

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CAROLINA GONÇALVES LEANDRO**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E TERRESTRES E A SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA ÁREA DA MINA CERRO  
RICO, LAVRAS DO SUL (RS)**

**Caçapava do Sul**

**2017**

**CAROLINA GONÇALVES LEANDRO**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E TERRESTRES E A SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA ÁREA DA MINA CERRO  
RICO, LAVRAS DO SUL (RS)**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação *Stricto sensu* em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

Coorientadora: Profa. Dra. Delia Del Pilar Montecinos de Almeida

**Caçapava do Sul**

**2017**

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

L437i Leandro, Carolina Gonçalves  
INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E TERRESTRES E A SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA ÁREA DA MINA CERRO  
RICO, LAVRAS DO SUL (RS) / Carolina Gonçalves Leandro.  
135 p.  
  
Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM TECNOLOGIA MINERAL, 2017.  
"Orientação: Mário Jesus Tomas Rosales".  
  
1. Mina Cerro Rico . 2. Alteração hidrotermal. 3.  
Mineralização metálica. 4. Eletroresistividade. 5.  
Polarização Induzida. I. Título.

**CAROLINA GONÇALVES LEANDRO**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS AÉREOS E TERRESTRES E A SUA  
CONTRIBUIÇÃO PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA ÁREA DA MINA CERRO  
RICO, LAVRAS DO SUL (RS)**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação *Stricto sensu* em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Área de concentração: Tecnologia mineral.

Dissertação defendida e aprovada em: 30 de outubro de 2017.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Luis Eduardo Silveira da Mota Novaes  
(UFPel)

---

Prof. Dr. Adelir José Strieder  
(UFPel)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, meus pais Luiz Antônio e Denize, vocês são os meus alicerces, o amor, carinho e cuidado que recebo de vocês me nutrem diariamente e me fazem ver o quão abençoada sou por tê-los na minha vida. Muito obrigada pelo incentivo em todas as minhas escolhas, obrigada pela confiança que vocês têm em mim, muitas vezes acreditando mais em mim que eu mesma, obrigada por viverem os meus sonhos comigo e por fazerem simplesmente tudo que está ao alcance de vocês para que eu conquiste todos os meus objetivos. Toda a gratidão que eu dedicar a vocês, nunca será o suficiente, vocês são minha inspiração! Ao meu irmão Rodrigo, por todas as vezes que me pergunta: “E ai mana, como está a vida? ”, essa é a tua forma de demonstrar tua preocupação comigo, muito obrigada pela tua torcida para que tudo dê certo na minha vida acadêmica, eu sinto ela toda vez que converso contigo, obrigada pelo teu carinho e por estar sempre comigo.

Agradeço ao Tobias, meu parceiro de caminhada nessa aventura chamada vida. Muito obrigada pela paciência e compreensão nos momentos de ausência, pelas palavras de incentivo e de motivação todas as vezes em que me desanimei e pelo carinho e cuidado que sempre tens comigo.

Agradeço ao meu orientador e amigo Mário Rosales, por todo o conhecimento compartilhado e pela confiança, apoio e incentivo na elaboração da dissertação. Obrigada não só por me proporcionar conhecimento de formação profissional, mas pelas conversas e demonstrações de afeto que me fizeram aprender tantas outras coisas a respeito da vida. Tu és um professor e amigo muito especial!

Agradeço minha coorientadora e também amiga Delia Pilar, carinhosamente chamada por mim de Pilarcita, muito obrigada pelo convite para cursar o mestrado em Tecnologia Mineral, se hoje sou mestre, foi porque tu me mostraste o caminho. Obrigada por me apoiar em toda minha vida acadêmica, pelas oportunidades e pela confiança no meu potencial. Sou muito grata pela tua amizade e pela tua presença na minha vida!

Agradeço aos amigos e colegas geofísicos Renato, Lenon e Celso. Muito obrigada por sempre me ajudarem quando surgiam as dúvidas, pelo apoio nos levantamentos de campo, processamento dos dados e pelas conversas amigas.

Agradeço a empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda., por cederem gentilmente os dados aerogeofísicos e por possibilitarem a execução dos levantamentos geofísicos terrestres na área da pesquisa.

Agradeço a Universidade Federal do Pampa, aos professores, colegas, técnicos e funcionários, por todo o suporte durante o curso e a realização desse trabalho.

Agradeço as amigas e colegas de vida acadêmica Taís e Camila, pelo auxílio nos trabalhos, pela amizade, pelas conversas e parceria nessa fase da minha vida.

E por fim agradeço a todos os familiares e amigos que pensaram positivo, acreditaram na minha capacidade e torceram pelo meu sucesso.

Dedico esta dissertação a minha família Luiz Antônio, Denize, Rodrigo e Tobias, com todo meu amor e gratidão, pelo incentivo e apoio incondicional em todas as minhas escolhas.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.

(George Bernard Shaw)

## RESUMO

A Mina Cerro Rico localiza-se aproximadamente a 7 km a leste da cidade de Lavras do Sul, na região central do estado do Rio Grande do Sul e está sob licença de pesquisa mineral da empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda. A área de pesquisa possui 15,758 km<sup>2</sup>, delimitada pelas longitudes 53° 47' 42,7" W - 53° 50' 56,4" W e pelas latitudes 30° 48' 5,7" S - 30° 49' 46" S. A ocorrência mineral de Au, Ag e Cu desta área, está relacionada a presença de zonas de alteração hidrotermal caracterizadas por filões de quartzo de direções NW e EW, alojados nas rochas vulcânicas da Formação Hilário (~ 580 Ma). Os dados aerogeofísicos pertencem ao levantamento gamaespectrométrico – Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul, o qual foi executado no ano de 2007 pela empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. A partir de setores identificados pela caracterização de anomalias geofísicas oriundas do processamento dos dados aerogamaespectrométricos onde foi definida uma área para levantamentos geofísicos terrestres em escala de detalhe, aproximadamente de 1: 3.000, com os métodos geoeletricos de Eletroresistividade e de Polarização Induzida, utilizando as técnicas de Caminhamento Elétrico e de Sondagem Elétrica Vertical. Os dados aerogamaespectrométricos permitiram a partir da interpretação do mapa Ternário dos radioelementos (K (%), eU (ppm), eTh (ppm)), a identificação de cinco domínios radiométricos que sugerem a presença de diferentes litologias, em termos de possíveis variações na textura e na mineralogia das rochas e solos presentes na área. Os perfis gamaespectrométricos integrados com os dados geoeletricos possibilitaram a identificação de possíveis zonas de fraturas e/ou falhas, com provável percolação de fluido hidrotermal e/ou presença de mineralizações metálicas. O modelo geofísico-geológico 2D proposto para a área da Mina Cerro Rico, sugere que o topo do embasamento andesítico se encontra entre 20 a 30 metros de profundidade, caracterizado pela presença de um relevo irregular, afetado por fraturas e/ou falhas. Conforme a integração dos resultados oriundos dos dados de resistividade e da cargabilidade, definiu-se que patamares anômalos com valor de resistividade em torno de 200 Ohm.m e de cargabilidade em torno de 8 mV/V a 12 mV/V, estão associados a presença de zonas de fraturas com possível mineralização metálica. Os setores da área com presença de fraturas preenchidas por veios de quartzo e com provável mineralização, resultam em potenciais atrativos, para dar

continuidade e orientar futuras pesquisas relacionadas a prospecção aurífera na Mina Cerro Rico.

Palavras chave: Mina Cerro Rico, alteração hidrotermal, mineralização metálica, aerogamaespectrometria, eletrorresistividade, polarização induzida.

## ABSTRACT

The Cerro Rico Mine is located approximately 7 km east of the Lavras do Sul city, in the central region of the state of Rio Grande do Sul and is under mineral exploration license of the Amarello Mineração do Brasil company. The research area is 15,758 km<sup>2</sup>, delimited by longitudes 53° 47' 42.7 "W - 53° 50' 56.4" W and latitudes 30° 48' 5,7 "S - 30° 49' 46" S. The occurrence of gold, silver and copper minerals in this area are related to the presence of hydrothermal alteration zones characterized by quartz filaments through NW and EW directions, intruded in the volcanic rocks of the Hilário Formation (~ 580 Ma). The aerogeophysical data belongs to the Lavras do Sul Gammasspectrometric Survey Project, which was executed by Prospectors Aerial Surveys and Systems in 2007. The sectors was identified by the characterization of geophysical anomalies through the processing of aerogamaespectrometric data, in this area the geophysical surveying was made on a scale of approximately 1: 3.000 and defined with the geoelectric methods of Eletroresistivity and Induced Polarization using the techniques of 2D Horizontal Profiling and Vertical Electrical Sounding. The aerogamaespectrometric data allowed the identification of five radiometric domains that suggests the presence of different lithologies in terms of possible variations in the radioelements (K (%), eU (ppm), eTh (ppm)), texture and mineralogy of the rocks and soils present in the area. The gamma spectrometric profiles integrated with the geoelectric data allowed the identification of possible zones of fractures and/or faults, with probable percolation of hydrothermal fluid and/or presence of metallic mineralizations. The 2D geophysical-geological model proposed for the Cerro Rico Mine area, suggests that the depth of the top of the andesitic basement is between 20 and 30 meters, characterized by the presence of irregular relief, affected by fractures and/or faults. According to the integration of the results from the resistivity and chargeability data, the anomalous levels with a resistivity value around 200 Ohm.m and chargeability of 8 mV/V to 12 mV/V are associated with the presence of fracture zones with possible metallic mineralization. The sectors of the area with presence of fractures filled by quartz veins and probable mineralization, results in attractive potentials, to give continuity and guide future research related to gold prospecting in the Cerro Rico Mine.

Keywords: Cerro Rico Mine, hydrothermal alteration, metallic mineralization, aerogamaespectrometry, electroresistance, induced polarization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acesso e localização da área de estudo. ....	28
Figura 2 – Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul Rio-Grandense. ....	29
Figura 3 – Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul. ....	32
Figura 4 – Mapa geológico regional da área de estudo, mostrando os perfis A-A' (NW-SE) e B-B' (NE-SW). ....	35
Figura 5 – Espectro típico da radiação gama, medido a 100 metros de altitude, ilustrando os fotópicos de maior intensidade e as posições das janelas dos radioelementos K, U e Th e da Contagem Total. ....	40
Figura 6 – Variação na média de concentração dos elementos K, U e Th em rochas ígneas com o aumento do conteúdo de sílica. ....	42
Figura 7 – Esquema gráfico mostrando o circuito elétrico em um condutor cilíndrico homogêneo. ....	47
Figura 8 – Esquema gráfico mostrando o campo equipotencial elétrico produzido por um eletrodo de corrente. ....	48
Figura 9 – O fenômeno de Polarização Induzida no Domínio do Tempo. ....	51
Figura 10 – Mecanismos de polarização induzida. (a) polarização de membrana (b) polarização metálica ou eletrônica. ....	52
Figura 11 – Arranjo Dipolo-Dipolo. ....	54
Figura 12 – Arranjo Wenner. ....	56
Figura 13 – Esquema de representação dos veios na Mina Cerro Rico. ....	60
Figura 14 – Descrição litológica do furo de sondagem 1. ....	61
Figura 15 – Descrição litológica do furo de sondagem 2. ....	62
Figura 16 – Descrição litológica do furo de sondagem 3. ....	62
Figura 17 – Área do estudo geoeletrico realizado por Rigoti & Blanco. ....	65
Figura 18 – Curva de cargabilidade aparente da região do CILS. ....	66
Figura 19 – Curva de resistividade aparente da região do CILS. ....	66
Figura 20 – Mapa de cargabilidade, corte horizontal na cota 400 m, conforme modelo geoeletrico, Alvo Butiá. ....	69
Figura 21 – Mapa de resistividade, corte horizontal na cota 400 m, conforme modelo geoeletrico, Alvo Butiá. ....	69

Figura 22 – Pseudoseções de cargabilidade (mV/V), medida (seção superior), calculada (seção intermediária) e modelo obtido (seção inferior), para o perfil P600E, Alvo Butiá.....	70
Figura 23 – Modelo 2D de cargabilidade obtido para o perfil P600E, Alvo Butiá.....	70
Figura 24 – Pseudoseções de resistividade (Ohm.m), medida (seção superior), calculada (seção intermediária) e modelo obtido (seção inferior), para o perfil P600E, Alvo Butiá.....	71
Figura 25 – Modelo 2D de resistividade obtido para o perfil P600E, Alvo Butiá. ....	71
Figura 26 – Mapa de localização do levantamento aerogeofísico gamaespectrométrico – Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul. ....	73
Figura 27 – Modelo numérico de elevação digital do terreno baseado em dados <i>ASTER-GDEM</i> .....	74
Figura 28 – Fluxograma de processamento dos dados aerogamaespectrométricos. ....	75
Figura 29 – Fluxograma esquemático com o procedimento aplicado ao processamento dos dados aerogamaespectrométricos, onde foram gerados mapas de imagens dos valores anômalos das concentrações dos radioelementos.....	77
Figura 30 – Mapa gamaespectrométrico da janela de Contagem Total (CT). ....	79
Figura 31 – Mapa gamaespectrométrico do canal do potássio (K).....	79
Figura 32 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do Tório (eTh). ...	80
Figura 33 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do Urânio (eU). ..	80
Figura 34 – Mapa gamaespectrométrico da razão do eTh/K. ....	81
Figura 35 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/K.....	81
Figura 36 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/eTh.....	82
Figura 37 – Mapa ternário de imagem RGB. ....	82
Figura 38 – Mapa gamaespectrométrico de Contagem Total (CT) para a área da Mina Cerro Rico.....	83
Figura 39 – Mapa gamaespectrométrico do canal do potássio (K) para área da Mina Cerro Rico.....	84
Figura 40 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do tório (eTh) para área da Mina Cerro Rico.....	84
Figura 41 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do urânio (eU) para área da Mina Cerro Rico.....	85

Figura 42 – Mapa gamaespectrométrico da razão $eTh/K$ para a área da Mina Cerro Rico. ....	85
Figura 43 – Mapa gamaespectrométrico da razão $eU/K$ para a área da Mina Cerro Rico. ....	86
Figura 44 – Mapa gamaespectrométrico da razão $eU/eTh$ para a área da Mina Cerro Rico. ....	86
Figura 45 – Mapa de domínios radiométricos a partir da imagem ternária RGB para a área da Mina Cerro Rico. ....	87
Figura 46 – Mapa gamaespectrométrico do potássio anômalo (Kd). ....	90
Figura 47 – Mapa gamaespectrométrico do urânio anômalo (Ud). ....	90
Figura 48 – Mapa gamaespectrométrico do Fator F. ....	91
Figura 49 – Mapa gamaespectrométrico do potássio anômalo (Kd) para a área da Mina Cerro Rico. ....	92
Figura 50 – Mapa gamaespectrométrico do urânio anômalo (Ud) para a área da Mina Cerro Rico. ....	92
Figura 51 – Mapa gamaespectrométrico do Fator F para a área da Mina Cerro Rico. ....	93
Figura 52 – Localização da área de estudo mostrando as linhas de CE e o posicionamento das SEVs.....	94
Figura 53 – Imagem da área do levantamento geofísico terrestre. ....	94
Figura 54 – Mapa de isocontornos anômalos (Fator F, K, $eTh$ e $eU$ ), mostrando o posicionamento das linhas de medição de CE e das SEVs. ....	96
Figura 55 – Modelos estimados para as curvas de resistividade aparente, correspondentes as SEVs realizadas na área de estudo. ....	97
Figura 56 – Curvas de campo de resistividade aparente oriundas dos dados adquiridos nas SEVs.....	101
Figura 57 – Modelos estimados para as curvas de cargabilidade aparente, correspondentes as SEVs realizadas na área de estudo. ....	102
Figura 58 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 01. ....	108
Figura 59 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 02. ....	109
Figura 60 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 03. ....	110
Figura 61 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 04. ....	111
Figura 62 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 05. ....	112
Figura 63 – Modelo 3D de resistividade elétrica para a área de estudo.....	113

Figura 64 – Esquema ilustrativo da localização das linhas de CE em conjunto com o posicionamento das SEVs na área de estudo. ....	114
Figura 65 – Modelo 2D de resistividade integrado com as colunas geoeletricas das SEVs.....	115
Figura 66 – Integração dos dados aerogamaespectrométricos, geoeletricos e geológicos.....	118
Figura 67 – Seções geoeletricas de cargabilidade e de resistividade. ....	119
Figura 68 – Integração de dados das anomalias de Fator F, Kd e Ud e dos patamares anômalos de cargabilidade a 10 e 20 metros de profundidade. ....	120
Figura 69 – Integração dos patamares anômalos de resistividade e cargabilidade a 10 e 20 metros de profundidade com a seção geoeletrica. ....	122
Figura 70 – Modelo 2D de cargabilidade e resistividade obtidos a partir da inversão dos dados das SEVs.....	123
Figura 71 – Modelo geofísico-geológico gerado a partir da interpretação dos dados de resistividade elétrica para a linha de CE 04.....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistividade em rochas e solos. ....	46
Tabela 2 – Comparação entre as principais características dos antigos trabalhos nas mineralizações da Sequência Vulcanogênica da Bacia do Camaquã.....	59
Tabela 3 – Estudos geofísicos realizados em depósitos minerais. ....	63
Tabela 4 – Resistividades e espessuras das camadas conforme os modelos geoeletricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro Rico. ....	97
Tabela 5 – Cargabilidades e espessuras das camadas conforme os modelos geoeletricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro Rico. ....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Fm. – Formação

ASLS – Associação Shoshonítica Lavras do Sul

APVSS – Associação Plutono-Vulcano-Sedimentar Seival

BC – Bacia do Camaquã

BR-290 – Rodovia Federal

CBC – Companhia Brasileira de Cobre

CE – Caminhamento Elétrico

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul

CMP – Companhia de Mineração e Participações

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

CRM – Companhia Riograndense de Mineração

CT – Contagem Total

DEM – Modelo Digital de Elevação

DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral

ESRG – Escudo Sul Rio-Grandense

IP – Polarização Induzida

LI – Lineamento Ibaré

Ltda. – Limitada

ppm – Partes por milhão

RS-357 – Rodovia do estado do Rio Grande do Sul

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

TMAP – Terreno Metamórfico de Acresção Palma

ZCCS – Zona de Cisalhamento de Caçapava do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ag – Prata

Ar – Argônio

Au – Ouro

Bi – Bismuto

Ca – Cálcio

Cu – Cobre

eTh – Equivalente de Tório

eU – Equivalente de Urânio

E – Leste

E-W – Leste-oeste

Ga – Giga anos

I – Corrente elétrica

K - Potássio

Kd – Potássio anômalo

km – Quilômetro

km<sup>2</sup> – Quilômetro quadrado

km/h – Quilômetro/hora

m – Metros

Ma – Milhões de anos

MeV – Megaelétron-volt

ms – Milissegundos

mV – milivolt

N – Norte

NE – Nordeste

NE-SW – Nordeste-Sudoeste

NNE – Nor-nordeste

NNE-SSW – Nor-nordeste-Sul-sudoeste

N-S – Norte-Sul

NW – Noroeste

NNW – Nor-noroeste

Pb – Chumbo

S – Sul

s – Segundos

SE – Sudeste

SSE – Sul-sudeste

SSW – Sul-sudoeste

SW – Sudoeste

Th – Tório

Tl – Tálho

U – Urânio

Ud – Urânio anômalo

U-Pb – Urânio-Chumbo

V - Volt

W – Oeste

Zn – Zinco

$\alpha$  – Alfa

$\beta$  – Beta

$\gamma$  – Gama

$\rho$  – Resistividade

$\rho_a$  – Resistividade aparente

$\eta$  – Cargabilidade

$\mu\text{R/h}$  – Micro röntgen/hora

% – Porcentagem

~ – Aproximadamente

$\infty$  – Infinito

$\Delta V$  – Diferença de potencial

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
2	OBJETIVOS .....	25
2.1	Geral.....	25
2.2	Específico.....	26
3	JUSTIFICATIVA .....	26
4	ÁREA DE ESTUDO.....	27
5	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	27
5.1	Geologia regional.....	27
5.2	Geologia local .....	31
5.2.1	Descrição das Seções Geológicas correspondentes aos perfis A-A' (NW-SE) e B-B' (NE-SW).....	36
6	MÉTODOS GEOFÍSICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	37
6.1	Gamaespectrometria .....	37
6.2	Prospecção geométrica.....	45
6.2.2	Método da Eletrorresistividade.....	46
6.2.3	Método da Polarização Induzida.....	50
6.2.4	Técnicas de investigação.....	52
6.2.4.1	Caminhamento Elétrico.....	53
6.2.4.2	Sondagem Elétrica Vertical (SEV) .....	55
7	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	56
7.1	Trabalhos geológicos.....	56
7.2	Trabalhos geofísicos .....	63
7.2.1	Base de dados do levantamento aerogeofísico.....	72
8	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	74
8.1	Modelo digital de elevação do terreno.....	74
8.2	Dados aerogamaespectrométricos .....	75

8.3	Dados geoeletricos .....	93
9	INTEGRAÇÃO E INTEPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS .....	115
10	CONCLUSÕES .....	125
11	RECOMENDAÇÕES.....	127
	REFERÊNCIAS .....	128

## 1 INTRODUÇÃO

Atividades de mineração estão intimamente ligadas ao histórico do município de Lavras do Sul, onde existem inúmeras ocorrências e depósitos metálicos de ouro-cobre, pirita, ferro e cromo, a maioria parcialmente minerada no passado, onde as mineralizações auríferas estão associadas principalmente a rochas graníticas e vulcânicas. A Mina Cerro Rico foi descoberta pela “*Brazilian Gold Field Ltda*”, atuando até meados de 1915. Logo após, foi pesquisada pela Companhia Estrada de Ferro e Minas São Jerônimo. A partir de 1938, passou a ser explorada pela Companhia de José Hipólito de Souza, funcionando até 1952, em seguida passou a ser propriedade da Minesul, responsável pela Mina de Ouro Bossoroca, em São Sepé (REICHEL, 1998). Atualmente a área da Mina Cerro Rico encontra-se sob detenção de licença de pesquisa mineral da empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda.

A Mina está localizada na região da campanha do Estado do Rio Grande do Sul (RS), abrangendo inúmeras trincheiras que foram objeto de estudo no passado, por conter grandes teores de ouro (Au) em 132 partes por milhão (ppm) e prata (Ag) em 1370 ppm. Inserida no contexto geológico regional do Escudo Sul Rio-Grandense (ESRG), Lavras do Sul está sobre rochas da Província Mantiqueira – Associação Shoshonítica Lavras do Sul (ASLS) e da Bacia do Camaquã (BC). A ocorrência mineral de Au, Ag e cobre (Cu) na área da mina Cerro Rico, encontra-se condicionada a existência de filões de quartzo que apresentam direções preferenciais noroeste (NW) e leste-oeste (E-W), presentes nas rochas caracterizadas como tufos, andesitos, derrames riolíticos e conglomerados vulcânicos da Formação Hilário (~580 Ma), pertencentes ao Grupo Bom Jardim, ou Alogrupo Bom Jardim de Paim, Lopes e Chemale Jr. (1995).

O presente projeto de pesquisa visa a utilização de dados aerogamaespectrométricos integrados com dados geofísicos terrestres provenientes de levantamentos geoeletricos utilizando as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Caminhamento Elétrico (CE) e dados de Polarização Induzida (IP), para a identificação e a caracterização de áreas de alteração hidrotermal associadas com zonas de falhamentos e/ou de fraturas, que constituem as estruturas que favorecem a ocorrência de mineralizações auríferas. Os dados aerogeofísicos utilizados na pesquisa foram gentilmente cedidos pela empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda,

pertencentes ao levantamento aerogeofísico gamaespectrométrico – Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul, o qual foi executado no ano 2007 pela empresa *Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda.*

O processamento dos dados aerogamaespectrométricos seguiu um fluxograma de metodologia convencional, tendo como produtos geofísicos gráficos finais, os mapas das concentrações dos radioelementos de potássio (K) em porcentagem (%), urânio (U) em ppm, e tório (Th) em ppm, assim como os mapas das respectivas razões dos radioelementos, mapa do Fator F e mapa ternário.

O processamento dos dados geoeletricos baseou-se na obtenção de modelos 2D, a partir da inversão dos dados de resistividade aparente e de cargabilidade aparente, obtidos com as técnicas de CE e SEV.

A necessidade de dispor de um mapeamento geológico-geofísico para área da pesquisa em escala de detalhe e como consequência poder esclarecer questões relacionadas com a geologia local em termos de um arcabouço tectônico estrutural mais aprimorado, constitui um desafio, visando como objetivo final da pesquisa a obtenção de um modelo geofísico-geológico para a área a partir da integração e interpretação dos dados geofísicos oriundos dos levantamentos realizados e assim propor novos alvos para prospecção mineral.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

A pesquisa tem como objetivo principal contribuir para o esclarecimento da geologia local na área da Mina Cerro Rico, a partir da integração e interpretação de dados geofísicos aéreos e terrestres em escala de detalhe (1: 3.000), onde se pretende identificar e caracterizar áreas de alteração hidrotermal associadas com zonas de falhamentos e/ou de fraturas, possivelmente associadas a mineralizações de metais base (Ag e Cu) e de ouro (Au), presentes nas rochas da Formação (Fm.) Hilário.

## 2.2 Específico

- i. Identificar assinaturas anômalas geofísicas a partir da interpretação dos resultados dos dados gamaespectrométricos que possam estar associadas à presença de zonas de alteração hidrotermal indicadoras de ocorrências mineralizadas;
- ii. identificar e caracterizar zonas de fraturas que possam estar servindo de condutos para a presença de mineralizações metálica e /ou aurífera;
- iii. confeccionar um modelo geofísico-geológico para a área a partir da integração e interpretação dos dados oriundos dos levantamentos de IP, conjuntamente com a interpretação dos parâmetros estimados a partir dos modelos obtidos para os dados de SEV e de CE.

## 3 JUSTIFICATIVA

Trabalhos geofísicos aplicados em condições geológicas com características similares, efetuados por Dickson & Scott (1997) ao sudoeste da localidade de Vitória na Austrália, mostraram a eficiência da aplicação do método gamaespectrométrico na identificação de zonas de alteração hidrotermal. Segundo Kearey *et al.* (2009), o método da eletrorresistividade é usado no estudo de descontinuidades horizontais e verticais e na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala. O método de IP faz uso da ação capacitiva ou polarizável da subsuperfície para localizar zonas onde os minerais condutivos estão disseminados dentro de suas rochas hospedeiras (KEAREY *et al.* (2009).

A Mina Cerro Rico foi escolhida para o trabalho pelo fato de possuir vastas informações oriundas de trabalhos geológicos anteriores realizados no local, além de dispor de um levantamento aerogeofísico. Rigoti & Blanco (1985), efetuaram um estudo geoeletrico utilizando os métodos de eletrorresistividade de corrente contínua e o de IP, para esclarecer e complementar o mapeamento de granitos hidrotermalizados, mineralizados em ouro no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e com base nas respostas de ocorrências conhecidas na área, os autores correlacionaram as zonas anômalas de cargabilidade elétrica à presença dos granitos hidrotermalizados, mineralizados em ouro. Sendo assim, nos é oferecido um marco

favorável para aplicação dos métodos geoeletricos, conjuntamente com os dados aerogamaespectrométricos, para verificar o contraste necessário nas propriedades físicas e auxiliar na caracterização e interpretação das áreas hidrotermalizadas.

#### **4 ÁREA DE ESTUDO**

O município de Lavras do Sul, localizado na porção sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, dista cerca de 300 km de Porto Alegre (figura 1). Saindo da capital, o acesso tem cerca de 250 km pela rodovia BR-290, sentido oeste, até o entroncamento com a BR-392, seguindo no sentido sul até o município de Caçapava do Sul, por cerca de 20 km. Percorre-se 57 km pela RS-357, sentido sudoeste, até os limites do município de Lavras do Sul.

A área que engloba a pesquisa localiza-se a 7 km ao leste da cidade de Lavras do Sul e encontra-se inserida na Folha Lavras do Sul/RS (SH-22-Y-A-IV-3-MI-2995/3) do Serviço Geográfico do Exército (1976).

