324 km de Porto Alegre. O seu acesso pode ser realizado no sentido Caçapava do Sul — Lavras do Sul pela rodovia estadual RS-357 (conhecida como “estrada velha da mina”), com virada à direita para a estrada de chão que fica à aproximadamente 57 km de Caçapava do Sul e 18 km de Lavras do Sul, onde podem ser acessadas algumas das propriedades privadas da região. Nesse sentido, a Mina Alcides fica à esquerda dessa estrada, conforme pode ser observado no mapa de localização da Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da Mina Alcides no município de Lavras da Sul/RS. A posição da mina no mapa está caracterizada pelo ponto vermelho.



Fonte: autoria própria.

As ocorrências de cobre no sul do Brasil foram descobertas graças às de ouro. Por volta dos anos 1930, a maior exploração do minério ocorreu na região da chamada Minas do Seival, que também possuía mais fácil acesso ao ser comparada a outras jazidas de cobre do estado (REISCHL, 1978).

A princípio, essas ocorrências cupríferas no Rio Grande do Sul começaram a ser descritas e estudadas no início do século XX, em 1901, por algumas empresas estatais e privadas, com algumas escavações realizadas posteriormente por outras companhias. Em 1937, uma empresa da capital, Porto Alegre, assumiu a exploração

das minas, que apresentavam teor médio de 4,7%. Entre os anos de 1939 e 1942, a chamada Companhia Indústria Eletroquímicas S/A ficou responsável pela extração do minério. A mina foi operada de forma intermitente de 1935 a 1962 e a partir de 1955 a produção chegou a atingir cerca de 1000 toneladas de minério por mês, de teor aproximado de 1,6% de cobre total, com 1% de sulfetos de cobre (LOPES, 2018).

As seis minas que compõem as Minas do Seival são a Mina Alcides, Cruzeta, Meio, Morcego, João Dahne e Barita, além de outras menores ocorrências como a Vila do Torrão (LOPES, 2011; 2018). Entre os anos de 1942 e 1964, a Mina da Barita registrou uma lavra aproximada de 64 mil/ton, com teor médio de 1,71% de cobre e 70 ppm de prata (Ag). Já a Mina João Dahne foi explorada por meio de uma trincheira com alguns metros de profundidade em 1957, focada na extração de minério de baixo teor. Depois, a Mina Alcides teve sua produção ligada à exploração de sulfatos para correção de solos agrícolas (LOPES, 2018).

A Mina do Seival foi classificada por Reischl (1978) de acordo com suas mineralizações, sendo subdividida em Mina da Barita, João Dahne, Morcego, Meio, Cruzeta e a Alcides, alvo deste trabalho.

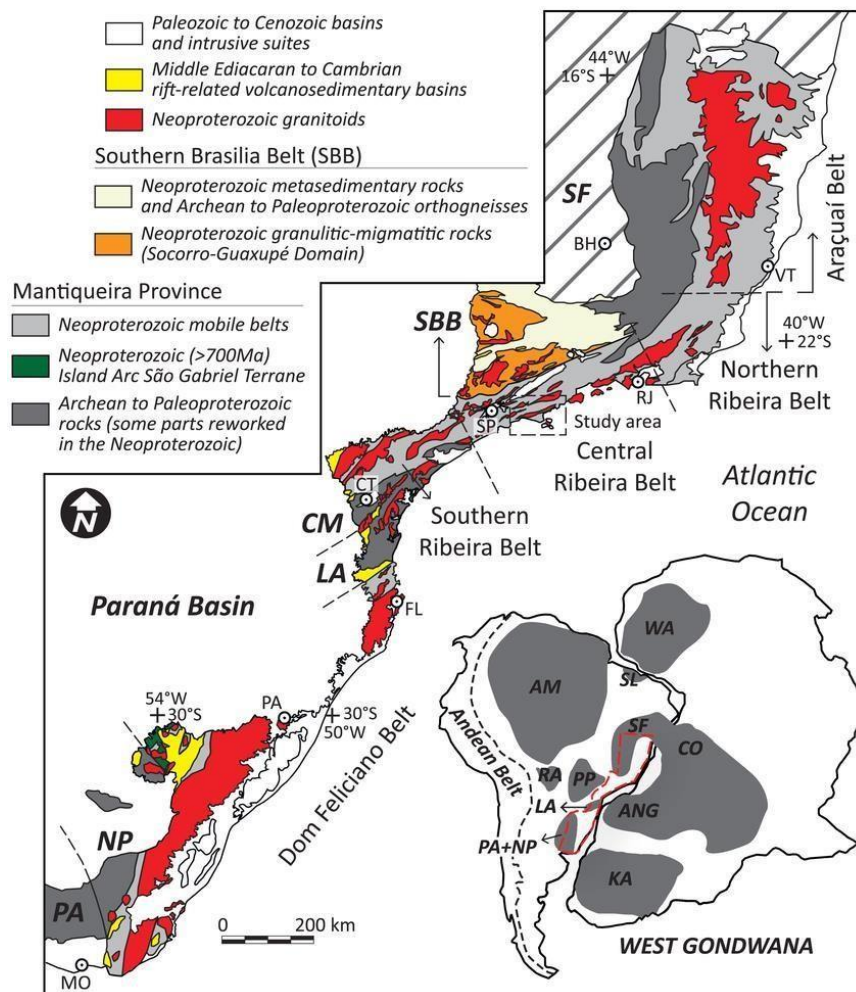
A Mina da Barita apresenta um corpo de minério de formato lenticular de direção NE-SW e mergulho de 50° para NW, que ocorre principalmente como calcocita concentrada em bolsões irregulares associados a zonas de falhas, e a barita é o principal mineral de ganga. A Mina João Dahne apresenta um corpo mineralizado de baixo teor e direção NE-SW, com mergulho bastante acentuado. A Mina do Morcego chegou a ser lavrada, mas depois foi considerada inviável economicamente, pois apresentava alto percentual de minerais oxidados (70% do minério), suas mineralizações ocorrem na forma de calcocita e malaquita finamente disseminadas na superfície, associadas a zonas de fraturas em lavas andesíticas de direções N-S e NE-SW. A Mina do Meio é caracterizada por uma mineralização composta por malaquita com ocorrências irregulares controladas por fraturas no tufo andesítico, também com direções N-S e NE-SW. A Mina da Cruzeta possui mineralizações de calcocita principalmente em veios ao longo de fraturas, com ocorrência rara de minério disseminado e estruturas de direção NE-SW e NW-SE, com inclinação subvertical e hospedadas em lavas andesíticas de fluxo porfirítico. Por fim, a Mina Alcides é caracterizada por bolsões de calcocita finamente disseminados em lapili tufos associados à ganga rica em barita e com preenchimento em fraturas de orientação N-S (REISCHL, 1978).

4 CONTEXTO TECTÔNICO E GEOLÓGICO REGIONAL

4.1 Província Mantiqueira

A Província Mantiqueira é um sistema orogênico formado durante a Orogenia Brasileira do Neoproterozoico, paralelo à costa atlântica brasileira, e uma faixa de direção NE-SW de mais de 3.000 km de comprimento que está estendida do sul da Bahia até o Uruguai, com totalidade de 700.000 km² (ALMEIDA, 1977; 1981). É constituída pelos orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel (ALMEIDA, 1977; 1981; HEILBRON *et al.*, 2004) (Figura 2).

Figura 2 - Mapa tectônico da Província Mantiqueira com destaque às faixas Araçuaí, Ribeira e Dom Feliciano ao sul.



Fonte: Egydio-Silva *et al.* (2018), modificado de Heilbron *et al.* (2004).

O Orógeno São Gabriel e Terrenos Apiaí-Guaupé fazem parte do primeiro episódio dos episódios colisionais diacrônicos da formação da província, com seus registros mais antigos sendo de 700 Ma e 790 Ma, respectivamente. Depois, deram continuidade as colisões do Orógeno Brasília meridional nos Terrenos Apiaí-Guaxupé (630 Ma – 610 Ma) e no Orógeno Dom Feliciano (600 Ma). Por fim, em 580 Ma – 520 Ma, ocorreu a colisão entre os orógenos Ribeira e Araçuaí (HEILBRON *et al.*, 2004).

A porção sul do país faz parte do segmento meridional da Província Mantiqueira, que inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel, o primeiro está estendido do nordeste de Santa Catarina até Punta del Rei, no Uruguai, e totaliza cerca de 1.200 km de extensão, enquanto o segundo é uma ramificação do Dom Feliciano localizada no extremo sudoeste de Santa Catarina. Essa porção meridional é marginal aos crátons Paranapanema, Rio de la Plata, que compõe o Uruguai e o estado do Rio Grande do Sul, e ao maciço Luis Alvez, que separa os orógenos Dom Feliciano e Ribeira (HEILBRON *et al.*, 2004).

4.2 Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG)

4.2.1 Compartimentação tectônica

O Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG) possui uma área total de 50 mil km² e está localizado no centro-sul do Rio Grande do Sul. É composto pelos orógenos Dom Feliciano e São Gabriel, pertencentes ao segmento meridional da Província Mantiqueira (SOLANI JUNIOR *et al.*, 2000).

O Orógeno São Gabriel é um terreno acrescionário do ESRG formado graças ao soerguimento de um arco magmático. É limitado a oeste pela Zona Cizalhante Ibaré (NW-SE); é caracterizado por um transporte tectônico, que o separa do Cráton Rio de la Plata, enquanto a leste é limitado pela chamada Anomalia Caçapava do Sul (NE-SW), que separa o Cinturão Porongos do Complexo Encantadas. Seu transporte tectônico possui direção WNW (HARTMANN *et al.*, 2007).

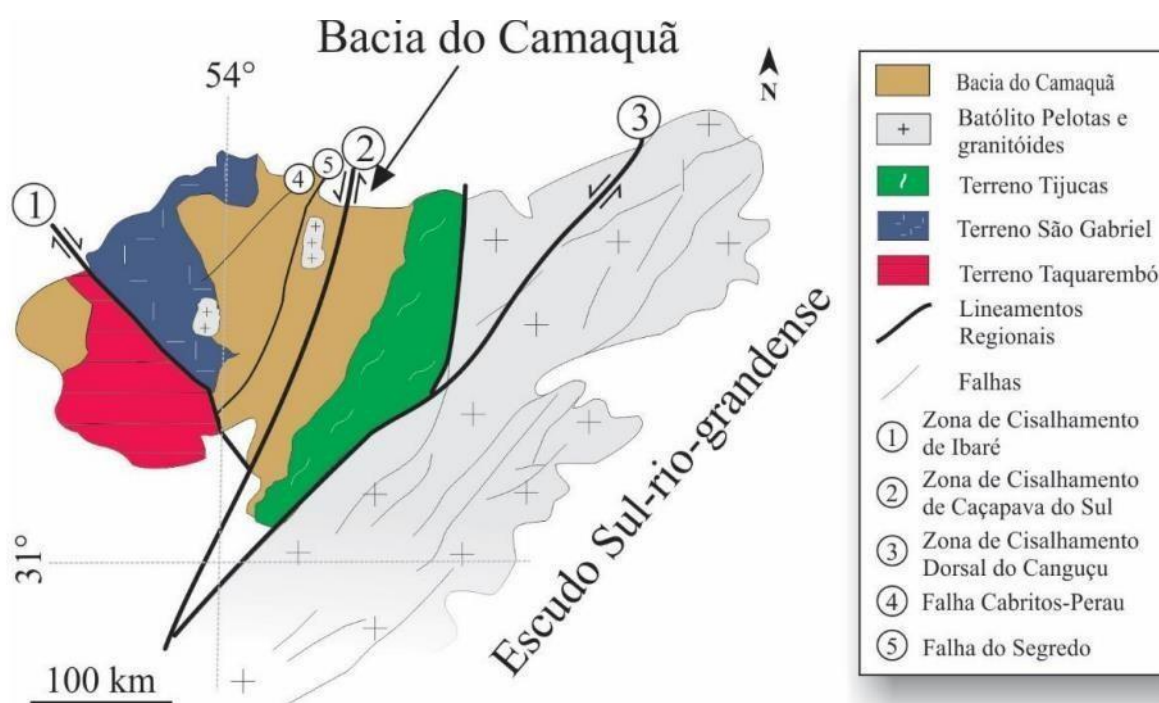
Já o Orógeno Dom Feliciano é composto por restos de embasamento (Arqueano-Paleoproterozoico), cadeia de arcos magmáticos e por uma sequência de margem passiva (Neoproterozoico). Graças à colisão dos crátons La Plata, Kalahari e Paranapanema, sua direção é de NE-SW. Sua evolução tectônica é do tipo

transpressiva (com escape lateral) e forma zonas de cisalhamento transcorrentes grandes e profundas (HARTMANN *et al.*, 2007).

A princípio, Solani Júnior (1986) dividiu o escudo em dois compartimentos tectônicos, o Batólito Pelotas, mais antigo, com intervalo de 850 – 550 Ma, e sua bacia marginal a oeste, com rochas metassedimentares de idade 760 – 640 Ma, o que aponta, também, um magmatismo polifásico que durou até 450 Ma e prolongou o ciclo brasileiro.

Posteriormente, o ESRG foi dividido em quatro diferentes unidades (CHEMALE JR., 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2014), o (i) Terreno Taquarembó, composto por intrusões graníticas brasileiras e sequências vulcanossedimentares do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. O (ii) Terreno São Gabriel, formado por remanescentes de um arco intra-oceânico e um mais jovem de margem continental ativa, além de que ambos são arcos magmáticos brasileiros. O (iii) Terreno Tijucas, composto por unidades litotectônicas de margens passiva e ativa e por um complexo neoproterozoico granítico-gnáissico. Por fim, o (iv) Batólito Pelotas, também chamado de Cinturão Dom Feliciano, que é um conjunto de suítes graníticas de idade entre 650 Ma – 590 Ma (HARTMANN *et al.*, 2007) (Figura 3).

Figura 3 - Mapa geológico esquemático mostrando os quatro terrenos pertencentes ao ESRG e a Bacia do Camaquã em sua cobertura.



Fonte: Hartmann et al. (2007), modificado por Lopes (2018).

O estudo de Frantz; Nardi (1992) aponta que a porção oriental do ESRG possui três fases principais de magmatismo granítico, com (i) tonalitos a trondhjemitos do evento brasileiro inicial associados a foliações de baixo ângulo e metamorfismo da fácies anfibolito. A fase transpressiva (ii) de orientação SW-NE, responsável pela formação de granitos cálcio-alcálicos e peraluminosos. E os granitos alcálicos da fase de magmatismo pós-orogênico (iii).

