

INTEGRAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS TERRESTRES EM REGIÃO DE OCORRÊNCIAS DE COBRE NO EXTREMO NOROESTE DA BACIA DO CAMAQUÃ, SUL DO BRASIL

INTEGRATION OF AEROGAMMASPECTROMETRIC AND GROUND ELECTROMAGNETIC DATA IN A COPPER OCCURRENCES REGION IN THE EXTREME NORTHWEST OF THE CAMAQUÃ BASIN, SOUTHERN BRAZIL

**Henrique Garcia PEREIRA¹, Francisco José Fonseca FERREIRA¹,
César Augusto MOREIRA²**

¹Universidade Federal do Paraná. Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 – Jardim das Américas, Curitiba – PR.
E-mails: ique_garcia@hotmail.com; francisco.ferreira@ufpr.br

²Universidade Estadual Paulista. Avenida 24-A, 1.515. Bela Vista, Rio Claro – SP. E-mail: cesar.a.moreira@unesp.br

Introdução
Área de estudo
Materiais e métodos
Resultados e discussões
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Nas diferentes fases de campanhas prospectivas de minerais metálicos como o cobre, a geofísica atua como ferramenta de apoio tanto no reconhecimento de novos alvos exploratórios, quanto na ampliação de jazidas conhecidas, devido à obtenção de contrastes de propriedades físicas entre as mineralizações e as rochas hospedeiras. O presente estudo apresenta os resultados da fase de reconhecimento pela aerogamaespectrometria seguidos de detalhamento de alvos potenciais de cobre pelo método eletromagnético indutivo terrestre em área contemplada pelas ocorrências denominadas Victor Teixeira e Capão Grande, localizadas no interior do município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. A ocorrência Victor Teixeira está inserida em rochas metamórficas do Escudo Sul-Riograndense, enquanto a de Capão Grande tem como encaixante os litotipos vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã. A mineralização aflorante de ambas as ocorrências compreende disseminações de carbonatos predominantemente em fraturas. Os dados radiométricos aéreos possibilitaram a definição de áreas enriquecidas em potássio associadas a produtos de alteração hidrotermal como guias indiretos para a localização de alvos de cobre. A correlação desse guia potássico com concentrações elevadas de tório também constituiu indicativo promissor. Os dados de condutividade aparente obtidos ao longo dos alvos aeroradiométricos possibilitaram sugerir a presença de sulfetos de cobre em áreas condutivas nos xistos do embasamento metamórfico e nos arenitos arcosianos conglomeráticos da Bacia do Camaquã.

Palavras-chave: Prospecção Mineral. Aerogamaespectrometria. Perfis Eletromagnéticos Indutivos. Escudo Sul-Riograndense.

ABSTRACT - In the different phases of prospective campaigns for metallic minerals such as copper, Geophysics acts as a support tool both in the recognition of new exploratory targets and the expansion of known deposits, due to the achievement of contrasts in physical properties between mineralizations and host rocks. The present study presents the results of the aerogamaspectrometry recognition phase, followed by the detailing of potential copper targets through the inductive terrestrial electromagnetic method in an area covered by the occurrences named Victor Teixeira and Capão Grande, both located to the interior of the municipality of Caçapava do Sul, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The Victor Teixeira occurrence is part of the metamorphic rocks of the Sul-Riograndense Shield, while the one in Capão Grande has as its host the Camaquã Basin's volcano-sedimentary lithotypes. The outcrop mineralization of both occurrences comprises carbonate disseminations predominantly in fractures. The aerial radiometric data allowed the demarcation of potassium-enriched areas associated with hydrothermal alteration products as indirect guides for the location of copper targets. The correlation of this potassium guide with high concentrations of thorium was also a promising indication. The apparent conductivity data obtained along the aeroradiometric targets made it possible to suggest the presence of copper sulfides in conductive areas in the metamorphic basement's schists and the arcossian conglomeratic sandstones of the Camaquã Basin.

Keywords: Mineral Prospecting. Aerogamaspectrometry. Inductive Electromagnetic Profiles. Sul-Riograndense Shield.

INTRODUÇÃO

O sucesso do emprego de métodos geofísicos aéreos e/ou terrestres na identificação e caracterização de alvos exploratórios de substâncias minerais metálicas (Au-Pb-Cu-Pb-Zn) é atribuído ao registro de variações de parâmetros físicos entre as mineralizações maciças ou disseminadas e as rochas encaixantes (Telford et

al., 1990; Kearey et al., 2002; Lowrie et al., 2007; Dentith & Mudge, 2014).

A gamaespectrometria, quando utilizada em pesquisa de metais, eventualmente revela assinaturas muito variáveis, porém o enriquecimento de potássio muitas vezes constitui guia para a localização indireta de concentrações significativas

em subsuperfície devido às alterações hidrotermais potássicas geradas nas rochas encaixantes (Gnojek & Prichystal, 1985; Hoover & Pierce, 1990; Pires, 1995; Dickson & Scott, 1997; Shives et al., 2000; Fornazzari Neto & Ferreira, 2003; Soares et al., 2004; Maden & Akaryali, 2015; Ohioma et al., 2017).

As alterações hidrotermais são relacionadas a processos marcados por grande interação fluido-rocha, com lixiviação de alguns elementos e concentração de outros em sistema físico-químico aberto com reações de troca (metassomatismo), podendo ocorrer em diversos ambientes geológicos. O urânio pode acompanhar o potássio ao longo dos processos hidrotermais, diferentemente do tório, que é quimicamente menos móvel (Ostrovsky, 1975; Pirajno, 1992; Ribeiro et al., 2015).

O comportamento condutivo padrão dos minerais metálicos é normalmente contrastante

com a característica resistiva da maioria dos minerais formadores das rochas, possibilitando a inferência de acumulações de mineralizações sulfetadas em subsuperfície pela aplicação de métodos eletromagnéticos no domínio do tempo e da frequência (Wynn, 2000; Silva et al., 2003; Al-Rawi et al., 2006; Flores & Peralta-Ortega, 2009; Weijun et al., 2010; Ariyibi, 2011; Granda et al., 2016; Pereira et al., 2017; Alarifí et al., 2019; Bitencourt et al., 2020).

O presente estudo apresenta o uso de dados aerogamaespectrométricos para delinear áreas com concentrações anômalas de potássio associadas a alterações hidrotermais, como guia prospectivo de cobre seguido de investigação eletromagnética terrestre indutiva para sugerir novos alvos exploratórios não aflorantes em área compreendida pelas ocorrências Victor Teixeira e Capão Grande.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada no limite noroeste do município de Caçapava do Sul, região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1). O principal acesso partindo da sede do município é realizado através da rodovia federal BR 392, no

sentido norte, por 17 km até o viaduto da BR 290, seguindo 15 km para oeste até a entrada da vila Cerrito do Ouro e depois pela estrada municipal Lavras do Sul-São Sepé, no rumo meridional, por mais 9 km.

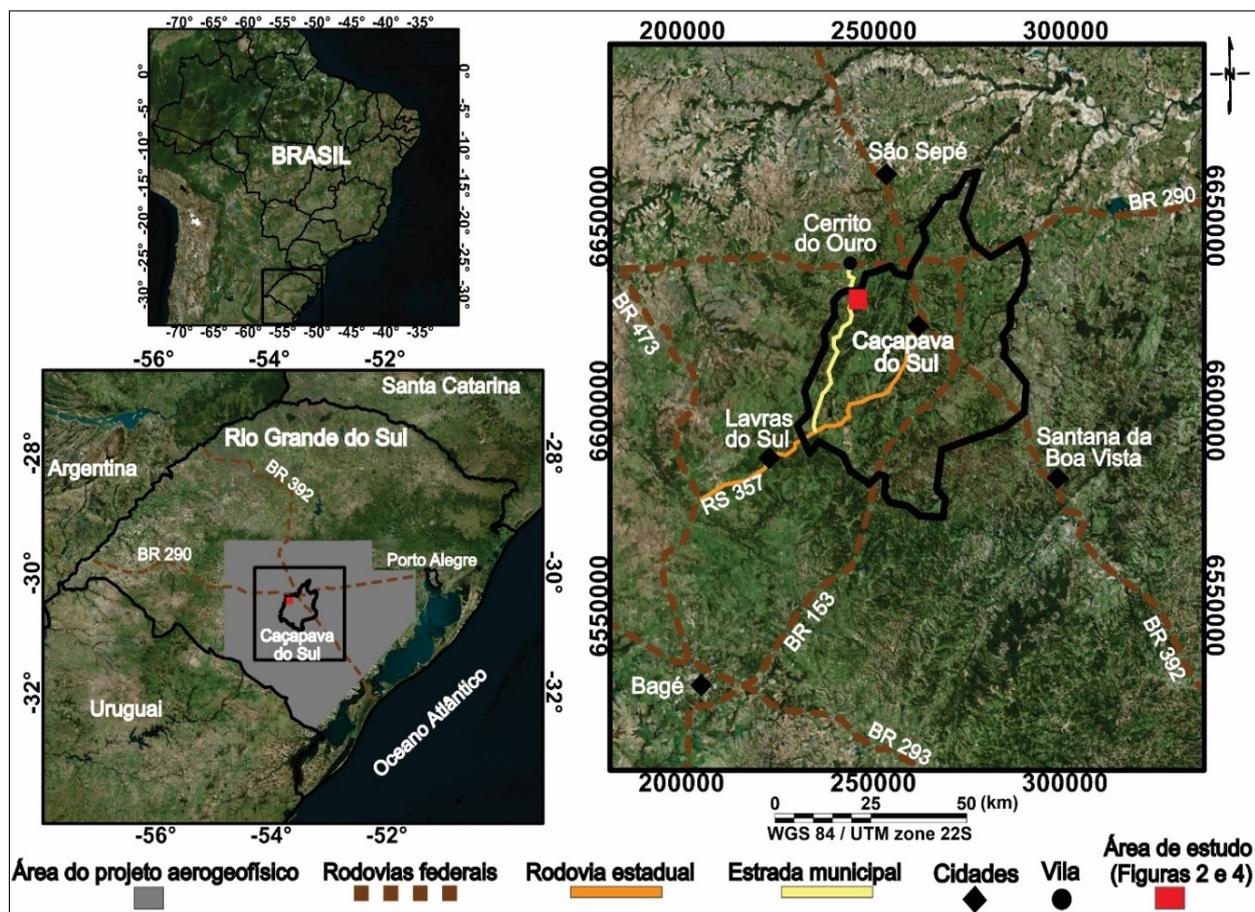


Figura 1 - Mapa de localização indicando a área do projeto aerogeofísico (esquerda) e as principais cidades e vias de acesso à área de estudo (direita).

O município de Caçapava do Sul é limitado ao norte por São Sepé, ao sul por Bagé, a leste por Santana da Boa Vista e a oeste por Lavras do Sul (Figura 1). Tem área estimada de 3.047,113 km², população de 33.548 habitantes e economia baseada na agricultura, pecuária e mineração (IBGE, 2020). Seu território é demarcado por ampla diversidade geológica e pela exploração de calcário, cobre e ouro que remonta ao início do século XX (Ronchi & Lobato, 2000).

O cenário geológico da área de estudo é

caracterizado por exposições de litotipos do Escudo Sul-Riograndense (Complexo Metamórfico Vacacaí) e dos grupos Maricá (Formações Passo da Promessa e Arroio América) e Cerro do Bugio (Formação Acampamento Velho) da Bacia do Camaquã (Figura 2a). Altitudes moderadas demarcam a ocorrência de cobre Victor Teixeira enquanto a porção mais baixa do relevo compreende as proximidades da ocorrência Capão Grande. As cotas mais elevadas correspondem à unidade dos tufos ácidos (Figura 2b).