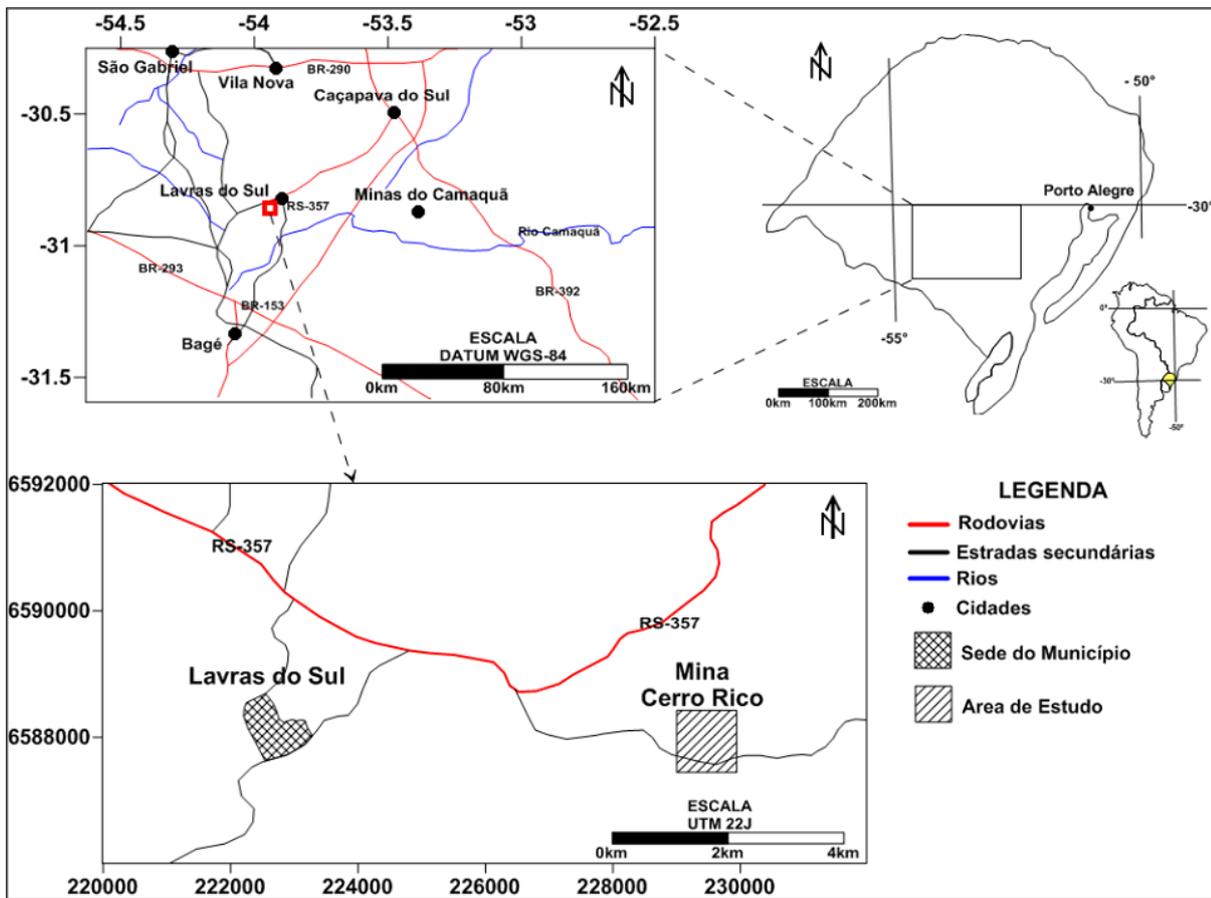
#### **5 CONTEXTO GEOLÓGICO**

##### **5.1 Geologia regional**

O município de Lavras do Sul, situado sobre o Escudo Sul Rio-Grandense (ESRG), foi dividido em quatro Terrenos ígneos e metamórficos distintos, segundo Paim *et al.* (2000): (i) Complexo Granulítico Santa Maria Chico; (ii) Terreno São Gabriel (TSG), onde está inserida a área de estudo; (iii) Cinturão Tijucas e (iv) Cinturão Granítico Gnáissico Dom Feliciano (figura 2).

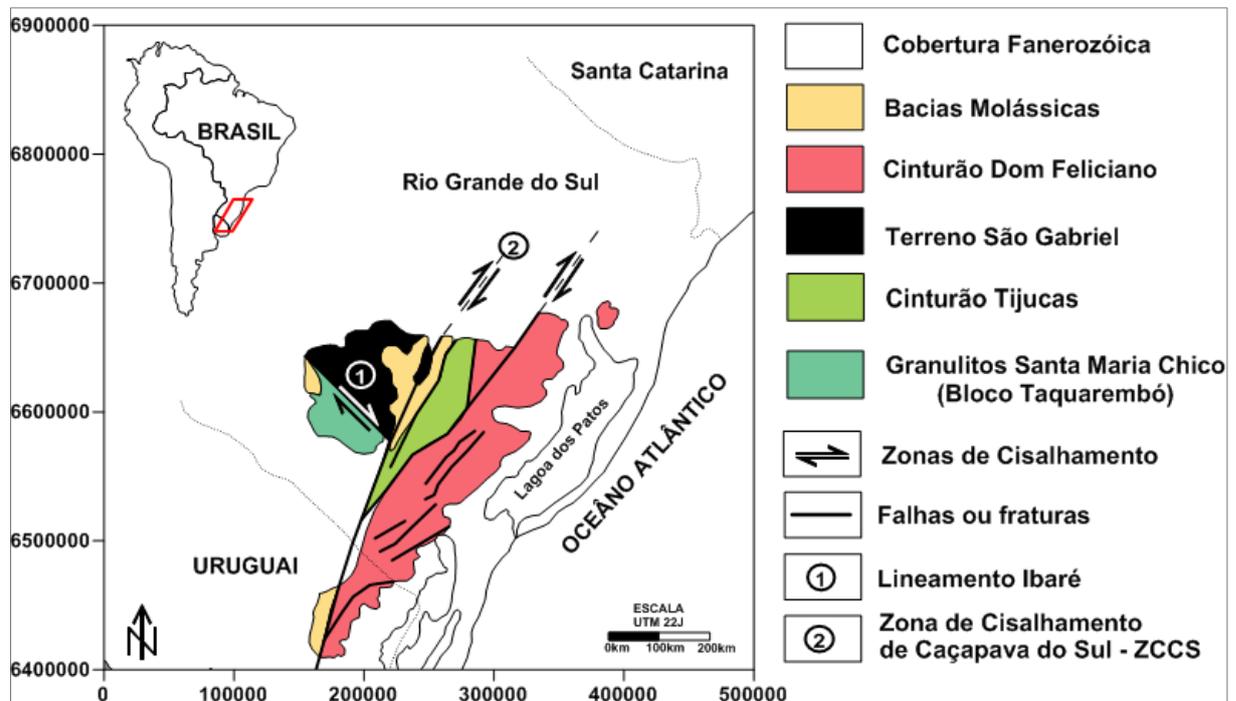
O terreno São Gabriel está delimitado a leste pela Zona de Cisalhamento de Caçapava do Sul (ZCCS) e a oeste e sul pelo Lineamento Ibaré (LI), sendo dividido em Terreno Metamórfico de Acresção Palma (TMAP) com 1 a 7 Ba constituída por rochas granito-gnáissicas e Associação Plutono-Vulcano-Sedimentar Seival (APVSS) apresentando idades entre 470 a 610 Ma.

Figura 1 – Acesso e localização da área de estudo.



Fonte: autor (2017)

Figura 2 – Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul Rio-Grandense.



Fonte: autor (2017), modificado de Oyhantçabal *et al.* 2011 (p. 208)

No contexto da APVSS, encontram-se os Alogrupos da Bacia do Camaquã descritos por Paim *et al.* (2000): Alogrupos Maricá, Bom Jardim, Cerro do Bugio, Santa Bárbara e Guaritas. A APVSS consiste de rochas vulcânicas básicas a intermediárias, sedimentares siliciclásticas a intermediárias, sedimentares siliciclásticas pertencentes à Bacia do Camaquã, com intrusões graníticas. A área de estudo está associada a rochas pertencentes ao Alogrupo Bom Jardim e mais especificamente, a Fm. Vulcano-Sedimentar Hilário.

O Alogrupo Bom Jardim (Paim *et al.* 2000) é uma sequência vulcano-sedimentar que mostra uma complexidade litoestratigráfica em sua área-tipo e similaridade litológica de algumas de suas unidades com outras unidades do Supergrupo Camaquã. O Alogrupo Bom Jardim, na sua área-tipo (Janikian *et al.* 2003), apresenta cerca de 4.000 metros de espessura e é constituído por rochas vulcânicas andesíticas, rochas piroclásticas caracterizadas por tufos lapili, tufos líticos e tufos vítreos grossos da Fm. Hilário e rochas sedimentares. O termo Hilário foi utilizado pela primeira vez por Robertson (1966) para designar uma variedade de tipos de rochas compostas

principalmente de composição andesítica a dacítica (fluxos, tufos, conglomerados vulcânicos, fluxos de lama, diques e rochas máficas intrusivas). Ribeiro *et al.* (1966) formalizou esta unidade como membro do Fm. Crespos – Grupo Bom Jardim. Santos *et al.* (1978) usaram o termo Hilário para se referir a um membro da Fm. Cerro dos Martins, enquanto Horbach *et al.* (1986) atualizaram estas rochas para o nível de formação. Vários estudos têm sido realizados sobre rochas da Fm. Hilário. Nardi & Lima (1985) e Lima & Nardi (1998) são especialmente relevantes. Assim, Lima & Nardi (1998) definiram a Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS), que compreende uma ampla faixa composicional de rochas intrusivas e extrusivas básicas a ácidas. A rocha extrusiva inclui a Fm. Hilário e os lamprófiros espessartíticos com idade de  $591.8 \pm 3$  Ma Urânio-Chumbo (U-Pb), obtida em amostra de lamprófiros tidos como a última manifestação vulcânica do evento Hilário (ALMEIDA *et al.* 2012). Idades para os eventos vulcânicos ocorridos, relacionadas à Fm. Bom Jardim  $593 \pm 6$  Ma (U-Pb SHRIMP) para os andesitos, obtidas por Remus *et al.* (1999) e  $580 \pm 3.6$  Ma (U-Pb SHRIMP) para dacitos obtidos por Janikian *et al.* (2003), demonstram que o evento vulcânico que deu origem a Fm. Hilário ocorreu entre 593-580 Ma.

Com relação a geologia da região de Lavras do Sul, Mexias *et al.*, (2007) menciona quatro etapas (figura 3):

- i. deposição dos sedimentos da Fm. Maricá sobre o embasamento constituído de gnaisses e metagranitóides, gerando uma bacia de retroarco da Orogênese Brasileira (CHEMALE Jr. 2000);
- ii. ocorrência de uma instabilidade tectônica no Neoproterozóico (últimos estágios da Orogenia Brasileira), associada a um magmatismo vulcânico, piroclástico e epiclástico, contíguo a Fm. Hilário;
- iii. intrusão de um complexo de corpos ígneos de caráter plutônico e hipoabissal com filiação geoquímica shoshonítica, causando metamorfismo de contato nas rochas vulcânicas chegando até fácies hornoblenda-hornsfels;
- iv. mineralizações com controle estrutural primário preferencial NW e secundários nordeste (NE), provocadas por falhamentos oriundos da intrusão granítica.

Os trabalhos de Bongioiolo (2006) e de Liz (2008) procuram elucidar a evolução dos sistemas hidrotermais e construir um padrão geoquímico para ASLS,

respectivamente. Dessa forma propiciam uma abordagem relacionada às mineralizações, suas formas de ocorrências e tipos geoquímicos.

Bongiolo (2006) indica que o tipo de mineralização se dá em forma de filões em veios e *stockworks* de quartzo, carbonatos, pirita e calcopirita, mantendo um padrão de apresentação sigmoidal com orientação N70W e/ou EW.

## 5.2 Geologia local

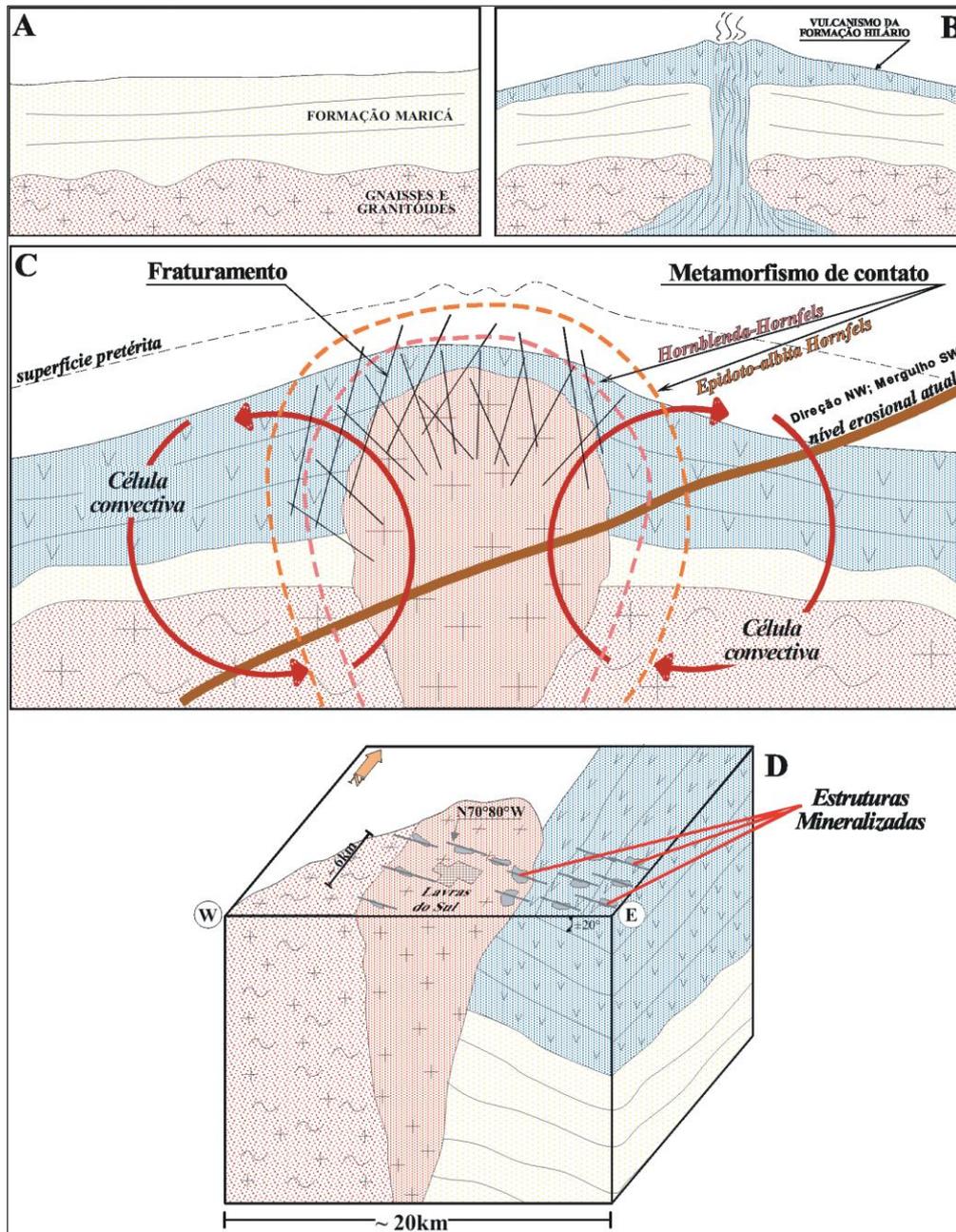
O Complexo Intrusivo Lavras do Sul é um corpo intrusivo em rochas do Terreno São Gabriel (700-900 Ma) e unidades basais da Bacia do Camaquã (Fm. Hilário e Maricá) (GASTAL, 1998).

O CILS foi subdividido em Monzogranito Tapera (porção norte) e granito Lavras (porção sul), segundo Gastal *et al.* (2015), possuindo dimensões de 12 km no sentido E-W por 18 km no sentido norte-sul (N-S). Na área correspondente a Mina Cerro Rico, são encontradas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas com algumas porções contendo material sedimentar como brechas. Estas rochas correspondem a Fm. Hilário e são descritas como piroclásticas, tufos, efusivas (subvulcânicas) e conglomerados vulcânicos (GASTAL *et al.* 2015).

Paim *et al.* (2014) inserem a Fm. Hilário no contexto do chamado Alogrupo Bom Jardim da Bacia do Camaquã, conforme citado anteriormente. Estes autores citam este Alogrupo como bacias transcorrentes, que confirmam a instabilidade tectônica citada por Mexias *et al.* (2007) e estabilidade no regime de subducção de placa (ALMEIDA *et al.* 2012).

A Fm. Hilário apresenta idade de  $591.8 \pm 3$  Ma (U-Pb), obtida em amostra de lamprófiros tidos como a última manifestação vulcânica do evento Hilário (ALMEIDA *et al.* 2012). Idades para os eventos vulcânicos ocorridos, relacionadas a Fm. Bom Jardim  $593 \pm 6$  Ma (U-Pb SHRIMP) para os andesitos, obtidas por Remus *et al.* (1999) e  $580 \pm 3.6$  Ma (U-Pb SHRIMP) para dacitos obtidos por Janikian *et al.* (2003), demonstram que o evento vulcânico que deu origem a Fm. Hilário ocorreu entre 593-580 Ma.

Figura 3 – Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul.



Fonte: Mexias *et al.* (2007, p.153)

Dentre as três formações descritas por Janikian *et al.* (2003): Cerro da Angélica, Hilário e Picada das Graças, somente a Fm. Hilário está representada na região de Lavras do Sul. As rochas da Fm. Hilário correspondem as porções vulcânicas (genericamente basaltos e andesitos) e piroclásticas (tufos, lapili tufos e brechas) (JANIKIAN, 2004).

A correlação estratigráfica ordinária é esperada neste tipo de evento vulcânico, contudo foram relatadas por Janikian (2004) em porções a leste da região de Vista Alegre, brechas vulcânicas sobrepondo tufos, situação esta que foi elucidada por Gastal *et al.* (2015). Segundo Gastal *et al.* (2015) a variabilidade do granito Lavras e sua zonação reversa estão relacionadas ao fato de que em período pós-orogênico os esforços distensivos permitem, após a subsidência de uma caldeira, que porções mais profundas do magma ascendam e remobilizem-se juntamente com o líquido residual da câmara magmática, gerando um novo evento vulcânico.

A Fm. Hilário inclui lavas traquiandesíticas intercaladas a rochas particuladas diversas (LIMA, 1995), em estratos NNW-SSE, com mergulho suave para nordeste (GASTAL *et al.* 2015). Camadas de direção NW-SE e alto ângulo para sudoeste ocorrem a nordeste e sudeste do monzonito Tapera. Esta sequência é intrudida por *stocks* de quartzo monzonito porfirítico e pelo granito peralcalino Estrela (GASTAL *et al.* 2015).

A Fm. Maricá tem o limite inferior definido pela idade U-Pb em zircão de 630 Ma (BORBA, *et al.* 2008). Consiste de arenitos arcoseanos a conglomeráticos com nível intermediário de pelitos, que afloram a sul e a norte do complexo intrusivo (GASTAL *et al.* 2015). Os estratos, com direção NNW-SSE a NNE-SSW e mergulho suave para leste, estão basculados e rotados próximo a falhas NW-SE e NE-SW (GASTAL *et al.* 2015). A sul, os arenitos basais estão a oeste e os pelitos a leste (UFRGS, 2004), onde os estratos mostram maior movimentação tectônica (GASTAL *et al.* 2015).

As porções mineralizadas na região da Mina Cerro Rico encontram-se prioritariamente em tufos, os quais foram hidrotermalmente alterados através de fluidos advindos das porções intrusivas do CILS e águas meteóricas. Estas alterações segundo Bongioiolo (2006) desencadearam predominantemente porções mineralizadas e alteradas relacionadas a metais como Au e Cu, além de cristalização/recristalização de minerais como quartzo, calcita, anfibólios, pirita, calcopirita e arsenopirita. Ao observar a forma de mineralização ocorrida (filoniana e *stockworks*) pode-se determinar que o tipo de alteração ocorrida foi principalmente do tipo não pervasiva e seletiva em porções mais próximas a falhas mais pronunciadas.

O CILS inclui o Monzonito Tapera, Quartzo Monzonito Porfirítico, Monzonito Arroio do Jaques, Granito Lavras e Granito Jaguari (GASTAL *et al.* 2015). E de acordo

com estes autores, as únicas rochas intrusivas que intrudem e/ou seccionam as vulcânicas e vulcanoclásticas da Fm. Hilário são as pertencentes ao Granito Lavras.

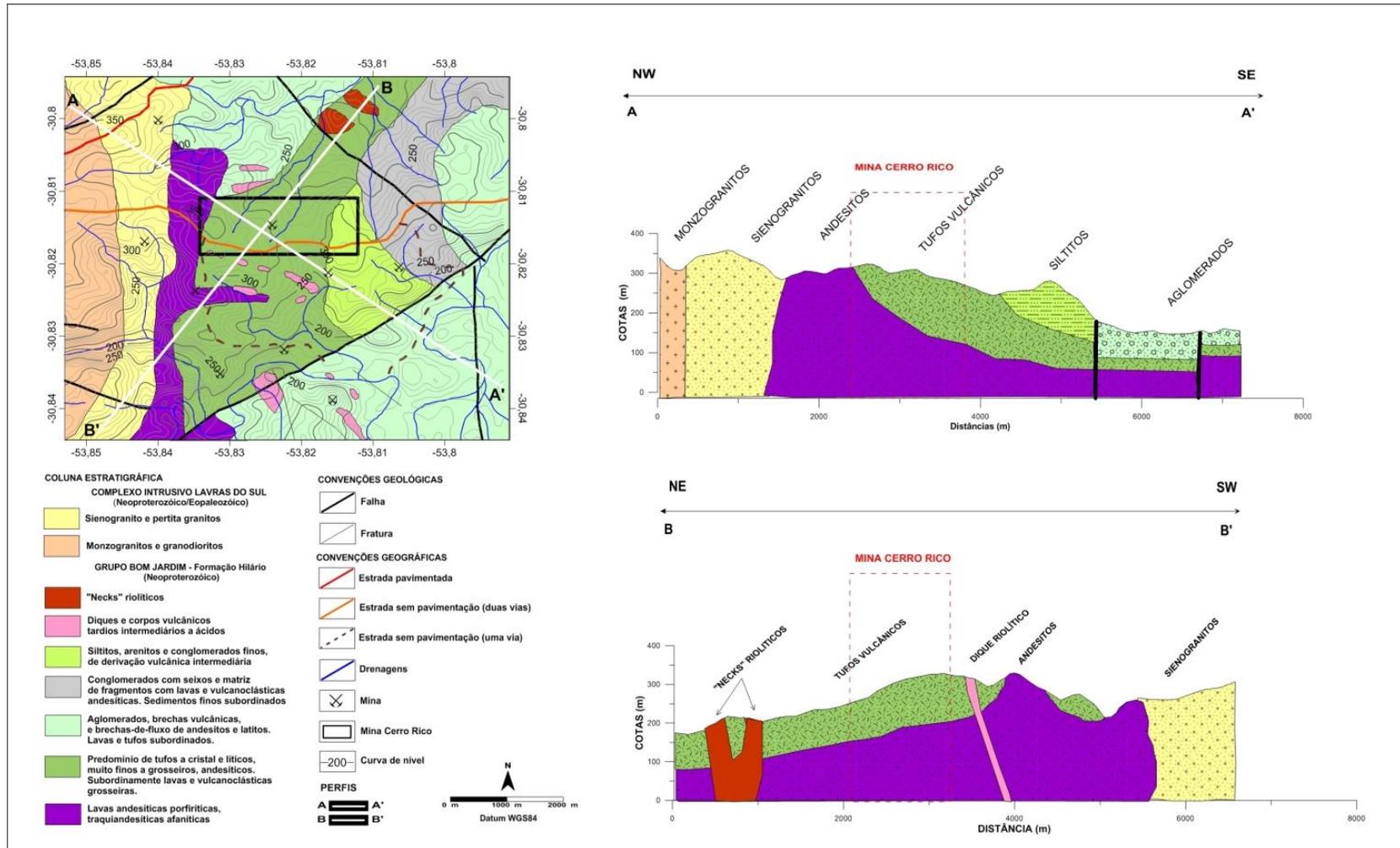
O Granito Lavras exhibe zanação composicional reversa, ou seja, termos centrais preferencialmente magnesianos e de borda ferrosos, corroborado por levantamentos magnetométricos onde a susceptibilidade magnética nas porções centrais (magnesianas) é menor do que naquelas da borda (ferrosas) (GASTAL *et al.* 2015). Dessa forma, o centro possui prioritariamente granodiorito circundado por monzogranito e sienogranito, todos possuindo afinidade cálcio-alcalina de alto K (shoshonítica) e a região da borda é composta por sienogranito e pertita-granito, sendo estes de caráter mais evoluído, possuindo afinidade alcalina e uma zona transicional entre os mesmos com textura rapakivi abundante (NARDI & LIMA, 1985).

Lima e Nardi (1998), destacam a intrusão de monzonitos porfiríticos hipabissais em traquibasaltos e nas piroclásticas, e posteriormente são cortados por diques riolíticos. As rochas graníticas do CILS que cortam as rochas da Fm. Hilário apresentam notadamente a influência de eventos hidrotermais, sendo assim, demonstrando a influência de eventos tectônicos e magmáticos concomitantemente e posteriores à formação das encaixantes do Hilário.

Oliveira *et al.* (2014) traz idades para o CILS de  $594\pm 5$  a  $580\pm 7$  Ma (U-Pb SHRIMP). Gastal *et al.* (2015) salientam que o CILS e Granito Jaguari são contemporâneos aos eventos vulcânicos do Hilário.

A figura 4 ilustra o mapa geológico da região de estudo, juntamente com dois perfis geológicos (A-A' NW-SE, B-B' NE-SW), através das principais unidades litoestratigráficas e estruturais presentes na área.

Figura 4 – Mapa geológico regional da área de estudo, mostrando os perfis A-A' (NW-SE) e B-B' (NE-SW).



Fonte: autor (2016), modificado de Minerar (1998)

### 5.2.1 Descrição das Seções Geológicas correspondentes aos perfis A-A' (NW-SE) e B-B' (NE-SW)

A seção geológica A-A', mostra graficamente as diferentes unidades litológicas que afloram na área de estudo em conjunto com relevo topográfico, com base em dados de altitudes ortométricas do ASTER-GDEM.

A noroeste afloram monzogranitos e sienogranitos pertencentes ao CILS de idade Neoproterozóico/Eopaleozóico, caracterizados por cotas de aproximadamente 320 m.

A porção central da área, que corresponde com os limites da área que abrange a Mina Cerro Rico, caracteriza-se pela presença de rochas andesíticas de idade Neoproterozóica, que afloram com cotas de aproximadamente 300 m em contato com tufos vulcânicos localizados na direção SE, ressalta-se que o embasamento composto por rochas andesíticas se estende na direção SE sob os tufos.

Na porção sudeste, afloram siltitos e aglomerados pertencentes a sequência vulcanos-sedimentar da Fm. Hilário (~580 Ma), caracterizado pela presença de um relevo mais baixo com valores de cota aproximadamente de 160 m. Evidencia-se a presença de uma falha regional na direção NE-SW, provavelmente de caráter profundo.

A seção geológica B-B', mostra a nordeste, afloramentos de tufos vulcânicos e "necks" riolíticos pertencentes a Fm. Hilário (~580 Ma), suprajacentes a um embasamento andesítico, com cotas de aproximadamente 200 m.

Na porção central, que também corresponde com os limites da área da Mina Cerro Rico, afloram tufos vulcânicos, com cotas topográficas de aproximadamente 300 m. Destaca-se nesta porção, a presença de um *trend* de diques de composição riolítica na direção aproximada de N70W.

A porção sudoeste apresenta tufos vulcânicos e rochas andesíticas em contato com a intrusão do sienogranito, pertencente ao CILS de idade Neoproterozóico/Eopaleozóico, onde o relevo é mais alto, com cotas de 300 m.