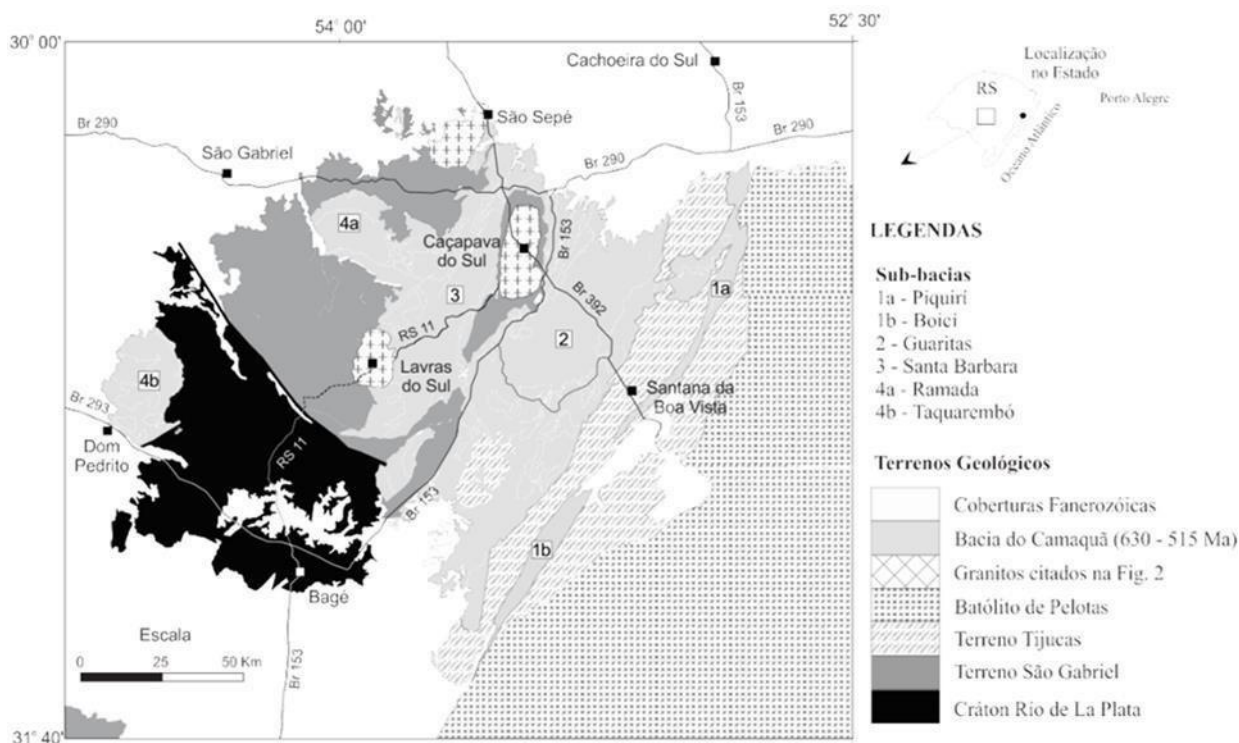
4.3 Bacia do Camaquã (BC)

A Bacia do Camaquã é uma bacia do tipo *strike-slip* (LIMA *et al.*, 2007) e está localizada na porção central do ESRG, limitada a leste pelos terrenos Tijuca e Dom Feliciano e sobre o Terreno São Gabriel e Cráton Rio de la Plata a oeste (PAIM *et al.*, 2014) (Figura 4). Sua formação dá-se do Neoproterozoico ao Ordoviciano no estágio final (pós-colisional) do ESRG durante o ciclo orogênico Brasileiro/Pan-Africano, é uma superimposição de muitas bacias independentes vulcanossedimentares de um mesmo locus deposicional (PAIM *et al.*, 2014, LOPES, 2018).

Dessa forma, a BC teve alguns ciclos vulcânicos (devido ao rifteamento e transcorrências dos blocos que a formaram). O primeiro ciclo, segundo Lima *et al.* (2007), foi o Vulcanismo Hilário, em que ocorreu derrames hipoabissais e a formação de tufos vulcânicos e brechas. Esse ciclo está associado a rochas shoshoníticas (mais ricas em potássio), com rochas intermediárias (andesíticas) a básicas.

O segundo ciclo é o Acampamento Velho, associado moderadamente a rochas alcalinas-sódicas (Na), com composição mais ácida. Diante disso, essa fase está relacionada aos estágios finais da cristalização do magma. O terceiro e último ciclo vulcânico é o do Grupo Rodeio Velho, com afinidade toleítica. Essas rochas têm composição básica, o que indica sua relação com o rifteamento da bacia (LIMA *et al.* 2007).

Figura 4 - Contexto geológico da Bacia do Camaquã no Rio Grande do Sul.



Fonte: Paim *et al.* (2014), adaptado de Chemale Jr. (2000).

4.3.1 Estratigrafia

Os autores Paim *et al.* (2000) definiram a Bacia do Camaquã como um superalótipo formado pelos grupos Guaritas, Santa Bárbara, Serra do Bugio, Bom Jardim e Maricá. O Grupo Guaritas é composto pelas formações Varzinha, Pedra Pintada e pelos andesitos Rodeio Velho. O Sta. Bárbara apresenta as formações Pedra do Segredo e Serra dos Lanceiros. O Grupo Serra do Bugio possui a Fm. Santa Fé e Fm. Acampamento, e por fim, o Grupo Bom Jardim, com a Formação Hilário. Os grupos Maricá e Bom Jardim são os mais antigos e apresentam algumas deformações associadas a falhas inversas, transcorrentes e de empurrão, o que indica um ambiente dúctil-rúptil, de contexto geotectônico transpressivo e compressivo (colisional), enquanto os grupos mais jovens representam um ambiente continental, influenciados pelo final da transcorrência sinistral (PAIM *et al.*, 2000).

O embasamento da BC é formado, do mais jovem ao mais antigo, por rochas graníticas, rochas metavulcanossedimentares, rochas graníticas do Cinturão Dom

Feliciano, rochas graníticas-gnáissicas e terrenos graníticos-gnáissicos de idade paleoproterozoica (PAIM *et al.*, 2000).

As rochas da Mina do Seival pertencem à Formação Hilário e à Formação Santa Fé, da Bacia do Camaquã, que compõem o contexto vulcano-pluto-sedimentar Seival, dentro do Cinturão Vila Nova. Basicamente, são associações entre intrusões graníticas e rochas vulcânicas intermediárias a básicas da referida bacia (CHEMALE, 2000), chamadas de Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (LIMA; NARDI, 1998; SOMMER *et al.*, 2006; LIZ *et al.*, 2009).

4.4 Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS)

A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS) é formada por rochas vulcânicas e intrusivas de composição básica a ácida, que têm afinidade com o magmatismo shoshonítico, e está localizado no sudoeste do ESRG. A ASLS também foi desenvolvida em um ambiente pós-colisional neoproterozoico, em que estão incluídos derrames de lavas, depósitos piroclásticos, diques, corpos subvulcânicos e intrusões mais profundas (LIZ *et al.*, 2009). As rochas vulcânicas e piroclásticas também estão associadas às rochas sedimentares clásticas, como arenitos e conglomerados (NARDI; LIMA, 1985).

Ao norte de Lavras, monzonitos e monzodioritos ocorrem como intrusões mais profundas, e outros como intrusões mais rasas, como é o caso dos monzonitos hipoabissais (mais novos – 587 Ma) que cortam rochas mais antigas da ASLS. Tais intrusões possuem estruturas e formatos relacionados ao colapso de caldeira, e são ressurgentes porque foram formadas após a primeira fase do magmatismo (LIZ *et al.*, 2009).

Minerais comuns nas rochas da ASLS são plagioclásio, feldspato, hornblenda, augita e biotita, embora possuam uma mineralogia bastante variada. Como minerais acessórios podem aparecer zircão, apatita e titanita (LIZ *et al.*, 2009). Quanto às características texturais das rochas da associação, podem ser equigranulares a porfíricas, o que estabelece diferentes condições de resfriamento do magma ao longo da evolução dessas rochas. Além disso, tipicamente de magmas shoshoníticos, as rochas geoquimicamente possuem Rb, Sr, Ba e ETR (NARDI; LIMA, 1985; LIZ *et al.*, 2009).

4.4.1 Complexo Granítico Lavras (CGL)

O trabalho de Nardi (1984) caracterizou o Complexo Granítico Lavras. De acordo com o autor, o complexo é formado por uma parte central granodiorítica que é parcialmente assimilada por magmas graníticos mais recentes; o núcleo é mais antigo do que as rochas associadas ao magmatismo posterior. Tal processo de assimilação originou os chamados *perthite* granitos, que só não está na borda leste do complexo. Assim, foram originadas rochas híbridas de características intermediárias dos dois litotipos e que exibem textura *rapakivi*. Os *perthite* granitos estão associados a suítes magmáticas de afinidade alcalina e cortam as rochas vulcanossedimentares de Volta Grande e as rochas sedimentares da Fm. Maricá, que fica ao sul do Complexo. As rochas do centro do complexo apresentam assinatura geoquímica semelhante a séries shoshoníticas e/ou monzoníticas, segundo Tauson (1983).

O estudo de Nardi (1984) aponta a grande relevância da região de Lavras do Sul devido as ocorrências de ouro e cobre, que estão presentes tanto no CGL, quanto nas sequências vulcanossedimentares. Segundo o autor, as mineralizações da região possuem características típicas de depósito do tipo pórfiro de cobre.

4.5 Metalogênese

Os lineamentos da região das Minas de Seival possuem direção N40°E a E-W e apresentam numerosos veios/brechas de quartzo associados a halos de alteração das rochas encaixantes, graníticas e/ou vulcânicas, que contêm minerais como sericita, clorita, pirita, calcopirita e os minérios Au-Cu, associados a intenso processo de cataclase e brechação (TEIXEIRA; LEINZ, 1942; KAUL; RHEINHEIMER 1974).

De acordo com Lopes *et al.* (2014), as anomalias conhecidas de cobre foram geradas pela circulação de fluidos hidrotermais e possuem direção N40–60°E/70–88°NW, associadas a veios de calcita, enquanto as estruturas profundas, resultantes da reativação das zonas de cisalhamento regionais, de direção NW-SE e NE-SW, estão relacionadas à circulação de fluidos, aos filões vulcânicos e às mineralizações.

Devido aos eventos hidrotermais que afetaram as rochas vulcânicas, o sistema de falhas, consideradas transcorrentes, deu origem à brecha hidráulica e mineralização associadas aos lineamentos estruturais (LOPES *et al.*, 2014, 2018,

2019; FONTANA *et al.*, 2017; 2019). A conexão entre a distribuição das alterações hidrotermais em zonas de falha e a as litologias da região sugerem um processo de recarga vertical (REISCHEL, 1978; LOPES *et al.*, 2014).

As zonas de cisalhamento de orientação NE-SW que cruzam a Bacia de Camaquã, segundo Philipp *et al.* (2016), devem ter atuado na concentração das mineralizações da área, onde as estruturas de direção NW-SE e NE-SW seriam as principais condicionantes no controle do fluxo hidrotermal, intrusão de diques e direcionamento das mineralizações. Assim, os depósitos de sulfeto Cu-Pb e Au podem estar condicionados pelos lineamentos N-S que hospedam os granitos da região.

Na atualidade, as principais mineralizações do Escudo Sul-Rio-Grandense são sulfetos de Cu, Pb e Zn, que podem ou não estar associados a metais preciosos, como Au e Ag (LAUX *et al.* 2021). Segundo Chemale Júnior (2010), essas mineralizações são intrínsecas à compartimentação tectônica, ligada a três eventos ocorridos na Orogênese Brasileira (900-535 Ma), a formação do Arco de São Gabriel, a formação do Batólito Torquaro Severo e a aglutinação dos terrenos formadores do ESRG, que possuem granitoides e vulcânicas.

No estudo de Laux *et al.* (2021) fazem a divisão baseada em outro contexto tectônico, com a maioria das minas e ocorrências da região inseridas em três ambientes, as sequências metavulcanossedimentares do Arco de São Gabriel, os granitos e vulcânicas com assinatura geoquímica cálcico-alcálica a shoshonítica e os sedimentos da Bacia do Camaquã. Essas sequências do primeiro ambiente são intra-arco e estão correlacionadas à formação do Arco São Gabriel, Cinturão Vacacaí, já os outros dois são inerentes entre si pelos processos de aglutinação do referido arco com os terrenos Taquarembó, Tijucas e Batólito Torquarto Severo e pela sequência vulcanossedimentar gerada durante esta aglutinação, a Bacia de Camaquã (LAUX *et al.*, 2021).

5 GEOLOGIA DA MINA DO SEIVAL

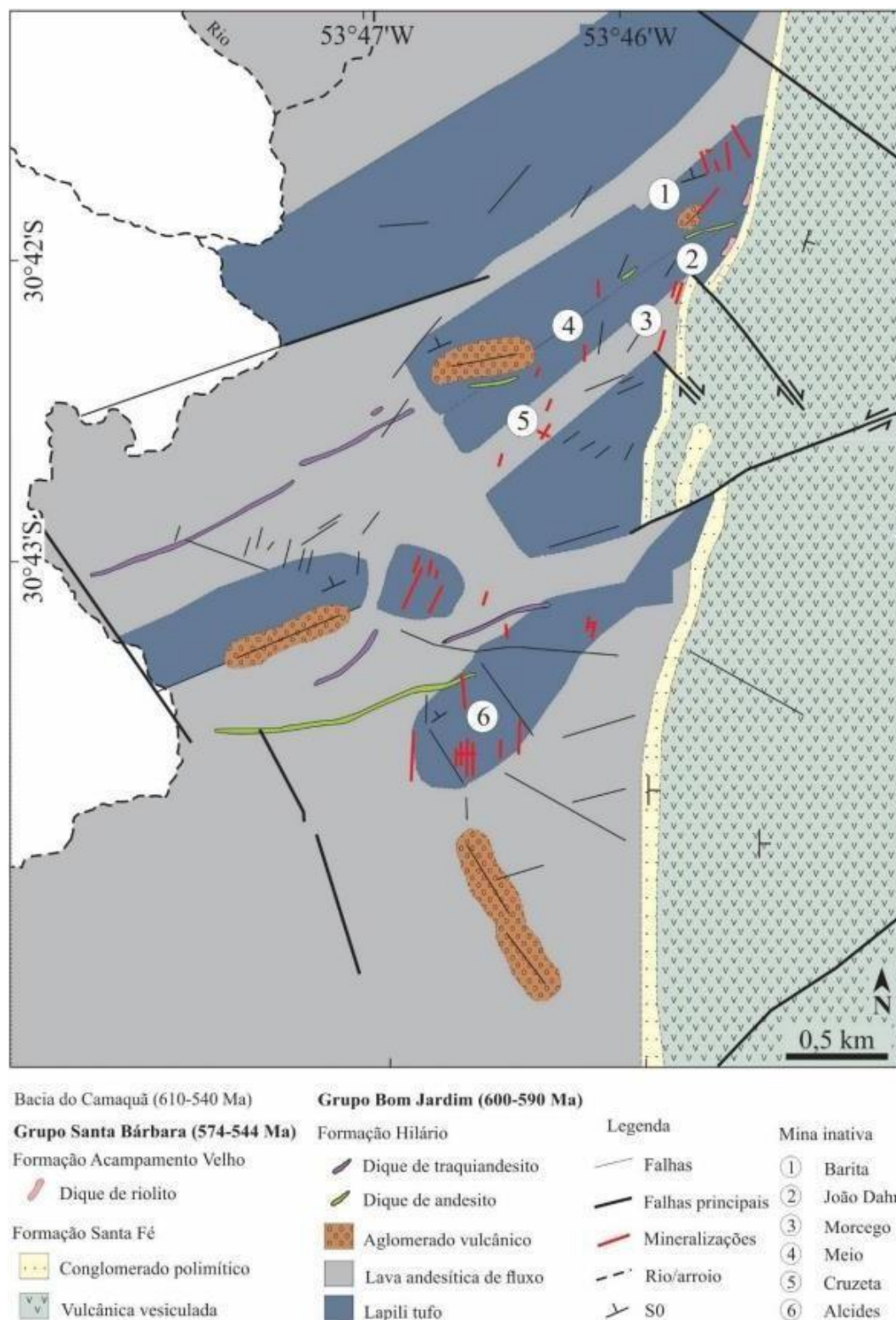
Os principais litotipos encontrados na Mina do Seival são brechas vulcânicas e andesitos em forma de corpos hipoabissais, ambos da Formação Hilário. Esses corpos andesíticos afloram como diques intrusivos nas rochas piroclásticas e possuem orientação NE-SW. A composição dessa fácies é marcada por plagioclásio, piroxênio e anfibólio, e muitas vezes aparecem brechadas graças aos eventos de hidrotermalismo que atuaram durante sua formação. O sistema de falhas que afeta essa formação possui direção NW, e pode ser correlacionado à chamada Zona de Cisalhamento Ibaré (LOPES, 2011; 2018).