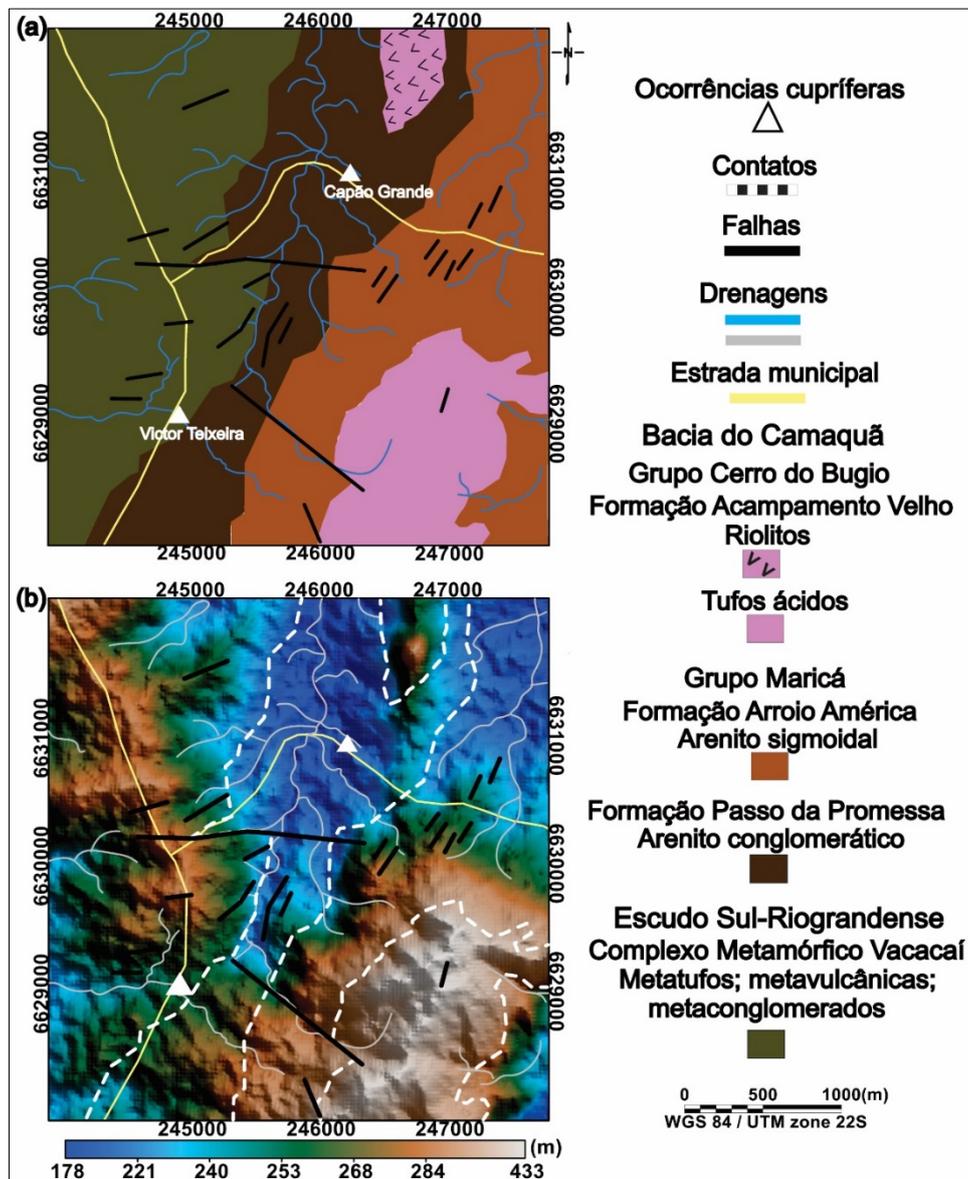


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo (a) baseado em CPRM (1995) e dados altimétricos SRTM (b).

O Escudo Sul-Riograndense compreende o segmento meridional da Província Estrutural Mantiqueira, demarcado por uma grande variedade de rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas, cuja gênese é relacionada aos processos de formação de crosta ocorridos durante os ciclos orogênicos Transamazônico/Eburiano (2.5-2.0 Ga) e Brasileiro/Pan-Africano (900-540 Ma) (Almeida

et al., 1981; Soliani Jr, 1986; Brito Neves & Cordani, 1991; Babinski et al., 1996; Hartmann et al., 2000). Segundo Borba et al. (2006) e CPRM (2007), estruturas regionais NE-SW, NW-SE e NS com expressão em subsuperfície compartimentam esse escudo segundo os domínios Taquarembó, São Gabriel, Santana da Boa Vista e Pelotas.

O Complexo Metamórfico Vacacaí (750 Ma)

abrange uma ampla associação de rochas vulcânicas, vulcanoclásticas e sedimentares, metamorfisadas principalmente por intrusões graníticas brasilianas pós-tectônicas mais jovens, em fácies xisto verde, filito, quartzito, mármore, xisto hornblenda e xisto clorítico (Machado et al., 1990; CPRM, 2000). Quatro fases de deformação estão relacionadas as suas principais estruturas regionais, sendo que as três primeiras compreenderam a geração de falhas e dobras coaxiais com eixo orientado para NE-SW (mergulhando 50° para NW), enquanto a fase final resultou em falhas e dobras com eixo orientado para NW-SE e E-W (CPRM, 1995; Remus et al., 1999). Na unidade supracitada, foram reconhecidos afloramentos de quartzitos (Figura 3a) e de metapelitos (Figura 3b), ambos demarcados por intenso fraturamento (por vezes com estruturas preenchidas por quartzo) e feições de metamorfismo de baixo grau.

A ocorrência cuprífera Victor Teixeira, hospedada no Complexo Metamórfico Vacacaí (veja a localização na Figura 2), é demarcada por um afloramento de direção NE-SW, com 5 m de comprimento por 2 m de largura (Figura 3c), sendo constituído por rochas com foliação plano-paralela e coloração que varia de cinza a cinza esverdeado, com clorita-quartzo-sericita xistos e/ou sericita-clorita quartzo xistos, com pequenas impregnações de malaquita [$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$] em fraturas e nos espaços interfoliares (Figura 3d).

A Bacia do Camaquã reúne sucessões estratigráficas e vulcanogênicas (entre 620 Ma e 450 Ma) com mais de 10.000 m de espessura sem registro significativo de metamorfismo regional segundo a direção geral N30E sobre o Escudo Sul-Riograndense (Almeida et al., 1981; De Ros et al., 1994; Fragoso-Cesar et al., 2000; Teixeira et al., 2004). Falhas regionais NNE-SSW e os altos do embasamento de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas delimitam suas unidades vulcanossedimentares (Almeida et al., 2009; Almeida et al., 2010; Janikian et al., 2012).

A sequência de preenchimento da Bacia do Camaquã pode ser subdividida em cinco grupos principais, separados entre si por discordâncias angulares e subdivididos em formações limitadas predominantemente por discordâncias erosivas: Maricá, Bom Jardim, Cerro do Bugio, Santa Bárbara e Guaritas (Paim et al., 2000, Janikian et al., 2003, CPRM, 2007).

O Grupo Maricá apresenta cerca de 2500 m de rochas siliciclásticas depositadas entre 620 e 580 Ma (Paim et al., 2000).

Este grupo pode ser subdividido em três formações principais: Passo da Promessa, São Rafael e Arroio América. A unidade basal corresponde à Formação Passo da Promessa, dominada por arenitos com estratificação cruzada e lentes conglomeráticas subordinadas, interpretados como depósitos de planícies fluviais de canais entrelaçados. A Formação São Rafael (sotoposta) marca o primeiro evento de inundação marinha na Bacia do Camaquã, sendo constituída por arenitos finos e ritmitos gerados em plataforma rasa dominada por ondas. A Formação Arroio América é a unidade de topo, que reúne arenitos e frequentes fácies conglomeráticas gerados a partir de um novo sistema de planícies fluviais de canais entrelaçados (Pelosi & Fragoso-Cesar, 2003).

Na Formação Passo da Promessa foram evidenciados arenitos marrom-avermelhados médios a grossos, por muitas vezes conglomeráticos, mal selecionados, com grãos angulosos a subangulosos, frequentemente com seixos arredondados de quartzo, granitos e rochas metamórficas (Figura 3e). São comuns as exposições de afloramentos com estratificação paralela (Figura 3f) e cruzada acanalada de porte métrico a decamétrico (Figura 3g).

A ocorrência cuprífera Capão Grande, encaixada na Formação Passo da Promessa (veja a localização na figura 2), é caracterizada por afloramento de direção NE-SW, exibindo 19 m de comprimento por 10 m de largura (Figura 3h), composto por arenitos arcossianos intensamente fraturados de granulação média e cor marrom avermelhada, com azurita [$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$] e malaquita [$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$], encontradas principalmente nas fraturas (Figura 3i).

O Grupo Cerro do Bugio envolve quase 1000 m de espessura e pode ser subdividido, da base para o topo, em Formação Santa Fé e Formação Acampamento Velho. A Formação Santa Fé é constituída por conglomerados ricos em clastos de rochas vulcânicas e plutônicas de composição ácida, que gradam para arenitos com estratificação cruzada e ritmitos areno-pelíticos, depositados em ambiente dominado por sistemas flúvio-deltaicos entrelaçados longitudinais (Paim et al., 2000). A Formação Acampamento Velho representa o registro de vulcanismo explosivo/efusivo subaéreo de composição predominantemente riolítica com afiliação a lavas e diques de composição básica, gerado em ambiente tectônico extensional pós-orogênico (Sommer et al., 1999; Janikian et al., 2005; Sommer et al., 2011; Matté et al., 2012).