## 6 MÉTODOS GEOFÍSICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 6.1 Gamaespectrometria

O método gamaespectrométrico têm um papel relevante na pesquisa de depósitos minerais auríferos associados a alterações hidrotermais. O método fundamenta-se na detecção da radiação gama, emitida devido ao processo de estabilização dos núcleos dos elementos radioativos. A propriedade, de os nuclídeos instáveis perderem sua massa pela emissão de partículas e/ou radiação eletromagnética, é denominada radioatividade.

A radioatividade foi descoberta no ano de 1895 por Wilhelm Conrad Roëntgen, sendo posteriormente estudada por Henri Bacquerel em 1896, e por Marie e Pierre Curie em 1898, os quais sistematizaram e ordenaram seus processos (TORQUATO & KAWASHITA, 1990).

As principais formas de decaimento de um elemento radioativo são através da emissão de partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e raios gama ( $\gamma$ ). As partículas alfa ( $\alpha$ ) equivalem a núcleos do átomo de Hélio e possuem energia pouco penetrativa, enquanto que as partículas beta ( $\beta$ ) são capazes de ionizar o ar por alguns centímetros e equivalem a elétrons. Raios gama são caracterizados por não possuírem carga nem massa atômica e serem gerados pela energia excedente criada após a formação, pelo decaimento de um radionuclídeo, de um novo núcleo em estado excitado de energia. Os raios gama possuem alta energia de penetração, podendo penetrar aproximadamente 0,5 m em rochas e até centenas de metros no ar (IAEA, 2003).

Os raios gama interagem com átomos da matéria por intermédio de três processos principais: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção por par. O espalhamento Compton é o processo predominante no intervalo de energia no qual as pesquisas gamaespectrométricas operam, entre 0,2 e 3 MeV, e ocorre quando um fóton incidente perde parte de sua energia para um elétron e é espalhado segundo um ângulo relacionado a sua direção original (MINTY, 1997; IAEA, 2003).

Segundo Thompson *et al.* 2007, nos últimos dez anos, a gamaespectrometria passou por um período de consolidação e evolução. Contudo, as medidas de espectrometria gama estão sujeitas a diversas fontes de erro causadas por efeitos ambientais e pela má calibração do gamaespectrômetro. Dentre os erros provenientes

de efeitos ambientais estão os originados pela sobrecarga estéril, que pode reduzir a radiação em decorrência de sua alta densidade, pela vegetação densa, que atenua o fluxo dos raios gama, pela inversão de camadas de temperatura no início do dia, que pode aprisionar radônio atmosférico afetando estimativas de *background* da radiação, e pela precipitação que diminui o fluxo da radiação gama na superfície (MINTY, 1997; IAEA, 2003).

Segundo Ferreira (2002), uma série de correções são necessárias para que se possa gerar os produtos finais de um levantamento aerogamaespectrométrico. As calibrações necessárias para a correção de influências não relacionadas à geologia nos dados gamaespectrométricos incluem a realização de voos para a definição do *background*. De acordo com Minty (1997), qualquer radiação não originária do terreno é considerada como *background*, desde que não tenha nenhum significado geológico e precisa ser removida dos dados gamaespectrométricos observados. Existem quatro tipos de fontes de radiação do *background*: fluxo atmosférico do radônio, *background* cósmico, *background* da aeronave e produtos oriundos de explosões atômicas e acidentes nucleares. O *background* da aeronave refere-se à radiação devida a quantidades de traços de K, U e Th na aeronave e equipamentos, bem como do próprio detector. Esta componente de *background* é constante (MINTY, 1997).

O *background* cósmico surge da reação entre a radiação cósmica primária com átomos e moléculas da atmosfera superior e é monitorado por espectrômetros na janela cósmica, que medem a radiação gama com energia superior a 3 MeV. A não correção dos dados originais para efeito do *background* geológico prejudica a definição adequada das áreas de alteração hidrotermal (PIRES, 1995).

Fontes naturais de radiação derivaram da síntese de radioisótopos durante a criação do sistema solar. O potássio (K), urânio (U) e tório (Th) são os únicos elementos naturais com radioisótopos que produzem raios gama com intensidade e energia suficientes para serem detectados em pesquisas aéreas (MINTY, 1997). A radioatividade total é obtida por meio da medida da radiação gama na janela de contagem total (CT) que opera entre 0,4 a 2,81 MeV. A concentração dos radioelementos nas rochas é dado em porcentagem (%) para o potássio e em partes por milhão (ppm) para o urânio e o tório, enquanto que as medidas na janela de contagem total são convertidas em taxa de exposição ( $\mu\text{R/h}$ ).

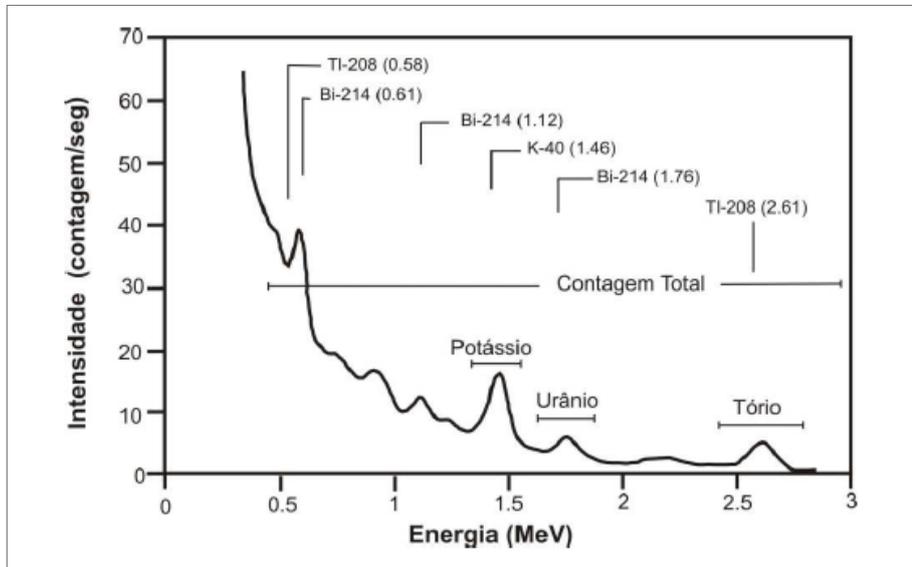
Outras correções necessárias são: a correção do efeito Compton, correção altimétrica, correção do tempo morto e conversão dos dados corrigidos em concentrações (% e ppm). Deve-se, entretanto, na interpretação de dados aerogamaespectrométricos, levar-se em consideração os efeitos ambientais que podem influenciar o espectro de raios gama.

Em virtude do espalhamento Compton na superfície e no ar, de 2,62 MeV do  $^{208}\text{Tl}$ , pode haver interferência nas janelas de baixa energia do U e do K a partir de uma fonte pura de Th (GRASTY, 1979). O mesmo ocorre com fontes de U que interferem no espectro de baixa energia do K, assim como na janela de alta energia do Th, em resposta à radiação do  $^{214}\text{Bi}$  na série do decaimento do U. Devido ao pequeno poder de resolução dos detectores de NaCl, as contagens decorrentes de uma fonte pura de K podem ser registradas no canal do U (FERREIRA, 2002).

O  $^{40}\text{K}$  é o único isótopo radioativo do potássio e é responsável por 98% da emissão de radiação gama dos radioisótopos primários presentes na crosta terrestre (PIRES, 1995). Este isótopo ocorre como 0,012% do K natural, sendo que 89% decaem por emissão de elétron para  $^{40}\text{Ca}$  e 11% para  $^{40}\text{Ar}$ , por meio da captura de elétron. Este decaimento é seguido por uma emissão de um único fóton de raio gama, com energia de 1,46 MeV (figura 6). O urânio ocorre naturalmente como radioisótopos  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  que decaem para  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente. Como o  $^{235}\text{U}$  forma apenas 0,72% do urânio natural e possui série de decaimento com raios gama de energia muito baixa para serem detectados, utiliza-se o isótopo filho do  $^{238}\text{U}$  em pesquisas gamaespectrométricas.  $^{214}\text{Bi}$  é o isótopo que emite raios gama com relativa intensidade e energia favorável para ser medida na série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , com energia de 1,76 MeV (figura 5). O tório ocorre naturalmente na forma de  $^{232}\text{Th}$ . Este possui uma série de decaimento que se conclui com a formação do  $^{208}\text{Pb}$  e apresenta maior energia no decaimento do  $^{208}\text{Tl}$ , com a emissão de um fóton de 2,61 MeV (figura 5).

Tanto o  $^{238}\text{U}$  como o  $^{232}\text{Th}$  não emitem raios gama, sendo suas concentrações estimadas por intermédio de seus filhos radioativos,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$ , respectivamente. Assim, essas estimativas requerem que a série de decaimento esteja em condições de equilíbrio, o que faz com que esses elementos sejam descritos como equivalente de urânio (eU), e equivalente de tório (eTh) (MINTY, 1997).

Figura 5 – Espectro típico da radiação gama, medido a 100 metros de altitude, ilustrando os fotópicos de maior intensidade e as posições das janelas dos radioelementos K, U e Th e da Contagem Total.



Fonte: modificado de Minty (1997, p. 49)

Correção altimétrica é uma correção efetuada através de sobrevoos, em regiões preferencialmente planas e a diversas alturas (FERREIRA, 2002). Segundo Minty (1997), os espectrômetros requerem um tempo finito para processar cada pulso do detector. Qualquer pulso que chega enquanto outro esteja sendo processado, é automaticamente rejeitado. Um tempo morto típico é da ordem de 5-15  $\mu$ s/pulso. A correção do tempo morto é geralmente muito pequena, mas pode ser significativa em áreas de alta radioatividade ou durante alguns procedimentos de calibração. O tempo morto pode ser experimentalmente medido pela conexão do espectrômetro a dois detectores idênticos (MINTY, 1997).

A maior parte da radiação gama proveniente da crosta da Terra é originada nos 30 centímetros superiores da superfície (IAEA, 2003). Com isso, a interpretação dos dados gamaespectrométricos requer um conhecimento da geoquímica dos radioelementos nas rochas e solos, além de um grande entendimento dos processos de superfície, como intemperismo, e da relação entre os materiais superficiais e o embasamento, como solo transposto, uma vez que rochas intemperizadas e materiais

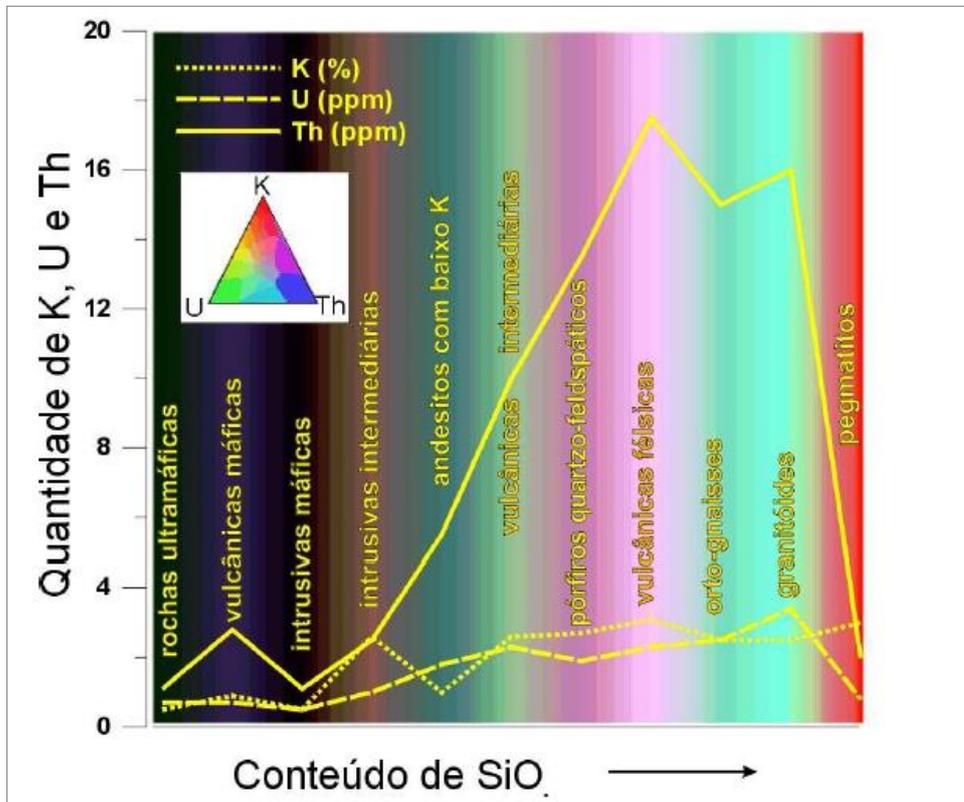
transportados geram assinaturas de espectrometria gama diferente das condições iniciais do ambiente.

O potássio, tório e urânio possuem uma abundância média na crosta superior de 2,3%, 12 ppm e 2,7 ppm, respectivamente (IAEA, 2003). O potássio ocorre predominantemente em feldspatos alcalinos e micas (muscovita e biotita) em rochas félsicas, principalmente granitóides, sendo ausente em minerais máficos. O tório, o radioelemento mais estável que permanece em minerais resistatos, e o urânio são comuns constituintes de minerais acessórios como zircão, monazita, alanita, xenotime, apatita e esfeno, frequentes em rochas ígneas e metamórficas. O urânio pode estar presente em rochas na forma de óxidos e silicatos, como nos minerais uraninita e uranotorita, sendo encontrado em granitos, pegmatitos, carbonatitos e folhelhos negros.

Em superfície de ambientes oxidantes o urânio tende a ser móvel, depositando-se em condições mais redutoras. As concentrações de urânio, tório e potássio apresentam um aumento com o acréscimo de sílica (Dickson & Scott, 1997) e alcalinidade nas rochas (HOOVER *et al.* 1992) (figura 6).

Os principais minerais constituídos por potássio tendem a ser destruídos durante o intemperismo e os que resistem tendem a ser incorporados em argilominerais. O zircão e a monazita são minerais estáveis durante o intemperismo, que em conjunto com a associação do Th e U a óxidos de ferro e argilas podem aumentar o conteúdo desses elementos em solos, como os provenientes de rochas intrusivas intermediárias (DICKSON & SCOTT, 1997). Rochas graníticas e vulcânicas félsicas tendem a perder concentração dos três radioelementos durante a pedogênese, enquanto que rochas vulcânicas intermediárias e máficas apresentam redução no conteúdo de potássio e mostram preservação e ganho de U e Th, respectivamente (DICKSON & SCOTT, 1997). Unidades argílicas intemperizadas revelam perda de K e retenção de cerca de 70% de U e Th à medida que a concentração dos radioelementos em produtos de intemperismo de arenitos é similar ao da rocha fonte (DICKSON & SCOTT, 1997).

Figura 6 – Variação na média de concentração dos elementos K, U e Th em rochas ígneas com o aumento do conteúdo de sílica.



Fonte: Blum (1999, p. 46), modificado de Dickson & Scott (1997)

Para Fornazzari *et al.* (2003), a gamaespectrometria, aérea e terrestre, possibilita a identificação de áreas alteradas hidrotermalmente e exploração de suas relações com processos de mineralização de ouro e prata, além de metais base (Cu-Pb-Zn), em vários ambientes geológicos. A gamaespectrometria também é amplamente aplicada no mapeamento geológico e exploração de petróleo (IAEA, 2003).

Nas décadas de 1970 e 1980, a aplicação direta de pesquisas gamaespectrométricas na prospecção mineral concentrava-se na procura de depósitos de U e Th (DICKSON & SCOTT, 1997). Atualmente, a radiação de raios gama é utilizada na prospecção de diversos depósitos minerais, como mineralizações de ouro relacionadas a alteração hidrotermal.

Apesar da assinatura gamaespectrométrica de depósitos de ouro ser muito variada e o ouro muitas vezes estar relacionado a veios quartzo-feldpáticos e/ou

carbonáticos, as rochas encaixantes hidrotermalizadas podem servir como guia exploratório a partir da detecção de halos potássicos e mudanças no conteúdo dos três radioelementos. O potássio é o radioelemento mais afetado durante a alteração hidrotermal. Na qual apresenta um aumento em seu conteúdo associado à assembleia mineral de alteração resultante principalmente das alterações hidrotermais potássica e fílica. A concentração de Th é pouco afetada, mas este elemento muitas vezes é mobilizado, tornando-se empobrecido em áreas de alteração potássica ou intensa silicificação (DICKSON & SCOTT, 1997; OSTROVSKIY, 1973). Pflug *et al.* (1997) observaram correlação negativa entre o K e Th na unidade vulcânica félsica, hospedeira da mineralização aurífera, em testemunhos do depósito de ouro Victoria Creek, no Canadá, e Ostrovskiy (1973) relata o contraste do potássio com o tório e/ou urânio em rochas mineralizadas, caracterizando o antagonismo entre Th e K.

A razão entre canais é uma técnica realizada no processamento dos dados gamaespectrométricos para realçar o enriquecimento (ou empobrecimento) de um canal em relação ao outro, facilitando a visualização da contribuição relativa dos radioelementos. A técnica é importante para a prospecção mineral, principalmente quando o minério está relacionado a processos de alteração hidrotermal que envolva soluções enriquecidas em potássio ou a processos de enriquecimento natural de urânio.

O hidrotermalismo provoca mudanças nos minerais acessórios hospedeiros de radioelementos de acordo com seu comportamento químico. O conteúdo de Th não se altera, enquanto que o K e o U, este na forma oxidada  $U^{6+}$ , tendem a formar complexos iônicos com as soluções. Assim, as razões entre os canais podem discriminar as anomalias gamaespectrométricas das variações litológicas normais dos radioelementos, discernindo áreas alteradas por hidrotermalismo e servindo como indicador de depósitos minerais.

A composição colorida RGB (R-vermelho, G-verde, B-azul), é criada a partir das cores primárias no espaço RGB. O uso do vermelho, verde e azul para os canais de K, Th e U, respectivamente, é padrão na exibição dos dados gamaespectrométricos (IAEA, 2003). Nestas composições, a ausência dos três componentes (RGB) resulta tonalidades mais escuras, enquanto que a saturação das três informações é atribuída a tonalidades mais claras.

Com o propósito do reconhecimento de depósitos minerais associados ao hidrotermalismo, Pires (1995) propôs uma técnica de identificação de áreas submetidas a ação de processos de alteração hidrotermal mediante a análise de dados de gamaespectrometria denominada Potássio Anômalo (Kd).

Esta técnica sugere a identificação de acumulações anômalas de potássio, constituinte importante das soluções hidrotermais, por intermédio do suprimento dos efeitos provocados por variações geológicas e condições ambientais na radiação observada. Os teores de Th são utilizados como controle geológico para definir os valores ideais de U e K para cada amostra. Considerando que os efeitos litológicos e ambientais que afetam a concentração aparente de Th também afetam o conteúdo de U e de K, os dados de Th podem ser usados para prever o conteúdo de K a partir da determinação das relações observadas entre os dois elementos (RAMOS, 2010).

A dependência da concentração do potássio com relação ao tório é representada por uma função linear que passa pela origem, na qual a inclinação da reta é determinada pela razão entre os valores das observações de potássio (Ks) e os de tório (Ths). Em gamaespectrometria, diagramas de dispersão são usualmente utilizados para a análise das relações entre radioelementos e identificação de *trends* e *clusters*, nos quais assinaturas anômalas dos radioelementos podem ser reconhecidas. Para uma efetiva caracterização anômala do potássio deve-se determinar a reta que melhor se ajusta a distribuição dos dados (RAMOS, 2010).

Para o cálculo do (Kd) utiliza-se a seguinte equação:

$$K_i = (\text{média de } K_s / \text{média de } Th_s) \times Th \quad (1)$$

Onde  $K_i$  é o valor ideal de potássio, definido a partir da concentração de tório para aquele ponto de observação.

O desvio do valor real a partir do valor ideal, calculado para cada ponto, obtém-se a partir da equação 2:

$$K_d = (K_s - K_i) / K_i \quad (2)$$

O procedimento é análogo para o comportamento do urânio.

Gnojek & Prichystal (1985) aplicaram diversas técnicas em dados de radiação gama para verificar a significância metalogenética das anomalias de potássio na região norte de Moravia, República Tcheca. Estas técnicas compreendiam razões simples entre os canais dos radioelementos e seus parâmetros derivados. O parâmetro denominado Fator F, proposto por Efimov (1978), foi o mais efetivo, já que abrange duas importantes características: a abundância do potássio para a razão Th/U e a abundância do urânio para a razão Th/K (GNOJECK & PRICHYSTAL, 1985). O Fator F pode ressaltar o enriquecimento de potássio em relação a razão entre o urânio e tório e destacar a presença de processos de alteração hidrotermal associados à mineralização. O método é baseado em uma função na qual se relacionam os conteúdos de urânio, potássio e tório:

$$\text{Fator F} = K \left( \frac{eU}{eTh} \right) \quad (3)$$

## 6.2 Prospecção geolétrica

Os métodos elétricos são considerados os mais versáteis dentro da geofísica aplicada, sendo extensamente aplicados em prospecção mineral, estudos ambientais, prospecção de águas subterrâneas, estudos de geologia e de engenharia. A prospecção elétrica envolve a detecção de efeitos da superfície produzidos por um fluxo de corrente elétrica.

Utilizam propriedades elétricas de solos e rochas, como condutividade, resistividade, potencial espontâneo, polarização, para investigar a geologia de subsuperfície. Compreendem o método da resistividade, o método da Polarização Induzida (IP), e o método do Potencial Espontâneo (SP).

O método da eletrorresistividade é amplamente utilizado em geofísica aplicada, esse emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de C1 e C2), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de P1 e P2) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real a partir da aparente em subsuperfície (KEAREY *et al.* 2009).

A corrente elétrica pode se propagar em rochas e minerais de três formas: Conduções eletrônica, eletrolítica e dielétrica. A primeira é o tipo comum do fluxo de

corrente em materiais que contém elétrons livres, como os metais. Na condução eletrolítica, a corrente é transportada por íons em uma taxa comparativamente lenta. A condução dielétrica ocorre em maus condutores ou isolantes, que tem muito pouco ou nenhum transportador (SCHÖN, 2004).

### 6.2.2 Método da Eletroresistividade

Eletroresistividade é um método geofísico cujo princípio é baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, a qual reflete algumas de suas características, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, grau de fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de perfurações (BURGUER *et al.*, 2006).

A Tabela 1 apresenta os valores de resistividade para diferentes tipos de rochas e solos.

A lei de Ohm define uma relação empírica entre a resistividade ( $\rho$ ) e a resistência ( $R$ ) de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica (figura 7) através da equação 4.

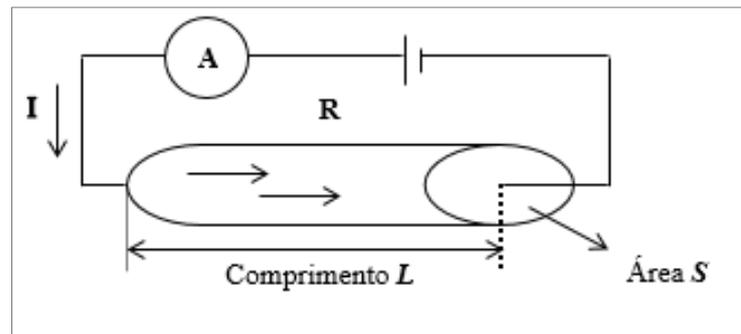
Tabela 1 – Valores de resistividade em rochas e solos.

	<u>Material</u>	<u>Resistividade (Ohm.m)</u>	<u>Condutividade (Siemen/m)</u>
<b>Rochas ígneas e metamórficas</b>	Granito	$5.0 \times 10^3$ a $1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{-6}$ a $2.0 \times 10^{-4}$
	Basalto	$1.0 \times 10^3$ a $1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{-6}$ a $1.0 \times 10^{-3}$
	Ardósia	$6.0 \times 10^2$ a $4.0 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8}$ a $1.7 \times 10^{-3}$
	Mármore	$1.0 \times 10^2$ a $2.5 \times 10^8$	$4.0 \times 10^{-9}$ a $1.0 \times 10^{-2}$
	Quartzito	$1.0 \times 10^2$ a $2.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^{-9}$ a $1.0 \times 10^{-2}$
<b>Rochas sedimentares</b>	Arenito	$8.0 \times 10^1$ a $1.0 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4}$ a $1.25 \times 10^{-1}$
	Folhelho	$2.0 \times 10^1$ a $2.0 \times 10^3$	$5.0 \times 10^{-4}$ a $5.0 \times 10^{-2}$
	Calcário	$5.0 \times 10^1$ a $4.0 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3}$ a $2.0 \times 10^{-2}$
<b>Solos e águas</b>	Argila	$1.0 \times 10^0$ a $1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-2}$ a $1.0 \times 100$
	Aluvião	$1.0 \times 10^1$ a $8.0 \times 10^2$	$1.25 \times 10^{-3}$ a $1.0 \times 10^{-1}$
	Água doce	$1.0 \times 10^1$ a $1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-2}$ a $1.0 \times 10^{-1}$

	Água salgada	$2.0 \times 10^{-1}$ a $5.0 \times 10^0$	
<b>Substâncias químicas</b>	Ferro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
	Cloreto de Potássio 0.01 M	$7.08 \times 10^1$	$1.413 \times 10^0$
	Cloreto de Sódio 0.01 M	$8.43 \times 10^{-1}$	$1.185 \times 10^0$
	Ácido Acético 0.01M	$6.12 \times 10^0$	$1.63 \times 10^{-1}$

Fonte: modificada de Orellana (1972, p. 75)

Figura 7 – Esquema gráfico mostrando o circuito elétrico em um condutor cilíndrico homogêneo.



Fonte: modificado de Kearey *et al.* (2009, p. 316)

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (Ohms)} \quad (4)$$

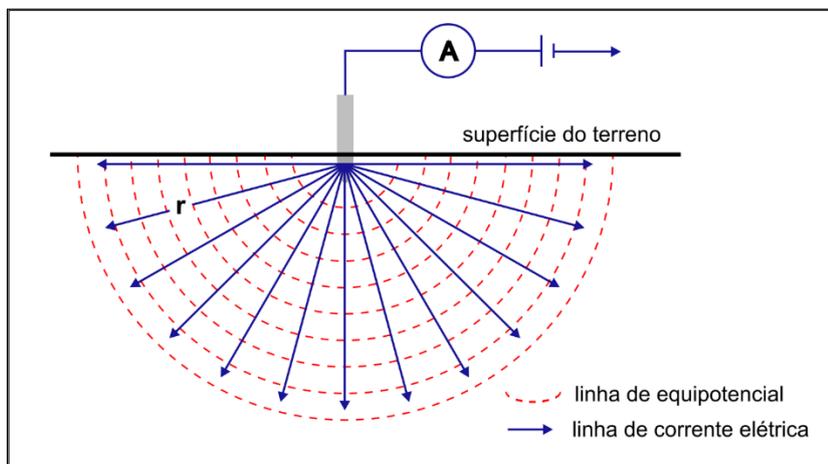
onde,  $L$  é o comprimento e  $S$  a área do condutor, a resistividade  $\rho$  é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo, e é definida como mostra a equação 5.

$$\rho = R \frac{S}{L} \text{ (Ohm. m)} \quad (5)$$

A dimensão da resistividade é o produto da resistência elétrica pelo comprimento e, portanto, a unidade de resistividade no SI é Ohm.m e pode ser definida como a medida da dificuldade da passagem de corrente elétrica em um determinado material.

No subsolo ou qualquer corpo tridimensional, a corrente elétrica não flui por um único caminho, como no caso de um condutor homogêneo cilíndrico. Considerando uma bateria conectada a um eletrodo conectado ao solo (figura 8), através de cabos e eletrodos, por dois pontos distantes um do outro, a Terra, que não é um isolante perfeito, conduz a corrente elétrica gerada pela bateria, assumindo que a resistividade do solo é uniforme (BRAGA, 2007).

Figura 8 – Esquema gráfico mostrando o campo equipotencial elétrico produzido por um eletrodo de corrente.



Fonte: autor (2017), modificado de Orellana (1972, p. 253)

Aplicando a equação 5 no semi-espço, tem-se a equação 6:

$$R = \frac{\rho r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi} \quad (6)$$

Substituindo em  $V=R.I$  (Lei de Ohm), resulta na equação 7.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (7)$$

Portanto, considerando o subsolo com uma resistividade constante, pode-se determinar sua resistividade através da equação 8.

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (8)$$

Onde:

$V$  = potencial;

$I$  = corrente elétrica;

$\rho$  = resistividade e

$r$  = distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido.