A outra formação que aparece na área é a Santa Fé, que ocorre como camadas centimétricas a decamétricas de conglomerados clastossuportados e polimíticos, além de andesitos, normalmente vesiculados, com matriz composta por plagioclásio. Essas vesículas não ocorrem nos andesitos da Formação Hilário, por isso são diferenciados. As rochas da Fm. Santa Fé aparecem com alto grau de fraturamento próximas ao contato com a Fm. Hilário. No geral, as rochas da área são muito fraturadas, o que evidencia cisalhamento rúptil, com fraturas de orientação NE-SW (LOPES, 2011; 2014, 2018).

A maioria dessas fraturas resulta da reativação das zonas de cisalhamento de direção NE, que por sua vez tem sua orientação controlada pelos eventos do ciclo brasileiro que afetaram o Escudo Sul-Rio-Grandense. Inclusive, as falhas presentes de direção NW truncam e deslocam outras falhas, mas de direção NE. O que pode ser atribuído a isso são os fortes eventos hidrotermais que marcam as rochas vulcânicas da área, pois quanto mais próximas dos lineamentos, mais significativamente estão com efeitos aparentes de hidrotermalismo (LOPES, 2011; 2018).

Por fim, também há os materiais mais recentes, que estão localizadas na parte oeste da Mina do Seival, em Arroio Teixeira. São depósitos aluvionares compostos por areias de granulometria fina a grossa, mineralogia caracterizada por grãos quartzo-feldspáticos e ambiente deposicional do tipo fluvial (LOPES, 2011; 2018). Além disso, próximos da área também afloram os granitos da Suíte Granítica de Lavras do sul (LIMA, 2007). A Figura 5 é um mapa geológico da região.

Figura 5 - Mapa geológico regional onde estão inseridas as seis pequenas minas da Mina do Seival. A Mina Alcides é informada pelo número 6.



Fonte: adaptado de Reischl (1978) por Lopes (2014).

As rochas aflorantes na Mina Alcides (Figura 6) são lapili tufos da Formação Hilário, Grupo Bom Jardim, que pertence à ASLS.

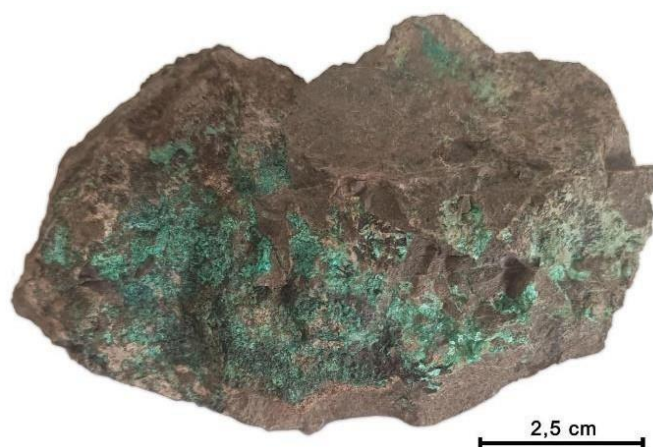
Figura 6 - Mina Alcides.



Fonte: autoria própria.

Em amostras dessa rocha vulcânica encontradas ao longo das proximidades da mina, podem ser observadas malaquita (Figura 7), mineral de minério de cobre.

Figura 7 - Amostra de lapili tufo com malaquita.



Fonte: autoria própria.

6 MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente trabalho foi utilizado o método geofísico da gamaespectrometria, baseada em medidas da intensidade de radiação gama proveniente de rochas e solos que possuem naturalmente K (potássio), U (urânio) e Th (tório).

6.1 Fundamentos físico-químicos da gamaespectrometria

6.1.1 Radioatividade e decaimento radioativo

Os átomos constituem as menores unidades da matéria e apresentam um núcleo central circundado por elétrons. Esse núcleo é formado por partículas com carga positiva, chamadas prótons, e por partículas neutras, os nêutrons. Os isótopos são definidos como átomos que apresentam a mesma quantidade de prótons, isto é, mesmo número atômico, mas diferentes quantidades de nêutrons, assim apresentam propriedades químicas idênticas e físicas distintas. Dito isto, os nuclídeos são átomos caracterizados por uma composição específica de prótons e nêutrons em seu núcleo (IAEA, 2003).

Número de nêutrons = N

Número de prótons = Z = número atômico

Massa = $N + Z = A$

O fenômeno da radioatividade é um processo que ocorre para que o núcleo de um átomo alcance uma configuração mais estável na natureza, pois em alguns elementos químicos, o equilíbrio entre essas partículas é instável, ou seja, a radioatividade é uma emissão natural de radiações por núcleos de elementos instáveis, para ficarem estáveis, após serem transformados em outros núcleos, chamados de núcleos-filhos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

O núcleo atômico é composto por prótons e nêutrons, que são mantidos em harmonia por meio da força nuclear, entretanto, essa força possui distância limitada, com os prótons (carregados positivamente) sofrendo repulsão eletrostática. Essa repulsão, quando supera a força de coesão no caso de elementos com número

atômico (prótons) elevado, causa a instabilidade do núcleo. Assim, as desintegrações nucleares buscam recuperar a estabilidade ao formarem os núcleos-filhos (outros elementos), acompanhados da emissão de radiação (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

O trabalho de Gilmore (2008) caracteriza o decaimento radioativo como um processo exoenergético e espontâneo do núcleo de um átomo, que resulta na emissão de partículas ou radiação eletromagnética. Para o autor, o decaimento é um regime de perda de massa, ao passo que a massa dos produtos sempre é menor que a do nuclídeo original.

A lei de decaimento radioativo é expressa pelo número de átomos desintegrados em função do tempo, conforme a Equação 1, enquanto o decaimento de metade dos radionuclídeos é dado pela constante de meia-vida, observada na Equação 2.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2)$$

Onde:

N_t = número de átomos após o tempo;

N_0 = número de átomos em $t = 0$;

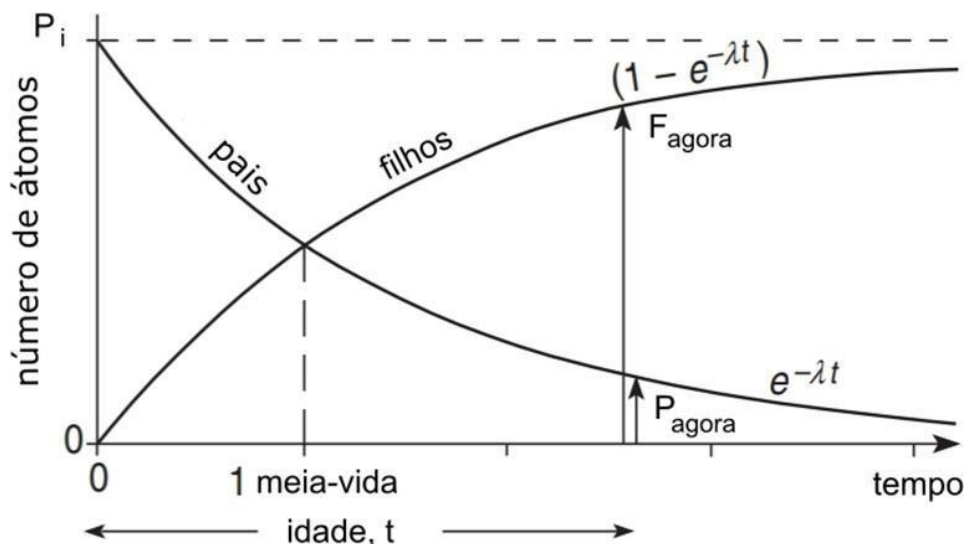
e = base do logaritmo;

λ = constante de decaimento;

$T_{1/2}$ = meia-vida.

Assim, a constante de decaimento e a meia-vida dos átomos possuem uma relação direta, uma vez que o decaimento fica cada vez mais lento conforme a meia-vida aumenta, o que implica em uma constante de decaimento menor. Diante disso, quando passa o intervalo de uma meia-vida, a quantidade de núcleos-pai restantes fica igualada à de núcleos-filhos (MUSSET; KHAN, 2000). A Figura 8 abaixo apresenta essa relação do número de átomos em função do tempo, ao passo que demonstra também a relação entre a meia-vida e a constante de decaimento:

Figura 8 - Diagrama demonstra a relação em função do tempo do número de átomos no decaimento radioativo e meia-vida, assim apresenta a relação das curvas entre os núcleos-pais e núcleos-filhos.



Fonte: Adaptado de Mussett & Khan (2000).

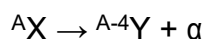
Existem três tipos de radiação, a alfa (α), beta (β) e gama (γ). A radiação α apresenta carga elétrica +2, massa alta e é a com menor poder de penetração. A β é dividida em dois tipos de emissões, β^- (elétrons) e β^+ (pósitrons), desta forma, possui carga elétrica -1 ou +1; seu poder de penetração é mediano. Já a radiação γ diz respeito a uma onda eletromagnética de alta frequência, sem apresentar carga ou massa, tendo o maior poder de penetração dentre as três (OKUNO; YOSHIMURA, 2010) e menor poder ionizante (LIMA, 2014).

Na emissão alfa (α), a carga nuclear diminui em duas unidades e a massa é reduzida em outras quatro unidades:

$$Z \rightarrow Z - 2$$

$$A \rightarrow A - 4$$

Conforme a seguinte demonstração:



Assim, de acordo com Gilmore (2008), é liberada uma quantidade de energia de natureza monoenergética bem definida, que está atrelada à diferença de massa entre o núcleo inicial e os produtos. Essa energia é dada conforme a relação da Equação 3:

$$\Delta E = \Delta m \times c^2 \quad (3)$$

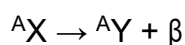
Onde:

ΔE = energia;

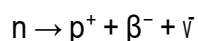
Δm = massa;

c = constante de velocidade da luz.

Já as partículas betas (β) (elétrons ou pósitrons) são emitidas quando ocorre o processo de transformação de prótons em nêutrons ou nêutrons em prótons. As emissões aparecem acompanhadas da liberação de antineutrinos ou neutrinos, o que garante a conservação de energia e momento angular da transição. A diferença de massa entre o núcleo inicial e o núcleo resultante é a força motriz desse processo, que gera uma energia compartilhada de espectro contínuo e que varia de valores muito baixos até o valor máximo ($E_{\beta\text{máx}}$), sem possuírem energia única, como as partículas alfa (GILMORE, 2008). Assim, o decaimento beta pode ser demonstrado por:



Quando um nêutron não está ligado a um núcleo, decai por emissão beta:



O valor mínimo da diferença de massa entre os núcleos para a emissão de pósitrons é de 1,022 MeV, que diz respeito à soma de massa das duas partículas, em que é formado um par elétron-pósitron (GILMORE, 2008).

A radiação gama (γ), diferentemente da alfa e beta, não altera o número atômico e nem a massa do núcleo; é apenas um processo de liberação de energia (GILMORE, 2008; OKUNO; YOSHIMURA, 2010; LIMA, 2014), com fótons de alta energia emitidos pelo núcleo durante transições entre outros níveis de energia, além de fornecer características específicas à radiação gama para cada elemento (GILMORE, 2008; OKUNO; YOSHIMURA, 2010). A força motriz desse regime é o estado de excitação no qual o núcleo permanece após alguma transformação de decaimento α - ou β -, em que é necessário eliminar esse excesso de energia para atingir sua estabilidade (GILMORE, 2008).

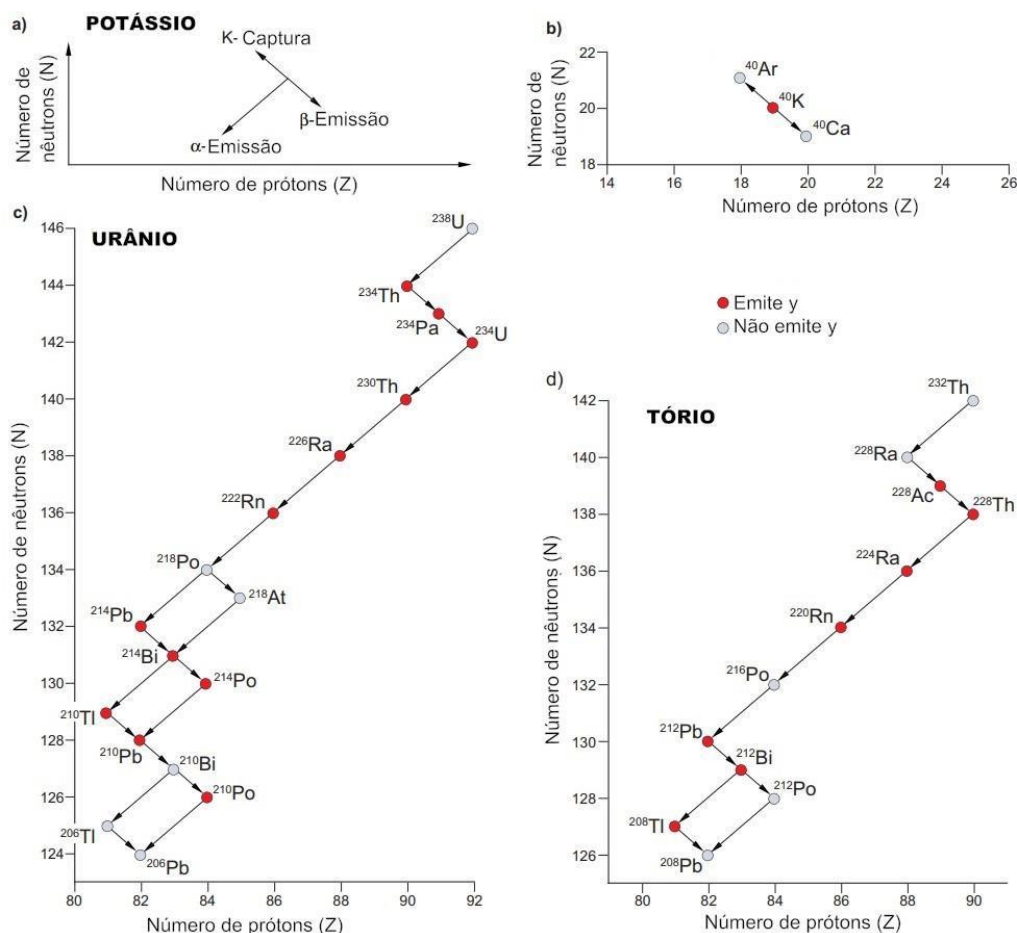
Outro processo que emite essa radiação é o preenchimento da vacância do elétron, que emite uma radiação eletromagnética de baixa energia, e a captura de elétrons, quando o elétron orbital de um átomo é absorvido pelo núcleo atômico (IAEA, 2003). Segundo Lima (2014), a radiação gama é altamente energética (acima de 0,1 MeV) porque tem alta frequência (maior que 10^{19} Hz) e baixo comprimento de onda (menor que 10^{-12} m).