Afloramentos de riolitos cinza-amarronzados

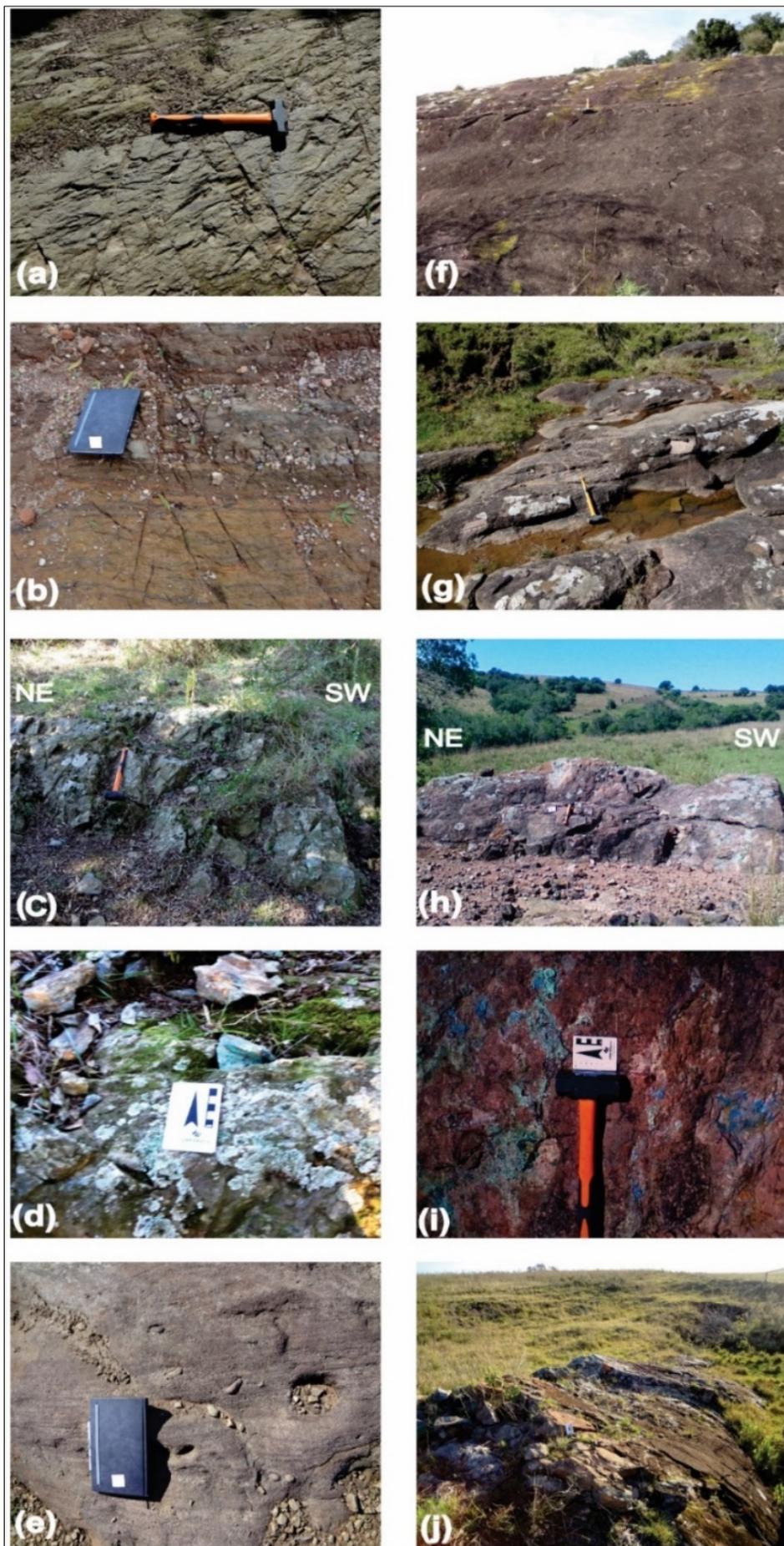


Figura 3 - Principais afloramentos encontrados na área de estudo: (a) quartzitos; (b) metapelitos; (c) ocorrência Victor Teixeira; (d) malaquita em detalhe; (e) arenitos conglomeráticos; (f) estratificação paralela; (g) estratificação cruzada; (h) ocorrência Capão Grande; (i) malaquita e azurita em detalhe; (j) riolitos.

como corpos tabulares alongados na direção NE, pertencentes à Formação Acampamento Velho (Figura 3j), foram frequentemente observados nos arenitos da Formação Passo da Promessa, próximo à localidade da ocorrência Victor Teixeira. De acordo com Borba et al. (2007), esses riolitos aproveitaram a zona de fraqueza do contato entre o embasamento e a bacia para se instalarem durante os eventos magmáticos pós-orogênicos.

Além das ocorrências de cobre evidenciadas no mapa geológico (Figura 2), os litotipos do Escudo Sul-Riograndense e da Bacia do Camaquã apresentam uma grande variedade de prospectos, ocorrências e depósitos de metais base (Cu, Pb e Zn) além de ouro e prata, cuja origem tem sido atualmente associada a um sistema magmático-tectônico desenvolvido no período pós-colisional da Orogênese Dom Feliciano. Os eventos plutonovulcânicos envolvidos teriam atuado como motores térmicos na geração de sistemas epitermais, responsáveis pela circulação de paleofluidos, pela

remobilização de metais de rochas encaixantes e posterior concentração destes elementos de interesse econômico (Remus et al., 2000; Laux et al., 2005; Toniolo et al., 2007; Fontana, 2016).

O controle estrutural da maioria dessas mineralizações está intrinsecamente associado aos sistemas de falhas Irapuá (N20°-30°E) e Cerro da Vigia (N50°- 60°W), relacionados aos episódios tectônicos de geração e deformação da Bacia do Camaquã sobre o Escudo Sul-Riograndense. Também são importantes os locais demarcados pelo entrecruzamento de falhas de direção NE-SW e NW-SE (Ribeiro et al., 1966; Ribeiro, 1970; Ribeiro, 1978; Remus et al., 1999; Kazmierczak, 2006; Almeida et al., 2010; Santos et al., 2012). Na figura 4b pode ser observado o cruzamento de lineamentos orbitais nas ocorrências cupríferas Victor Teixeira e Capão Grande, demarcados em análise de dados de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução espacial de 30 m (USGS, 2014).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de gamaespectrometria aérea são provenientes do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010). Os principais parâmetros de aquisição podem ser observados na tabela 1, enquanto a área do levantamento envolvendo aproximadamente 75.600,00 km² no extremo sul do Brasil pode

ser visualizada na figura 1. A disposição preferencial NE-SW a E-W das unidades geotectônicas investigadas, juntamente com as baixas latitudes magnéticas dessa região, foram determinantes para a definição da direção preferencial N-S das linhas de voo (Cordani, 2005).

Tabela 1 - Especificações técnicas do aerolevanteamento (CPRM, 2010).

Projeto	Escudo do Rio Grande do Sul
Ano	2010
Direção das linhas de voo	N-S
Espaçamento das linhas de voo	500 m
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento das linhas de controle	10 km
Altura de voo	100 m
Sistema de navegação	FASDAS
Sistema de aquisição GPS	Trimble AgPS 132 DGPS Real-time
Radar altimétrico	King-405 e Collins Alt-50
Altímetro barométrico	Fugro/Enviro
Intervalo de medidas geofísicas	1.0 s (gamaespectrometria)
Equipamentos gamaespectrométricos	Radiation Solutions RS500 e Exploranium GR-820

As leituras radiométricas realizadas a cada segundo nas aeronaves representaram medições a intervalos de amostragem entre 63 m e 75 m do terreno. Ambos os modelos de gamaespectrômetros utilizados (Exploranium GR-820 e Radiation Solutions RS-500) somam as radiações detectadas e reduzem as leituras a uma única saída de 256 canais espectrais. O espectro de cada um dos cristais detectores de radiação é analisado individualmente para a determinação mais precisa dos

fotopicos de potássio, urânio e tório. A tabela 2 mostra o maior número de canais correspondentes do Radiation Solutions RS-500, em comparação com o Exploranium GR-820 (CPRM, 2010).

A etapa inicial de processamento dos dados radiométricos aéreos consistiu na seleção dos dados do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul para os limites do quadrante de 16 km² da área de estudo, contemplando sete linhas de voo N-S com comprimentos de 3200 m

Tabela 2 - Janelas de energia e canais correspondentes dos gamaespectrômetros (CPRM, 2010).

Canal radiométrico	Janela de energia (MeV) GR-820		Canal correspondente GR-820		Janela de energia (MeV) RS 500		Canal correspondente RS-500	
	0.41	2.81	34	233	0.41	2.81	71	511
Contagem Total	0.41	2.81	34	233	0.41	2.81	71	511
K	1.37	1.57	115	131	1.37	1.57	233	267
eTh	2.41	2.81	202	233	2.41	2.81	411	480
eU	1.66	1.86	139	155	1.66	1.86	284	319
Cósmico	3	∞	256	-	3	∞	511	-

cada (Figura 4a).

A inspeção do banco de dados revelou valores negativos nos canais K, eTh e eU, decorrentes de erros acumulados durante as várias etapas de correção tradicionalmente aplicadas nesse tipo de dado (Tempo Morto; Erro de Paralaxe; Efeito Compton; Coeficiente de Atenuação

Atmosférica; Altura Efetiva de Voo; Background Cósmico, da Aeronave e do Radônio). Os dados negativos (Tabela 3) foram removidos de acordo com a adição de constantes a cada canal, de modo a resultar em valores mínimos correspondentes a 0.01 (Ferreira et al., 2009; Weihermann et al., 2016).

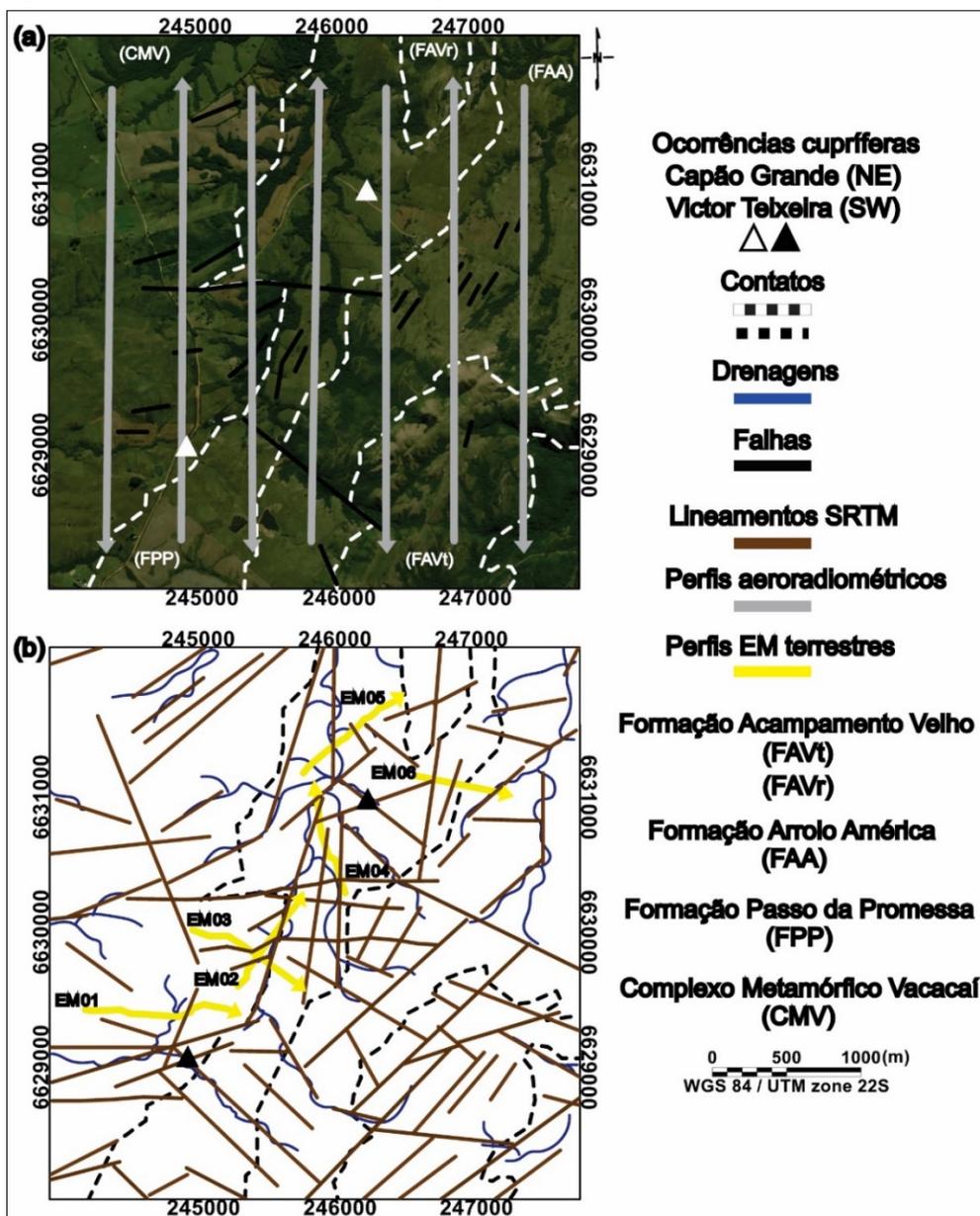


Figura 4 - Disposição das 7 linhas de voo (a) e dos perfis de caminhada eletromagnético (b).