Em geral, os arranjos de desenvolvimento do método da eletrorresistividade constam de quatro eletrodos cravados na superfície do terreno. Um par de eletrodos é utilizado para introduzir a corrente elétrica no subsolo (C1C2), enquanto o outro par, para medir a diferença de potencial que se estabelece entre eles (P1P2) como resultante da passagem dessa corrente. A determinação do potencial resultante deste campo elétrico criado pode ser demonstrada conforme o esquema apresentado na figura 8. A corrente elétrica de intensidade  $I$  é introduzida no subsolo por meio dos eletrodos C1 e C2 e o potencial  $V$  gerado, é medido por meio dos eletrodos denominados P1 e P2. Supondo que o meio investigado é homogêneo e isotrópico e levando em conta a equação 5, o potencial no eletrodo P1 e P2, respectivamente será dado pelas equações 9 e 10.

$$V_{P1} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{C1P2} - \frac{1}{C2P2} \right) \quad (9)$$

$$V_{P2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{C1P2} - \frac{1}{C2P2} \right) \quad (10)$$

A diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos P1P2, será:  $\Delta V_{P1P2} = V_{P1} - V_{P2}$ , como mostra a equação 11.

$$\Delta V_{P1P2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{C1P1} - \frac{1}{C2P1} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{C2P2} \right) \quad (11)$$

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a quantia medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície relativamente grande. Portanto ao efetuar as medições pertinentes obtém-se uma resistividade aparente ( $\rho_a$ ), a qual é uma variável que expressa os resultados das medições de alguns dos métodos geoeletricos e é a que se toma como base para a interpretação final. As

dimensões da resistividade aparente, em virtude de sua definição, são as mesmas que para a resistividade e sua unidade será também Ohm.m (BRAGA, 2007).

Pode-se então calcular o valor da resistividade  $\rho$  do meio investigado mediante as equações 12 e 13.

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (12)$$

onde,

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{C1P1} - \frac{1}{C2P1} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{C2P2} \right)^{-1} \quad (13)$$

Onde:

$\rho_a$  é a resistividade aparente;

K é o fator geométrico do arranjo utilizado;

$\Delta V$  é a diferença de potencial;

I é a corrente elétrica.

### 6.2.3 Método da Polarização Induzida

A Polarização Induzida (IP) foi observada por C. Schlumberger em 1920, quando ele percebeu que corpos atravessados por uma corrente elétrica, ao ser cortado esse campo elétrico, a corrente não desaparece e passa a decair lentamente (ORELLANA, 1972). Um fenômeno semelhante é observado quando a corrente é ligada. Após um repentino aumento inicial da voltagem, esta aumenta gradualmente durante um intervalo de tempo até um valor estável. O solo, então, age como um capacitor e armazena carga elétrica, isto é, torna-se eletricamente polarizado (KEAREY *et al.* 2009).

A resposta da polarização induzida é uma medida relativamente pequena, sendo na prática medida tal como uma variação de voltagem em função do tempo ou frequência, denominados IP – Domínio do Tempo e IP – Domínio da Frequência, respectivamente (BRAGA, 2007). A medição de um decaimento de voltagem sobre um certo intervalo de tempo é conhecida como levantamento IP no domínio do tempo,

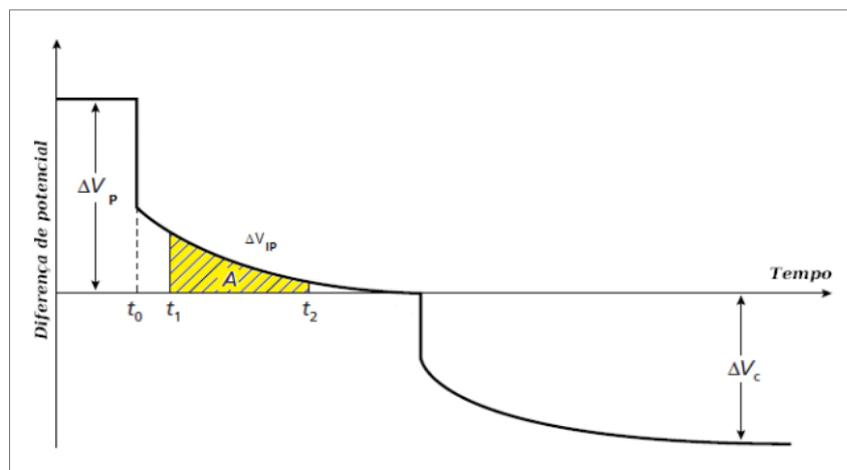
enquanto as medições de resistividade aparente em duas ou mais baixas frequências é conhecida como levantamento IP no domínio da frequência (KEAREY *et al.* 2009).

As medições IP no domínio do tempo envolvem o monitoramento do decaimento da voltagem após a corrente ser desligada. O parâmetro mais comumente medido é a cargabilidade M (equação 14), definida como a área A sob a curva de decaimento durante um certo intervalo de tempo  $t_1$ - $t_2$  (KEAREY *et al.* 2009).

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt \quad (14)$$

A cargabilidade é medida durante um determinado intervalo de tempo, logo após a corrente polarizada ser desligada (figura 9). A área A é fornecida pelo aparato de medição, onde é obtida por integração analógica (KEAREY *et al.* 2009).

Figura 9 – O fenômeno de Polarização Induzida no Domínio do Tempo.



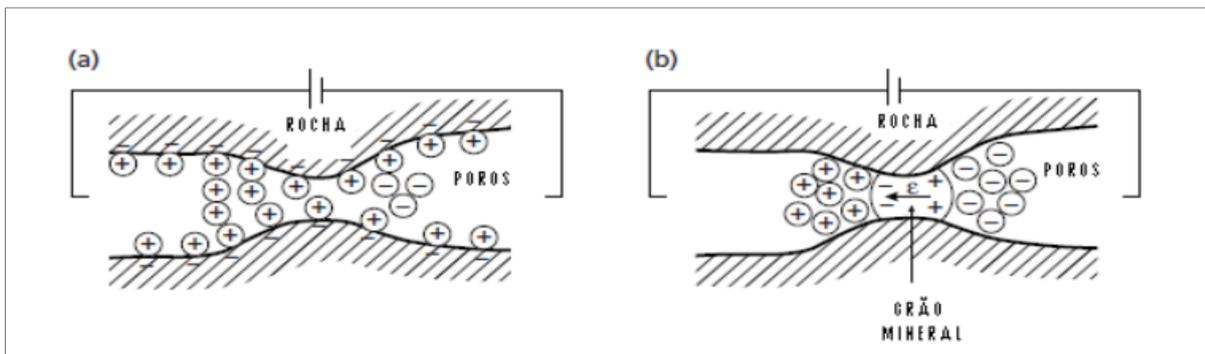
Fonte: Kearey *et al.* (2009, p, 340)

A polarização no meio geológico ocorre de duas formas principais: a polarização metálica ou eletrônica e a polarização de membrana. A passagem de corrente em solos e rochas ocorre, principalmente, por fluxo eletrolítico. O efeito conhecido como polarização de membrana ocorre porque a maior parte dos minerais formadores de rocha possui carga total negativa em suas superfícies exteriores, cujo contato com o fluido dos poros atrai íons positivos para sua superfície exercendo assim um efeito de membrana bastante comum na presença de argila, onde os poros são relativamente

pequenos. Ao aplicar voltagem em cada lado do espaço do poro, cargas positivas e negativas são acumuladas sobre os lados opostos do grão, acumulando-se separadamente. A taxa dos íons que são conduzidos é mais lenta do que a taxa de troca de elétrons com íons. Assim, ao se acumularem de cada lado do grão, os íons causam um aumento de carga e, quando a voltagem é removida, os íons se dispersam lentamente de volta a seus locais originais, causando um decaimento transitório de voltagem (figura 10a).

Quando os minerais metálicos estão presentes em uma rocha, é aberto um caminho eletrônico ou polarização eletrônica para o fluxo de corrente (KEAREY *et al.* 2009). Este acúmulo de íons é dissipado quando o potencial elétrico é removido, os íons voltam ao estado anterior num processo de lenta dispersão, seguido ao decaimento transitório de voltagem, conhecido como polarização metálica ou eletrônica (figura 10b).

Figura 10 – Mecanismos de polarização induzida. (a) polarização de membrana (b) polarização metálica ou eletrônica



Fonte: Kearey *et al.* (2009, p. 341)

#### 6.2.4 Técnicas de investigação

As principais técnicas de investigação dos métodos elétricos são: Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

A técnica do CE é aplicada em situações em que visam determinar discontinuidades laterais do meio geológico, tais como diques e soleiras, contatos geológicos, fraturamentos e/ou falhamentos, corpos mineralizados, mapeamento de plumas de contaminação no subsolo, etc. (ORELLANA, 1972).

A técnica de SEV deve ser efetuada, preferencialmente, em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas em relação ao parâmetro físico estudado, e limitadas por planos paralelos à superfície do terreno. Envolve estudos rasos aplicados à Geologia de Engenharia, Ambiental, Hidrogeologia, e também pode ser usada para estudos profundos aplicados à Geologia do Petróleo, hidrogeologia e prospecção mineral (BRAGA, 2007).

Essas técnicas de investigação do subsolo apresentam maneiras de disposição dos eletrodos na superfície do terreno - arranjos de desenvolvimento - variando em função dos objetivos do trabalho e de situações gerais de campo, tais como, topografia, ruídos artificiais indesejáveis, urbanização, etc. (ORELLANA, 1972).

#### **6.2.4.1 Caminhamento Elétrico**

A técnica de CE se baseia na análise e interpretação da resistividade obtida a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas.

Os resultados obtidos se relacionam entre si através de mapas (a uma ou mais profundidades determinadas), ou de seções (com várias profundidades de investigação - vários níveis de investigação). No desenvolvimento desta técnica, o arranjo mais utilizado é o Dipolo-Dipolo (figura 11).

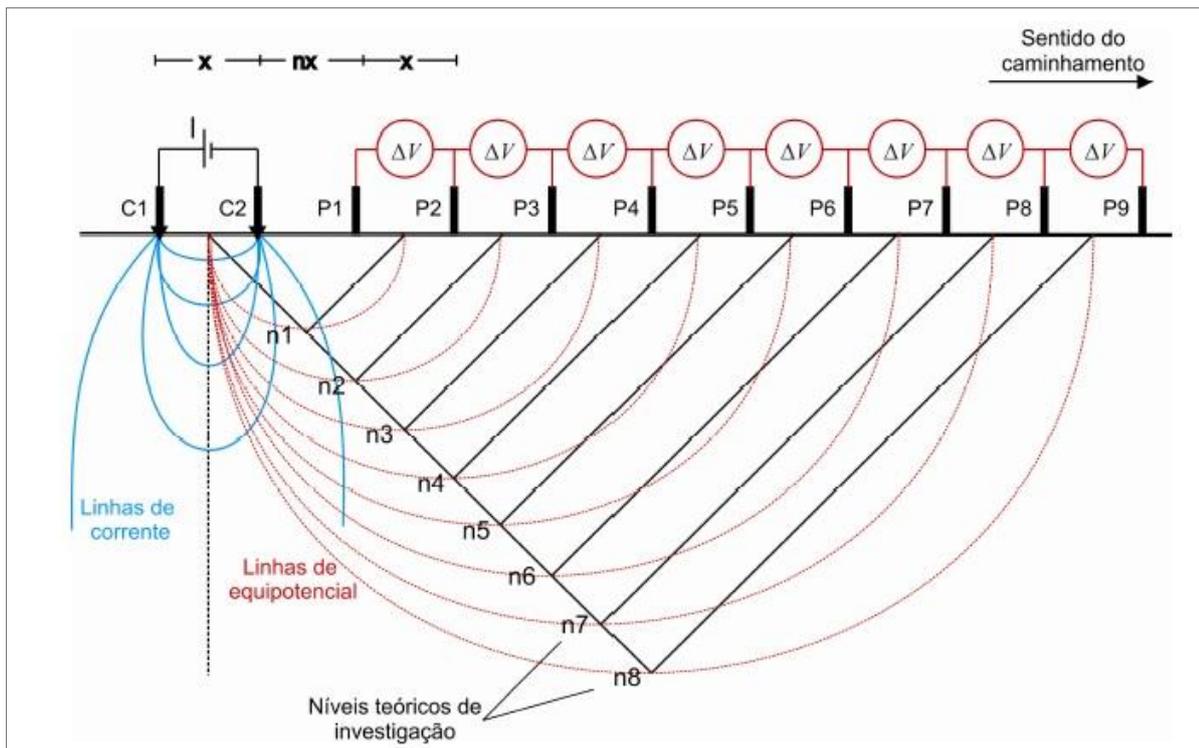
No desenvolvimento desse arranjo, podem-se utilizar simultaneamente vários dipolos de recepção (P1P2) dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo P1P2 corresponde a um nível de investigação, podendo estudar variações horizontais da resistividade ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigação (ORELLANA, 1972).

O sistema de plotagem dos parâmetros geoeletricos obtidos, é efetuado considerando como ponto de atribuição das leituras, uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos C1C2 e P1P2, até atingir-se o ponto médio entre os centros destes dipolos. Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma pseudo-seção de resistividade (BRAGA, 2007).

Com o arranjo Dipolo-Dipolo, os eletrodos de corrente (C1 e C2) e de potencial (P1 e P2) são dispostos num mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos

$X = \overline{C1C2} = \overline{P1P2}$ . Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), atribuídas à intersecção das linhas que partem do centro de cada par de eletrodos, com ângulos de  $45^\circ$  (USTRA, 2008), conforme ilustra a figura 11.

Figura 11 – Arranjo Dipolo-Dipolo.



Fonte: modificado de Elis (1998, p. 84)

No método da Eletrorresistividade, a resistividade aparente é determinada a partir da equação 4 onde o coeficiente geométrico  $K$ , nesse caso, é dado conforme a equação 15 a seguir.

$$K = 2\pi Gx, \text{ com } G = \frac{1}{\frac{1}{n} + \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (15)$$

Onde:

$x$  é o espaçamento entre os eletrodos  $\overline{C1C2}$  e  $\overline{P1P2}$ .

$n$  é o nível de investigação.

#### 6.2.4.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

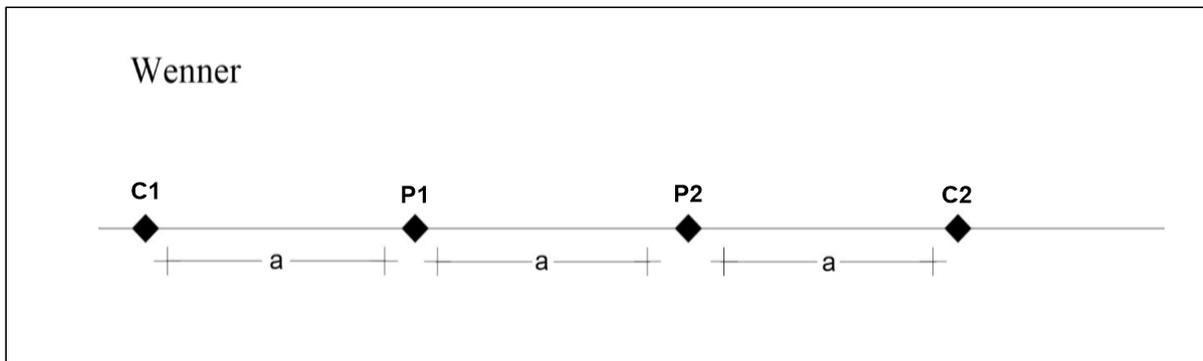
Na SEV mantêm-se uma separação crescente entre os eletrodos de emissão de corrente e recepção de potencial, alinhados na superfície do terreno de maneira simétrica, e durante a sucessão de medidas, a direção do arranjo e o centro do dipolo de recepção de potencial permanecem fixos.

A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição espacial dos estratos com diferentes resistividades em subsolo, partindo dos dados de resistividade aparente medidos em superfície. Por fim, é feita uma correlação dos estratos geoeletricos com a geologia local (ELIS, *et al.* 2008). A técnica de SEV possui dois arranjos mais conhecidos, o Wenner e o Schlumberger.

O arranjo mais utilizado para a técnica SEV na maioria dos levantamentos é o Schlumberger. A ideia deste arranjo é fazer com que a distância  $a$  que separa os eletrodos P1 e P2 se mantenha fixa e tenda a zero em relação à distância crescente de L (Entre C1 e C2). O modelo geoeletrico final obtido, através da interpretação dos dados é atribuído ao ponto central do arranjo (ORELLANA, 1972).

Apesar do arranjo Wenner (figura 12) ser menos utilizado nos levantamentos por ser considerado menos prático em campo e ser mais susceptível a ruídos é o que possui melhor resultado para aplicação do método da eletrorresistividade e o método da polarização induzida conjuntamente. Neste arranjo os eletrodos de corrente (C1C2) e de potencial (P1P2) são dispostos de forma uniforme numa linha e a resistividade aparente pode ser calculada a partir da equação 4 (TELFORD *et al.* 1990), onde o fator geométrico é  $K = 2\pi a$ .

Figura 12 – Arranjo Wenner.



Fonte: autor (2016), modificado de Kearey *et al.* (2009, p. 320)

## 7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 7.1 Trabalhos geológicos

Bongiolo (2006) realizou uma síntese sobre o histórico e mineralizações na região de Lavras do Sul. Foi no fim do século XVIII que a garimpagem ao longo dos aluviões nos arroios da região se tornou rotineira. A coroa portuguesa se encarregou então da fiscalização da atividade de extração de Au, Cu, Pb, Zn e Ag e já no início do século XIX os pesquisadores do Serviço Geológico do Brasil fizeram as primeiras descrições destas ocorrências.

Na década de 50, trabalhos mais detalhados de reconhecimento foram executados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) realizou um grande levantamento e amostragem de todas as ocorrências, na década de 70 (KAUL e REINHEIMER, 1974). Entre as décadas de 1970-80 a Companhia Brasileira de Cobre (CBC) realizou trabalhos e prospecção em solo, rocha e sedimento de corrente principalmente nas Minas Cerrito e Bloco Butiá. Já nas décadas de 1980-90, a Companhia Riograndense de Mineração (CRM) implantou um programa de exploração na Mina Volta Grande, mas com baixa produtividade.

No trabalho de Rojas (2007), a partir de um perfil geológico regional E-W utilizado para o reconhecimento em detalhe da Mina Cerro Rico, relacionando a interação das litologias, constatou-se pelo estudo macro e microscópico que, o andesito é a rocha

mais antiga, evidenciado por clastos nos tufos, aglomerados e distalmente, fora da área de estudo, presente em conglomerados e brechas vulcânicas. Os derrames riolíticos representam o segundo litotipo formado na área, estes inclusos como litoclastos nos tufos. O terceiro litotipo é caracterizado pelos conglomerados com clastos das rochas citadas acima, e sendo o último representante desta série de rochas, os tufos.

A tabela 2 mostra as principais características de cada uma das ocorrências e seus teores médios (BONGIOLO, 2006).

O modelo proposto por Rojas (2007) do contato entre o granito e as lavas andesíticas, evidencia uma intrusão nas rochas vulcânicas, uma vez que clastos das vulcânicas foram parcialmente assimilados, observando-se formas angulosas com texturas de corrosão nas amostras coletadas em campo.

Segundo Rojas (2007), os filões presentes na área de estudo são pouco expressivos e com teores elevados de minério, especialmente de Au estruturalmente se comportam semelhante às famílias de fraturas NW e EW. Geralmente se comportam de forma rúptil, no qual os veios foram formados por fluidos que alteraram a encaixante em um sistema do tipo brechóide (figura 13), percolando entre os constituintes proximais ao veio e alterando parcialmente ou intensamente, dependendo da porosidade da rocha, como no caso dos andesitos e tufos respectivamente.

Os principais minerais de alteração nas zonas mineralizadas dos granitóides são quartzo, pirita e argilominerais dioctaédricos. Estes últimos vêm sendo descritos historicamente como uma fase sericítica homogênea (BONGIOLO, 2006).

A partir da integração de dados geológicos, geofísicos e geocronológicos das intruvisas que compõem o CILS, foi possível caracterizá-lo como um sistema vulcano-plutônico de subsidência (GASTAL *et al.* 2006).

Araújo (2016) realizou um estudo sobre a paragênese mineral da Mina Cerro Rico através de descrições petrográficas, de amostras e furos de sondagem, e análise do banco de dados geoquímicos da área de estudo, pertencente a empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda. A partir da análise dos quase 682 m de testemunhos de sondagem foram observados contatos existentes entre as rochas e como eles ocorrem. A presença de fraturas, veios e vênulas, as mineralizações, os produtos de

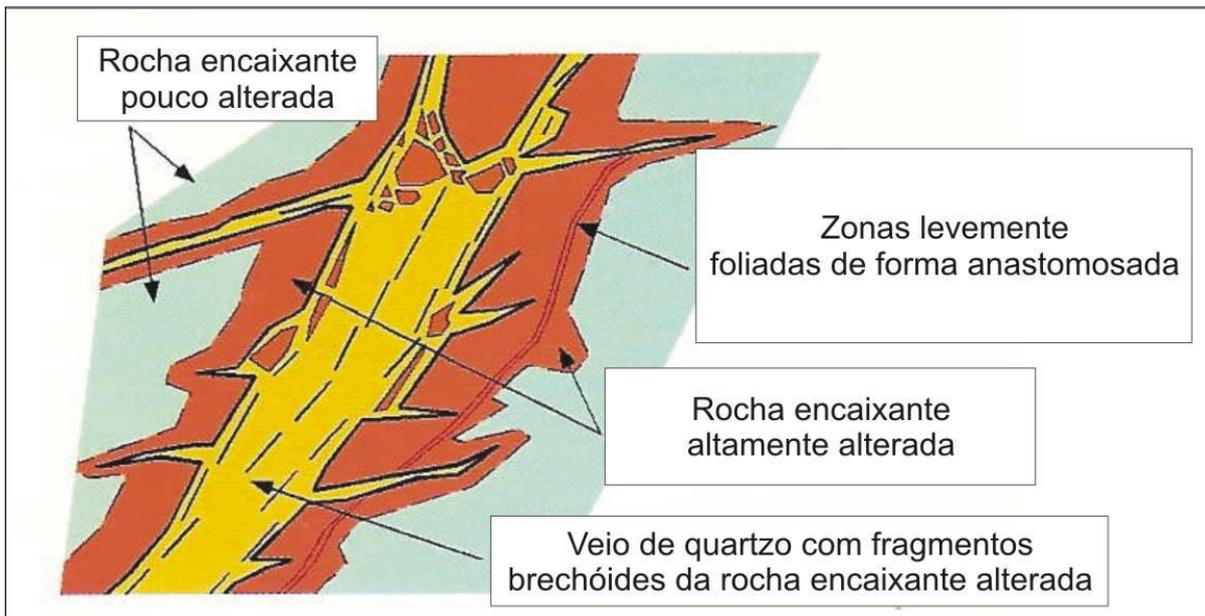
alteração e a assembleia mineralógica foram identificados na descrição macroscópica. A predominância litológica nos furos de sondagem presentes na área é dada por tufos líticos contendo horizontes de tufo a cristal e pouca presença de tufos cineríticos, além de porções apresentando rochas traquíticas e andesíticas. Os contatos entre as rochas são variáveis e não respondem a um padrão podendo ser abrupto ou gradual.

Tabela 2 – Comparação entre as principais características dos antigos trabalhos nas mineralizações da Sequência Vulcanogênica da Bacia do Camaquã.

MINA	ENCAIXANTE	CONTEXTO	ALTERAÇÃO	MINÉRIO	TIPO	TEORES	CARACTERÍSTICAS
<b>MINERALIZAÇÕES NA BACIA DO CAMAQUÃ - SEQUÊNCIA VULCANOGÊNICA FORMAÇÃO HILÁRIO</b>							
<b>CERRO RICO</b>	Predominam tufo a cristal, subordinadamente intercalados com rochas sedimentares com constituintes de origem vulcânica (NE)	Cerca de uma centena de trincheiras e poços, além de nove galerias.  Os tufo são acamados N0-30E/0-45SE.	Quartzo, pirita, calcopirita, arsenopirita, especularita, calcocita, bornita, azurita, clorita, calcita, anfibólios e óxidos de manganês.	<b>Au</b>	Filoniano  Veios e <i>stockworks</i> de quartzo, carbonatos, pirita e calcopirita  N60-80W e N70E	4 ppm	Veios com 120 m de comprimento e 50 cm de espessura média.
<b>SARAIVA</b>	Tufo líticos e a cristal, lavas de traque-andesitos e rochas vulcanoclásticas. Corpos hipabissais monzoníticos.	Dezenas de trincheiras e poços. Os filões são alinhados a sudeste dos filões da mina Volta Grande. Os veios são descontínuos, deslocados por zonas de falha NE e NW.	Quartzo, pirita, calcopirita e especularita.		Filoniano  Veios e <i>stockworks</i> de quartzo, pirita e calcopirita  N30-80W	4 ppm	Veios descontínuos com 15 m de comprimento e 20 cm de espessura média.
<b>VOLTA GRANDE</b>	Tufo líticos e a cristal, lapili tufo, aglomerados e brechas piroclásticas, intercalados com lavas de traquibasaltos e traquiandesitos e depósitos epiclásticos. Diques e corpos subvulcânicos intermediários a ácidos.	Cerca de uma centena de trincheiras e poços, além de seis galerias. Ocorrência de cornubianitos. Presença de veios de actinolita nas rochas vulcanogênicas. Enriquecimento supergênico. Contato com granitoide do CILS.	Quartzo, calcita, dolomita, pirita, calcopirita, epidoto, clorita, galena, actinolita, especularita, bornita, calcocita e arsenopirita.	<b>(Ag)</b>  <b>Volta Grande</b>	Filoniano  Veios e <i>stockworks</i> de quartzo, calcita, dolomita, pirita e calcopirita  N50-80W	3,5 ppm	Veios com 20 m de comprimento e 20 cm de espessura média.

Fonte: autor (2016), modificado de Bongiolo (2006, p. 32)

Figura 13 – Esquema de representação dos veios na Mina Cerro Rico.



Fonte: Rojas (2007, p. 53), modificado de Witt (1993)

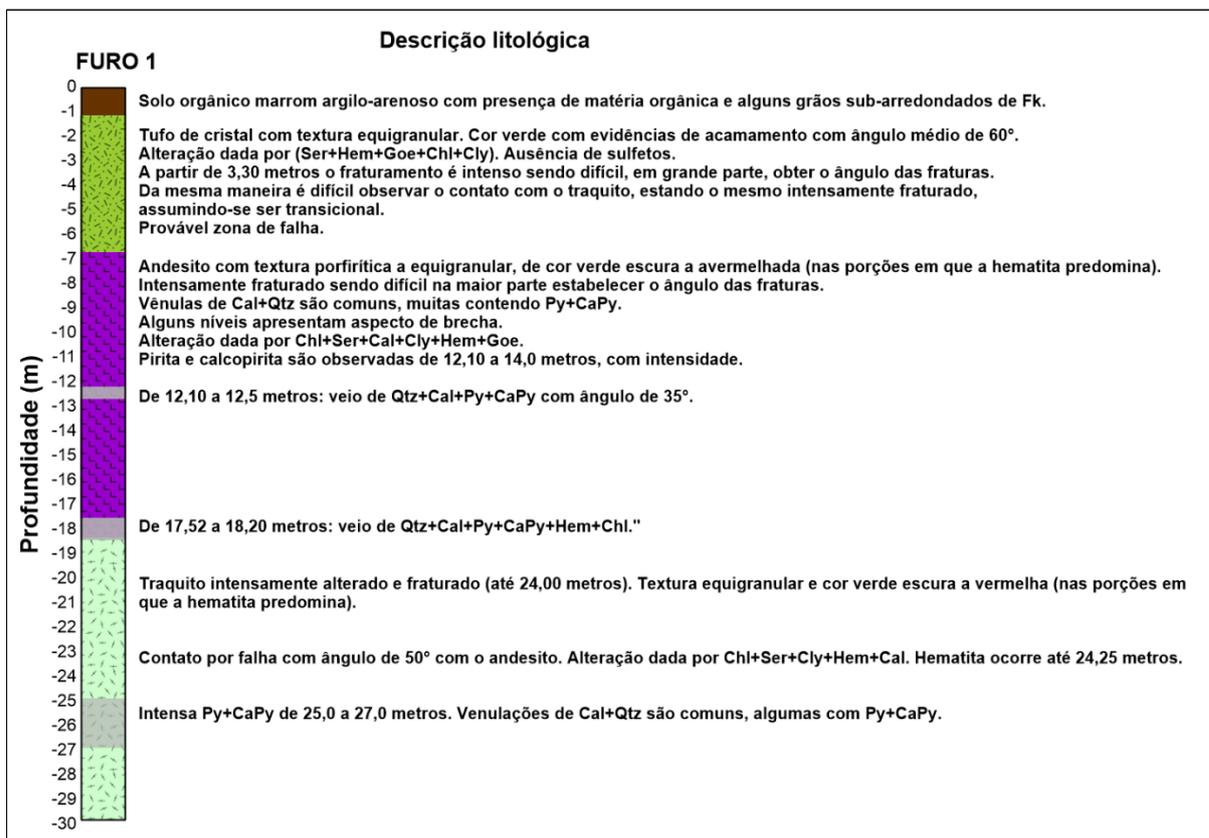
As porções observadas nos furos em que há muita cloritização/sericitização, aliadas a mineralogia encontrada e diagnosticada através das petrografias, permitiu a identificação da Mina Cerro Rico como sendo uma zona limítrofe com rochas que se encontram em um regime de depósito hidrotermal do tipo pórfiro e em regimes hidrotermais do tipo epitermal (ora de alta sulfetação ora de baixa sulfetação) (ARAÚJO, 2016).