Embora as partículas gama tenham maior grau de penetração se comparadas às outras, não possuem um limite fixo de alcance, pois sua intensidade diminui à medida que atravessam a matéria. Na atmosfera, podem ser detectadas até 100 metros de distância, enquanto em rochas o alcance é reduzido (MUSSET; KHAN, 2000).

Os raios gama são uma forma de radiação eletromagnética que é gerada durante o processo de decaimento radioativo de elementos que geralmente estão presentes em todos os solos e rochas, embora em quantidades mínimas. As principais fontes radioativas são o ${}^{40}\text{K}$, bem como as séries de decaimento do ${}^{238}\text{U}$ e do ${}^{232}\text{Th}$ (Figura 9 e Tabela 1), que possuem isótopos radioativos de longa vida (MUSSET; KHAN, 2000; IAEA, 2003, GILMORE, 2008).

Figura 9 - Alterações no número atômico (Z) e no número de nêutrons (N) associadas ao decaimento radioativo. (a) Esquema com as mudanças associadas às emissões α e β e à captura-K (não há alterações em Z e N na emissão γ); (b) linhas espectrais do ${}^{40}\text{K}$; (c) série do ${}^{238}\text{U}$; e (d) série do ${}^{232}\text{Th}$.



Fonte: adaptado de Dentith; Mudge (2014).

Tabela 1 - Decaimento radioativo natural dos isótopos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K e energia y emitida em MeV.

Decaimento ^{238}U	Energia y (MeV)
$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\alpha$	0,09; 0,6; 0,3
$^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{234}_{91}\text{Pa} + ^0_{-1}\beta$	1,01; 0,77; 0,04
$^{234}_{91}\text{Pa} \rightarrow ^{234}_{92}\text{U} + ^0_{-1}\beta$	0,05
$^{234}_{92}\text{U} \rightarrow ^{230}_{90}\text{Th} + ^4_2\alpha$	-
$^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{226}_{88}\text{Ra} + ^4_2\alpha$	-
$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\alpha$	0,19
$^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{218}_{84}\text{Po} + ^4_2\alpha$	-
$^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{214}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$	-
$^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}\beta$	0,35; 0,24; 0,29; 0,05
$^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{214}_{84}\text{Po} + ^0_{-1}\beta$	2,43; 2,20; 1,76; 1,38
$^{214}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{210}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$	-
$^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{210}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}\beta$	-
$^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{210}_{84}\text{Po} + ^0_{-1}\beta$	0,04
$^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$	-
Decaimento ^{232}Th	Energia y (MeV)
$^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{228}_{88}\text{Ra} + ^4_2\alpha$	0,06
$^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{228}_{89}\text{Ac} + ^0_{-1}\beta$	-
$^{228}_{89}\text{Ac} \rightarrow ^{228}_{90}\text{Th} + ^0_{-1}\beta$	1,64; 1,59; 0,99; 0,97
$^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra} + ^4_2\alpha$	-
$^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn} + ^4_2\alpha$	-
$^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{216}_{84}\text{Po} + ^4_2\alpha$	-
$^{216}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{212}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$	-
$^{212}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{212}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}\beta$	0,30; 0,24; 0,18; 0,12
$^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{212}_{84}\text{Po} + ^0_{-1}\beta$	1,18; 0,83; 0,73
$^{212}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{212}_{85}\text{Bi} + ^0_{-1}\beta$	-
$^{212}_{85}\text{Bi} \rightarrow ^{208}_{83}\text{Tl} + ^4_2\alpha$	-
$^{208}_{83}\text{Tl} \rightarrow ^{208}_{84}\text{Pb} + ^0_{-1}\beta$	2,62; 0,86; 0,58; 0,51
Decaimento ^{40}K	Energia y (MeV)
$^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + ^0_{-1}\beta$	-
$^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar} + ^0_{+1}\beta$	1,46

Fonte: adaptado de Milsom (2003).

O ^{40}K é um isótopo que pode ser transformado por dois principais processos. O mais comum é responsável por aproximadamente 89% das ocorrências, em que há a emissão de β^- , que decai para cálcio-40 (^{40}Ca). No segundo caso, há captura de elétron, com decaimento para argônio-40 (^{40}Ar), que fundamenta o método de datação de K-Ar. A meia-vida estimada do ^{40}K é de 1,25 bilhões de anos (MUSSET; KHAN, 2000).

Os principais isótopos de U são o ^{238}U e ^{235}U . O primeiro possui uma longa cadeia de transformações e emite partículas tanto alfa, quanto beta, originando o chumbo-206 (^{206}Pb), enquanto o segundo decai para chumbo-207 (^{207}Pb) (MUSSET; KHAN, 2000; IAEA, 2003). A meia-vida do ^{238}U e ^{235}U é 4,47 bilhões e 704 milhões, respectivamente (MUSSET; KHAN, 2000; GILMORE, 2008). Nos decaimentos desses dois isótopos são emitidas radiações gama detectáveis por equipamentos radiométricos (MUSSET; KHAN, 2000).

Quase 100% do Th natural é representado pelo isótopo ^{232}Th , cuja meia-vida é de aproximadamente 14,05 bilhões de anos, o que o torna um dos elementos radioativos com maior preservação na natureza e com maior estabilidade temporal. O decaimento desse isótopo ocorre principalmente por emissões de partículas α , que resultam no ^{208}Pb (MUSSET; KHAN, 2000). Os isótopos ^{238}U e ^{232}Th não emitem radiação gama, então as estimativas de suas concentrações são tomadas pelos raios gama emitidos pelos seus produtos de decaimento (IAEA, 2003).

6.1.2 Elementos radioativos no meio geológico

O urânio (U), tório (Th) e potássio (K) são os elementos radioativos mais relevantes presentes nas rochas, por isso são os principais em estudos geofísicos e geológicos pautados em prospecção radiométrica, pois fornecem informações sobre origem e evolução das rochas e potenciais áreas exploratórias para o setor mineral (MUSSET; KHAN, 2000).

Na natureza, a distribuição desses elementos é desigual e condicionada por processos geoquímicos. O K é o mais abundante na crosta terrestre, pois está presente em minerais mais comuns, como micas e feldspatos, mas apenas uma pequena fração é radioativa, que é o isótopo ^{40}K , detectável em levantamentos radiométricos. Enquanto os elementos U e Th são pouco abundantes e ocorrem em

concentrações mais baixas nas rochas, mas com teores elevados em minerais específicos, como uraninita, zircão e monazita (MUSSET; KHAN, 2000). Os minerais que contêm esses elementos estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Minerais que contêm os elementos radioativos e suas porcentagens.

Mineral	Fórmula	%K	%U	%Th
Feldspatos				
Ortoclásio	KAlSi_3O_8	14,05	-	-
Microclínio	KAlSi_3O_8	14,05	-	-
Sanidina	$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	10,69	-	-
Anortoclásio	$(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	3,67	-	-
Micas				
Biotita	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	9,02	-	-
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	9,81	-	-
Foglopita	$\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$	9,33	-	-
Glauconita	$\text{K}(\text{Fe}^{3+},\text{Al})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,49	-	-
Argilominerais				
Ilita	$\text{K}_y\text{Al}_4(\text{Si}_{8-y}\text{Al})\text{O}_{20}(\text{OH})_2$	6.03	-	-
Minerais de U e Th				
Branerita	$(\text{U},\text{Ca},\text{Ce})(\text{Ti},\text{Fe})_2\text{O}_2$	-	33,54	-
Carnotita	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 1-3\text{H}_2\text{O}$	8,67	52,77	-
Cofinita	$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	-	72,63	-
Monazita	$(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\text{Th},\text{Y})\text{PO}_4$	-	-	4,83
Torita	$(\text{Th})\text{SiO}_4$	-	-	71,59
Uraninita (pechblenda)	UO_2	-	88,15	-
Uranofânio	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-	40,59	-

Fonte: adaptado de Dentith; Mudge (2014).

Na crosta terrestre, o potássio, urânio e tório têm abundâncias de aproximadamente 3%, 3 ppm e 12 ppm, respectivamente (WILFORD *et al.*, 1997). O ^{40}K representa cerca de 0,012% do potássio total (WILFORD *et al.*, 1997; MUSSET; KHAN, 2000), o ^{238}U constitui 99,3% do urânio total, enquanto o ^{232}Th compõe 100% do tório total (WILFORD *et al.*, 1997). O isótopo ^{40}K possui uma parcela fixa do K na natureza, o que permite que a sua radioatividade possa ser usada para estimar a quantidade de K presente em determinada área (IAEA, 2003).

Esses elementos radioativos possuem maior concentração em rochas félsicas, como granitos e riolitos, graças à evolução magmática delas, em que ocorre sua concentração em minerais acessórios durante a cristalização fracionada. Já em rochas máficas, como gabros e basaltos, a quantidade costuma ser menor, e em rochas sedimentares, especificamente arenitos, podem ser enriquecidos em U e Th se formados em ambientes redutores (MUSSET; KHAN, 2000).

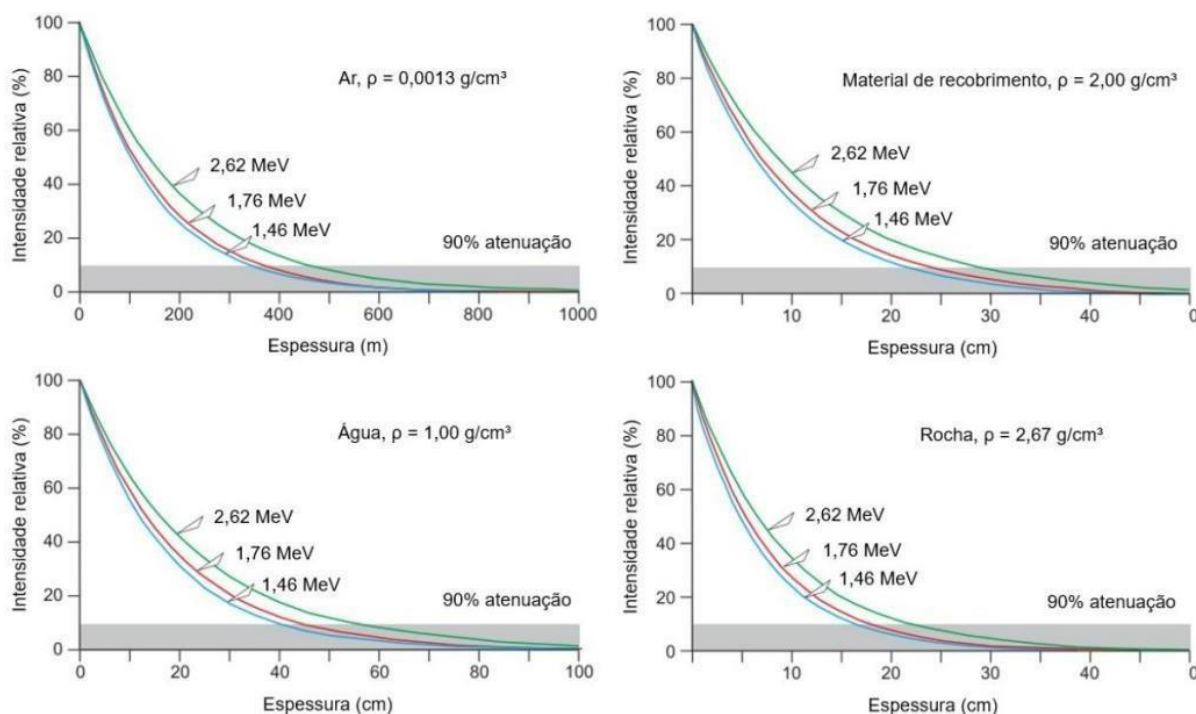
As proporções desses elementos são úteis tanto para diferenciar litologias, quanto identificar anomalias que indiquem mineralizações, como é o caso dos depósitos de cobre associados a hidrotermalismo na área da presente pesquisa, e embora pertençam ao grupo dos litófilos (GILMORE, 2008) e se concentrem mais em rochas félsicas e minerais silicáticos ((MUSSET; KHAN, 2000); DENTITH; MUDGE, 2014), possuem diferentes níveis de mobilidade natural (DENTITH; MUDGE, 2014), que é ocasionada por processos geológicos e intemperismo.

Em síntese, o K ocorre em rochas ígneas ácidas, em pegmatitos, alterações de rochas vulcânicas ácidas e depósitos salinos sedimentares. O Th pode aparecer em granitos, pegmatitos, gnaisses e pláceres. E o U em granitos, pegmatitos e associados e veios mineralizados de Au, Pb e Cu, arenitos e associado à uraninita (DENTITH; MUDGE, 2014).

6.1.3 Atenuação e absorção da radiação

Naturalmente, a radiação dos radioisótopos sofre processos de atenuação e de absorção quando interagem com a matéria (GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014). O coeficiente de atenuação é a medida da redução da intensidade da radiação gama à medida que atravessa o ar, água, solos e rochas (Figura 10), e é controlado pela densidade, espessura e composição química da matéria (GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014), enquanto o coeficiente de absorção já é a quantidade de radiação gama que consegue ficar retida na matéria, e é controlada por propriedades físicas e mineralógicas dela, como porosidade, grau de intemperismo e presença de água (GILMORE, 2008).

Figura 10 - Atenuação dos raios gama em diferentes meios.



Fonte: adaptado de Dentith; Mudge (2014).

Outros meios da matéria que influenciam no coeficiente de atenuação dos raios gama são os solos residuais/regolitos, paleossuperfícies muito intemperizadas, o acúmulo de minerais resistentes e óxidos, erosão, rochas expostas, lixiviação de elementos solúveis (como o K), além de processos hidrológicos, como fluxo e descarga de água subterrâneas, ascensão capilar e iluviação. A formação de solos e depósitos aluvionares também geram mais heterogeneidades (DENTITH; MUDGE, 2014).