O processamento dos dados aerogamaespectrométricos foi encerrado a partir da elaboração de malhas regulares de 125 m x 125 m (Briggs, 1974) dos valores corrigidos (Tabela 3) São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 40, n. 3, p. 623 - 640, 2021

(correspondentes a ¼ do espaçamento das linhas de voo) pelo método de mínima curvatura dos valores corrigidos (Tabela 3)

dos canais K (%), eTh (ppm) e eU (ppm), bem como na elaboração da respectiva composição ternária RGB, das razões eTh/K e eU/K, do

Parâmetro F e do Potássio Anômalo (K_d), usando a versão 9.6 do programa Oasis Montaj, da Seequent Inc.

Tabela 3 - Valores corrigidos de cada radioelemento.

Radionuclídeo	Valor mínimo	Valor adicionado	Mínimo corrigido
K	-0.266	+0.276	0.01
eTh	-0.230	+0.240	0.01
eU	-0.444	+0.454	0.01

O Parâmetro F ressalta o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório, podendo sugerir áreas com alteração hidrotermal potássica associadas a mineralizações (Gnojek & Perichystal, 1985; Biondi et al., 2001; Fornazzari Neto & Ferreira, 2003; Ferreira et al., 2009; Barbuena et al., 2013; Campos et al., 2017). O Parâmetro F é indicado pela seguinte equação:

$$F = K \times \frac{eU}{eTh}$$

$$K_i = (\text{média de } K_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s; K_d = (K_s - K_i) / K_i$$

$$U_i = (\text{média de } U_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s; U_d = (U_s - U_i) / U_i$$

onde K_i e U_i indicam os valores ideais definidos a partir do tório, K_d e U_d são os desvios dos valores ideais e K_s , U_s e Th_s representam os dados originais.

Tais técnicas foram aplicadas à prospecção mineral pela primeira vez por Pires (1995). Por simplicidade, neste trabalho, são apresentados apenas os resultados obtidos pelo Potássio Anômalo (K_d).

O método eletromagnético indutivo (EM) foi aplicado ao longo de seis perfis terrestres (Figura 4b) por meio do condutímetro EM-34 modelo XL, fabricado pela Geonics Ltda e gentilmente cedido pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). O EM-34 possibilita a leitura direta da condutividade aparente (σ_a) a partir da técnica de baixo número de induções. Informações detalhadas sobre os princípios teóricos dessa técnica, assim como as características mais importantes desse instrumento, são descritos respectivamente em McNeill (1980) e em Geonics (2007).

Os perfis de caminamento eletromagnético

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens aerogamaespectrométricas de K, eTh, eU, ternária RGB, razão eTh/K, razão eU/K, parâmetro F e K_d são apresentadas na forma de mapas de contorno pseudocoloridos (Figuras 5 e 6), com sobreposição das principais informações indicadas no mapa geológico (Figura 2a) e dos dados altimétricos SRTM (Figura 2b). Essa

Segundo Dickson & Scott (1997) e Wilford et al. (1997), os teores dos radioelementos podem ser alterados por fatores ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas. Considerando tais aspectos, e tendo em mente que o tório apresenta menor mobilidade geoquímica, Saunders et al. (1987) propuseram uma normalização do potássio (K_d) e do urânio (U_d) pelo tório, aplicada à prospecção de petróleo, calculada da seguinte forma:

foram elaborados com comprimentos variando entre 600 m e 1040 m, sendo a tomada de medidas de condutividade aparente realizada a cada 20 m (totalizando 250 estações), com as bobinas operadas na frequência de 400 Hz, em configurações coplanares verticais (modo Dipolo Horizontal) e horizontais (modo Dipolo Vertical) com o cabo de 40 m, possibilitando investigar aproximadamente 60 m de profundidade. As posições das estações de medidas foram tomadas com o auxílio de um GPS de mão Garmin e posteriormente georreferenciadas com base no sistema de coordenadas WGS84, zona 22S.

O processamento dos dados eletromagnéticos compreendeu a elaboração de pseudo-seções de condutividade aparente por meio do interpolador de krigagem no programa Surfer, desenvolvido pela Golden Software Inc. Esse programa possibilita ainda o cálculo e a construção de mapas de variáveis distintas a partir da interpolação de dados regularmente distribuídos (Golden Software Inc, 2009).

forma de apresentação visa ao melhor discernimento entre as possíveis concentrações anômalas oriundas de variações litológicas e hidrotermais das geradas por processos pedogenéticos e/ou de movimentos de massa (Saunders et al., 1987; Wilford et al., 1997; Carvalho et al., 2006).

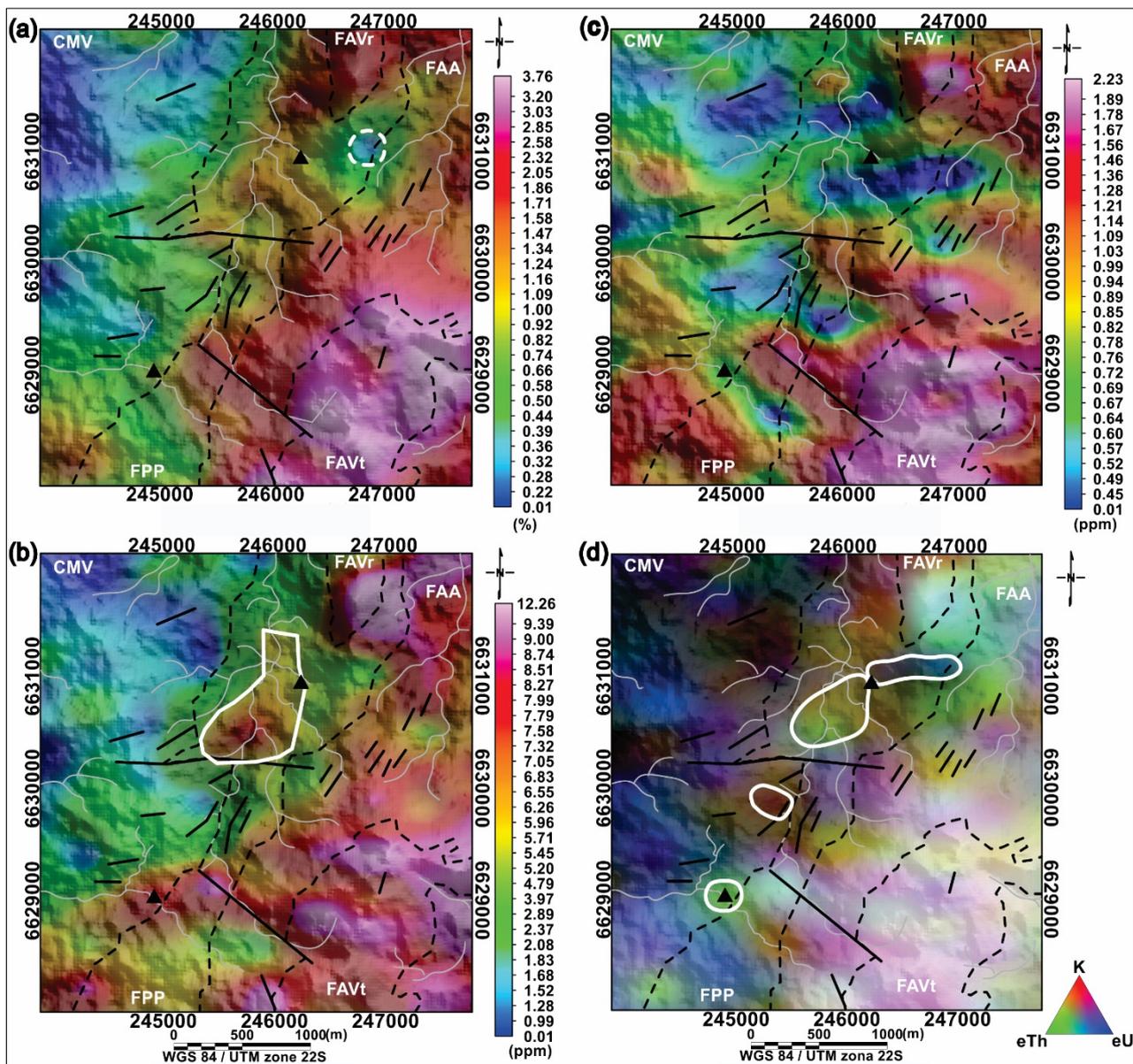


Figura 5 - Mapas radiométricos aéreos da área de estudo: K (a), eTh (b), eU (c) e ternário RGB (d).

O mapa do K (Figura 5a) mostra as rochas metavulcanoclásticas do CMV com valores baixos (em tons azuis), sobretudo no quadrante noroeste, enquanto, ao Sul, predominam teores médios (em verde) próximos ao contato com os arenitos arcosianos conglomeráticos da FPP. Concentrações mais acentuadas (entre amarelo e laranja) ocorrem no extremo sudoeste do complexo. Na FPP, são demarcados valores baixos a médios (azul ao verde) próximos aos contatos, e médios a altos (amarelo ao vermelho) nas porções mais centrais. Os arenitos sigmoidais da FAA e os riolitos da FAVr revelam teores mais elevados em cores vermelhas. No contato nordeste entre a FPP e a FAA, ocorre uma pequena zona circular de baixo valor, demarcada em branco tracejado na figura 5a, semelhante às anomalias observadas no CMV. As maiores concentrações (tonalidade magenta) correspondem

aos tufos ácidos da FAVt, cujos contatos são bem delineados gamaespectrometricamente. As ocorrências de cobre não denotam assinaturas típicas de K, situando-se na transição entre valores médios a altos.

A distribuição do K na área de estudo mostrou bom contraste entre os litotipos mais básicos do CMV e as rochas mais ácidas da Bacia do Camaquã (destaque para a coerência dos limites da FAVt). É evidente a dispersão de K por processos intempéricos e remobilização, tanto das rochas da FAVt (extremo SE da Figura 5a) para a unidade FAA, onde dominam cotas menores (Figura 2b), quanto das rochas da FAVr para a unidade FPP.

O mapa do eTh (Figura 5b) apresenta o CMV com domínio de valores baixos em cores azuis, de norte até a ocorrência Victor Teixeira, onde os índices são mais elevados (tons laranjas e

vermelhos). A FPP apresenta domínio de valores intermediários em verde. A ocorrência Capão Grande se localiza na borda de uma anomalia mais intensa demarcada em branco. Os arenitos sigmoidais da FAA apresentam valores altos (laranja ao vermelho), acompanhando sua disposição preferencial NE-SW. Os máximos valores em magenta demarcam as unidades FAVr e FAVt.

Embora o Th seja o radionuclídeo menos móvel no ambiente natural, a sua migração, adsorvido às argilas, ocorre dos litotipos ácidos da FAVt (predominantemente) e da FAVr para os arenitos sigmoidais da FAA. Essa dispersão atinge o embasamento na localidade da ocorrência Victor Teixeira pela drenagem que acompanha a falha regional NW-SE. Em contraste, não é claro o transporte de material mais rico em tório de sudeste para noroeste pelas drenagens até a área delineada na FPP, podendo caracterizar uma zona de concentração anômala não residual.