Em síntese, Araújo (2016) concluiu que a Mina Cerro Rico, pode ser interpretada como uma região em que as rochas vulcânicas da Fm. Hilário, andesitos, traquitos, tufos líticos e a cristal, sofreram alterações em sua composição inicial frente a ocorrência de eventos hidrotermais com capacidade de mineralização de Au. As observações petrográficas foram importantes para a determinação da assembleia mineralógica encontrada na área de estudo, permitindo a interpretação da ocorrência de hidrotermalismo sobre as rochas da região inicialmente através de veios, venulações, preenchimento de fraturas e posteriormente ao se observar minerais de minério, como: sulfetos (pirita, calcopirita, arsenopirita, covelita, bornita); sulfatos (jarosita, barita, alunita) e argilominerais (sericita, cloritas, pirofilita). O autor ressaltou, que na área há evidências da ocorrência de mais de um evento hidrotermal, onde é

possível a identificação de uma zona em que ocorrem superposições ou interdigitações entre os ambientes através de uma evolução horizontal e vertical do hidrotermalismo na região. Passa-se de uma zona propilítica de um depósito do tipo pórfiro nas porções mais a NW da área para os estágios de alta sulfetação e de baixa sulfetação de depósitos epitermais nas porções a SE e NE.

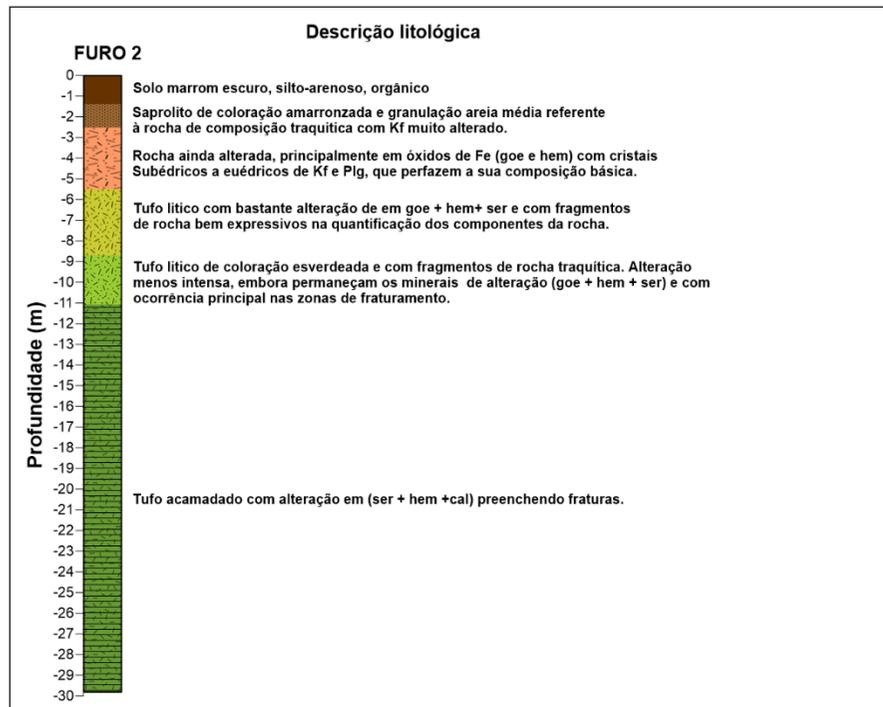
As interpretações de três furos de sondagem presentes na área da Mina Cerro Rico, pertencentes a empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda., estão representados nas figuras 14, 15 e 16.

Figura 14 – Descrição litológica do furo de sondagem 1.



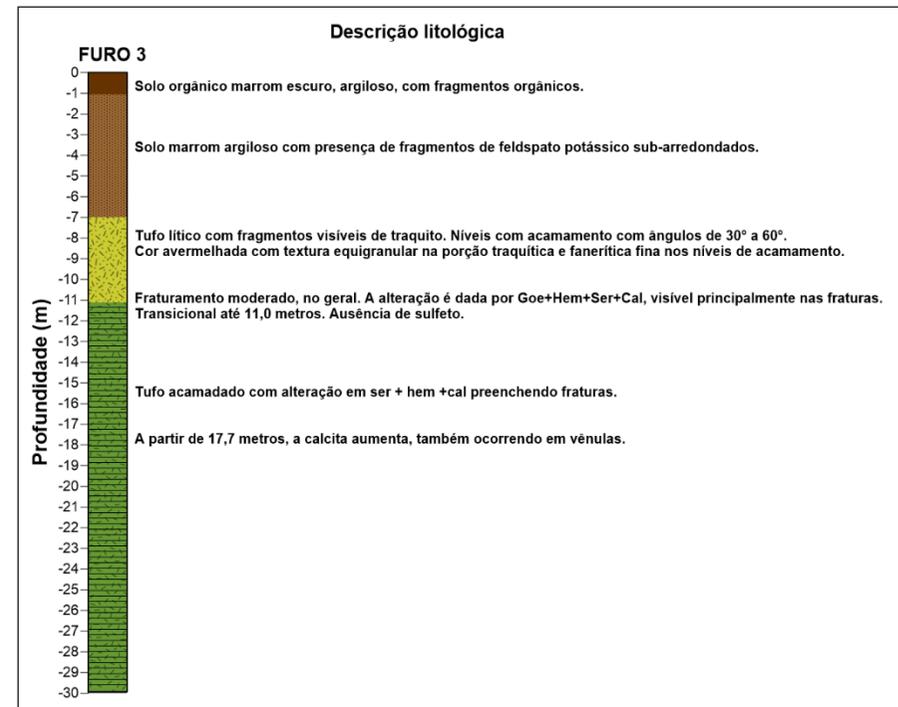
Fonte: Amarillo (2007)

Figura 15 – Descrição litológica do furo de sondagem 2.



Fonte: Amarillo (2007)

Figura 16 – Descrição litológica do furo de sondagem 3.



Fonte: Amarillo (2007)

## 7.2 Trabalhos geofísicos

A tabela 3 apresenta alguns trabalhos geofísicos com a utilização de métodos geoeletricos e gamaespectrométricos para identificação e caracterização de áreas de depósitos minerais.

Tabela 3 – Estudos geofísicos realizados em depósitos minerais.

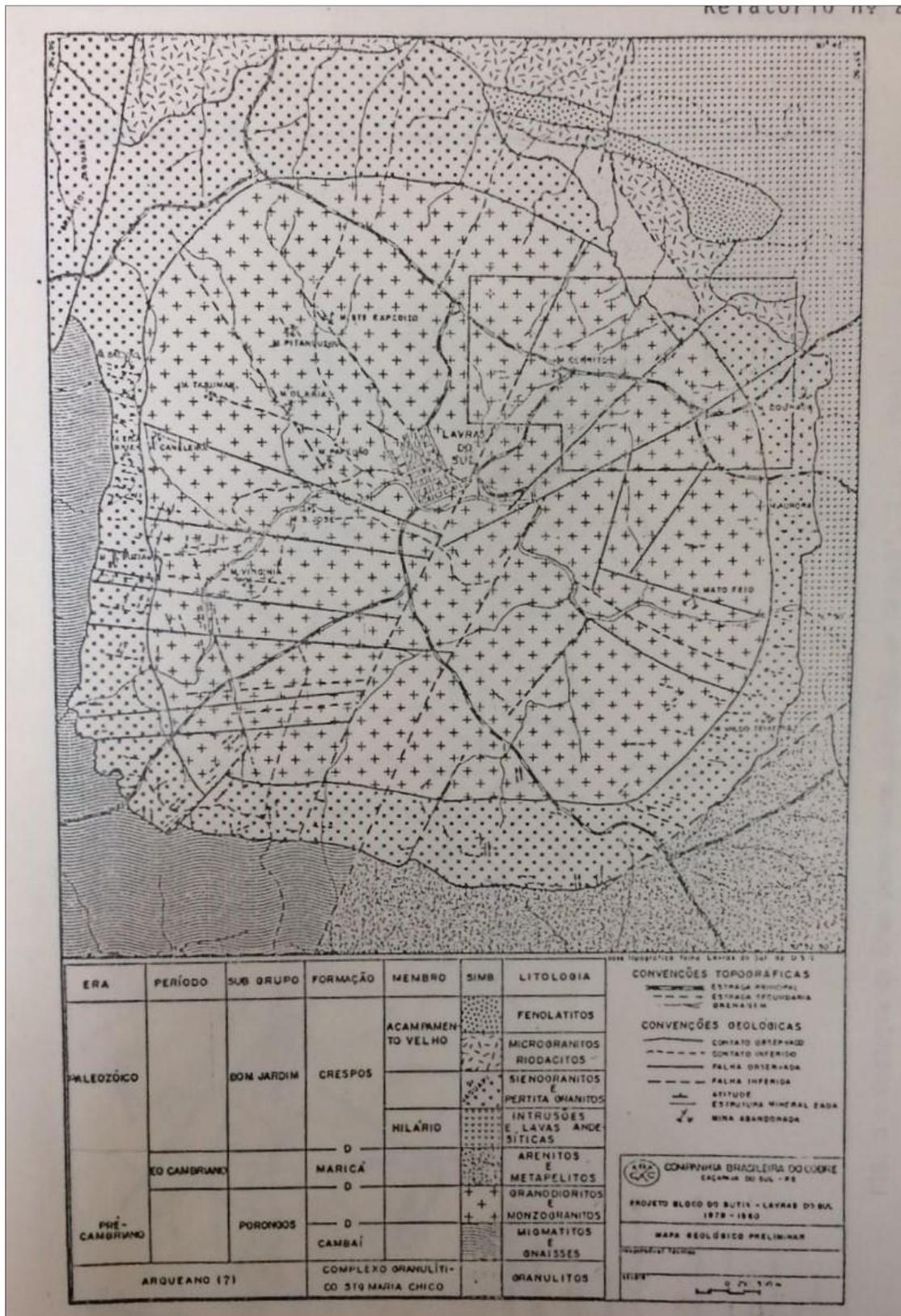
AUTOR	MÉTODO/TÉCNICA	DESCRIÇÃO
Rigoti & Blanco (1985)	Eletrorresistividade de corrente contínua e o de Polarização Induzida (IP)	Correlacionaram as zonas anômalas de IP à presença dos granitos hidrotermalizados, mineralizados em ouro.
Irvine & Smith (1990)	Caminhamento elétrico (CE) e Polarização Induzida (IP)	Concluíram que os métodos geoeletricos são eficazes na detecção de sistemas de alteração textural ou veios de quartzo auríferos e zonas silicificadas.
Dickson & Scott (1997)	Gamaespectrometria	Mostraram a eficiência da aplicação do método gamaespectrométrico na identificação de zonas de alteração hidrotermal.
Gallas (2000)	Polarização Induzida (IP), Caminhamento elétrico (CE) e Potencial espontâneo (SP)	Os levantamentos geofísicos obtiveram excelentes resultados, principalmente num contexto de mineralizações disseminadas.
Ferreira <i>et al.</i> (2001)	Polarização induzida espectral (SIP)	O modelo de cargabilidade global verdadeira, obtido por inversão, refletiu a disposição horizontalizada do minério e dos estratos geológicos.

HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda. (2008)	Polarização Induzida e eletrorresistividade	Identificaram setores com anomalias de cargabilidade coincidindo com baixos de resistividade, que foram consideradas, conforme critérios interpretativos, de maior potencial prospectivo para investigações futuras no Alvo Butiá
Zacchi & Silva (2009)	Aerogamaespectrometria	Mapearam e caracterizaram zonas de alteração hidrotermal através dos dados aerogeofísicos.
Ramos (2010)	Magnetometria e gamaespectrometria aérea	Identificou estruturas que podem estar relacionadas à percolação de fluidos de alteração hidrotermal, os quais podem ter associações com mineralizações auríferas.

Fonte: autor (2016)

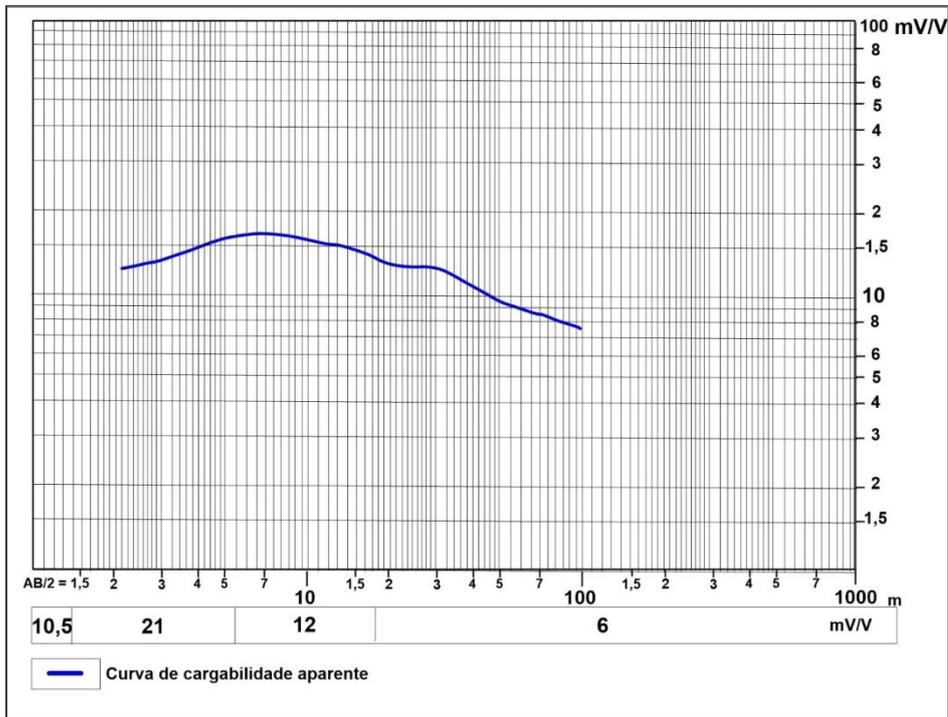
No trabalho realizado por Rigoti & Blanco (1985), foi efetuado um estudo geolétrico utilizando os métodos de Eletrorresistividade de corrente contínua e o de Polarização Induzida (IP), com arranjo dipolo-dipolo, para apoiar e complementar o mapeamento de granitos hidrotermalizados, mineralizados em ouro no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) (figura 17). No trabalho foram constatados intervalos anômalos de cargabilidade, normalmente associados a valores de resistividades média a baixa ( $\rho_a < 1500 \text{ Ohm.m}$ ). Num *background* inferior a 8mV/V as anomalias IP foram consideradas com valores maiores que 12 mV/V. Com base nas respostas de ocorrências conhecidas na área pode-se correlacionar as zonas anômalas à presença dos granitos hidrotermalizados, denominados pelo termo de hidrotermalitos, mineralizados em ouro, em que a pirita associada seria a responsável pela anomalia IP e a maior alteração da rocha seria responsável pela baixa resistividade. As figuras 18 e 19 mostram as curvas de cargabilidade aparente e de resistividade aparente, respectivamente.

Figura 17 – Área do estudo geolétrico realizado por Rigoti & Blanco.



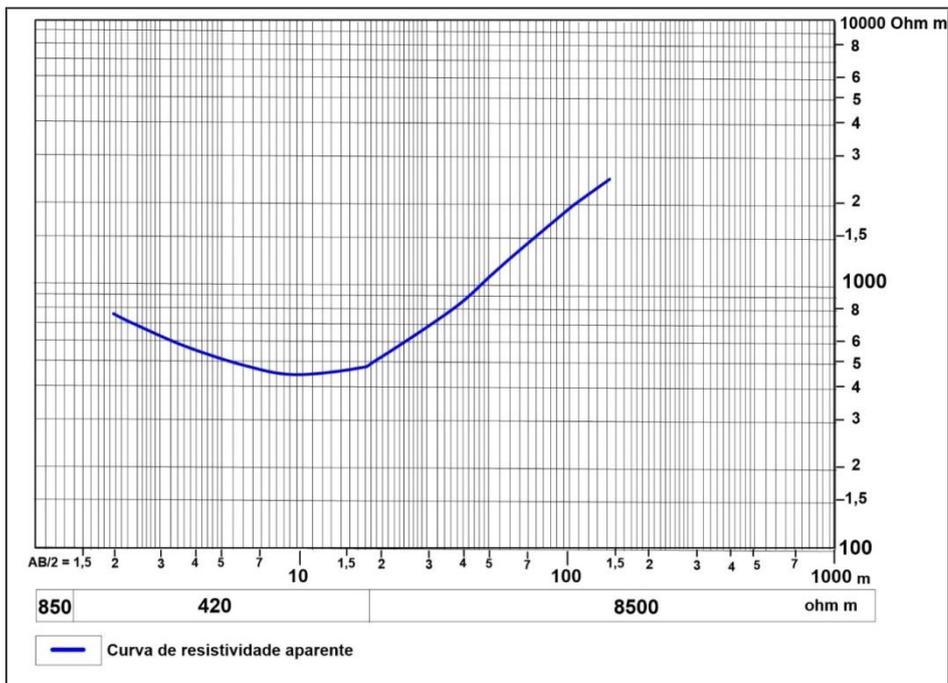
Fonte: Rigoti & Blanco (1985, p. 4)

Figura 18 – Curva de cargabilidade aparente da região do CILS.



Fonte: modificado de Rigoti & Blanco (1985, p. 6)

Figura 19 – Curva de resistividade aparente da região do CILS.



Fonte: modificado de Rigoti & Blanco (1985, p. 6)

Na prospecção de ouro epitermal em *Rhyolite Creek* (Austrália), Irvine & Smith (1990) aplicaram os métodos geoeletricos de eletroresistividade de corrente contínua e polarização induzida. O corpo mineral ocorre em andesitos, dacitos e sedimentos epivolcanoclasticos, com alteração hidrotermal, presença de pirita e pirofilita e gênese do tipo alta sulfetação. Os autores observaram também uma anomalia de cargabilidade intensa em conjunto com uma zona de baixa resistividade. A resposta geofísica foi relacionada a veios mineralizados contendo de 10% a 30% de pirita com ocasionais zonas de pirita maciça de 1 m de espessura, determinados a partir de sondagens e trabalhos posteriores.

Segundo estudos em *New South Wales* (Austrália), Irvine e Smith (1990) aplicaram o método da eletroresistividade em mineralização de ouro epitermal, contida nos veios de quartzo em lavas basálticas para andesíticas, em uma sequência vulcânica dominada por rochas vulcânicas e andesítica riolíticas. A zona oxidada prolonga-se por 60 m abaixo da superfície, a vulcânicas básicas e argila caulínica. Os veios principais de quartzo apresentam alta resistividade se comparados às rochas vulcânicas.

Ferreira *et al.* (2001), realizaram ensaios de polarização induzida espectral (*Spectral Induced Polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em concentrações subsuperficiais (depósitos “cegos”) de sulfetos metálicos estratiformes (Zn-Pb-Ag), detectadas por sondagens na área da jazida Canoas, município de Adrianópolis, Paraná. A seleção da área foi feita a partir de anomalias detectadas em sedimentos de corrente e em solos; um programa de sondagens levou a descoberta de três corpos sulfetados (denominados Canoas 1, Canoas 2 e Canoas 3). O modelo de profundidade obtido por inversão dos dados aparentes de IP foi considerado satisfatório, uma vez que identificou com clareza o posicionamento dos dois corpos de minério e apresentou valores de cargabilidade entre 5 e 10 mV/V para ambos os corpos, como também logrou êxito na definição aproximada de suas profundidades, além de refletir a disposição das camadas do perfil geológico. Já o modelo de resistividade, ao contrário, mostrou diferenças significativas da resistividade nos segmentos ocupados pelos corpos Canoas 2 e Canoas 3. No primeiro deles os valores variaram entre 500 a maiores que 1.000 Ohm.m, enquanto no outro as resistividades modeladas são bem maiores (500 a > 10.000 Ohm.m). Tais índices podem ser interpretados pelos contrastes de espessuras

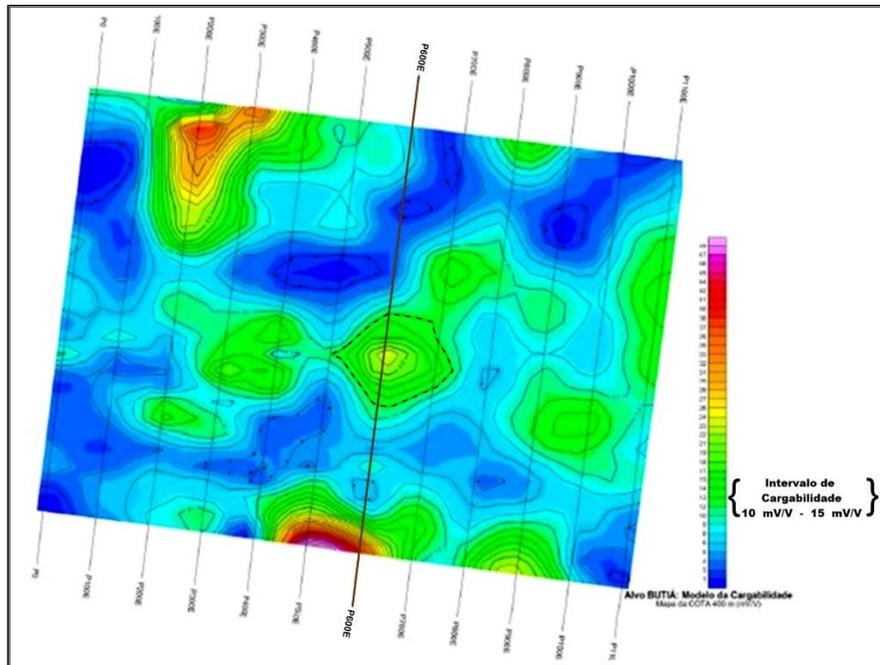
de rochas resistivas. A pseudoseção de resistividade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão, portanto, refletem as propriedades elétricas das litologias envolvidas e não os corpos mineralizados, talvez como decorrência das pequenas espessuras de material condutivo quando comparadas com o semiespaço resistivo. Por outro lado, as baixas resistividades aparentes constituem resposta de uma zona intensamente fraturada/falhada, com soerguimento do embasamento quartzítico de pelo menos 30 m, caracterizando um *horst*, o que permite maior infiltração e percolação das águas superficiais e subterrâneas, respectivamente, portanto incrementando a condutividade elétrica no citado segmento.

O relatório realizado pela empresa HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda. (2008), apresentou resultados da aquisição, processamento e interpretação geofísica nos Alvos denominados de Butiá, Caneleiras e Paredão, localizados no município de Lavras do Sul, Rio Grande do Sul, representando o esforço adicional nos trabalhos de prospecção mineral desenvolvida no Projeto Lavras do Sul.

Os trabalhos constaram da aquisição, processamento e interpretação de dados de Polarização Induzida (medições no Domínio do Tempo ou TDIP) e de Eletrorresistividade em 48,1 km lineares de caminhamentos elétricos ao longo de perfis interespaçados de 100 m, com arranjo dipolo-dipolo colinear ( $a = 50$  m e  $n = 6$ ). Os resultados finais dos métodos elétricos estão apresentados na forma de modelagens bidimensional para a cargabilidade (TDIP) e para a eletrorresistividade, obtidos da inversão controlada usando o programa *RESINV2D* da *Interpex*.

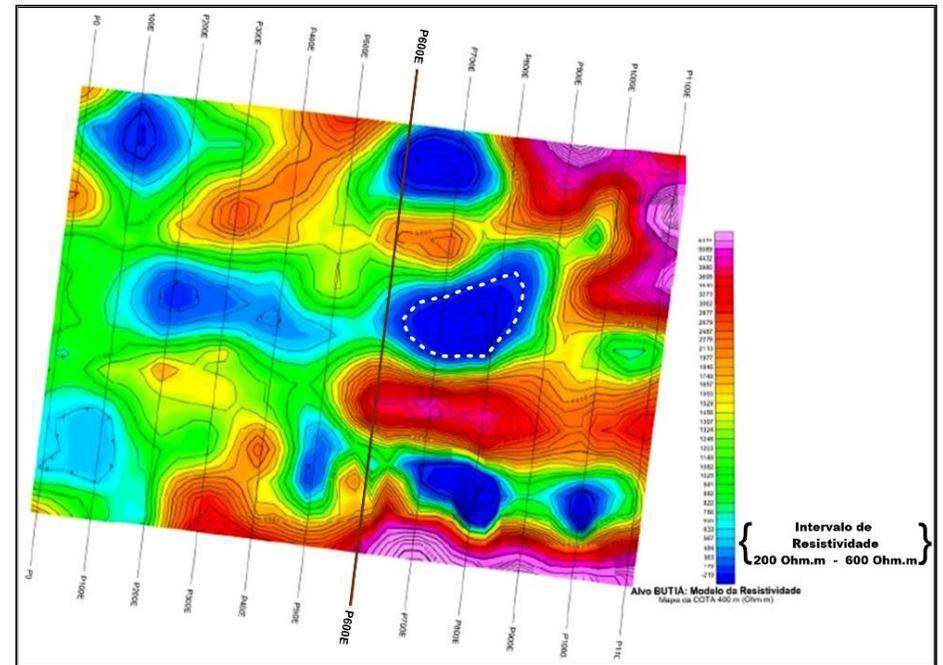
O trabalho apresenta modelos geoeletricos de cargabilidade e de resistividade (figuras 20 e 21) e um conjunto de seções com os resultados das cargabilidades (figura 22) e de resistividades (figura 24) aparentes medidas (seção superior), calculadas conforme o modelo (intermediária) e o modelo geoeletrico obtido como resultado da inversão (seção inferior) para o Alvo Butiá. Nos modelos geoeletricos de cargabilidade (figura 23) e de resistividade (figura 25) para a linha P600E, para um intervalo de profundidade até os 20 m, observa-se assinaturas de cargabilidade na ordem de 10 mV/V a 15 mV/V, coincidentes com baixos de resistividade na ordem de 200 Ohm.m a 600 Ohm.m. Esses setores que fornecem indicações sobre as anomalias de cargabilidade coincidindo com baixos de resistividade, foram consideradas, conforme critérios interpretativos, de maior potencial prospectivo para investigações futuras no Alvo Butiá.

Figura 20 – Mapa de cargabilidade, corte horizontal na cota 400 m, conforme modelo geológico, Alvo Butiá.