6.1.4 Mobilidade do U, Th e K

A mobilização de elementos ocorre devido a processos supergênicos e à ação de fluidos hidrotermais. Esse transporte segue a mesma lógica dos processos erosivos e intempéricos, ocorrendo das áreas mais elevadas até regiões mais baixas do relevo (MCSWEEN *et al.*, 2003; GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014).

O K é o mais móvel dos três elementos, também o mais volátil (IAEA, 2003; GILMORE, 2008). É um elemento incompatível (IAEA, 2003; GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014), concentrado no magma residual durante a cristalização

fracionada e em minerais acessórios, como zircão e apatita, além de monazita, e em minerais não-acessórios, como micas e feldspatos (DENTITH; MUDGE, 2014). Em rochas metamorfizadas e alteradas, possui mobilidade intermediária durante processos de albitização, potassificação e sericitização. Em rochas sedimentares também está presente em feldspatos e micas, com enriquecimento de argilominerais, com sua concentração variando conforme a mineralogia e o grau de alteração. Assim, esses minerais mais instáveis liberam o K durante o intemperismo, mas também pode ser acumulado em minerais secundários de argilas, principalmente (DENTITH; MUDGE, 2014).

O U possui mobilidade intermediária, móvel em processos hidrotermais e supergênicos (GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014). Em rochas magmáticas é considerado altamente incompatível, então sua concentração ocorre no magma residual por acúmulo progressivo originado da cristalização fracionada e em minerais acessórios, como o zircão, apatita, uraninita, entre outros (MUSSET; KHAN, 2000; DENTITH; MUDGE, 2014). Durante processos metamórficos, apresenta alta mobilidade, principalmente em condições oxidantes e quando há fluidos hidrotermais, assim, muitas vezes, é transportado e reprecipitado (GILMORE, 2008; DENTITH; MUDGE, 2014). Em ambientes sedimentares, o U é fortemente controlado por processos redox e ocorre de forma solúvel em ambientes oxidantes como U^{6+} e precipita em condições redutoras como U^{4+} (DENTITH; MUDGE, 2014). Na superfície, o U também é bastante móvel, pode ser migrado por processos de intemperismo, lixiviação e erosão e formar zonas de enriquecimento secundário, como concreções e frentes de oxidação (DENTITH; MUDGE, 2014), além de poder ser acumulado em drenagens.

Diferentemente dos outros dois elementos, o Th é imóvel (GILMORE, 2008), mas também é incompatível e está concentrado em minerais acessórios. Essa baixa mobilidade ocorre em todos os ambientes geológicos, com resistência a metamorfismo, hidrotermalismo e a outros intensos processos de alteração. É bastante estável em rochas sedimentares com minerais pesados e resistente a intemperismos (DENTITH; MUDGE, 2014).

6.2 Gamaespectrometria

A gamaespectrometria é um método geofísico passivo que utiliza a relação entre radionuclídeos e a energia de raios gama emitidos. Como cada um dos isótopos radioativos liberam uma energia característica, é possível distinguir a radiação proveniente do potássio (K) em relação à do urânio (U) ou tório (Th). O método utiliza equipamentos que detectam e convertem a energia radioativa em pulsos elétricos (GILMORE, 2008).

O gamaespectrômetro opera por meio de canais (Tabela 3) e mede a radiação gama em bandas de energia discretas, estreitas e pré-definidas e fornecem informações sobre a geoquímica da fonte radioativa, e é calibrado à energia dos radionuclídeos de interesse geológico, que é medida em Volts (eV) (potencial elétrico de um volt da energia de um elétron quando acelerado) (DENTITH; MUDGE, 2014).

Tabela 3 - Canais de energia radioativa durante a aquisição de dados.

Canal	Nuclídeo-alvo	Energia (MeV)
Contagem total	-	0,410-2,810
Potássio	^{40}K (1,460 MeV)	1,370-1,570
Urânio	^{214}Bi (1,765 MeV) dentro da série do ^{238}U	1,660-1,860
Tório	^{208}Tl (2,614 MeV) dentro da série do ^{232}Th	2,410-2,810

Fonte: adaptado de IAEA (1991).

6.2.1 Gamaespectrometria para depósitos associados a hidrotermalismo

O estudo feito por Shives *et al.* (2000) tem como foco a aplicação da radiometria (terrestre e aerotransportada) na exploração mineral. Os autores enfatizam a detecção de alterações potássicas relacionadas a sistemas hidrotermais mineralizados (depósito polimetálico magmático-hidrotermal), entre os quais há depósitos pórfiros de cobre. Nesse caso, é compreendido pelos autores que os processos hidrotermais responsáveis pela gênese de mineralizações em pórfiros de Cu-Au-Mo (cobre-ouro-molibdênio) são acompanhados por enriquecimento em potássio e modificações químicas detectáveis por meio da radiação natural emitida pelos radioisótopos. Logo,

a gamaespectrometria atua de forma indireta, ao identificar halos de alteração hidrotermal que servem como guia prospectivo, em vez de detectar os metais em si.

Também foi determinado que a razão K/eTh é a mais confiável para reconhecer alteração potássica em depósitos polimetálicos magmático-hidrotermais, uma vez que as anomalias de potássio coincidem com fortes anomalias magnéticas, típicas desse tipo de depósito, e são acompanhadas por valores baixos da razão eTh/K , o que reforça o caráter hidrotermal da alteração. Contudo, em regiões de clima tropical, onde o intemperismo químico e grau de alteração são mais intensos, o K é mais móvel do que o tório. Assim, o K passa a ser redistribuído, enquanto o Th não, o que reduz a confiabilidade dessa relação nesse tipo de ambiente (SHIVES *et al.*, 2000).

O trabalho de Dutra (2019) também utiliza o método da gamaespectrometria aplicada à exploração mineral, embora tenha sido por meio de aerolevanteamento. Esse estudo foi realizado na Província Mineral de Carajás, com foco em depósitos do tipo óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) por meio de zonas de alteração hidrotermal. O autor analisa as concentrações de K, U e Th, suas razões e valores anômalos de K, que somados puderam apontar as áreas alteradas. Foi identificado que as alterações hidrotermais foram mais intensas ao sul da área, próximas a zonas de cisalhamento e no contato entre o Supergrupo Itacaiúnas e o Complexo Xingu. Tais resultados puderam indicar indiretamente potenciais mineralizações de Cu-Au relacionadas às zonas de alteração anômalas (DUTRA, 2019).

A pesquisa realizada por Essa *et al.* (2022) faz uso de aerolevanteamento magnético e radiométrico. O objetivo foi delimitar zonas de potenciais mineralizações de estruturas tectônicas. Confeccionaram mapas de intensidade para cada método, além de sinais analíticos e outros métodos espectrais para interpretação estrutural. Os resultados indicaram que as anomalias gamaespectrométricas estavam concentradas em zonas estruturalmente controladas, associadas a lineamentos e falhas. Essas áreas, integradas com outros resultados, sugeriram condições favoráveis a mineralizações dos minerais supracitados.

Outro exemplo é o trabalho de Ewusi *et al.* (2020) desenvolvido em Balantindi, na Guiné, em uma área com potencial para mineralizações de Au, U e Cu, contudo sem associação com fluidos hidrotermais. Realizaram levantamentos magnéticos e radiométricos em perfurações com diamantes, integrados a análises de laboratório. As medidas radiométricas apresentaram forte correlação com as concentrações de urânio, o que permitiu que distinguíssem zonas mineralizadas de zonas estéreis.

6.3 Aquisição e processamento de dados

6.3.1 Gamaespectrômetro

O equipamento utilizado neste estudo é o gamaespectrômetro, que detecta a radiação gama natural, discriminando-a em diferentes faixas de energia, o que permite identificar os picos espectrais característicos associados aos radionuclídeos do potássio, urânio e tório. O modelo utilizado foi o *RS-332 Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System* (Figura 11).

Figura 11 - Gamaespectrômetro RS-332 usado no levantamento geofísico.



Fonte: autoria própria.

Segundo o manual (2017) da *Radiation Solution INC*, fabricante, o equipamento é composto por um detector de óxido de germanato de bismuto com alta sensibilidade, um protetor térmico para não superaquecer e um GPS interno. O detector de óxido possui um colimador interno, que serve para absorção e suavização dos raios-gama emitidos. Além disso, as medidas são feitas em um intervalo de 30 keV – 3000 keV, com uma sensibilidade de 160 cps, o que é suficiente para detectar as emissões radioativas.

De acordo com Hansen (1975), o detector absorve a radiação emitida pelos materiais e depois a transforma em cintilações ou pulsos luminosos, que são convertidos em sinais elétricos para gerar uma diferença de potencial. Essa diferença resulta em medidas em Volts separadas em classes para se adquirir um espectro

elétrico da incidência radioativa. O resultado pode ser convertido para porcentagem no caso do K e para partes por milhão (ppm) no caso do U e do Th. Assim, é possível obter, posteriormente, um mapa de anomalia da radiação emitida para cada um desses elementos radioativos.

Além do gamaespectrômetro, foi utilizado em levantamento aéreo um drone modelo MAVIC 3T, da fabricante DJI (Figura 12) para formar um modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo, com objetivo de realizar uma interpretação conjunta dos resultados MDE e dos mapas obtidos por meio da gamaespectrometria.

Figura 12 – Drone modelo MAVIC 3T da fabricante DJI usado nos voos.



Fonte: autoria própria.

Esse equipamento possui quatro baterias e autonomia de voo de 30 minutos por cada uma, a partir de seu posicionamento próximo à área. Neste caso, foi programado para realizar o levantamento aéreo em linhas horizontais paralelas ao longo da área, em que foi necessário apenas um voo a aproximadamente 120 m de altitude para realizar toda a cobertura total de 58 ha.

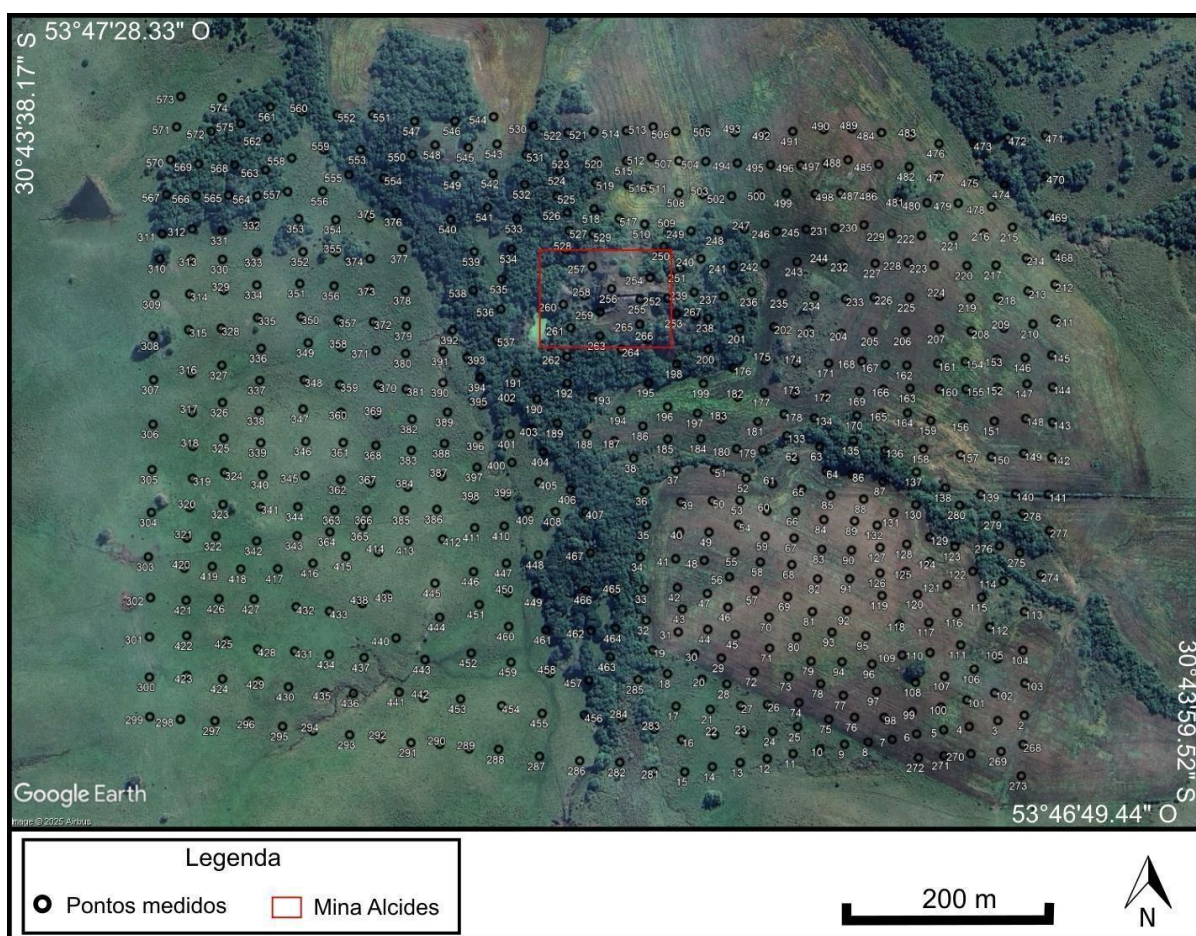
6.3.2 Aquisição dos dados

Para a aquisição dos dados, o gamaespectrômetro fica diretamente na superfície e levou 60 segundos em cada ponto para gerar os valores medidos das

espécies minerais que contêm os isótopos radioativos. Em cada ponto medido, são dados os valores na tela do gamaespectrômetro para os três elementos radioativos, sendo em % para o K e ppm para o U e Th, que são armazenados em sua memória.

Também foi utilizado o GPS diferencial modelo Stonex S850, fabricado na Itália, que apresenta precisão de 0,5 metros em cada ponto onde o equipamento fez a medida radiométrica, assim, foi possível obter o mapa de pontos. As medidas formaram uma área total retangular de 58 hectares (580 m²) ao redor e sobre a Mina Alcides, o que gerou uma malha de 574 pontos no total (ponto 2 ao 575), com equidistância aproximada de 30 metros entre cada um. Algumas adversidades da paisagem, como drenagens e cercas, dificultaram o alinhamento perfeito dos pontos (Figura 13).

Figura 13 - Mapa de pontos. Os círculos são os pontos levantados e no retângulo vermelho está a localização da Mina Alcides.



Fonte: autoria própria.

Contudo, a vegetação na maior parte da área é rasteira e de pastagens, o que não dificultou o contato entre o equipamento e a superfície. As partes de vegetação

mais densa estavam limitadas principalmente ao redor da mina e em áreas de drenagens. Nessas regiões próximas às drenagens, havia mais umidade no solo, com o risco de atenuações das medidas radiométricas. Na mina, muitas das medidas foram feitas diretamente sobre os lapili tufos que a compõem.