O mapa do eU (Figura 5c) evidencia as rochas metavulcanoclásticas do CMV e as coberturas areníticas arcosianas (FPP) e sigmoidais (FAA) através de faixas alternadas de valores baixos, médios (característica das ocorrências cupríferas) e altos. Apenas as unidades ácidas, topograficamente mais elevadas (FAVr e FAVt), apresentam concentrações altas (cor magenta), as quais são coerentes com os limites geológicos.

A dispersão do eU na área de estudo não é tão clara, diferentemente do observado nos mapas do K (Figura 5a) e do eTh (Figura 5b). As áreas de elevada concentração de eU caracterizadas junto as falhas regionais (NW-SE e E-W) são entendidas como resultado dos produtos de intemperismo e transporte (dominantemente pelas drenagens NW-SE) dos tufos ácidos da FAVt.

O mapa ternário RGB (Figura 5d) apresenta o CMV predominantemente com tonalidades escuras, indicativo das baixas concentrações dos três elementos. Os núcleos azulados refletem teores maiores de eU (Figura 5c), relativamente ao K (Figura 5a) e ao eTh (Figura 5b). Próximo ao contato com a FPP é destacada em branco uma área anômala em potássio e na ocorrência Victor Teixeira concentração de tório. A FPP é demarcada pela maior variação composicional (intercalação de K, eTh e eU) dentre as unidades da Bacia do Camaquã. A ocorrência Capão Grande se dispõe no limite entre áreas enriquecidas em eTh e eU, delineadas em branco. A FAA é caracterizada pela intercalação de

potássio com zonas que reúnem os três elementos (tons esbranquiçados). Essa última assinatura predomina nas unidades ácidas sotopostas da FAVr e FAVt (Figura 5d). A tonalidade lilás clara no âmbito da FAVt e na sua zona de dispersão na FAA pode indicar contribuições de K e eU, em detrimento do eTh.

A composição ternária RGB demonstrou eficiência na caracterização de contrastes radiométricos coerentes com os limites geológicos e ainda possibilitou a observação de variações composicionais internas das unidades. As anomalias demarcadas em branco parecem não indicar relação direta com o lixiviamento de minerais das unidades mais elevadas, podendo representar concentrações associadas a processos ígneos, metamórficos ou hidrotermais.

O mapa da razão eU/K (Figura 6a) demarca o CMV com anomalias de altas a máximas amplitudes (enriquecidas em urânio). Apenas na proximidade da falha regional E-W e na ocorrência Victor Teixeira são notados valores menos intensos. No contexto da FPP, são assinaladas em branco tracejado as duas zonas com as menores razões eU/K (tons azuis escuros), uma imediatamente a sul da ocorrência Capão Grande e outra a norte. Mais a leste também é demarcada uma anomalia circular de alta intensidade, semelhante aquelas que dominam o contexto do embasamento. Os litotipos da FAA, FAVr e FAVt mostram faixas com intensidades variadas (leve domínio para valores baixos mais potássicos em tons azuis).

O mapa da razão eTh/K (Figura 6b) exhibe o CMV e a FPP com domínio de anomalias de máxima amplitude (concentrações de tório), sendo destaque as ocorrências de cobre, a área próxima à falha regional E-W e o contato nordeste com a formação FAA. Baixos valores da razão eTh/K são assinalados em branco tracejado sem clara associação com rochas potássicas. Por outro lado, os índices baixos da FAVt refletem sua litologia ácida.

O mapa do Parâmetro F (Figura 6c) não exhibe um contraste nítido entre os litotipos do CMV e da FPP. Áreas restritas de alto F ocorrem no CMV (demarcadas em branco) sem relação com rochas ácidas. O padrão anômalo mais evidente e coerente com os limites geológicos corresponde à máxima concentração de K em magenta na unidade FAVt. Já os contornos da FAA e da FAVr denotam boa correspondência com valores altos em vermelho. É notável que as zonas de baixos valores de F atribuídas a concentrações de

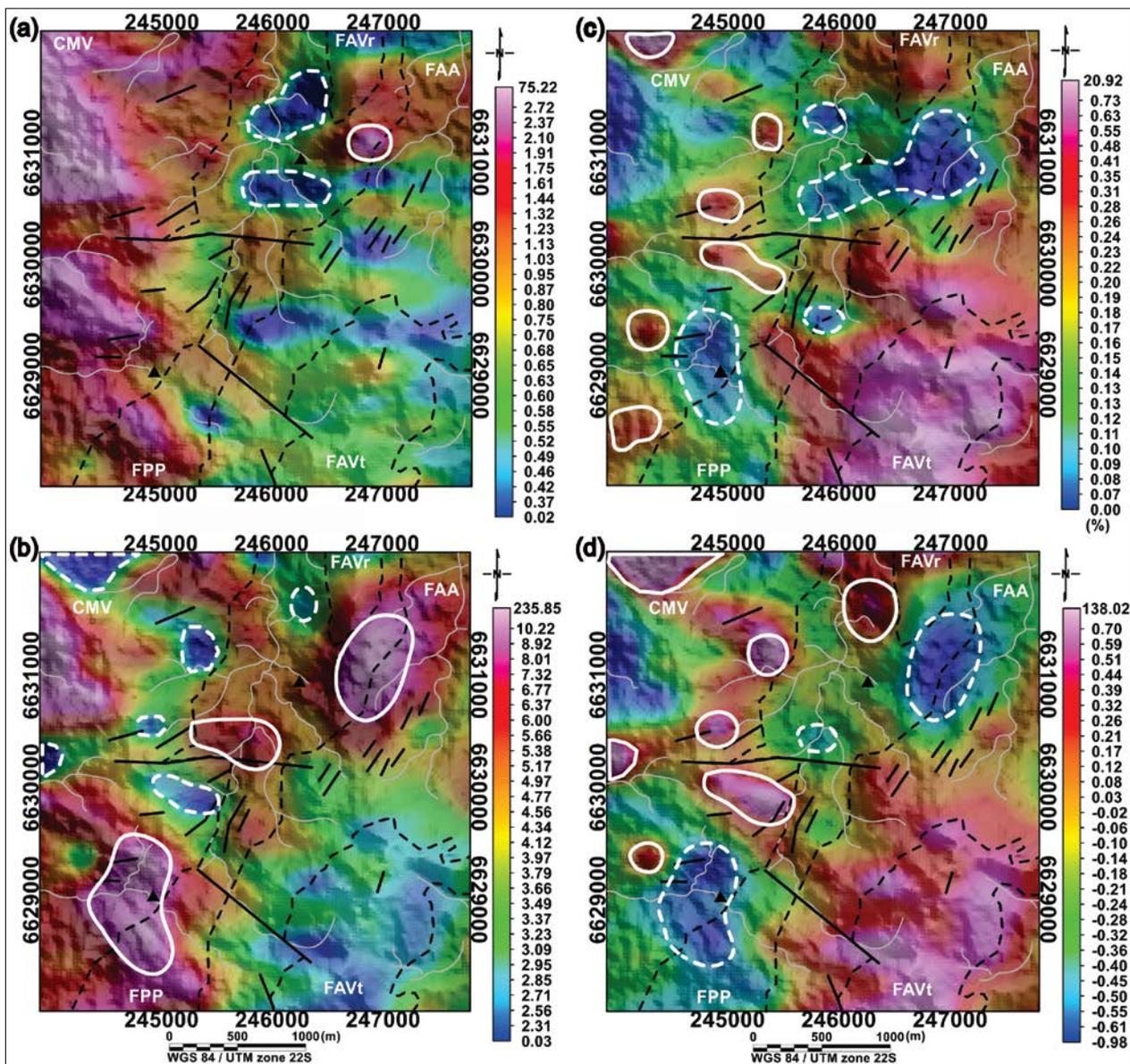


Figura 6 - Mapas radiométricos aéreos da área de estudo: razão eU/K (a), razão eTh/K (b), parâmetro F (c) e K_d (d).

concentrações de tório (assinaladas em branco tracejado) parecem espacialmente vinculadas às ocorrências minerais.

O mapa do K_d (Figura 6d) apresenta o CMV com predominância de valores baixos (tons azuis e verdes), padrão análogo ao observado na figura 6c, o qual também envolve a ocorrência Victor Teixeira (linha branca tracejada).

Concentrações anômalas representadas por índices elevados em vermelho (demarcadas em branco) são indicadas de forma localizada predominantemente próximo aos contatos geológicos. Na FPP ocorrem variações de índices baixos, médios (padrão da ocorrência Capão Grande) e altos. A oeste do contato com a FAVr ocorrem valores mais expressivos delineados em branco. Já no contato sudoeste da FAVr se destaca uma área com valores muito baixos (demarcada em branco tracejado). Os limites das FAA e FAVt são bem

definidos por valores altos em vermelho e máximos em magenta, respectivamente.

No geral, os mapas da figura 6 mostraram um domínio de urânio e tório para o CMV e de potássio para a FAVr e FAVt, reflexo de suas litologias. Por outro lado, as áreas delineadas em branco nas proximidades dos contatos geológicos e da falha regional E-W diferem do comportamento gamaespectrométrico de suas encaixantes, podendo configurar zonas de alteração metamórfica ou hidrotermal. As ocorrências de cobre denotaram mais afinidade com tório do que com o potássio e urânio. Lixiviamento de minerais das unidades mais elevadas para as de menor altitude puderam ser inferidas, respectivamente do CMV (urânio e tório) para a FPP e da FAVt (potássio) para a FAA. Por fim, a área circular a elíptica enriquecida em tório e urânio, demarcada no

contato nordeste entre a FPP e a FAA, pode compreender uma intrusão de rocha ígnea básica a intermediária não evidenciada no mapa geológico, pois suas assinaturas são equivalentes as dominantes no embasamento metamórfico.

Devido a sobreposição de valores elevados de

F e Kd e baixas razões eTh/K, a área situada entre as ocorrências Victor Teixeira e Capão Grande (Figura 7) foi selecionada como principal alvo prospectivo para o detalhamento eletromagnético terrestre, na qual foram investigados os perfis EM02 e EM03.

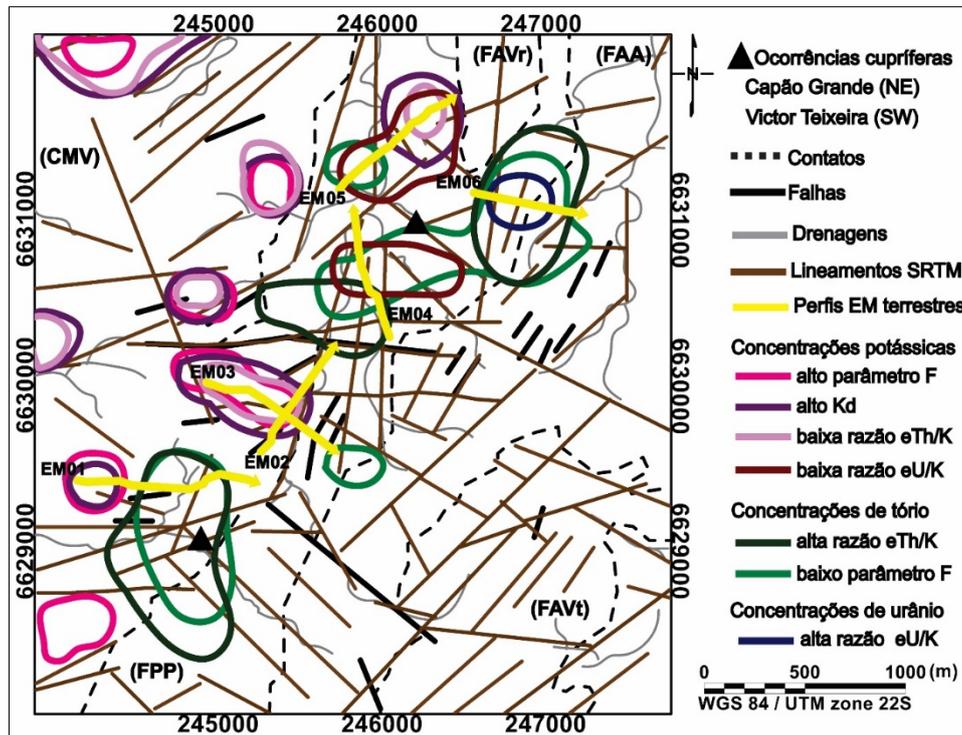


Figura 7 - Mapa da área de estudo indicando as concentrações radiométricas de interesse.