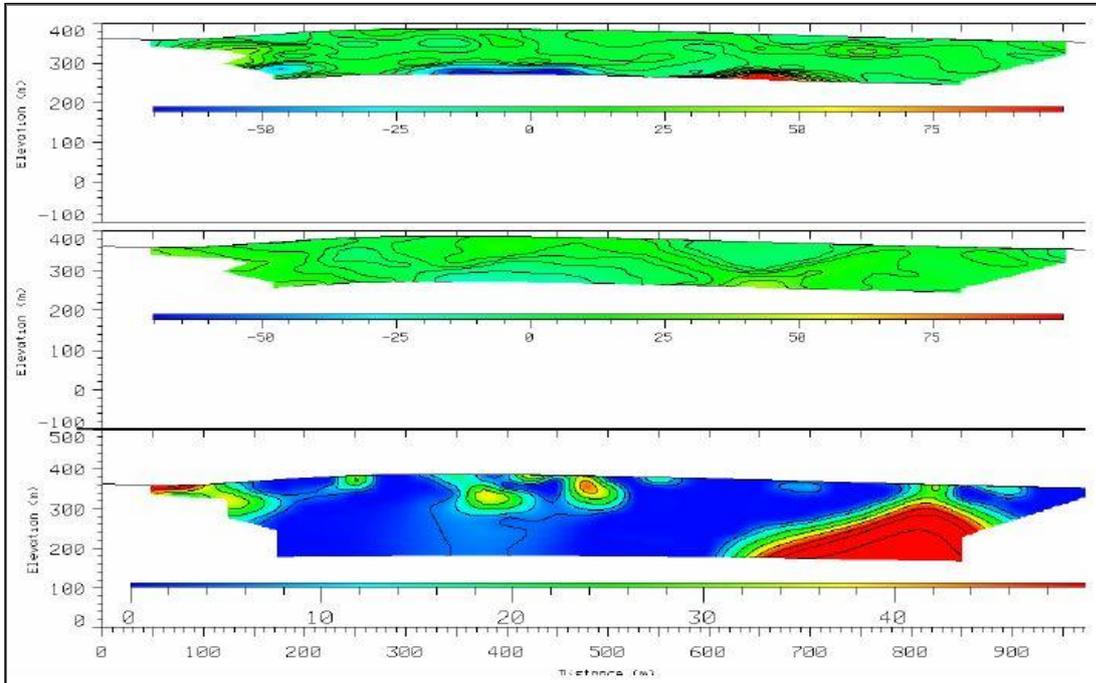
Fonte: Modificado do Relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 27)

Figura 21 – Mapa de resistividade, corte horizontal na cota 400 m, conforme modelo geológico, Alvo Butiá.



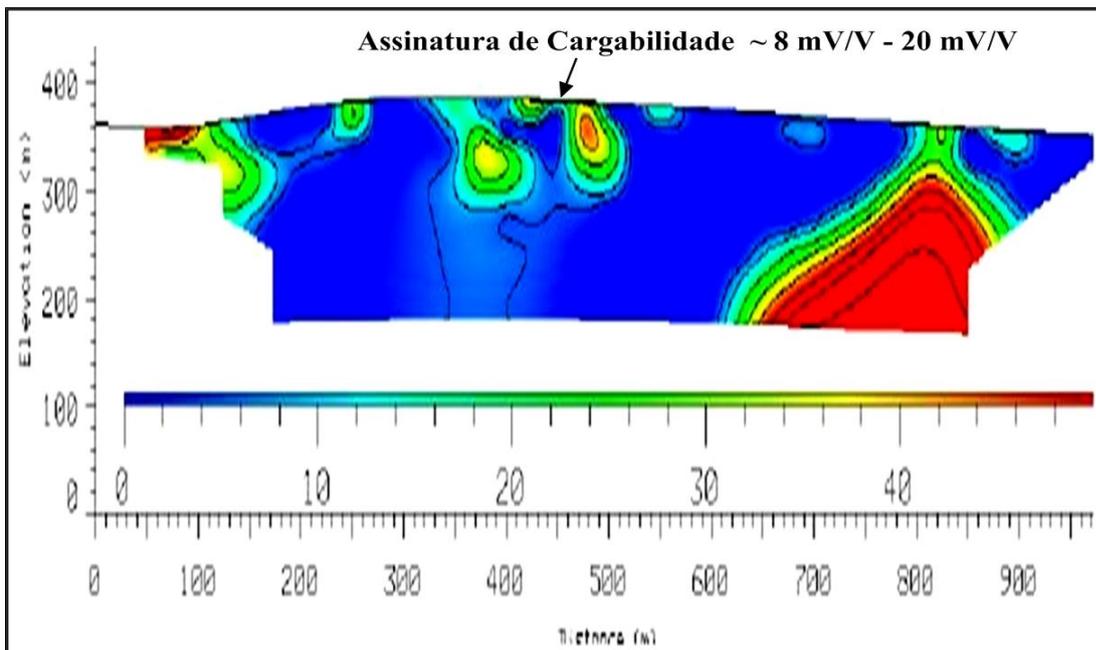
Fonte: Modificado do Relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 20)

Figura 22 – Pseudoseções de cargabilidade (mV/V), medida (seção superior), calculada (seção intermediária) e modelo obtido (seção inferior), para o perfil P600E, Alvo Butiá.



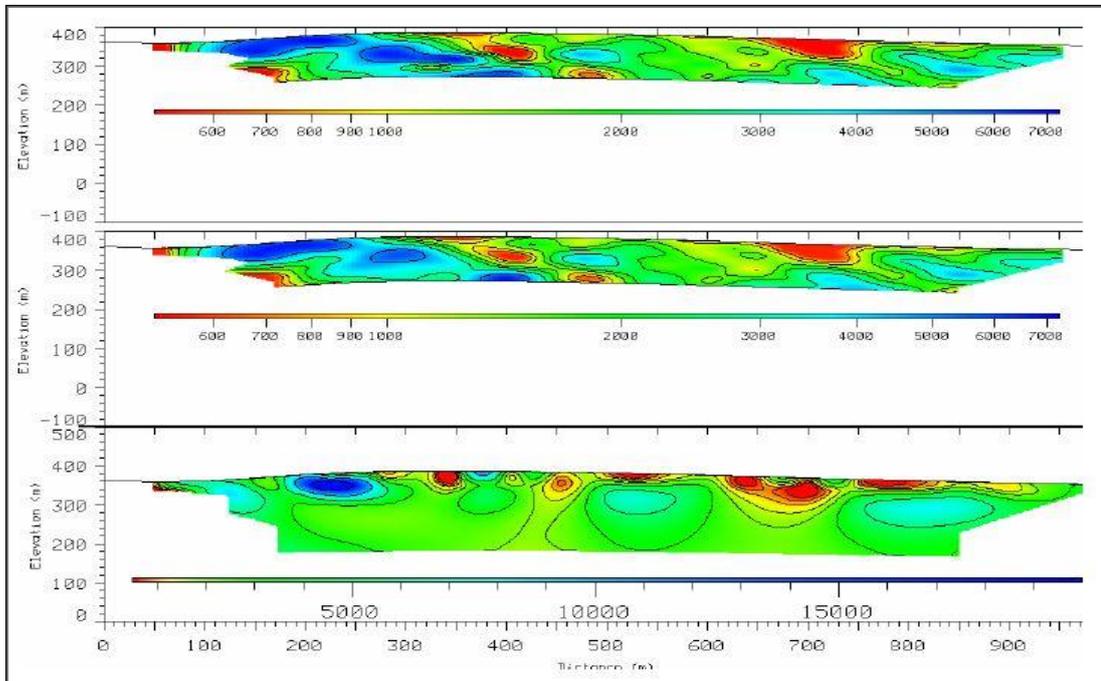
Fonte: Relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 24)

Figura 23 – Modelo 2D de cargabilidade obtido para o perfil P600E, Alvo Butiá.



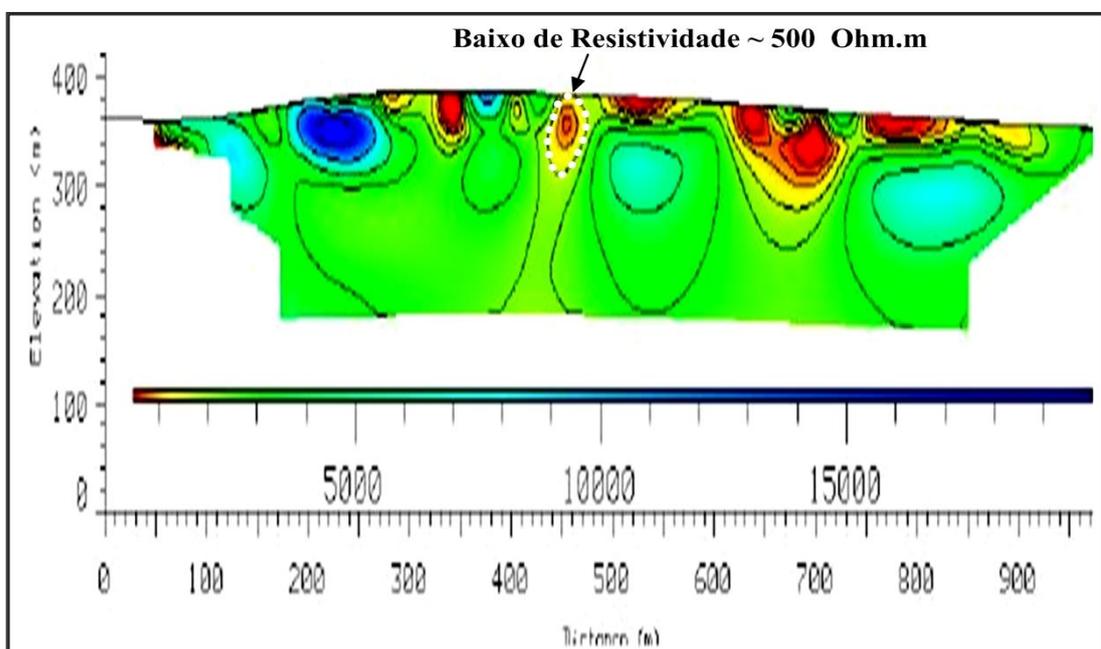
Fonte: Modificado do relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 24)

Figura 24 – Pseudoseções de resistividade (Ohm.m), medida (seção superior), calculada (seção intermediária) e modelo obtido (seção inferior), para o perfil P600E, Alvo Butiá.



Fonte: Relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 18)

Figura 25 – Modelo 2D de resistividade obtido para o perfil P600E, Alvo Butiá.



Fonte: Modificado do relatório da HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., (2008, p. 18)

### 7.2.1 Base de dados do levantamento aerogeofísico

No aerolevanteamento foi utilizada uma aeronave bimotor Piper Navajo/Chieftain PA 31-350 com registro PR-PRS. Os equipamentos aerogeofísicos e sistemas auxiliares foram instalados e calibrados no Canadá. O levantamento foi efetuado sobre um bloco pré-definido localizado no estado do Rio Grande do Sul (figura 26), possuindo uma área total de 226,64 km<sup>2</sup>.

Todos os dados adquiridos, após processos de correções e melhoramentos, foram disponibilizados em forma digital como grids, bancos de dados e planilhas, que podem ser abertos com o software *Oasis Montaj* (Geosoft).

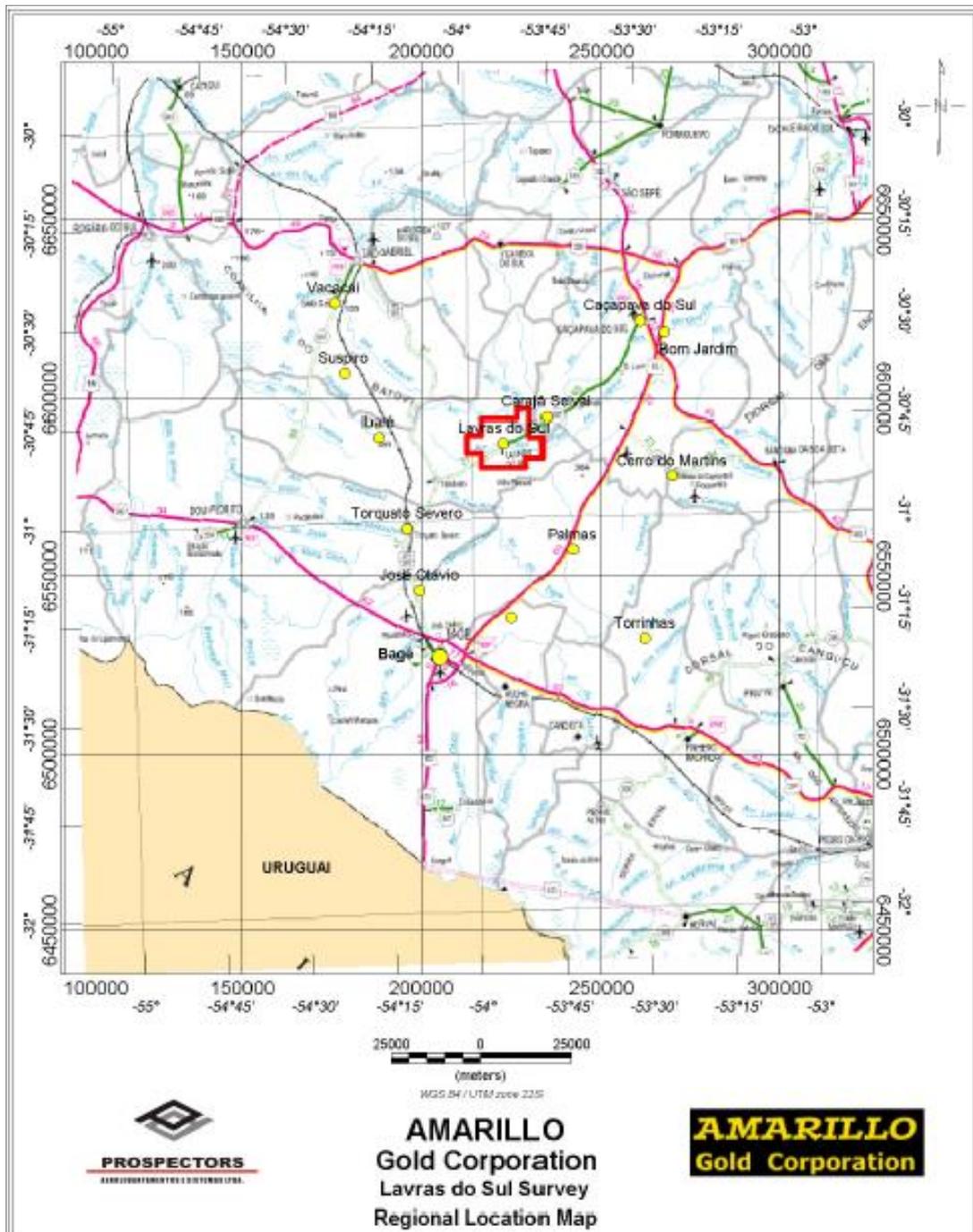
O Gamaespectrômetro Exploranium GR-820 de 256 canais, foi utilizado no levantamento. Este equipamento se caracteriza por uma estabilização automática de ganho, eliminando a deriva espectral. Os dados de saída consistem em 4 canais de integração (Contagem Total, Potássio, Urânio e Tório) e canal cósmico, sincronizados com 256 canais espectrais de leitura dos conjuntos de cristais para cima e para baixo.

Dados radiométricos, gravados em seu estado bruto como um espectro de 256 canais, foram inicialmente integrados em 5 janelas de energia, e após foram corrigidos e processados seguindo os métodos descritos pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003). As seguintes correções foram realizadas: Correção 'Live Time', Correção do *Background* Cósmico, Correção do *Background* Atmosférico, Correção do Espalhamento Compton e Correção da Atenuação de Altura.

Os parâmetros que definiram a execução do levantamento são descritos, resumidamente, a seguir:

- i. direção das linhas de voo: 0° (N-S);
- ii. espaçamento entre as linhas de voo: 100 m;
- iii. direção das linhas de controle: 90° (E-W);
- iv. espaçamento entre as linhas de controle: 1 km;
- v. intervalo entre medições geofísicas consecutivas: 1,0 s (espectrômetro e GPS);
- vi. altura média de voo: 100 m;
- vii. velocidade aproximada de voo: 270 km/h;
- viii. intervalo de amostragem gamaespectrométrica: 70 - 80 m.

Figura 26 – Mapa de localização do levantamento aerogeofísico gamaespectrométrico – Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul.



Fonte: Relatório Prospectors aerolevantamentos e sistemas Ltda. (2007, p. 4)

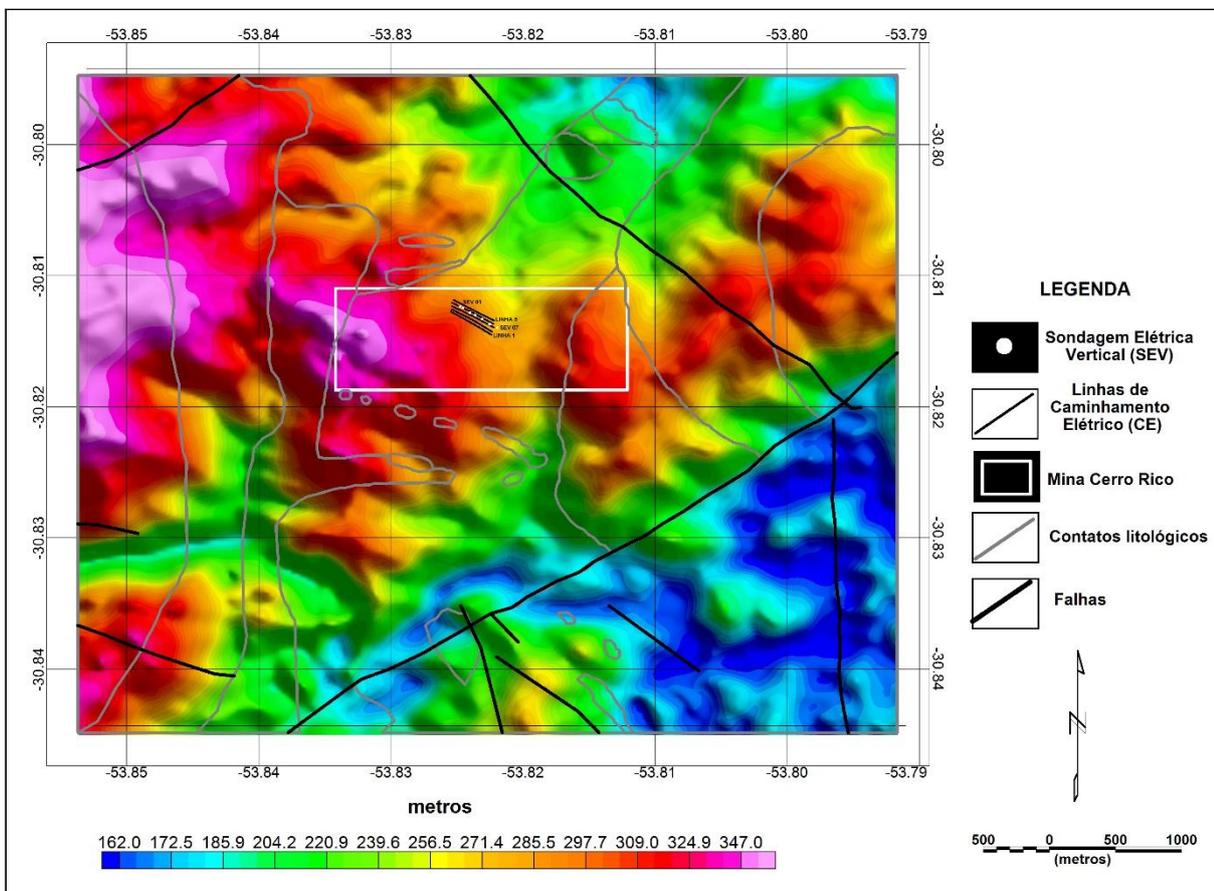
## 8 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 8.1 Modelo digital de elevação do terreno

Para efeito de visualização da topografia e análise dos resultados, foi gerado um modelo digital de elevação do terreno (*DEM*) a partir da obtenção de dados topográficos *ASTER* (figura 27).

Os dados provenientes do *ASTER GDEM* oferecem uma resolução espacial em longitude e latitude de 1 *arc-second* (~30 m) e uma resolução na vertical referente à altitude ortométrica de 7 – 14 m aproximadamente.

Figura 27 – Modelo numérico de elevação digital do terreno baseado em dados *ASTER-GDEM*.



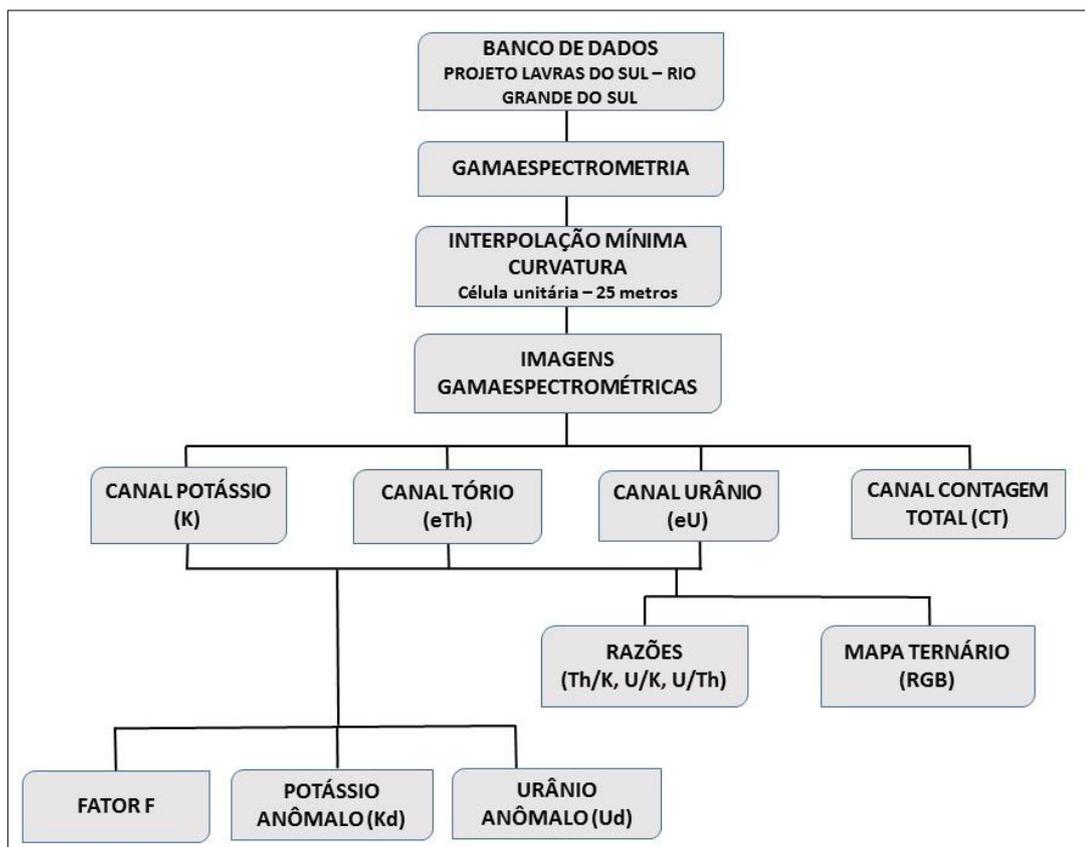
Fonte: autor (2017)

## 8.2 Dados aerogamaespectrométricos

Os dados aerogamaespectrométricos foram disponibilizados no formato *ASCII* (*XYZ*), *GDB's*, compatíveis com a plataforma do *Oasis Montaj Geosoft* (2007), que contém as informações de posicionamento corrigidas e todos os demais canais de informação registrados a bordo da aeronave. Com a utilização de técnicas de processamento aplicadas aos dados, foi possível a identificação e realce de assinaturas anômalas nos mapas das diferentes transformações.

Os principais procedimentos do processamento estão listados no fluxograma da figura 28.

Figura 28 – Fluxograma de processamento dos dados aerogamaespectrométricos.



Fonte: autor (2016)

A escolha do método de interpolação dos dados para a geração de uma malha regular (*grid*) foi feita em função da natureza da distribuição espacial regular dos

dados, onde o algoritmo utilizado deve se ajustar aos valores originais e ao mesmo tempo gerar uma superfície contínua e suave.

O método de interpolação da mínima curvatura é utilizado por possuir processamento rápido e eficiente para um conjunto grande de dados que apresente uma distribuição espacial regular. A superfície gerada na curvatura mínima é análoga a uma placa fina e linearmente elástica, deformada de forma a passar pelos valores dos dados com uma quantidade mínima de flexão (BRIGGS, 1974).

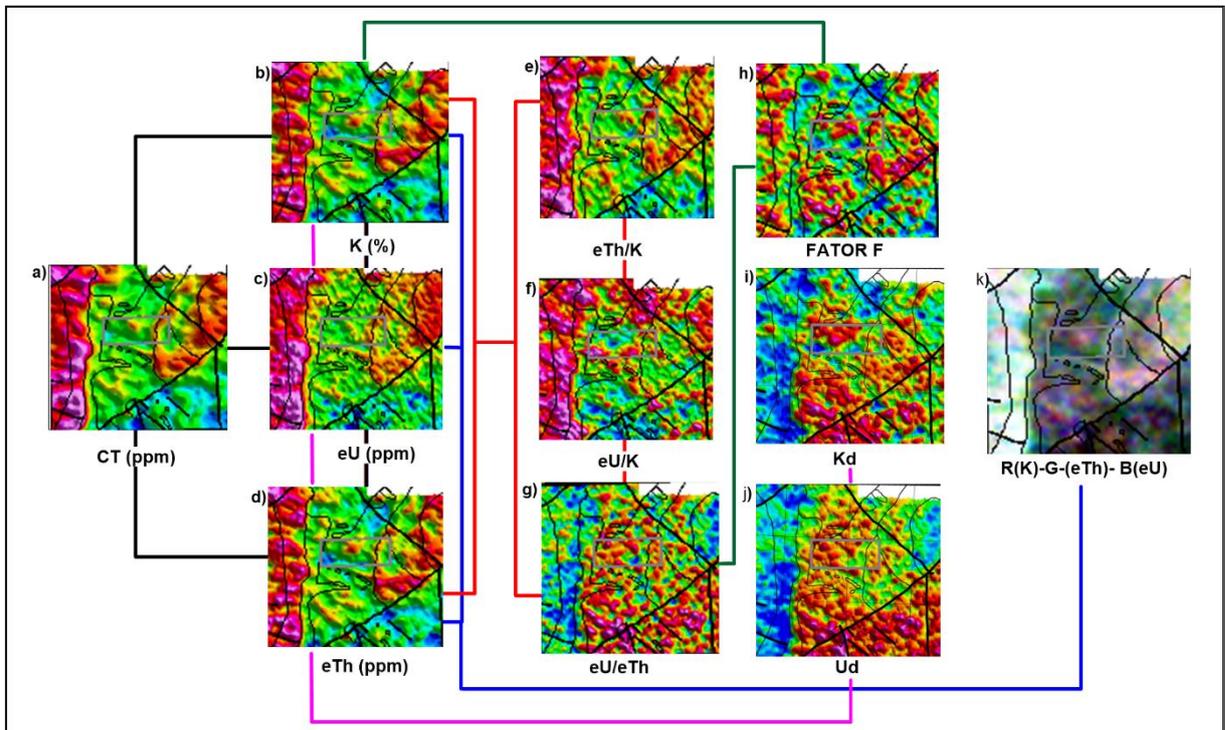
Depois da escolha do método de interpolação dos dados é estabelecido o tamanho da célula unitária para ser utilizado na confecção das *grids*. Vasconcellos *et al.* (1994) sugerem células unitária com valores entre 1/4 e 1/8 do espaçamento nominal das linhas de voo.

Para que se evitem perdas de informação e o aparecimento de erros padrões associados aos dados, os valores para a célula unitária são estabelecidos. Alguns destes erros representam a incorporação de altas frequências dentro de baixas frequências, denominadas *aliasing* (RAMOS, 2010). Estas altas frequências possuem o comprimento de onda menor que o espaçamento entre os pontos de amostragem e não podem ser detectadas, já que a mais alta frequência estimada corresponde a frequência de *Nyquist*, que possui comprimento de onda igual a duas vezes a distância entre observações sucessivas (Davis, 1986), no caso de aerolevantamentos, duas vezes o espaçamento entre as linhas de voo.

Considerando o aerolevantamento do Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul, que possui 100 m de espaçamento entre as linhas de voo, a dimensão da célula unitária escolhida foi de 25 m.