A emissão da radiação gama no ambiente geológico está associado principalmente a materiais mais superficiais, pois é um método geofísico raso. Em países tropicais, como o Brasil, o perfil de solo costuma ser espesso, o que dificulta a utilização desse método. No entanto, a área de estudo pertence a uma região do Rio Grande do Sul, estado que costuma ter mais climas frios ao longo do ano, com solos menos desenvolvidos, de no máximo 30 centímetros, e com mais rochas aflorantes, se comparado a outras regiões do país.

6.3.3 *Processamento dos dados radiométricos*

Para o processamento de dados foi utilizado o *software Geosoft* da plataforma *Oasis Montaj*. Nele, os 574 pontos medidos foram interpolados para gerar mapas 2D das anomalias de urânio, tório e potássio. A interpolação dos dados radiométricos foi feita com o algoritmo de mínima curvatura com tensão, RANGRID GX, que ajusta uma superfície suavizada entre os valores medidos, mas preserva as variações da área que ajudam na diferenciação dos padrões regionais.

Segundo a Geosoft (2010), o RANGRID GX calcula valores para os nós de uma grade inicial – que normalmente é oito vezes maior do que célula final – com base na média ponderada inversa das distâncias dos pontos de dados dentro de um raio de busca predefinido. Caso não haja dados nesse raio, o valor que o *software* usa é a média de todos os pontos disponíveis na grade.

Depois disso, é aplicado um processo iterativo, que ajusta gradativamente a grade para que se aproxime dos dados mais próximos de seus nós. A cada interação, o tamanho da célula da grade é diminuído pela metade até que o ajuste alcance um bom padrão. Esse procedimento continua até que se gere uma superfície com curvatura mínima, o que corresponde ao tamanho final das células (GEOSOFT, 2010).

O resultado do processamento são mapas temáticos com escala de cores que indicam os teores quantitativos dos elementos radioativos, em ppm para o U e Th, e em % para o K.

Já os voos de drone capturam imagens ao longo de toda a área, processadas por meio do *software Agisoft Metashape*, onde são importadas e combinadas. As ortofotos produzidas possuem resolução de 20 cm, a partir das quais é elaborada uma nuvem de pontos digital. Essa nuvem possibilita a determinação das altitudes registradas em cada ortofoto e permite a criação do modelo digital de elevação (MDE) a partir da interpolação dos valores altimétricos existentes.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o processamento de dados, foi gerado um mapa 2D para cada uma das anomalias emitidas pelos três isótopos radioativos, K, U e Th. As cores mais quentes dos mapas representam valores maiores de concentração, enquanto as mais frias correspondem a valores baixos, conforme estão representados nas legendas.

Também foram realizados mapas 2D de composição ternária e de razões entre os elementos, mas esses resultados adicionais não possuem informações relevantes, por isso não foram considerados úteis para o presente trabalho.

7.1 Mapa 2D de urânio (U)

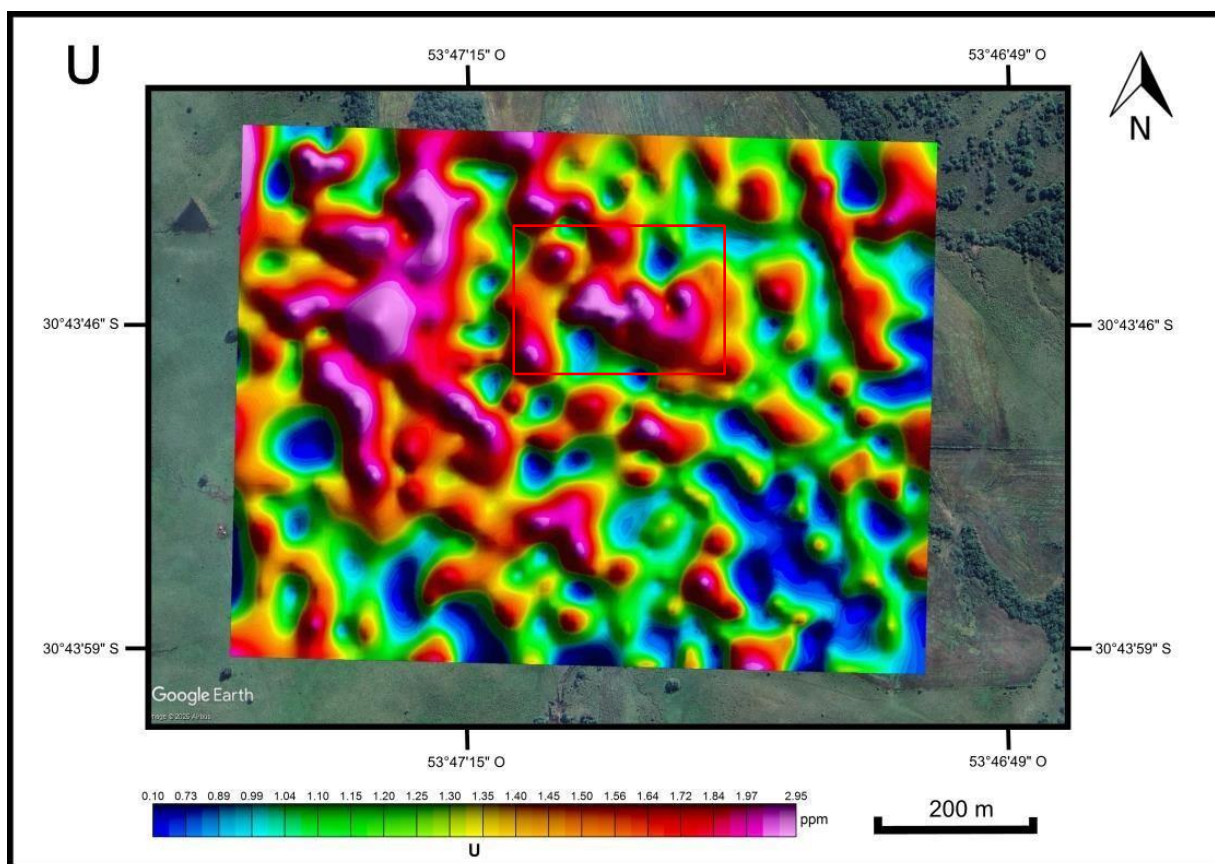
O mapa 2D do U apresenta uma faixa de valores entre 0,10 ppm e 2,95 ppm, em que podem ser consideradas com alta concentração de U as áreas com valores acima de 1,9 ppm, que corresponde ao valor mínimo multiplicado por 19.

Há alguns valores acima de 1,9 ppm na região NE e abaixo da mina, mas pouco significativos por estarem muito dispersos. As regiões ao sul da área e principalmente a SE apresentaram resultados próximos a zero (entre 1,60 ppm e 0,10 ppm).

No geral, a dispersão do U é baixa e está concentrada na área da mina e na região WNW, onde o mapa apresenta muitos halos de anomalia de U, com valores que variam de 1,9 ppm a 2,95 ppm (Figura 14).

Em termos de mobilidade, a do U é considerada intermediária, móvel em processos hidrotermais e supergênicos (DENTITH; MUDGE, 2014). Como a área tem muitas rochas aflorantes, essa concentração de U na porção WNW provavelmente se dá pelos processos hidrotermais. Assim, a mobilidade do elemento associada a fatores supergênicos pode ser desconsiderada na área de estudo.

Figura 14 - Mapa 2D de interpolação de concentração de urânio (U). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa.



Fonte: autoria própria.

7.2 Mapa 2D de tório (Th)

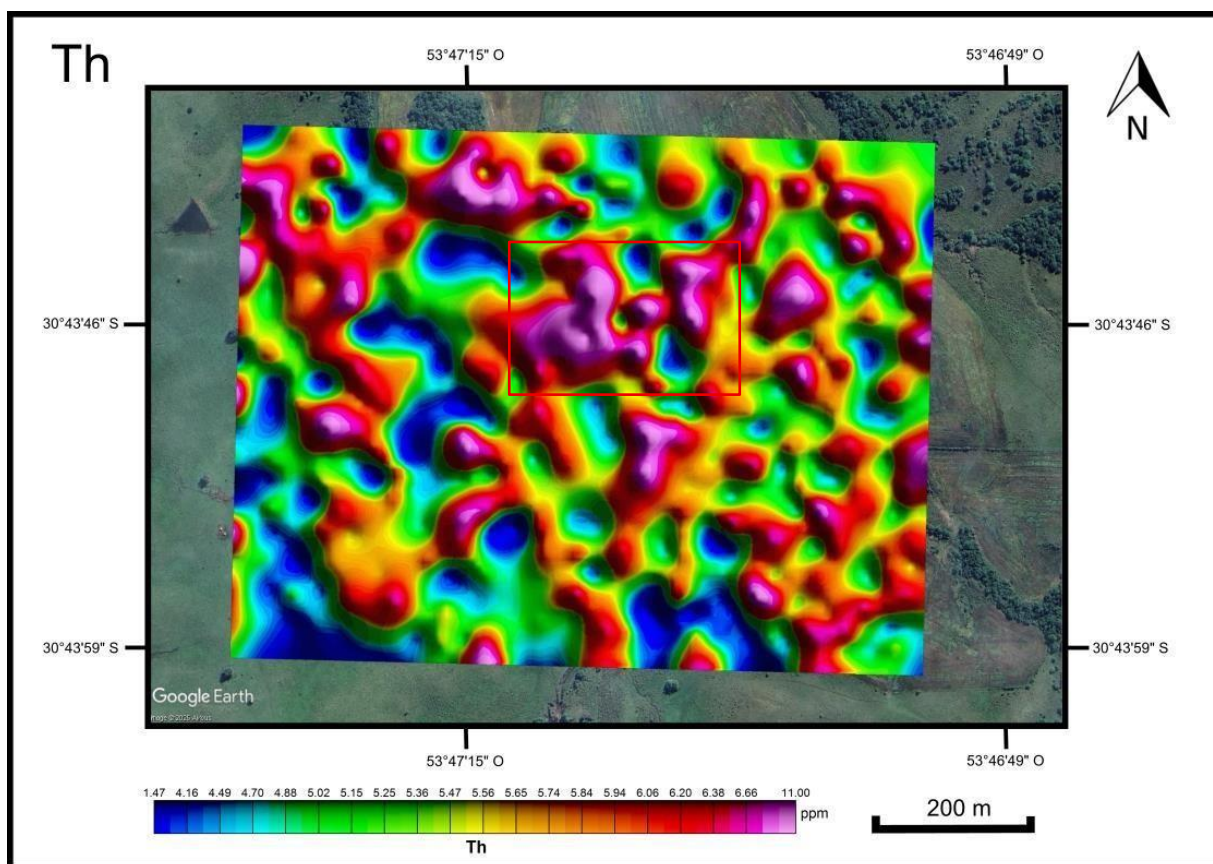
No mapa do Th, o intervalo varia de aproximadamente 1,47 ppm a 11 ppm, e as anomalias são definidas por valores acima de 9,6 ppm, resultado da multiplicação do valor mínimo por 6,5.

Na porção SW do mapa de Th, há valores nulos ou muito baixos. Há algumas pequenas porções com resultados altos dispersos a NE e SE, mas não muito significativos. Os maiores valores estão concentrados na posição da mina e a NW dela, quando comparados aos do restante do mapa. No geral, há pequenos halos anômalos espalhados ao longo de toda a área (Figura 15).

O Th é considerado imóvel mesmo sob condições hidrotermais e processos de alteração, além de ser resistente a intemperismos (DENTITH; MUDGE, 2014), embora a área seja pouco alterada. Desta forma, por ser imóvel e incompatível (GILMORE,

2008), os halos anômalos menores e mais dispersos possivelmente estão associados apenas aos minerais acessórios presentes nas rochas vulcânicas da área.

Figura 15 - Mapa 2D de interpolação de concentração de tório (Th). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa.



Fonte: autoria própria.

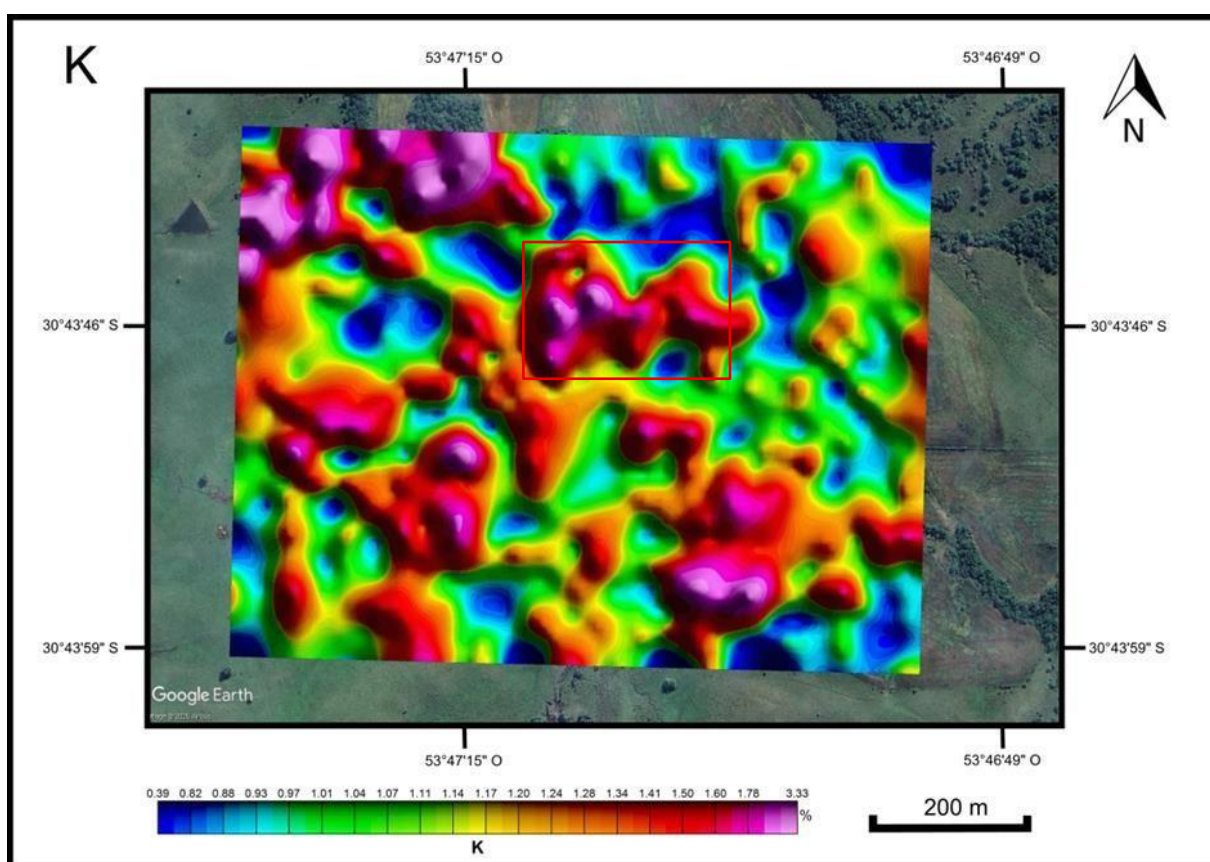
7.3 Mapa 2D de potássio (K)

O mapa de concentração de K apresenta os valores em %, com variações aproximadas de 0,39% a 3,33%. Os resultados considerados anômalos foram os maiores do que 1,75%, pois correspondem ao valor mínimo multiplicado por 4,5.