O perfil EM01, a nordeste da ocorrência Victor Teixeira, foi selecionado como decorrência da sobreposição de valores elevados de F, Kd e da razão eTh/K, enquanto o perfil EM04 foi planejado com base nas baixas razões eU/K e do parâmetro F. A localização do perfil EM05 foi baseada em altos valores de Kd e baixas razões eU/K eTh/K, enquanto o perfil EM06 foi planejado devido aos altos valores das razões eU/K e eTh/K e baixos do parâmetro F.

Os dados obtidos nos caminhamentos eletromagnéticos apontados na figura 7 são apresentados em termos de pseudo-seções de condutividade aparente em escala única de cor, para facilitar a análise comparativa entre os perfis (Figura 8). Cores quentes representam índices altos (condutivos) enquanto as cores frias competem os valores mais baixos (resistivos).

Bitencourt et al. (2020) interpretaram lineamentos obtidos por sensoriamento remoto e realizaram sete perfis eletromagnéticos com o mesmo equipamento aqui empregado (EM-34), em área da ocorrência Victor Teixeira, cuja localização é indicada na figura 7. Como resultados, os autores sugeriram áreas favoráveis à acumu-

lação de sulfetos metálicos na subsuperfície da citada ocorrência cuprífera, baseadas em anomalias condutivas verticais (entre 16 mS/m e 20 mS/m) associadas ao cruzamento de lineamentos orbitais. Bitencourt et al. (2020) ainda ponderaram que a disseminação da mineralização (tanto em profundidade, quanto em superfície) estaria relacionada às zonas horizontais vinculadas às anomalias verticais condutivas.

Pereira et al. (2017) investigaram a área da ocorrência Capão Grande (Figura 7) através de quatro perfis EM associados a caminhamentos elétricos. Os resultados apontaram contrastes de condutividade relacionados a porções do solo com água, além de carbonatos e sulfetos de cobre. O regolito saturado foi delineado por anomalias horizontalizadas, em torno de 15 mS/m, até cerca de 20 m de profundidade. Zonas condutivas verticais, entre 13 mS/m e 15 mS/m, foram interpretadas como respostas de carbonatos de cobre em profundidades superiores a 30 m. Já os valores entre 17 e 20 mS/m, dispostos horizontalmente em profundidades superiores a 50 m, foram explicados pela presença de sulfetos metálicos.

A pseudo-seção de condutividade aparente do perfil EM01 (Figura 8a) mostra a subsuperfície com distribuição de zonas condutivas (acima de 14.5 mS/m) mais profundas envolvendo áreas resistivas (inferiores a 14.5 mS/m) mais rasas até a estação 600 m. Entre 640 m e o final do perfil domina a dispersão de zonas resistivas juntas à base da seção com áreas condutivas superficiais. Em ambos os segmentos ocorrem anomalias verticais a inclinadas com valores mais acentuados (entre 16.5 mS/m e 18 mS/m) nas estações 160 m, 260 m, 340 m, 720 m e 960 m, as duas últimas mais condutivas.

Na estação 720 m, ocorre a interceptação de um lineamento NE-SW identificado em análise orbital (Figura 7). A elevada condutividade e a correspondência com um lineamento estrutural conferem situação idêntica às observadas por Bitencourt et al. (2020), interpretadas como resposta de sulfetos de cobre no contexto dos xistos do CMV. Essa anomalia, assim como aquela centrada na estação 960 m, parece continuar para profundidades superiores aos 60 m.

A pseudo-seção de condutividade aparente do perfil EM02 (Figura 8b) apresenta, entre as estações 0 m e 160 m, estruturas verticalizadas que continuam em profundidade, com valores de condutividade aparente superiores a 17 mS/m. Entre as estações 160 m e 540 m também dominam estruturas verticalizadas que continuam em profundidade com valores entre 13 e 14.5 mS/m, com destaque para um núcleo profundo, entre as estações 240 m e 280 m e valores em torno de 15 mS/m. Já entre as estações 540 m e 760 m destacam-se em profundidade condutividades em torno de 15 mS/m, que envolvem um núcleo horizontalizado, mais superficial, entre as estações 580 m e 740 m, com valores entre 13 e 14.5 mS/m.

Os valores condutivos mais expressivos verificados até a estação 160 m provavelmente foram amplificados devido à influência de cercas de arame, cabos elétricos e máquinas agrícolas observados nas proximidades do caminhamento. Entretanto, a estrutura verticalizada, centrada na estação 120 m, está relacionada a uma zona de falha NE-SW indicada no mapa geológico (Figura 7). Cruzamento dessa falha NE-SW com lineamento obtido em análise de imagem de satélite (Figura 7) parece se vincular ao sinal entre 240 m e 280 m, já mencionado. Na posição da estação 560 m ocorre o contato entre o CMV e a Bacia do Camaquã, demarcado em campo por

grande desnível topográfico.

Afora zonas verticais resistivas (valores inferiores a 14.5 mS/m), restritas às estações 640 m e 720 m, a pseudo-seção de condutividade aparente do perfil EM03 (Figura 8c) evidencia domínio de distribuição condutiva (valores superiores a 14.5 mS/m). Entre 480 m e 620 m se destacam valores mais acentuados de condutividade (entre 17 mS/m e 19 mS/m), que continuam em profundidade.

A porção condutiva entre 80 m e 240 m é possivelmente influenciada pela umidade do solo decorrente de um lago a montante. Já os valores condutivos observados entre as estações 480 m e 560 m se relacionam ao cruzamento de lineamentos orbitais E-W e SW-NE, e a falha indicada no mapa geológico em torno da estação 560 m (Figura 7). Mais uma vez, a elevada condutividade associada ao cruzamento de falhas e lineamentos, sugere provável concentração de sulfetos de cobre no CMV. As estruturas verticais resistivas refletem o contato entre o embasamento e a Bacia do Camaquã. Os níveis horizontais observados entre a estação 720 m e a terminação SE da pseudo-seção refletem a disposição dos arenitos arcossianos da FPP (como verificado em afloramento da figura 3f).

A pseudo-seção de condutividade aparente do perfil EM04 (Figura 8d) indica valores condutivos homogêneos significativos (19 mS/m), em todo o segmento entre as estações 0 m e 380 m, os quais continuam em profundidade até o final da seção. No segmento superficial (até 30 m de profundidade), entre as estações 380 m e 760 m, ocorrem condutividades aparentes inferiores a 14.5 mS/m. Em torno das estações 560 m e 640 m, zonas verticalizadas menos resistivas se prolongam desde a superfície até se conectarem com domínio condutivo em profundidade.

Durante a realização do perfil EM04, não foram observados artefatos que possam ter influenciado as respostas condutivas entre as estações 0 m e 380 m. Assim, tais valores podem ser relacionados a mineralizações em subsuperfície, pois esse padrão anômalo é muito semelhante ao domínio horizontal condutivo associado a sulfetos de cobre na ocorrência Capão Grande por Pereira et al. (2017). Os contrastes laterais abruptos observados nas estações 360 m, 560 m e 640 m estão vinculados a cruzamentos de lineamentos orbitais de direções SSW-NNE a SW-NE (Figura 7), que podem representar condutos

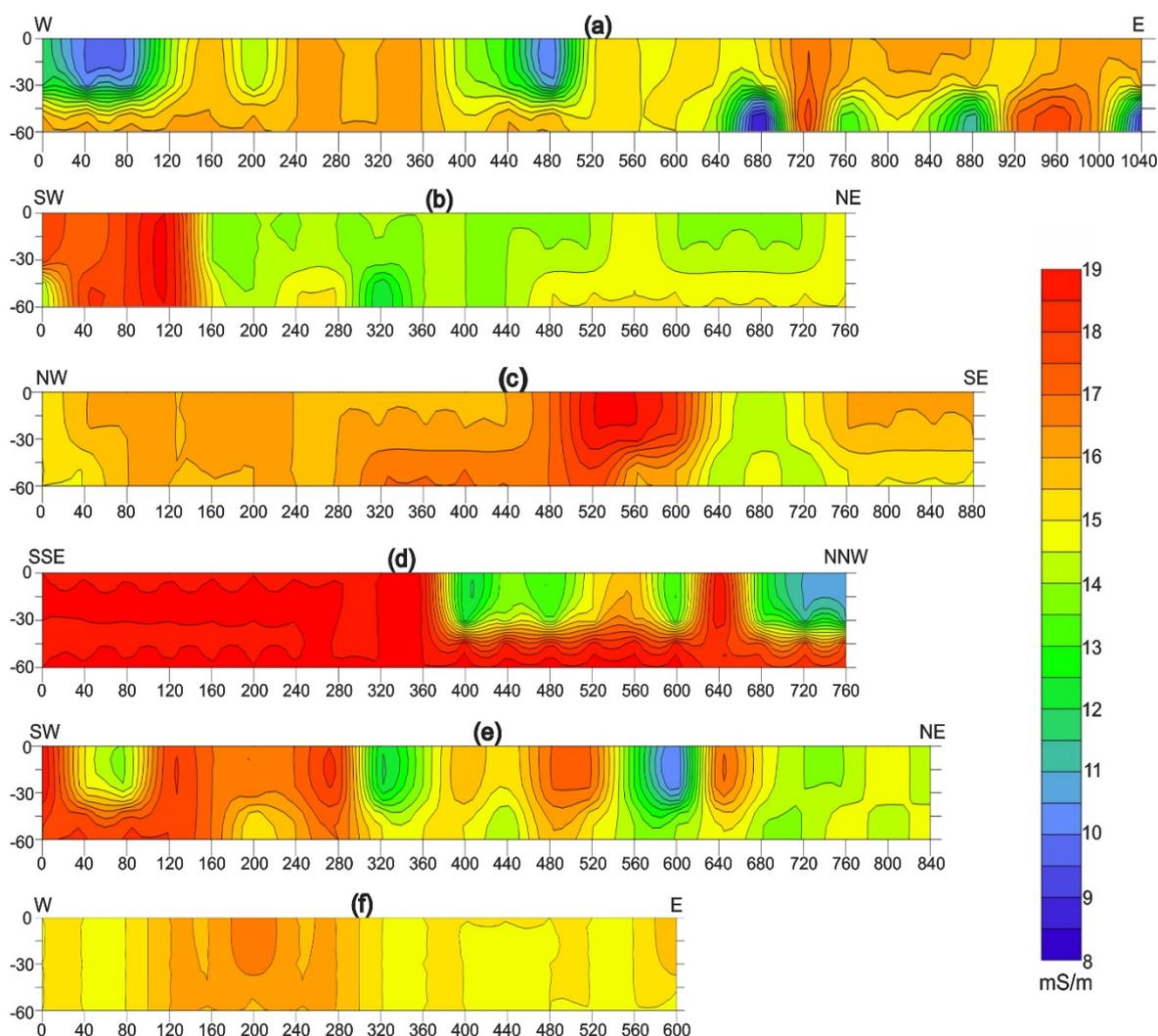


Figura 8 - Pseudo-seções de condutividade aparente dos perfis de caminhada eletromagnético: (a) EM01; (b) EM02; (c) EM03; (d) EM04; (e) EM05; (f) EM06.

de disseminação do minério.