A figura 29 mostra um fluxograma esquemático com o procedimento aplicado ao processamento dos dados aerogamaespectrométricos, onde se gerou mapas de imagens dos valores anômalos das concentrações dos radioelementos, isto é: a) mapa de Contagem total (ppm), b) mapa de concentração do Potássio K (%), c) mapa de concentração de eU (ppm), d) mapa de concentração de eTh (ppm), mapa das razões e) eTh/K, f) eU/K, g) eU/eTh, h) mapa do Fator F ( $K(eU/eTh)$ ), i) mapa do potássio anômalo (Kd), j) mapa do urânio anômalo (Ud) e k) mapa ternário de composição colorida RGB (R(*red*) - K, G(*green*) - eTh e B(*blue*) - eU).

Figura 29 – Fluxograma esquemático com o procedimento aplicado ao processamento dos dados aerogamaespectrométricos, onde foram gerados mapas de imagens dos valores anômalos das concentrações dos radioelementos.



Fonte: autor (2016)

Inicialmente, optou-se pelo processamento dos dados aerogamaespectrométricos com uma abordagem interpretativa regional para a área de estudo. O processamento envolveu a geração de imagens da janela de Contagem Total (figura 30) e dos canais de K, eTh, eU (figuras 31, 32 e 33), assim como imagens das razões entre canais (figuras 34, 35 e 36) e mapa ternário em falsa-cor (figura 37).

A área regional de estudo apresentou variações litológicas significativas para a delimitação das diferentes unidades, a partir da interpretação dos resultados oriundos das imagens gamaespectrométricas, com associação de rochas graníticas, pertencentes ao CILS, e as vulcânicas e sedimentares da Fm. Hilário. Conforme o mapa de CT (figura 30), que possui a contribuição integrada das respostas dos três canais provenientes das concentrações de K (%), eU (ppm) e do eTh (ppm), corrobora de alguma maneira a presença de altas concentrações dos radioelementos na porção oeste da área de estudo, associada a borda leste da intrusão dos sienogranitos,

monzogranitos e granodioritos, pertencentes ao CILS, a qual se encontra bem delimitada.

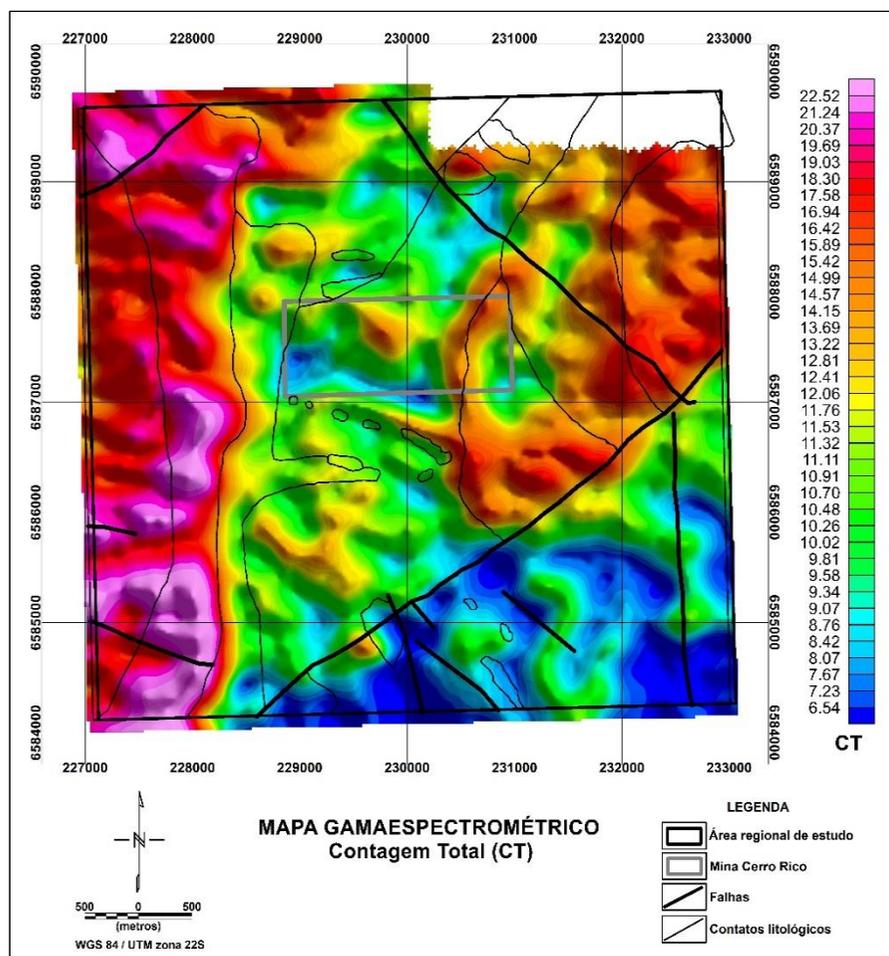
O canal do K (figura 31) mostra altas concentrações, em torno de 3,57%, localizadas na porção oeste, associadas as rochas de composição granítica, que pertencem ao CILS. Na porção leste da área de estudo, observa-se que apenas o canal do K possui altas concentrações (3,57%) caracterizadas por um baixo no relevo topográfico, com altitude ortométrica aproximada de 347 m. Devido a presença de feldspato-K na composição das rochas presentes na área.

No mapa correspondente ao canal do eTh (figura 32), as altas concentrações, em torno de 28,27 ppm, são observadas a oeste, onde o relevo topográfico é mais acentuado (aproximadamente 347 m). Por ser o radioelemento mais estável, o Th está associado a minerais resistatos, hidróxidos de ferro e argilo minerais, presentes nas rochas que afloram nessa região.

As principais falhas reconhecidas em mapeamento geológico também foram identificadas a partir das imagens dos canais gamaespectrométricos, principalmente no canal do eU (figura 33). Como um dos principais radioelementos do canal do eU é o radônio, zonas de falhas caracterizam-se por concentrações elevadas de emissão deste radioelemento.

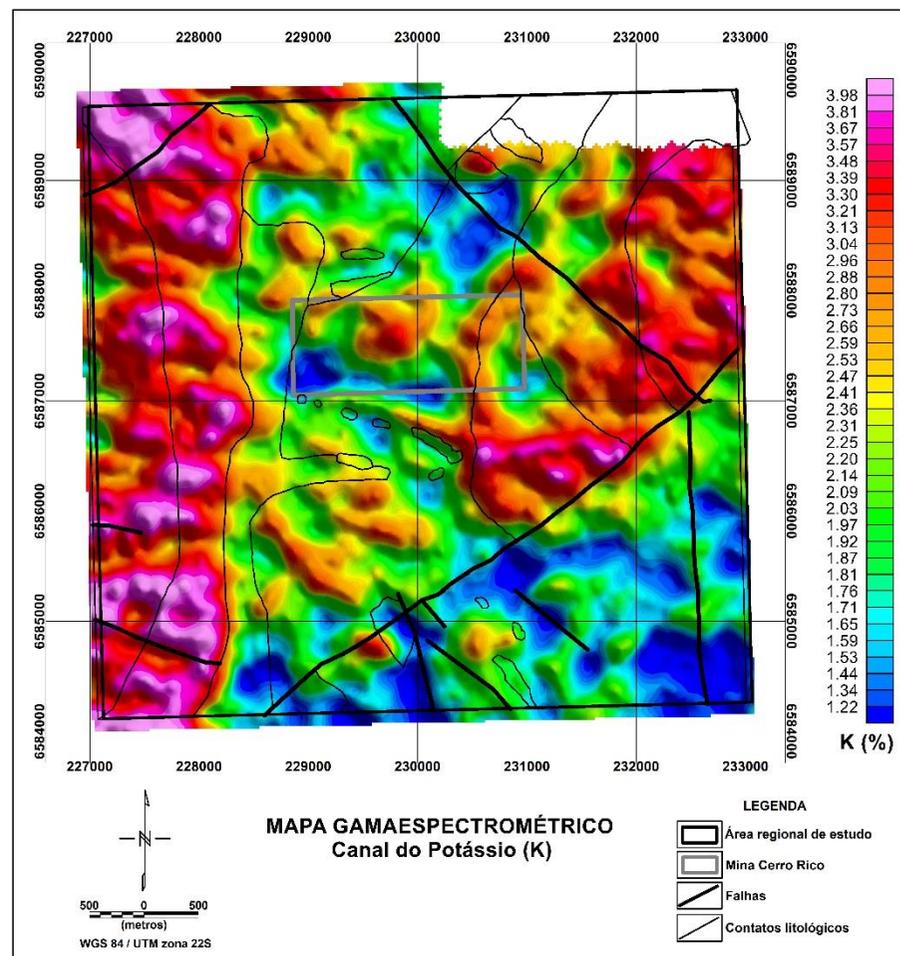
A figura 37 mostra o mapa ternário com a imagem da composição colorida RGB, onde as tonalidades mais claras são atribuídas a uma maior contribuição dos três radioelementos (K, eTh e eU), correlacionáveis com a presença de intrusões graníticas.

Figura 30 – Mapa gamaespectrométrico da janela de Contagem Total (CT).



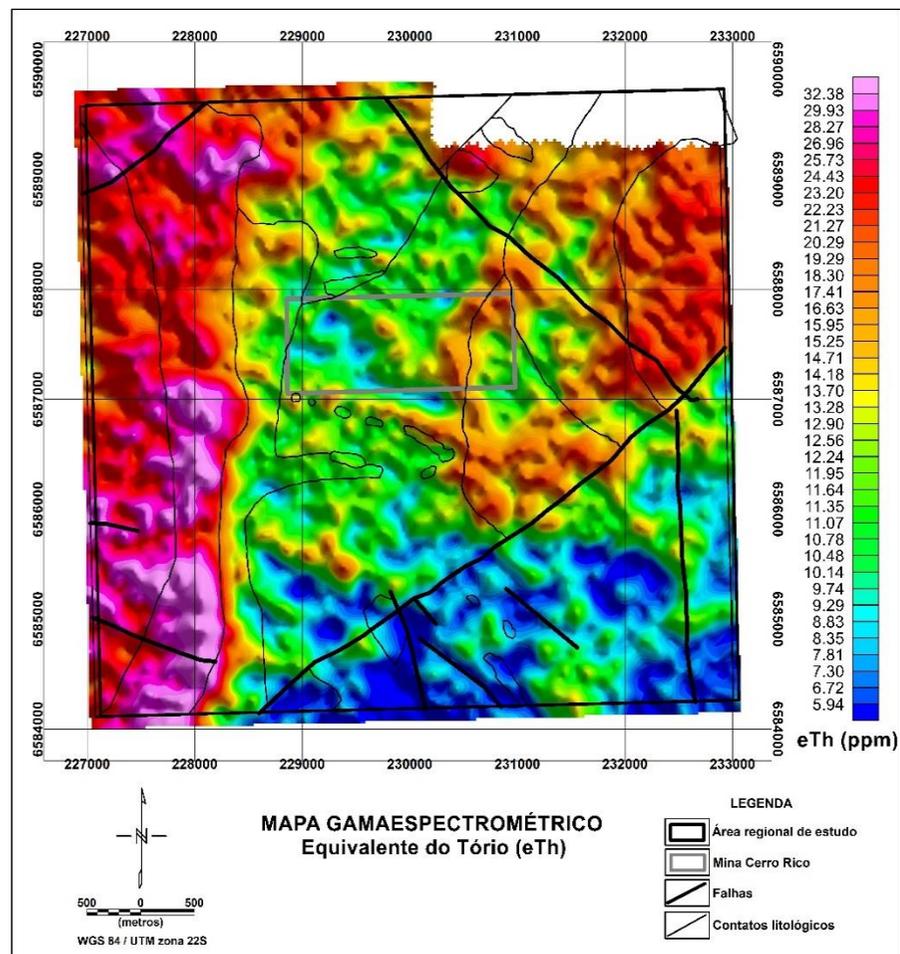
Fonte: autor (2016)

Figura 31 – Mapa gamaespectrométrico do canal do potássio (K).



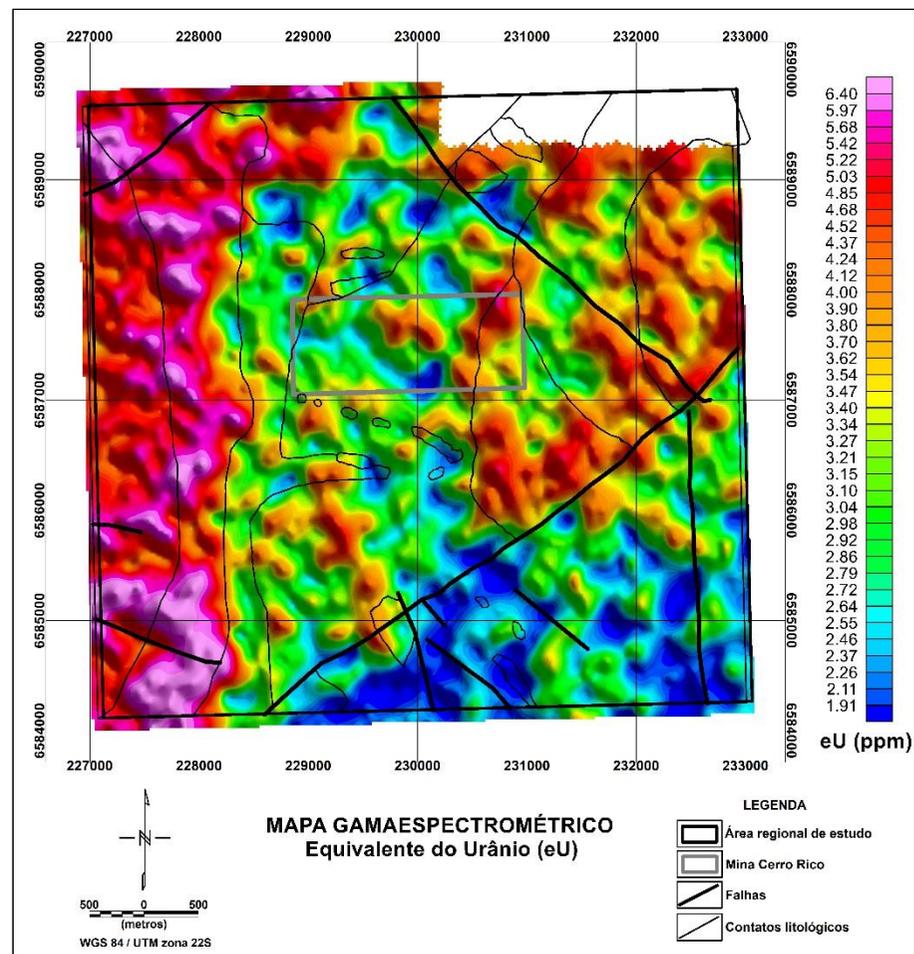
Fonte: autor (2016)

Figura 32 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do Tório (eTh).



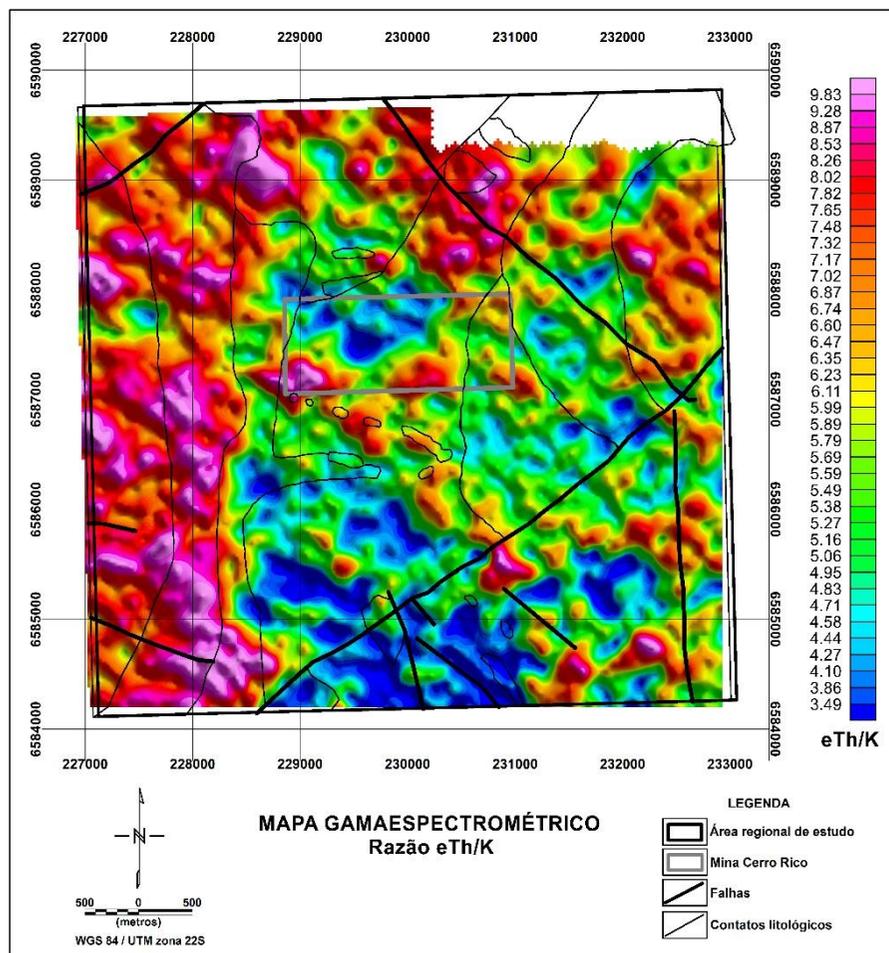
Fonte: autor (2016)

Figura 33 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do Urânio (eU).



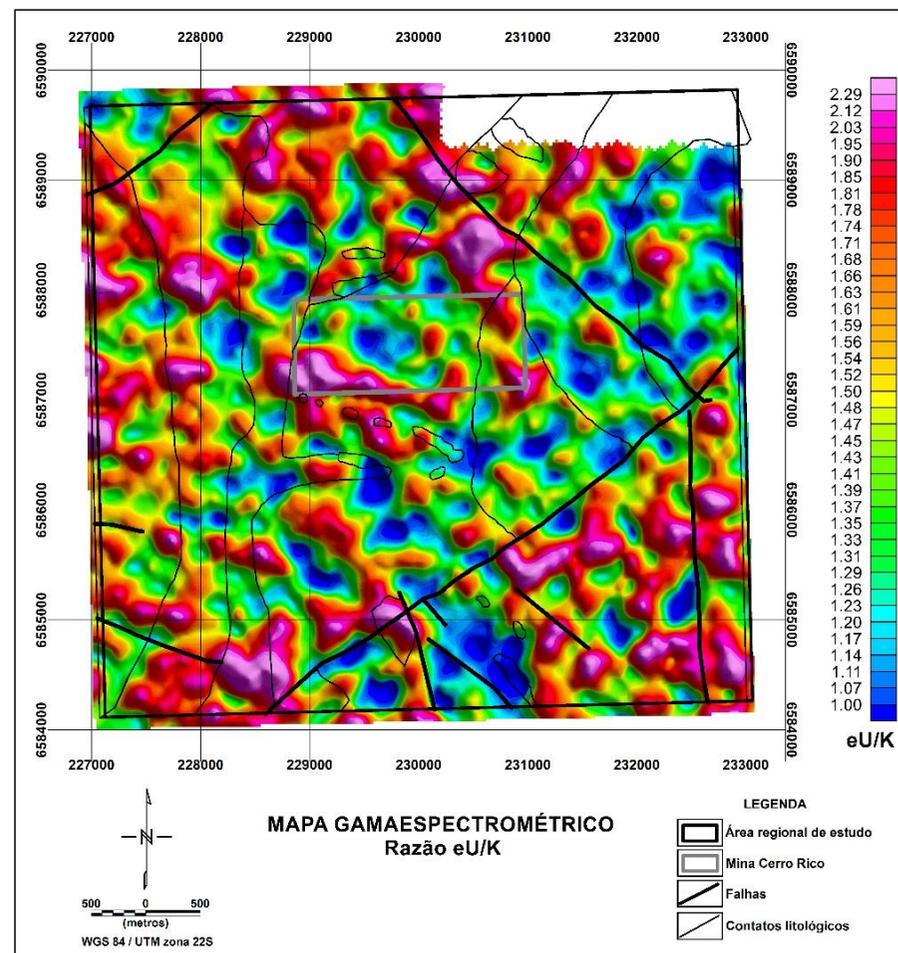
Fonte: autor (2016)

Figura 34 – Mapa gamaespectrométrico da razão do eTh/K.



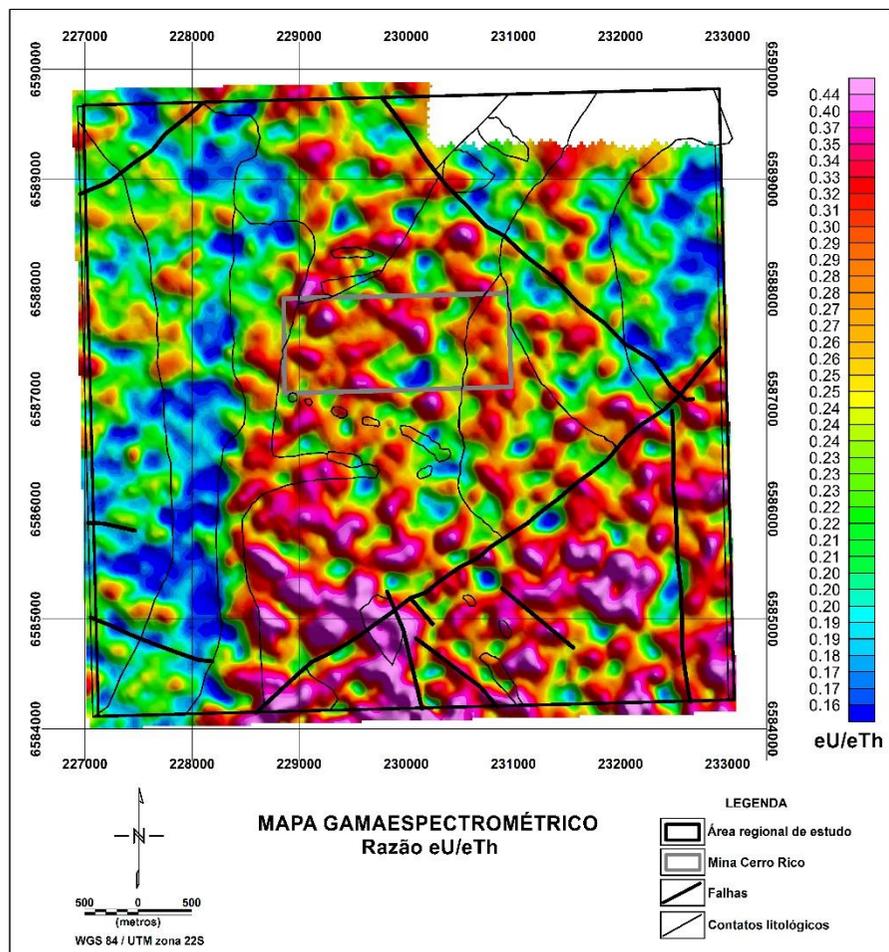
Fonte: autor (2016)

Figura 35 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/K.



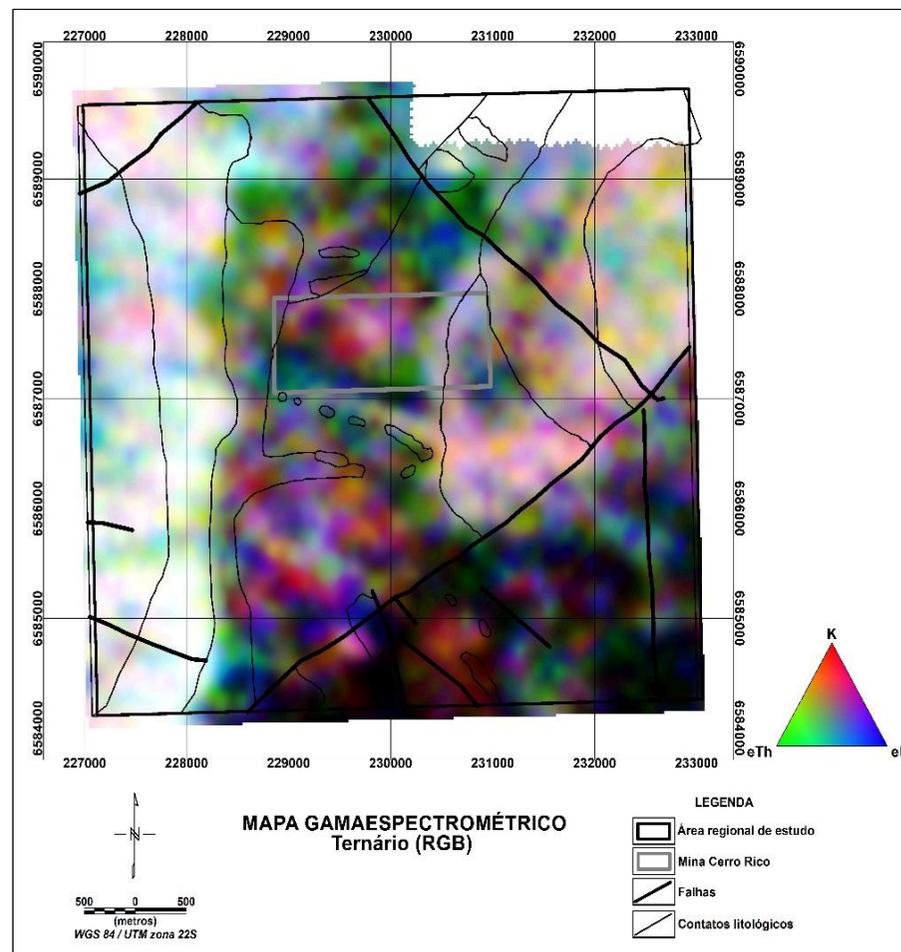
Fonte: autor (2016)

Figura 36 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/eTh.



Fonte: autor (2016)

Figura 37 – Mapa ternário de imagem RGB.

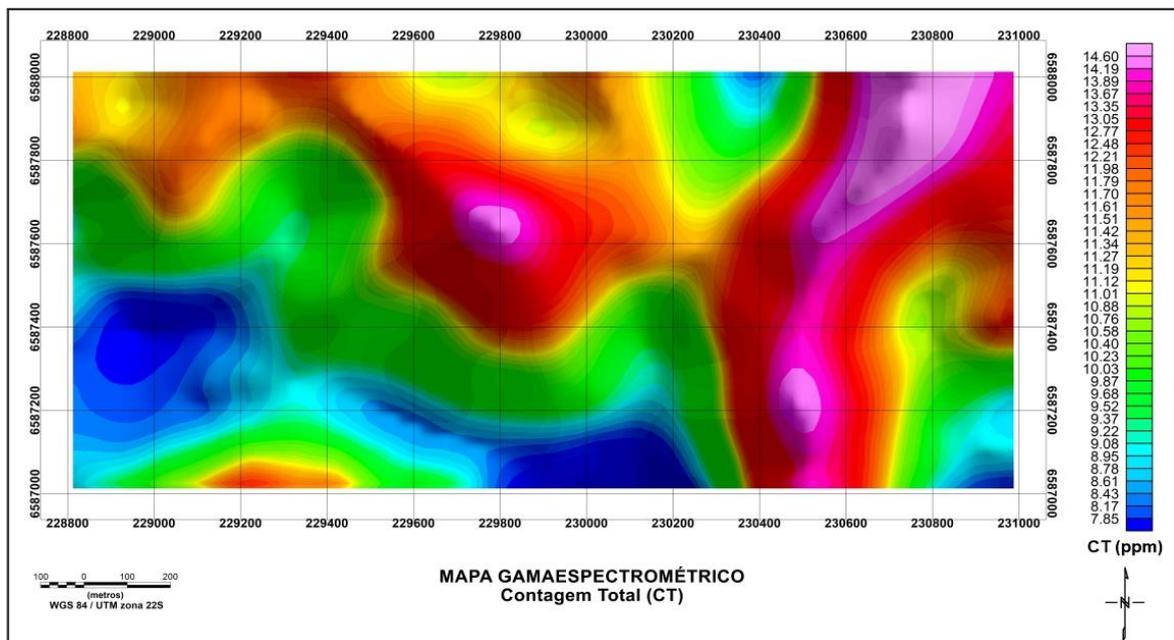


Fonte: autor (2016)

Os mapas de CT (figura 38) e dos canais de K, do eTh, do eU (figuras 39, 40 e 41), assim como os mapas das razões dos radioelementos (figuras 42, 43 e 44).