Pelo mapa do K existem valores anômalos acima de 1,75% na porção SW, onde são pouco significativos, na SE e principalmente no extremo NW, onde ocorre a maior concentração de K. O que aparenta haver no mapa é um lineamento de sentido NW/SE com halos anômalos mais altos de K e que inclusive cruza a mina, esse sentido é o mesmo do dos corpos de diques andesíticos que ocorrem na região das Minas do Seival (Figura 16).

Os halos anômalos de K podem estar associados aos estágios em que há silicificação somadas à alteração potássica que ocorrem durante eventos hidrotermais (MENG, 1999), que por sua vez estão associados a zonas mineralizadas.

Figura 16 - Mapa 2D de interpolação de concentração de potássio (K). O retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa.



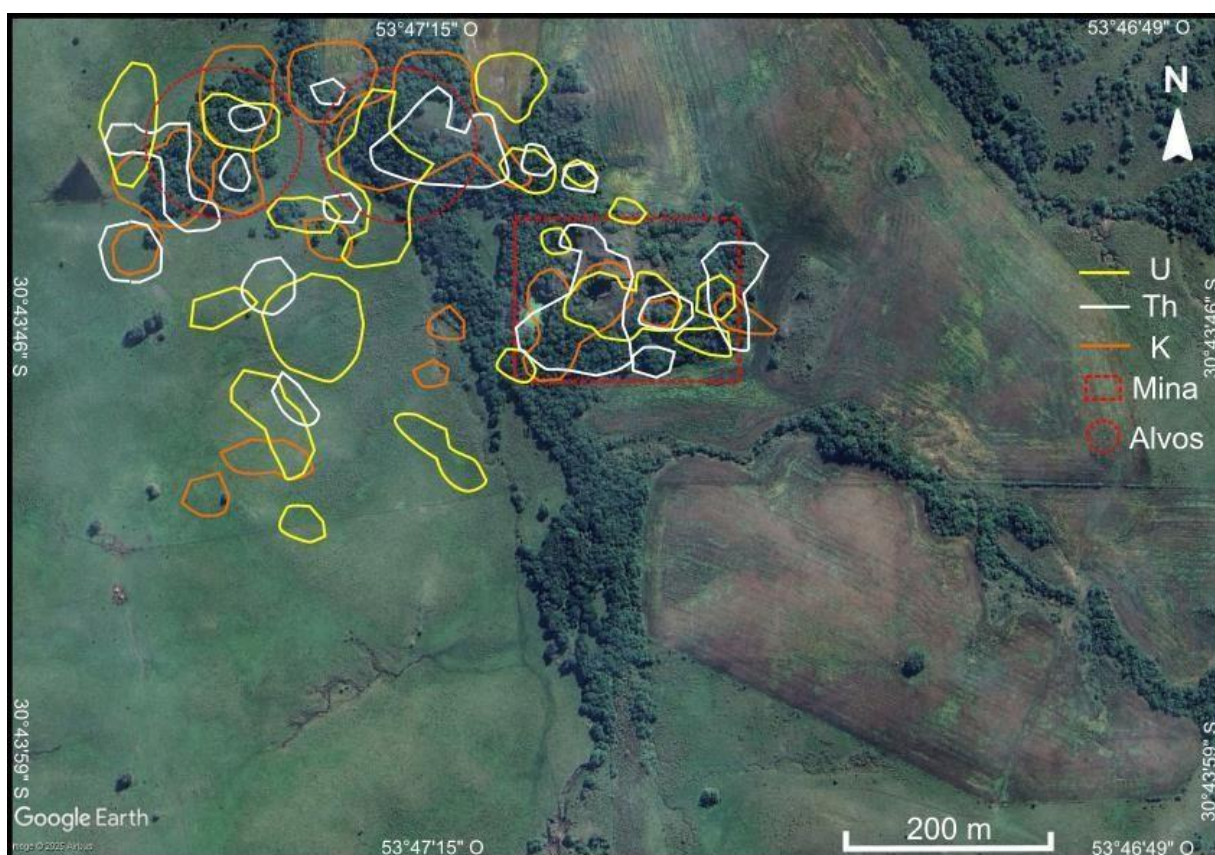
Fonte: autoria própria.

7.4 Mapa integrado dos resultados dos três elementos

Nos valores obtidos nos três mapas 2D, pode ser observado valores elevados para os três isótopos na região da Mina do Alcides, em que os valores são anômalos para todos, ou seja, isso indica que em locais com mineralizações deve haver respostas altas para os três elementos radioativos. Assim, com o mapa integrado dos resultados é possível fazer uma comparação dos valores na localização da mina a porções da área em que também há respostas anômalas coincidentes para o U, Th e K.

A NE da área há alguns valores mais altos de U e Th, mas irrelevantes, e quase nulos de K. Na porção SE o K apresentou uma concentração mais anômala, o Th valores medianos e o U muito baixos e principalmente nulos. Na porção SW os resultados também não foram significativos, mesmo com algumas respostas anômalas para os três elementos. Assim, os resultados que coincidem com os da Mina Alcides estão concentrados na porção ao extremo NW do mapa (WNW da mina), em que também há intersecção de valores anômalos para o U, Th e K e onde houve maior concentração de K. Assim, foi possível determinar dois alvos de interesse (Figura 17).

Figura 17 - Mapa integrado com valores anômalos relevantes de cada elemento radioativo. Os círculos vermelhos pontilhados representam os alvos de interesse e o retângulo vermelho indica a posição da mina no mapa. Os valores anômalos no extremo NW da área foram extrapolados para os três elementos.



Fonte: autoria própria.

Vale lembrar que o U é fortemente associado a veios mineralizados de cobre originados de processos hidrotermais (DENTITH; MUDGE, 2014) e o Th também, pois ambos apresentam concentração na crosta devido à ascensão de magmas.

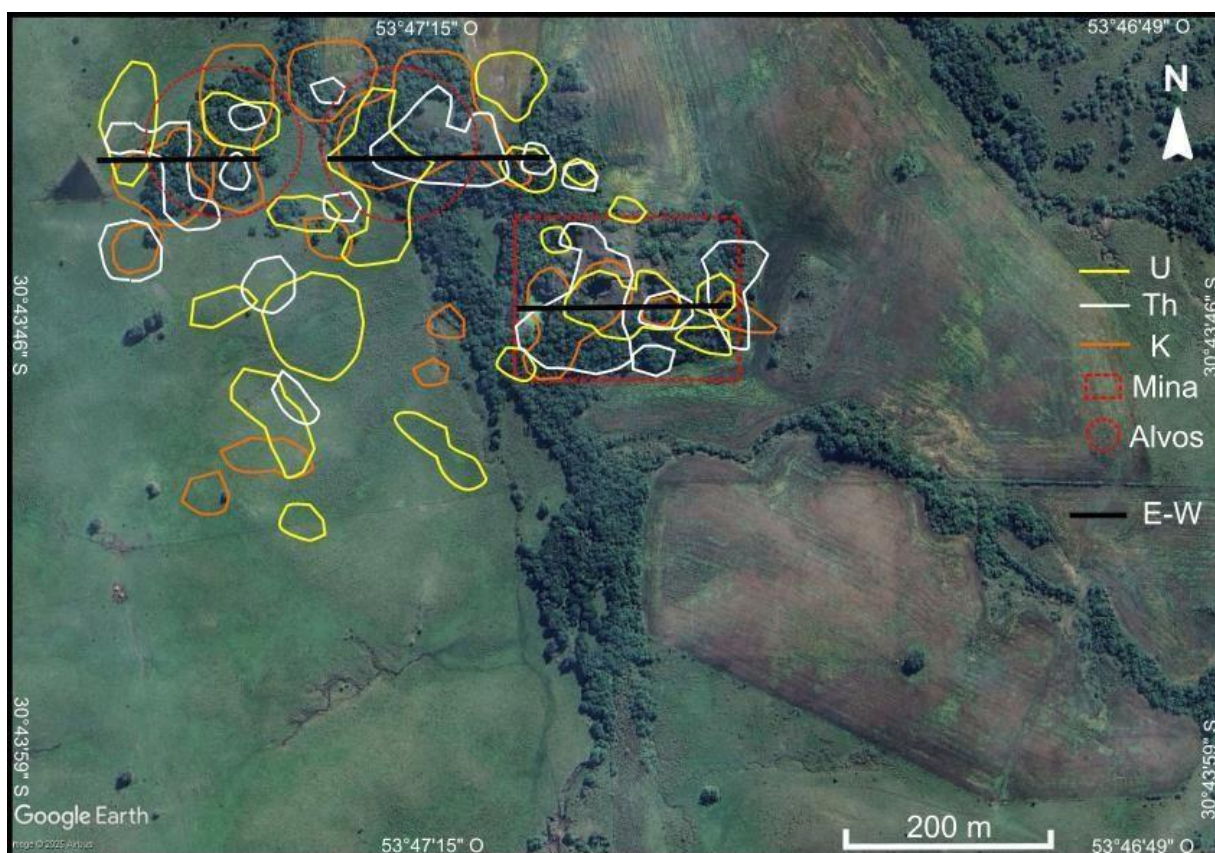
No contexto estrutural regional, a direção das principais falhas e fraturas seguem no sentido NE/SW, o que é evidenciado por todas as seis Minas do Seival,

em que em grande escala poder ser observado em mapa que seguem esse lineamento. Pelos resultados, nas proximidades da Mina Alcides, nenhum dos três elementos teve esse alinhamento, pois os halos anômalos coincidentes estão concentrados a NW da área. Mas há falhas menores de direção NW/SE que inclusive truncam nas de direção NE-SW e que deslocam outras falhas, o que também pode ser atribuído a isso são os fortes eventos hidrotermais que marcam as rochas vulcânicas da área, pois quanto mais próximas dos lineamentos, mais estão com efeitos aparentes de hidrotermalismo (LOPES, 2011; 2014; 2018).

Outra importante evidência do forte controle estrutural da área é que a Formação Hilário, à qual pertence, é relacionada aos estágios de estabilização de subducção de placas tectônicas (LIMA; NARDI, 1998).

Além disso, no entanto, tanto nos alvos, quanto nas minas, aparenta haver uma direção preferencial E-W (Figura 18) de menor escala nos intervalos anômalos, que pode estar relacionada a falhas menores da área.

Figura 18 - Mapa de sobreposição demonstrando os resultados lineados em sentido E-W existentes nos altos halos anômalos observados nos mapas 2D também. Essa orientação é notada tanto na mina quanto nos alvos de interesse.



Fonte: autoria própria.

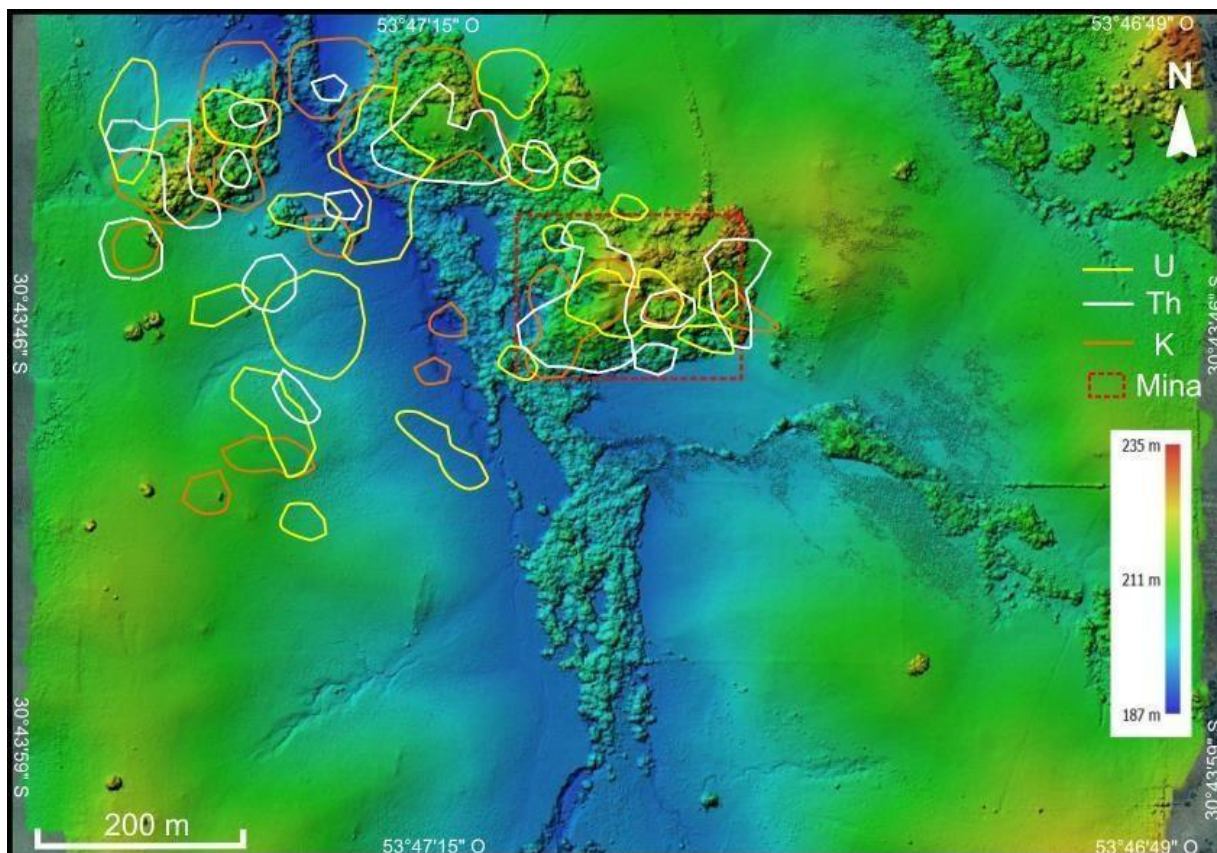
De acordo com Kaul; Rheinheimer (1974), as principais falhas regionais são as de sentido proeminente NW-SE e as secundárias de sentido NE-SW são de cisalhamento, enquanto esses lineamentos E-W são falhas de tensão, que hospedam veios/brechas de quartzo associados a halos de alteração das rochas encaixantes (sejam graníticas ou vulcânicas) e que contêm minerais como sericita, pirita, clorita, calcopirita e mineralizações de Au-Cu. Ainda segundo os referidos autores, essas falhas de tensão foram observadas localmente, mas estão presentes regionalmente, pois foram notadas em diversas áreas de ocorrências de mineralizações do município de Lavras do Sul. Apresentam abertura mediana e normalmente estão acompanhadas pela brechação existente nas rochas.