A pseudo-seção de condutividade aparente do perfil EM05 (Figura 8e) apresenta predominância de valores condutivos, superiores a 17 mS/m, no segmento entre as estações 0 m e 300 m.

A anomalia centrada na estação 280 m corresponde ao cruzamento da drenagem mais significativa da área e também coincide com um lineamento N-S (Figura 7). Os valores elevados desse segmento refletem, possivelmente, a umidade observada do solo, decorrente da influência daquela drenagem. No restante da seção, dominam valores em torno de 15 mS/m, onde se notam zonas verticalizadas, superiores a 17 mS/m, em torno das estações 500 m e 640 m. Zonas verticalizadas mais resistivas, centradas nas estações 340 m (13 mS/m), 600 m (10 mS/m)

e 680-760 m (13 mS/m), podem ser reconhecidas nesta parte da seção.

A pseudo-seção do perfil EM06 (Figura 8f) evidencia o menor contraste de condutividade aparente, relativamente aos perfis anteriormente descritos. Dominam padrões verticalizados com valores próximos de 15 mS/m. Entretanto, entre as estações 120-280 m dominam valores em torno de 16 mS/m, coincidentes com lineamentos orbitais de direção SSW-NNE (Figura 7). A expressão lateral dessa zona em subsuperfície parece se associar melhor com a hipótese de uma intrusão de rocha básica a intermediária nos arenitos conglomeráticos e sigmoidais encaixantes da FPP e FAA do que com uma possível existência de mineralizações ou de água subterrânea.

CONCLUSÕES

O uso de dados gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010) contribuiu tanto para avanços

no mapeamento geológico local quanto à indicação de novos alvos exploratórios de cobre em áreas situadas entre as ocorrências Victor

Teixeira e Capão Grande.

A principal contribuição ao mapeamento geológico local compreendeu a caracterização de anomalias circulares a elípticas enriquecidas em tório e urânio relacionadas a uma possível intrusão ígnea no limite entre as formações Passo da Promessa e Arroio América. É provável que seja uma rocha de composição básica à intermediária, pois sua assinatura radiométrica é distinta das unidades intrusivas ácidas associadas a Formação Acampamento Velho.

A delimitação de áreas anômalas em potássio associadas a possíveis alterações hidrotermais constituiu o principal guia radiométrico prospectivo de cobre.

A correlação dessas áreas com concentrações enriquecidas em tório (correspondente a assinatura das ocorrências de cobre) também conferiu indicativo promissor para mineralizações cupríferas.

A observação de possíveis alvos relacionados com assinaturas radiométricas enriquecidas em potássio, em contraste com as ocorrências de cobre demarcadas por elevada concentração de tório revela a atuação de fases distintas de alteração hidrotermal nas mineralizações de cobre da área de estudo.

O método eletromagnético indutivo terrestre de investigação rasa mostrou resultados satisfato-

tórios quanto à caracterização de anomalias condutivas associadas a possíveis acumulações de sulfetos de cobre nos guias prospectivos indicados pela aerogamaespectrometria. No contexto do Escudo Sul-Riograndense, as anomalias condutivas se dispuseram verticalmente em locais correspondentes a estruturas (falhas e lineamentos), enquanto no contexto da Bacia do Camaquã a disposição anômala condutiva é predominantemente horizontal segundo a disposição das camadas sedimentares.

Os dados dos caminhamentos eletromagnéticos permitiram ainda a observação de importantes descontinuidades estruturais verticais estéreis de condutividades moderadas a baixas, representativas de zonas de contato entre o Complexo Metamórfico Vacacaí e a Bacia do Camaquã e dos limites laterais do corpo ígneo intrusivo indicado pela aerogamaespectrometria.

É recomendada a realização de estudos geofísicos terrestres posteriores para maior detalhamento das áreas supostamente mineralizadas em cobre abrangidas pelos perfis EM01, EM02, EM03 e EM04. A utilização conjunta da eletrorresistividade e da polarização induzida possibilitará a obtenção de contrastes físicos de baixa resistividade e elevada cargabilidade para as mineralizações cupríferas em relação as suas encaixantes metamórficas e sedimentares mais resistivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelos dados radiométricos aéreos e ao Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Pampa pelo empréstimo do condutímetro EM-34 empregado no levantamento eletromagnético terrestre. H. G. Pereira agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código financeiro 001, pela concessão de bolsa de Doutorado. F.J.F. Ferreira e C.A. Moreira foram apoiados nessa pesquisa pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, contrato 303826/2018-5) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo nº2019/14565-3), respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ALARIFI, S.A.; KELLOGG, J.N.; IBRAHIM, E. Gravity, aeromagnetic and electromagnetic study of the gold and pyrite mineralized zones in the Haile Mine area, Kershaw, South Carolina. **Journal of Applied Geophysics**, v. 164, p. 117-129, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.03.011>.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- ALMEIDA, R.P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A.R.; FAMBRINI, G.L. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. **The Journal of Geology**, v. 118, n. 2, p. 145-161, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1086/649817>.
- ALMEIDA, R.P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; MARCONATO, A. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 217, n. 1-4, p. 30-51, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.01.010>
- AL-RAWI, F.R.; AL-GABERY, A.S.; MOHAMED, S.M. Application of Electromagnetic Method for Mineral Prospecting in Al-Bayda Area, Yemen. **Journal of King Abdulaziz University**, v. 17, n. 1, p. 103-116, 2006, DOI: <https://doi.org/10.4197/Ear.17-1.6>
- ARIYIBI, E. A. Integrated Geochemical and Geophysical Approach to Mineral Prospecting – A Case Study on the Basement Complex of Ilesa Area, Nigeria. In: CHEN, D. **Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience**, Rijeka: INTECH, p. 71-92, 2011.
- BABINSKI, M.; CHEMALE JR, F.; HARTMANN, L. A.; VAN SCHMUS, W.R.; SILVA, L.C. Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. **Geology**, v. 24, n.5, p. 439-442, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091613\(1996\)024<0439:JAAMIS>2.3.C](https://doi.org/10.1130/0091613(1996)024<0439:JAAMIS>2.3.C) O;2.

- BARBUENA, D.; DE SOUZA FILHO, C.R.; LEITE, E.P.; MIGUEL JUNIOR, M.; DE ASSIS, R.R.; XAVIER, R.P.; FERREIRA, F.J.F.; DE BARROS, A.J.P. Airborne geophysical data analysis applied to geological interpretation in the Alta Floresta gold province, MT. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 31, n. 1, p. 169-186, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.22564/rbfg.v31i1.254>.
- BIONDI, J.C.; BARTOSZECK, M.K.; VANZELA, G.A. Controles geológicos e geomorfológicos dos depósitos de caulim da Bacia de Campo Alegre (SC). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 13-20, 2001.
- BITENCOURT, J.C.; LIMA, J.P.R.; HANSEN, M.A.F.; PEREIRA, H.G.; MOREIRA, C. A. Aplicação de método eletromagnético terrestre de investigação rasa numa ocorrência cuprífera localizada no interior do município de Caçapava do Sul (RS). **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 379-391, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i2.13158>.
- BORBA, A.W.; MARASCHIN, A.J.; MIZUSAKI, A.M. Evolução Tectono-Estratigráfica e Paleoclimática da Formação Maricá (Escudo Sul-Rio-Grandense, Brasil): um Exercício de Geologia Histórica e Análise Integrada de uma Bacia Sedimentar Neoproterozoica. **Revista Pesquisa em Geociências**, v. 34, n. 2, p. 57-74, 2007. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.19472>.
- BORBA, A.W.; MIZUSAKI, A.M.P.; SILVA, D.R.A.; KOESTER, E.; NORONHA, F.L.; CASAGRANDE, J. Provenance of the Neoproterozoic Maricá Formation (Sul-rio-grandense Shield, southern Brazil): petrographic and Sm-Nd isotopic constraints. **Gondwana Research**, v. 9, n. 4, p. 464-474, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.01.005>.
- BRIGGS, I.C. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p. 39-48, 1974. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440410>.
- BRITO NEVES, B.B. & CORDANI, U.G. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. **Precambrian Research**, v. 53, n. 1-2, p. 23-40, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90004-T](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90004-T).
- CAMPOS, D.S.; SILVA, A.M.; TOLEDO, C.L.B.; DE CARVALHO, M.J.; RODRIGUES, V.G.; ARAUJO, K. Prospectivity analysis of gold and iron oxide copper-gold-(silver) mineralizations from the Faina Greenstone Belt, Brazil, using multiple data sets. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 4, p. 561-590, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720170012>.
- CARVALHO, L.M.M.; PIRES, A.C.B.; OLIVEIRA, C.G.; MORAES, R.A.V.; BLUM, M.L.B. Processamento e interpretação de dados magnetométricos aéreos do projeto Itabira-ferros, MG: uma ferramenta no auxílio ao mapeamento geológico-estrutural. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n.1, p. 85-92, 2006. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200636S17784>.
- CORDANI, R. Um critério para a escolha da direção das linhas de voo em aeromagnetometria no Brasil. In: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF. Salvador, p.11-14, 2005, DOI: <https://doi.org/10.1190/sbgf2005-196>.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Passo do Salsinho, Folha SH.22-Y-A-I-4: Estado do Rio Grande do Sul**, 1995.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cachoeira do Sul: folha SH.22-Y-A: estado do Rio Grande do Sul**, 2000.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**, 2007.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**, 2010.
- DE ROS, L.F.; MORAD, S.; PAIM, P.S.G. The role of detrital composition and climate on the diagenetic evolution of continental molasses: evidence from the Cambro-Ordovician Guaritas Sequence, southern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 92, n. 3-4, p. 197-228, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90106-6).
- DENTITH, M. & MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge: Cambridge University Press, 454 p., 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139024358>.
- DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys — adding the geochemical factors. **AGSO Journal Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.
- FERREIRA, F.J.F.; FRUCHTING, A.; GUIMARÃES, G.B.; ALVES, L.S.; MARTIN, V.M.O.; ULBRICH, H.H. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. II: O exemplo do Granito Joaquim Murтинho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná. **Geologia USP. Série Científica**, v. 9, n. 1, p. 55-72, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100004>.
- FLORES, C. & PERALTA-ORTEGA, S.A. Induced polarization with in-loop transient electromagnetic soundings: A case study of mineral discrimination at El Arco porphyry copper, Mexico. **Journal of Applied Geophysics**, v. 68, n. 3, p. 423-436, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.009>.
- FONTANA, E. **Hidrotermalismo e mineralizações das rochas vulcânicas da mina do Seival: evolução geoquímica e isotópica ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$) dos fluidos e sua correlação com outros depósitos de minérios epitermais da Bacia do Camaquã – Rio Grande do Sul – Brasil**. Porto Alegre, 2016, 201p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul URL: <http://hdl.handle.net/10183/156450>.
- FORNAZZARI NETO, L. & FERREIRA, F.J.F. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 97-208, 2003.
- FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; FAMBRINI, G.L.; ALMEIDA, R.P.; PELOSI, A.P.M.R.; JANIKIAN, L.; RICCOMINI, C.; NOGUEIRA, A.; SAES, G. The Camaquã Extensional Basin: Neoproterozoic To Early Cambrian Sequences In Southernmost Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 442-445, 2000. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000303442445>.
- GEONICS. EM-34 & EM34-3XL **Operating Instructions (for model with two digital meters)**. Ontario Canada L5T 1C6, 2007.
- GNOJEK, I. & PRICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). **Geoexploration**, v. 23, n. 4, p. 491-502, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(85\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0016-7142(85)90076-6).
- GOLDEN SOFTWARE INC. **SURFER 9 User's guide/Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers**, Software, 2009.
- GRANDA, A.; GRANDA, T.; PONS, J.M.; VIDEIRA, J.C. The leading role of geophysical methods in the discovery of the La Magdalena VMS deposit in the Pyrite Belt, Huelva. **First Break**, v. 34, n. 8, p. 67-78, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.34.8.86176>.
- HARTMANN, L.A.; LEITE, J.A.D.; SILVA, L.C.; REMUS, M.V.D.; MCNAUGHTON, N.J.; GROVES, D.I.; FLETCHER, I.R.; SANTOS, J.O.S.; VASCONCELLOS, M.A.Z. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 47, n. 5, p. 829-844, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00815.x>.
- HOOVER, D. B. & PIERCE, H. A. **Annotated Bibliography of**

- Gamma-Ray Methods Applied to Gold Exploration.** Open-File Report 90-203. US Geological Survey, 1990. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr90203>.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Cidades – Caçapava do Sul**, 2020. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=430280>. Acessado em: 05jun2020.
- JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; CORRÊA, C.R.A.; PELOSI, A.P.M.R. Evolução Paleambiental e sequências deposicionais do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho (Supergrupo Camaquã) na porção norte da Sub-bacia Camaquã ocidental. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 2, p. 245-256, 2005.
- JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; FAMBRINI, G. L. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área-tipo: litoestratigrafia, paleogeografia e significado tectônico das sucessões vulcano-sedimentares do Supergrupo Camaquã, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 4, p. 349-362, 2003.
- JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; MARTINS, V.T.S.; DANTAS, E.L.; TOHVER, E.; MCREATH, I.; D'AGRELLA-FILHO, M. S. Ages (U-Pb SHRIMP and LA ICPMS) and stratigraphic evolution of the Neoproterozoic volcano-sedimentary successions from the extensional Camaquã Basin, Southern Brazil. **Gondwana Research**, v. 21, n. 2-3, p. 466-482, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.010>.
- KAZMIERCZACK, T.S. **Mapeamento da Bacia do Camaquã com a utilização de dados geofísicos, geologia e sensoriamento remoto.** Porto Alegre, 2006, 110 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. URL: <http://hdl.handle.net/10183/7645>.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration** (3rd ed). Oxford: Wiley Blackwell Science Ltd, 272 p., 2002.
- LAUX, J.H.; LINDENMAYER, Z.G.; TEIXEIRA, J.B.; BASTOS NETO, A. Ore genesis at the Camaquã copper mine, a neoproterozoic sediment-hosted deposit in Southern Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 26, n. 1-2, p. 71-89, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.11.001>.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics** (2nd ed.). New York: Cambridge University Press, 393 p., 2007. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807107>.
- MACHADO, N.; KOPPE, J.C.; HARTMANN, L.A. A late Proterozoic U-Pb age for the Bossoroca Belt, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 3, n. 2-3, p. 87-90, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90021-R](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90021-R).
- MADEN, N. & AKARYALI, E. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye). **Journal of Applied Geophysics**, v. 122, p. 74-85, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.003>.
- MATTÉ, V.; SOMMER, C.A.; LIMA, E.F.; SALDANHA, D.L.; PINHEIRO-SOMMER, J.A.; LIZ, J.D. Rochas dioríticas do Platô da Ramada, Rio Grande do Sul, e sua relação com o vulcanismo alcalino da Formação Acampamento Velho, Neoproterozoico do Escudo Sul-RioGrandense. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 343-362, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5327/Z0375-75362012000200010>.
- McNEILL, J. Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Geonics Ltd., Ontario, Canadá, **Technical Note Tn – 6**, 15 p., 1980.
- OHIOMA, O.J.; EZOMO, F.; AKINSUNMADE, A. Delineation of Hydrothermally Altered Zones that Favour Gold Mineralization in Isanlu Area, Nigeria Using Aeroradiometric Data. **International Annals of Science**, v. 2, n. 1, p. 20-27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21467/ias.2.1.20.27>.
- OSTROVSKY, E. A. Antagonism of radioactive elements in wallrock alteration fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. **International Geology Review**, v. 17, n. 4, p. 461-468, 1975. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206817509471687>.
- PAIM, P. S. G.; CHEMALE, F.; LOPES, R. C. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M. & DE ROS, L. F. **Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CIGO/UFRGS**, p. 231-274, 2000.
- PELOSI, A.P.M.R. & FRAGOSO-CESAR, A.R.S. Proposta litoestratigráfica e considerações paleoambientais sobre o Grupo Maricá (Neoproterozoico III), Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 137-148, 2003.
- PEREIRA, H.G.; MOREIRA, C.A.; CAMARERO, P.L. Correlação de dados geofísicos em pesquisa mineral de ocorrência de cobre em Caçapava do Sul (RS). **Geociências**, v. 36, n. 4, p. 717-729, 2017.
- PIRAJNO, F. **Hydrothermal Mineral Deposits: Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist.** Berlin: Springer, 709 p., 1992, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75671-9>.
- PIRES, A.C.B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 1, p. 61-68, 1995.
- REMUS, M.V.D.; HARTMANN, L.A.; MCNAUGHTON, N.J.; GROVES, D.I.; REISCHL, J. Distal Magmatic-Hydrothermal Origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) Deposits, Southern Brazil. **Gondwana Research**, v. 3, n. 2, p. 155-174, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70094-0](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70094-0).
- REMUS, M.V.D.; MCNAUGHTON, N.J.; HARTMANN, L.A.; KOPPE, J.C.; FLETCHER, I.R.; GROVES, D.I. Gold in the Neoproterozoic juvenile Bossoroca Volcanic Arc of southernmost Brazil: isotopic constraints on timing and sources. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 12, n.4, p. 349-366, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00026-7).
- RIBEIRO, M. **Geologia da Folha de Bom Jardim, Rio Grande do Sul, Brasil.** Rio de Janeiro: Boletim n°247, Departamento Nacional de Produção Mineral, 142 p., 1970.
- RIBEIRO, M.; BOCCHI, P.R.; FIGUEIREDO, P.M.; TESSARI, R.I. **Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.** Rio de Janeiro: Boletim n°127, Departamento Nacional de Produção Mineral, 32 p., 1966.
- RIBEIRO, M.J. 1978. **Mapa Previsional do Cobre no Escudo Sul-Rio-Grandense: Nota Explicativa.** Brasília: Série de geologia econômica n° 01, Departamento Nacional de Produção Mineral, 104 p., 1978.
- RIBEIRO, V.B.; MANTOVANI, M.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. **Terrae Didactica**, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20396/td.v10i1.8637386>.
- RONCHI, L.H. & LOBATO, A.O.C. **Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar.** São Leopoldo: Unisinos, 366 p., 2000.
- SANTOS, M.G.M.; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S. Paleostress analysis in brittle structures of the Camaquã Copper Mines. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 3, p. 573-584, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5327/Z0375-75362012000300011>.
- SAUNDERS, D.F.; TERRY, S.A.; THOMPSON, C.K. Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. **Geophysics**, v. 52, n. 11, p. 1547-1556, 1987. DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1442271>.
- SHIVES, R.B.K.; CHARNONNEAU, B.W.; FORD, K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry-Recognition of alteration related to mineralization. **Geophysics**, v. 65, n. 6, p. 2001-2011, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444884>.
- SILVA, A.M.; PIRES, A.C.B.; MCCAFFERTY, A.; DE

- MORAES, R.A.V.; XIA, H. Application of Airborne Geophysical Data to Mineral Exploration in The Uneven Exposed Terrains of th Rio das Velhas Greenstone Belt. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 17-28, 2003.
- SOARES, M.S.; KOPPE, J.C.; COSTA, J.F.C.L.; ROLIM, S.B. Interpretação das anomalias de potássio hidrotermal e parâmetro F da região do Complexo Bossoroca, São Sepé, RS. **Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 39-44, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000100008>.
- SOLIANI JR, E. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-Rio-Grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. São Paulo, 1986, 417p. Tese (Doutorado em) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, DOI: <https://doi.org/10.11606/T.44.1986.tde-15072015-153916>.
- SOMMER, C.A.; LIMA, E.F.; PIEROSAN, R.; MACHADO, A. Reoinimbritos e ignimbritos de alto grau do vulcanismo Acampamento Velho, RS: origem e temperatura de formação. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 420-435, 2011. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011413420435>.
- SOMMER, C.A.; LIMA, E.F.; NARDI, L.V.S. Evolução do vulcanismo alcalino na porção sul do Platô do Taquarembó, Dom Pedrito - RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 9, n. 2, p. 245-254, 1999. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.199929245254>.
- TEIXEIRA, A.L.; GAUCHER, C.; PAIM, P.S.G.; FONSECA, M.M.; PARENTE, C.V.; SILVA FILHO, W.F.; ALMEIDA, A.R. Bacias do estágio da transição da plataforma sul-americana. In: NETO, V. M., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R., BRITO-NEVES, B. B. **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 448-487, 2004.
- TELFORD, W.M.W.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics** (2nd ed.). London: Cambridge University Press, 792 p., 1990. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.
- TONIOLO, J.A.; GIL, C.A.A.; SANDER, A. **Metalogenia das bacias neoproterozóico-eopaleozóicas do Sul do Brasil: Bacia do Camaquã. Porto Alegre: Programa de Geologia do Brasil, Projeto Baneo, 157p., 2007.**
- USGS, 2014. Data Search — **SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)** Disp. em: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Acessado em 10jan2019.
- WEIHERMANN, J.D.; FERREIRA, F.J.F.; CURY, L.F.; DA SILVEIRA, C.T. Gamma-ray spectrometry of granitic suites of the Paranaguá Terrane, Southern Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 132, p. 38-52, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.06.017>.
- WEIJUN, C.; HONGTAO, L.; JIANMING, L.; XINGGUO, S.; QINGDONG, Z. Integrated geophysical exploration for the Longtoushan Ag–Pb–Zn deposit in the southeast of the Da Xing'an Ling mountains, Inner Mongolia, northern China. **Exploration Geophysics**, v. 41, n. 4, p. 279–288, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1071/EG09041>.
- WILFORD, J.R.; BIERWIRTH, P.N.; CRAIG, M.A. Application of airborne gamma ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 201–216, 1997.
- WYNN, J. **A Ground Electromagnetic Survey Used to Map Sulfides and Acid Sulfate Ground Waters at the Abandoned Cabin Branch Mine, Prince William Forest Park, Northern Virginia Gold-Pyrite Belt. Open-File Report 00-360**. US Geological Survey, 15 p., 2000.

Submetido em 26 de junho de 2021

Aceito para publicação em 2 de setembro de 2021