Portanto, as falhas de tensão E-W, localmente, foram as principais para a acomodação do material ascendido que deu origem aos corpos mineralizados. Assim, foram formados filões que estão estendidos por poucas dezenas de metros no sentido E-W mineralizados (como cobre filoniano) encaixados em granitos do Complexo Graníticos de Lavras do Sul e em andesitos da Fm. Hilário, também chamado de Andesito Hilário, onde os granitos aparecem em contato intrusivo com essas rochas, pois após essa fase de intrusão granítica, ocorre outra hidrotermal e mineralizante (KAUL; RHEINHEIMER, 1974).

Além do contexto estrutural, outro fator importante é que nas porções anômalas onde estão os alvos há vegetação nativa concentrada, também é onde há maior concentração de rochas aflorantes, logo são locais em que não há plantios como o resto da área. No entanto, como a espessura do solo onde há monoculturas e pastagens é pequena, essa diferença de presença de rochas aflorantes não interfere nos dados radiométricos.

Desta forma, os alvos não só estão localizados em porções da área com vegetação fechada (que, inclusive, não estão associadas a drenagens), como também apresentam topografia mais elevada assim como na mina, evidenciada pelo MDE (Figura 19), embora a área como um todo não esteja em uma alta altitude.

Figura 19 - Modelo digital de elevação (MDE) da área obtido por meio do levantamento de drone.



Fonte: autoria própria.

Após todas as interpretações é possível notar que há alguns intervalos diferentes para o K, U e Th na superfície. Geralmente, em condições supergênicas, o K apresenta maior mobilidade, o U mobilidade intermediária e o Th é imóvel independente das condições. Na área, a espessura do solo é pequena e rico em fragmentos de rochas e muitas rochas aflorantes, então isso diminui as chances de mobilização dos elementos, pois quanto mais espesso o solo, mais há influência na mobilidade. Assim os resultados são relativos às rochas vulcânicas presentes, seja por sua composição mineralógica ou por processos hidrotermais.

Na mina as rochas são completamente aflorantes e, ao longo do tufo vulcânico onde está inserida, a espessura do solo é ainda menor do que em outras porções da área, e nos alvos, onde há vegetação mais densa, também. Diante deste fato (desconsiderada a mobilidade dos elementos) e do fato de que nessa zona os halos foram anômalos para o K, U e Th, podem ser ressaltados os valores coincidentes a NW de que também estão associados à composição mineralógica das rochas ou a processos hidrotermais, que indicam possíveis mineralizações.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho partiu das ocorrências conhecidas de cobre na Mina Alcides, uma das seis Minas do Seival, no Escudo Sul-Rio-Grandense, com o objetivo de investigar o potencial para depósitos ocultos nas proximidades por meio do método da gamaespectrometria terrestre. A partir da integração entre dados radiométricos de K, U e Th, observações estruturais e o reconhecimento geológico, foi possível compreender como as anomalias radiométricas estão relacionadas aos lineamentos tectônicos e com o contexto vulcânico e hidrotermal da área.

Pela análise dos dados, os resultados gamaespectrométricos permitiram o reconhecimento de áreas anômalas na porção noroeste da área, onde são observadas assinaturas anômalas para U, Th e K, semelhantes às registradas na mina desativada. Além disso, o mapa integrado e o MDE apresentaram correlação entre as zonas anômalas e as zonas com vegetação mais densa e de maior elevação da área. Esses dados permitiram determinar dois alvos prospectivos de interesse na área.

Também, as condições geológicas e climáticas da região, com solos rasos e abundância de rochas aflorantes, favoreceram a aquisição de dados radiométricos consistentes, o que minimizou interferências de atenuação causadas por espessos perfis de solo, pois o método usado é raso. Isso contribuiu para a maior confiabilidade dos resultados obtidos e reforça a adequação do método ao contexto geológico local.

As estruturas geológicas controlam a distribuição dos elementos radioativos e dos fluidos hidrotermais que as detêm, os quais ficam alojados em falhas e fraturas e formam veios e filões mineralizados. A área de estudo passou por mais de um evento geológico, o que permitiu que seu contexto estrutural fosse bastante variado e, embora as maiores falhas da região tenham sentido NW/SE e principalmente NE/SW (que é o lineamento observado em grande escala entre as Minas dos Seival), existem falhas menores de tensão, dentre elas as de sentido E-W, que hospedam algumas mineralizações na região e parecem influenciar os alvos anômalos determinados. Isso demonstra a influência da tectônica na concentração mineral observada. Assim, a interpretação integrada dos dados estruturais e dos resultados radiométricos também permitiu delimitar os alvos de interesse.

Para uma investigação mais detalhada, ainda sem partir para métodos prospectivos diretos e que necessitam de maior investimento, podem ser realizados

os levantamentos geofísicos de Polarização Induzida (IP) e de Eletrorresistividade, com linhas orientadas no sentido N-S sobre os alvos anômalos identificados. Esses métodos permitirão uma análise indireta em maior profundidade do que a gamaespectrometria e seus resultados poderão ser combinados aos deste trabalho para melhor identificação da possível mineralização existente. Posteriormente, embora necessite de maior investimento, também pode ser realizada geoquímica pelo método direto de amostragem por meio de abertura de trincheiras para cada um dos dois alvos de interesse.

Pode ser concluído, portanto, que os resultados deste estudo evidenciam a eficiência da gamaespectrometria na identificação de anomalias radiométricas associadas a potenciais zonas mineralizadas, por sua vez, associados a eventos hidrotermais em ambientes vulcânicos e vulcanoplutossedimentares. A análise do mapa integrado dos resultados reforça a aplicabilidade da técnica na prospecção de depósitos minerais e demonstra sua capacidade como guia prospectivo em exploração mineral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEMALE JÚNIOR, F. Evolução geológica do Escudo Sul-riograndense. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (ed.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, p. 13-52, 2000.
- DENTITH, M; MUDGE, S. T. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 193-231, 2014.
- DOGGET, M. The role of Exploration in future copper supply. SIXEMIN, ADIMB, 2014.
- DUTRA, L. F. Avaliação da alteração hidrotermal por gamaespectrometria aplicada à exploração mineral na Província Carajás. XVI Simpósio de Geologia da Amazônia, 2019.
- EGYDIO-SILVA, M.; HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. da C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. de A. Connecting the Araçuaí and Ribeira belts (SE–Brazil): Progressive transition from contractional to transpressive strain regime during the Brasiliano orogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 86, p. 182–203, 2018.
- ESSA, K. S.; MUNSCHY, M.; YOUSSEF, M. et al. Aeromagnetic and radiometric data interpretation to delineate the structural elements and probable Precambrian mineralization zones: a case study, Egypt. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 39, p. 1249-1266, 2022.
- EWUSI, K.; SEIDU, A.; AMADU, M. Application of Geophysics for Quick Determination of Deposit in Mineral Exploration – A Case Study. *Journal of Natural Sciences Research*, v. 11, n. 14, 2020.
- FONTANA, E.; MEXIAS, A. S.; RENAC, C.; NARDI, L. V. S.; LOPES, R. W.; BARATS, A.; GOMES, M. E. B. Hydrothermal alteration of volcanic rocks in Seival Mine Cu–mineralization, Camaquã Basin, Brazil: part 1, chloritization process and geochemical dispersion in alteration halos. *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, v. 177, p. 45-60, jun. 2017.
- FONTANA, E.; RENAC, C; MEXIAS, A. S.; BARATS, A.; GERBED, M. C.; LOPES, R. W.; NARDI, L. V. S. Mass balance and origin of fluids associated to smectite and chlorite/smectite alteration in Seival Mine Cu–Mineralization – Camaquã Basin –Brazil (Part II). *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, v. 196, p. 20–32, 2019.
- FRANTZ, J. C.; NARDI, L. O magmatismo granítico da região oriental do Escudo Sul-Rio-Grandense. *Pesquisas em Geociências*, v. 19, n. 2, p. 183–189, 1992.
- GEOSOFT INC. Oasis Montaj versão 7.1 Sistema de Mapeamento e Processamento: A plataforma para o trabalho com grandes volumes de dados espaciais. 334 p, 2010.
- GILMORE, G. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. 2. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. 387 p., 2008. ISBN 978-0-470-86196-7.

HANSEN, D. A. Geological Applications Manual for Portable Gamma Ray Spectrometers. Toronto, Exploranium G. S. Limited, 87 p., 1975.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JUNIOR, F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (Org.). Geologia do Rio Grande do Sul, 50, p. 97–123, 2007.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; VALERIANO, C. de M.; ALMEIDA, J. C. H.; TUPINAMBÁ, M.; SIMÕES, L. Província Mantiqueira. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 203–235, 2004.

HEITHERSAY, P. Mineral resources for future generations. SIXEMIN, ADIMB, 2014.

HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Eds.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, p. 303–322, 2000.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Airborne gamma ray spectrometer surveying. International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series 323, 1991.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. 172p. Viena, Áustria, 2003.

JULIANI, C.; MONTEIRO, L. V. S.; FERNANDES, C. M. D. Potencial mineral: cobre. In: JULIANI, C.; QUEIROGA, G. N.; RIBEIRO, A.; MONTEIRO, L. V. S. (Eds.). Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, p. 134–154, 2016.

KAUL, P.F.T.; RHEINHEIMER, D. Projeto ouro no Rio Grande Sul e Santa Catarina: relatório final. 1974, Porto Alegre: DNPM/CPRM, 1974.

LAUX, J.H.; STROPPER, J.L.; PROVENZANO, C.A.S.; HORN, B.L.D; KLEIN, C. (Orgs.) Programa Novas Fronteiras Escudo Sul-Rio-Grandense recursos minerais associação tectônica mapeamento geológico geologia regional, Rio Grande do Sul, escala 1:500.000. Programa de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Porto Alegre: CPRM, 167p., 2021.

LIMA, E. F. L.; NARDI L. V. S. The Lavras do Sul shonshonitic association: implications for origin and Evolution of eoproterozoic shonshonitic magmatism in southernmost Brazil. Journal of South American Earth Science, vol. 11 (1), p. 67-77, 1998.

LIMA. E. F. L.; SOMMER, C. A.; NARDI, L. V. S. O vulcanismo neoproterozoico-ordoviciano no Escudo Sul-riograndense: os ciclos vulcânicos na Bacia do Camaquã. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (Eds.). 50 anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, p. 79-97, 2007.

LIMA, L.S. Radiação gama, Rev. Ciência Elem., V2(4):084, 2014.

LIMA, T. M.; NEVES C. A. R. (Coords.). Sumário mineral 2014, DNPM/MME, Brasília, vol. 34, 2014.

LIZ, J. D.; LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S. Avaliação de fontes magmáticas de séries shoshoníticas pós-colisionais com base na normalização pela Associação Shoshonítica de Lavras do Sul – aplicação de Sliding Normalization. *Brazilian Journal of Geology*, v. 39, p. 55–66, 2009.

LOPES, R.W. Alteração hidrotermal e mineralizações de cobre na Mina do Seival, Bacia do Camaquã, RS. 90 p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

LOPES, R. W. Alterações hidrotermais, mineralizações de Cu-Ag e geologia estrutural das rochas vulcanogênicas da mina do Seival, bacia Neoproterozoica do Camaquã, Sul do Brasil. Tese (doutorado em Geociências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 237f, 2019.

LOPES, R. W.; FONTANA, E.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B.; NARDI, L. V. S.; RENAC, C. Caracterização petrográfica e geoquímica da sequência magmática da Mina do Seival, Formação Hilário (Bacia do Camaquã - Neoproterozoico), Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 41, n. 1, p. 51-64, 2014.

LOPES, R. W.; MEXIAS, A. S.; PHILIPP, R. P.; BONGIOLO, E. M.; RENAC, C.; BICCA, M. M.; FONTANA, E. Au-Cu-Ag mineralization controlled by brittle structures in Lavras do Sul mining district and Seival mine deposits, Camaquã Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 88, p. 197-215 dec., 2018.

MCSWEEN, H. Y.; RICHARDSON, S. M.; UHLE, M. E. *Geochemistry: Pathways and Process-es*. 2. ed. New York: Columbia University Press. 363 p. v. 1, 2003. ISBN 0-213-12440-6.

MENG, L. Silicification and mineralization in hydrothermal deposits. *Geological Journal of China Universities*, v. 5, n. 1, p. 9-18, 1999. DOI: 10.1007/BF03182895.

MILSOM, J. *Field Geophysics. The Geological Field Guide Series*. 3ª Edição. University College London. 232p. 2003.

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

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. *Looking into the Earth: an introduction to geological geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 233-268, 2000.

NARDI, L. V. S. *Geochemistry and petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brazil*. Londres, PhD Thesis, London University, 1984.

NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. *Brazilian Journal of Geology*, v. 15, p. 139–146, 1985.

NASCIMENTO, C. T. C.; GUIMARÃES E. M.; PIRES, A. C. B. Reconhecimento de solos por meio de gamaespectrometria. Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Universidade de Brasília, 6 p. 2005.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Radioatividade. In: OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 1.4, 2010.

PAIM, P. S. G.; LOPES, R. C. Geologia da Região das Minas do Camaquã. In: RONCHI, L. H.; LOBATO, A. O. C. (Eds.). Minas do Camaquã: um estudo multidisciplinar. São Leopoldo: Editora Unisinos, p. 111–132, 2000.

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

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JUNIOR, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: geological relationship and U–Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, supl., v. 46, p. 83–104, 2016.

RADIATION SOLUTIONS INC. RS-330/332 Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System – Operator Manual. Revision 2.00. Firmware Version 0.90. 45p., 2017.

REISCHL, J.L. Mineralizações cupríferas associadas a vulcânicas na Mina do Seival. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. 1978, Recife. Anais... Recife, SBG. v 4, p. 1568–1582, 1978.

SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry: recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa*, v. 65, n. 6, p. 2001–2011, 2000. DOI: 10.1190/1.1444884

SOLIANI JUNIOR, E. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-Rio-Grandense e suas implicações de ordem geotectônica. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986.

SOLIANI JUNIOR, E.; KAWASHITA, K.; BAITELLI, R. A geologia isotópica do Escudo Sul-Rio-Grandense – Parte I: métodos isotópicos e valor interpretativo. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Eds.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 161–174, 2000.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S.; LIZ, J. D.; WAICHEL, B. L. The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high-K tholeiitic and silica-saturated, sodic alkaline volcanism in post-collisional basins. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, p. 573–589, 2006.

TAUSON, L. V. Geochemistry and metallogeny of the latitic series. *International Geology Review*, v. 25, p. 125–135, 1983.

TEIXEIRA, A. L.; GAUCHER, C.; PAIM, P. S. G.; FONSECA, M. M.; PARENTE, C. V. P.; SILVA FILHO, W. F. S.; ALMEIDA, A. R. Bacias do estágio de transição da plataforma sul-americana. In: NETO, V. M.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D.; BRITO NEVES, B. B. (Eds.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Editora Beca, p. 487–536, 2004.

WILFORD, J. R., BIERWITH, P.N., CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, vol. 17, p. 201-216, 1997.