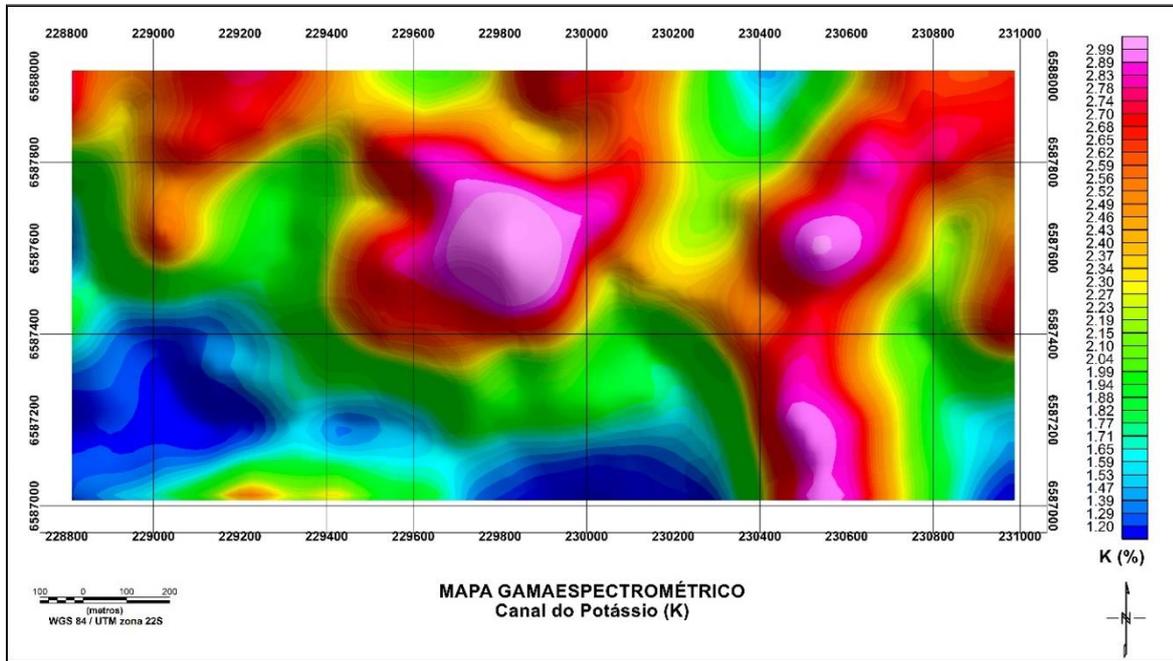
As maiores concentrações de potássio (figura 38) em torno de 2,99% e do eU (figura 41) em torno de 4,17 ppm a 4,33 ppm, ocorrem nas porções central e a leste da área de estudo. O urânio acompanha o potássio ao longo de processos hidrotermais, predominantemente sobre o tório, sendo este último de menor mobilidade geoquímica dos três radioelementos. Conforme pode ser observado (figura 40) na porção central da área de estudo, as concentrações do eTh não são expressivas, se comparadas com as dos canais do K e eU.

Figura 38 – Mapa gamaespectrométrico de Contagem Total (CT) para a área da Mina Cerro Rico.



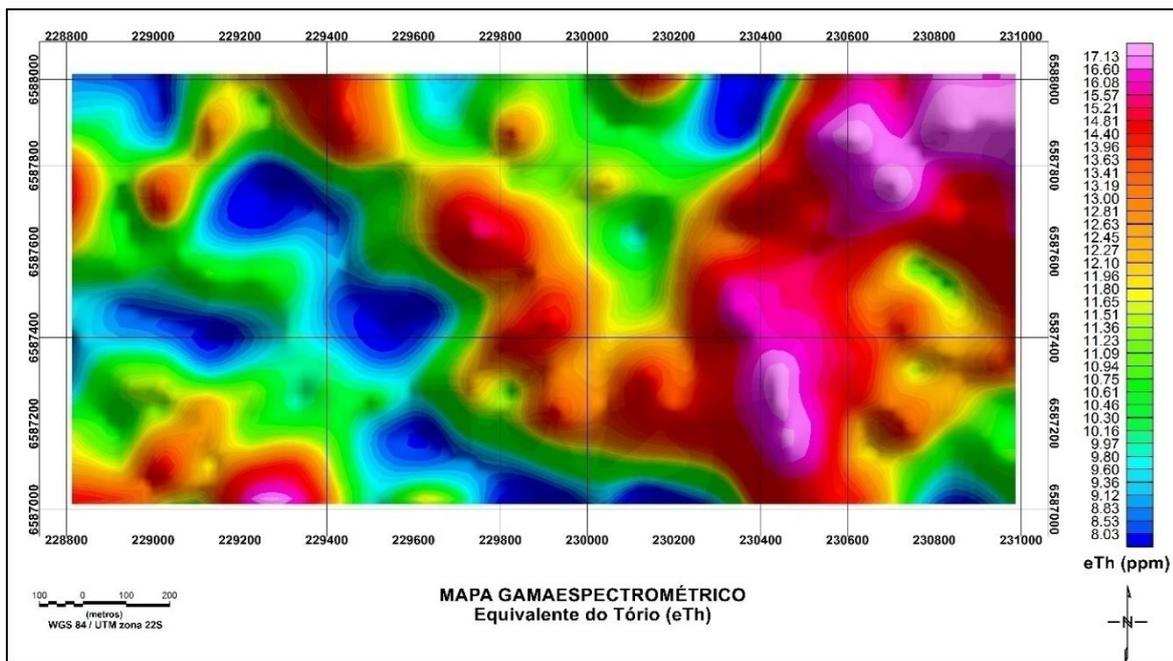
Fonte: autor (2017)

Figura 39 – Mapa gamaespectrométrico do canal do potássio (K) para área da Mina Cerro Rico.



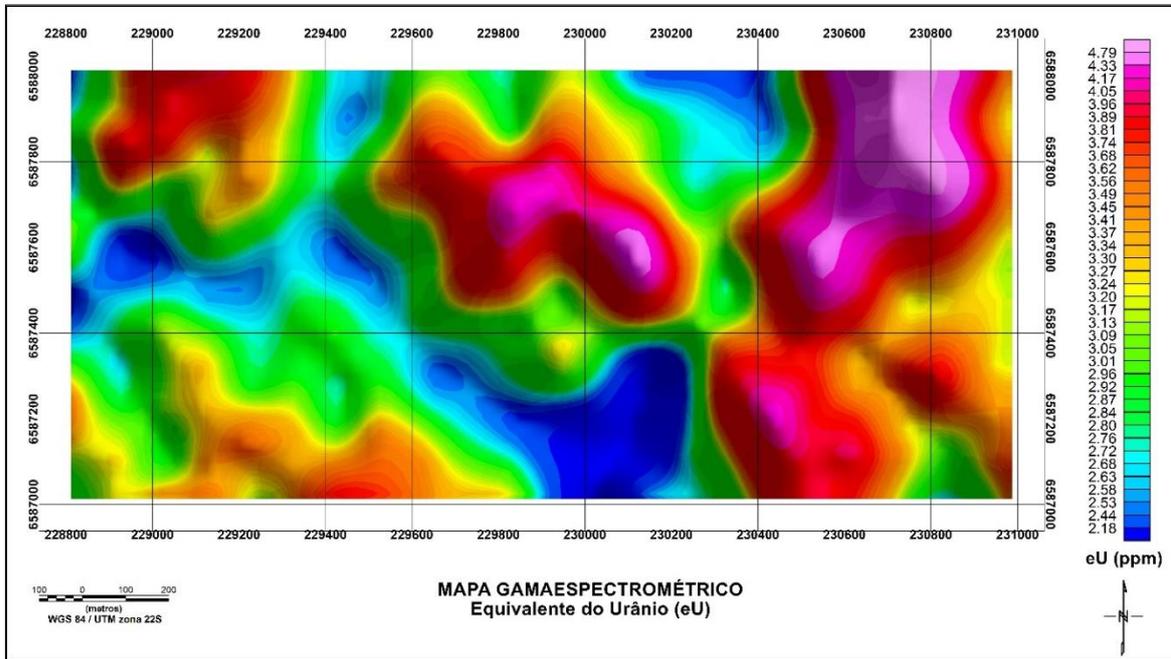
Fonte: autor (2017)

Figura 40 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do tório (eTh) para área da Mina Cerro Rico.



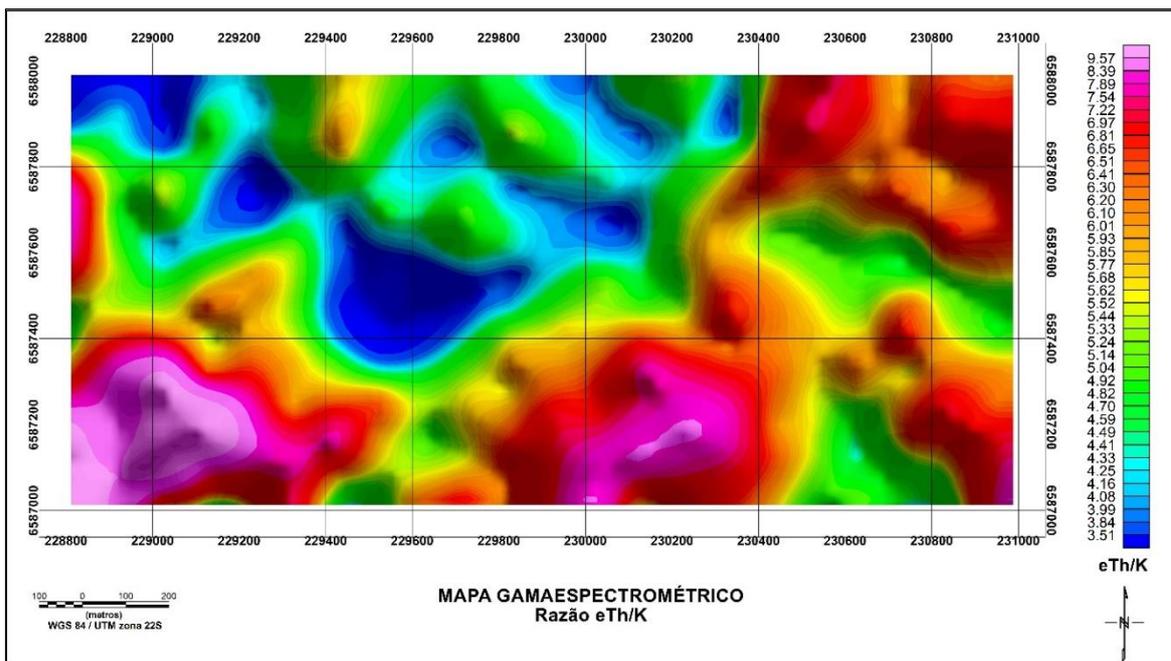
Fonte: autor (2017)

Figura 41 – Mapa gamaespectrométrico do canal do equivalente do urânio (eU) para área da Mina Cerro Rico.



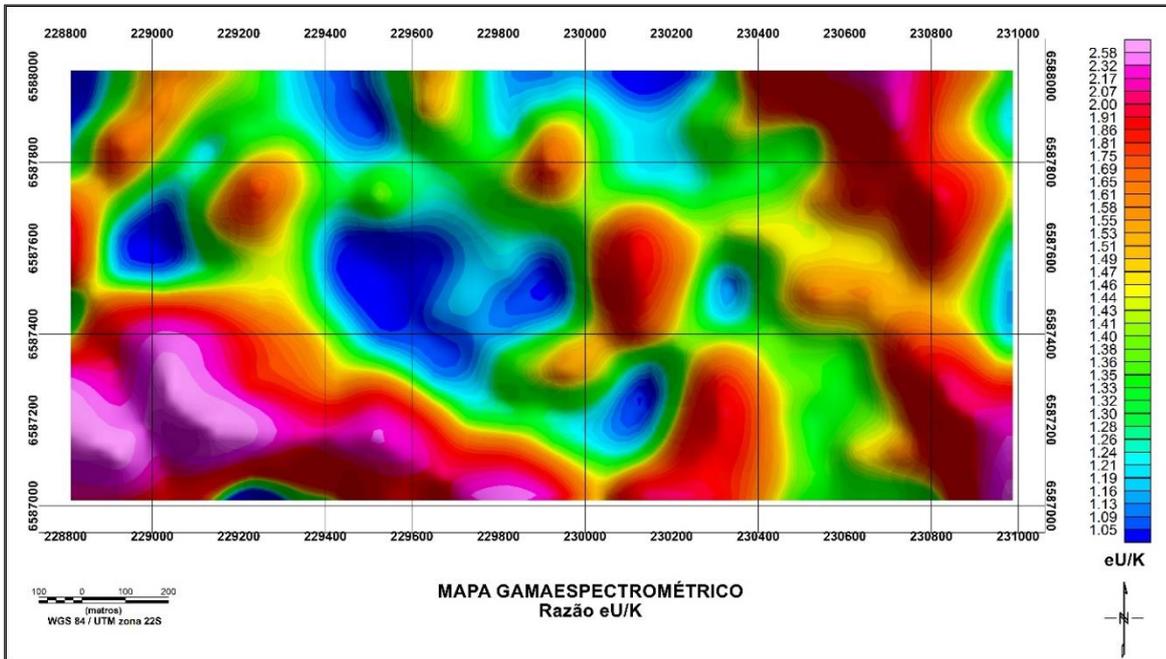
Fonte: autor (2017)

Figura 42 – Mapa gamaespectrométrico da razão eTh/K para a área da Mina Cerro Rico.



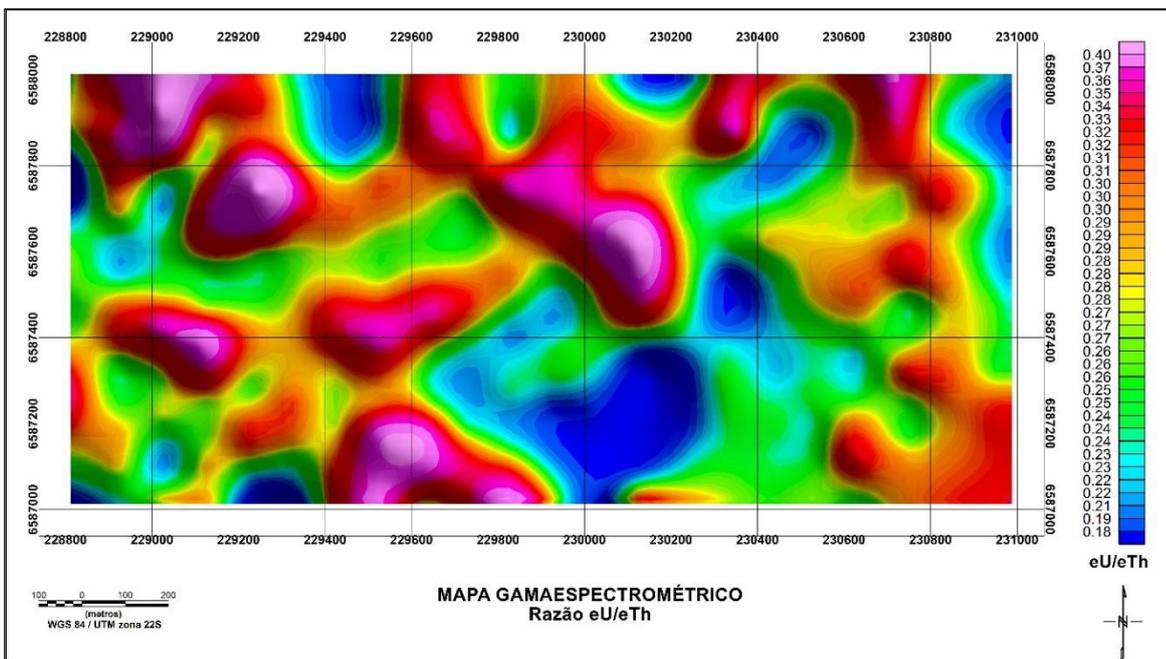
Fonte: autor (2017)

Figura 43 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/K para a área da Mina Cerro Rico.



Fonte: autor (2017)

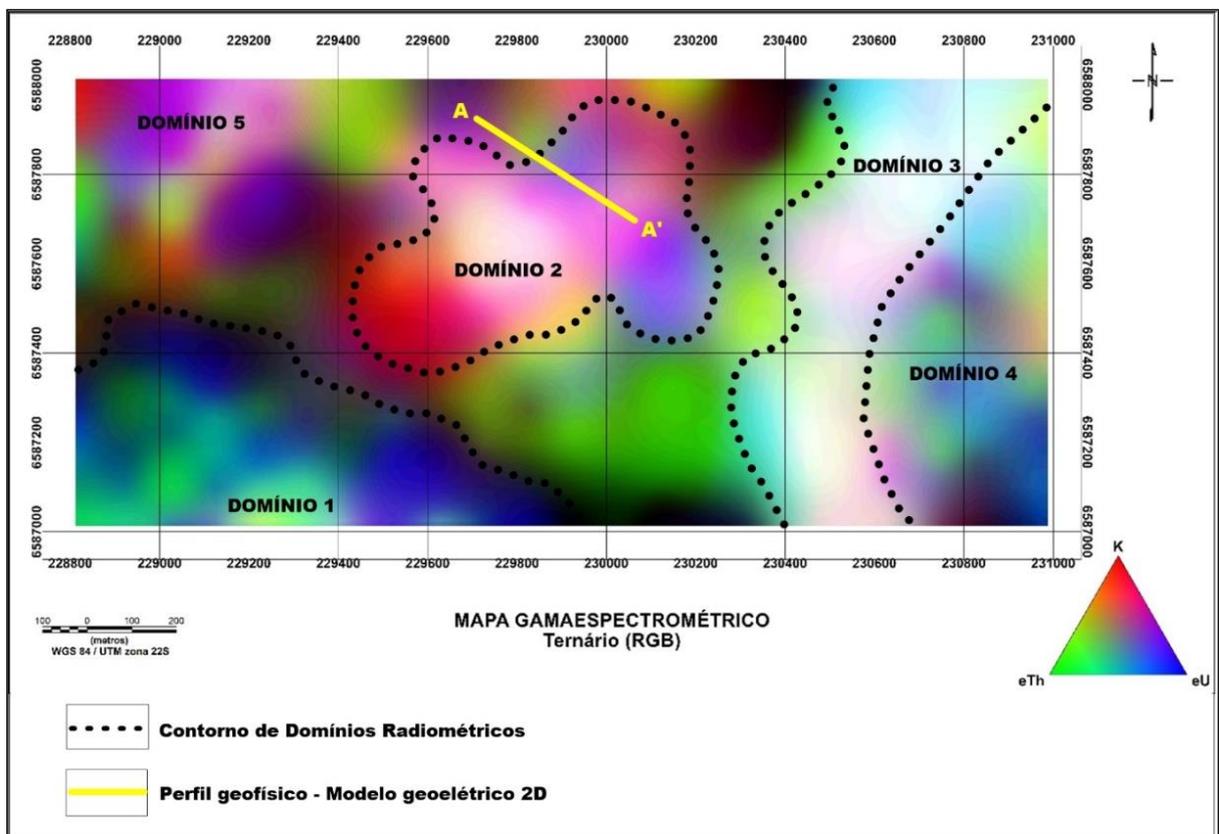
Figura 44 – Mapa gamaespectrométrico da razão eU/eTh para a área da Mina Cerro Rico.



Fonte: autor (2017)

No mapa ternário (figura 45), para a área da Mina Cerro Rico, foi possível identificar a presença de cinco domínios radiométricos, em termos da contribuição relativa de cada radioelemento, e da contribuição conjunta dos três radioelementos.

Figura 45 – Mapa de domínios radiométricos a partir da imagem ternária RGB para a área da Mina Cerro Rico.



Fonte: autor (2017)

O Domínio 1, apresenta baixas concentrações de K, em torno de 1,2 % a 1,8 %, e concentrações intermediárias do eTh na ordem de 8,0 ppm a 11,8 ppm e do eU variando entre 2,8 ppm a 3,3 ppm. Esse domínio se caracteriza pela presença de um relevo topográfico mais acentuado (~347 m - 325 m). Enquanto o domínio 2, apresenta uma contribuição significativa dos radioelementos, onde as concentrações do K e do eU, são mais elevadas, na ordem de 2,4 % a 3,0 % para o K, 3,2 ppm a 4,8 ppm para o eU. As concentrações do eTh apresentam uma maior variação, na ordem de 8,0 ppm a 14,8 ppm. Esse domínio se caracteriza pela presença de um relevo topográfico

com variação de 310 m a 280 m. Ressalta-se que o Domínio 2, coincide espacialmente com a localização dos levantamentos geofísicos terrestres.

O Domínio 3, apresenta uma contribuição significativa dos três radioelementos, de maneira regional na porção leste da área, com concentrações elevadas de K, eTh e eU. As concentrações de K variam na ordem de 2,7 % a 3,0 %, as concentrações de eTh variam de 13,0 ppm a 18,0 ppm e as concentrações de eU variam de 4,0 ppm a 4,8 ppm. Esse domínio está caracterizado por um relevo topográfico com pouca variação (~280 m - 320 m).

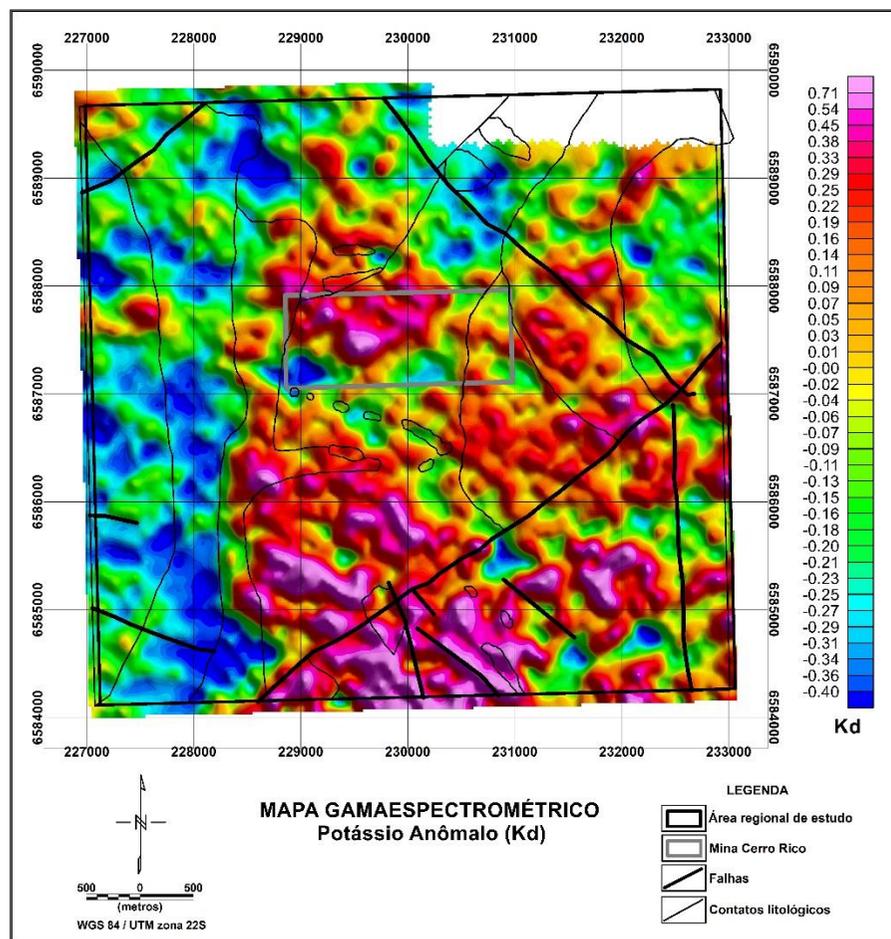
O Domínio 4, caracteriza-se pela menor contribuição dos três radioelementos, com baixas concentrações de K, variam na ordem de 1,6 % a 2,5 %, concentrações intermediárias do eTh, na ordem de 10,2 ppm a 14,0 ppm e concentrações mais elevadas do eU, na ordem de 3,2 ppm a 3,6 ppm. Esse domínio apresenta um relevo topográfico mais acentuado, variando de 310 m a 325 m.

O Domínio 5, é o de maior abrangência regional na área de estudo e maior variação topográfica (~347 m - 285 m). A porção oeste possui concentrações de K que variam na ordem de 1,7 % a 2,6 %, as concentrações do eTh variam de 8,6 ppm a 13,0 ppm e as concentrações do eU variam de 2,0 ppm a 3,3 ppm. A porção central do domínio 5, corresponde ao domínio 2, e a porção sul é caracterizada por concentrações baixas de K e do eU, que variam de 1,7 % a 2,3 % e 2,0 ppm a 3,2 ppm, respectivamente e concentrações do eTh variando de 10,0 ppm a 14,4 ppm.

Os mapas do Kd, Ud e Fator F para a área regional de estudo, estão representados nas figuras 46, 47 e 48, respectivamente. As figuras 49, 50 e 51, mostram os mapas do Kd, Ud e Fator F para a área da Mina Cerro Rico. Na figura 49, observa-se anomalias do Kd, em torno de 0,4, na porção central da área. Comportamento similar é observado para o Ud (figura 50) e para o Fator F (figura 51). Observa-se no mapa gamaespectrométrico do Ud, altos valores, em torno de 0,6, e no mapa gamaespectrométrico do Fator F, identificam-se anomalias com valores na ordem de 0,9. É importante ressaltar o critério interpretativo de que a presença de anomalias do Kd, do Ud e Fator F, podem estar associadas a litologias de áreas com processos de alteração hidrotermal.

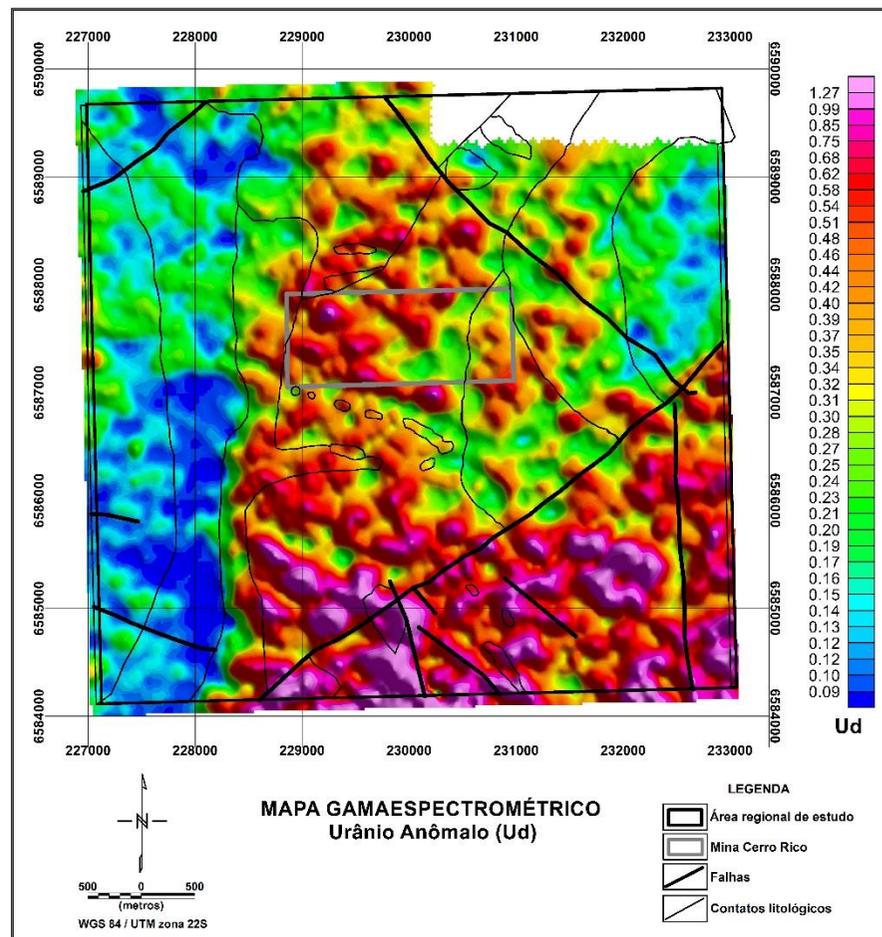
A figura 53, mostra um mapa integrado de contornos anômalos do K, eTh, eU e Fator F, que serviu como subsídio para a localização dos levantamentos geofísicos terrestres.

Figura 46 – Mapa gamaespectrométrico do potássio anômalo (Kd).



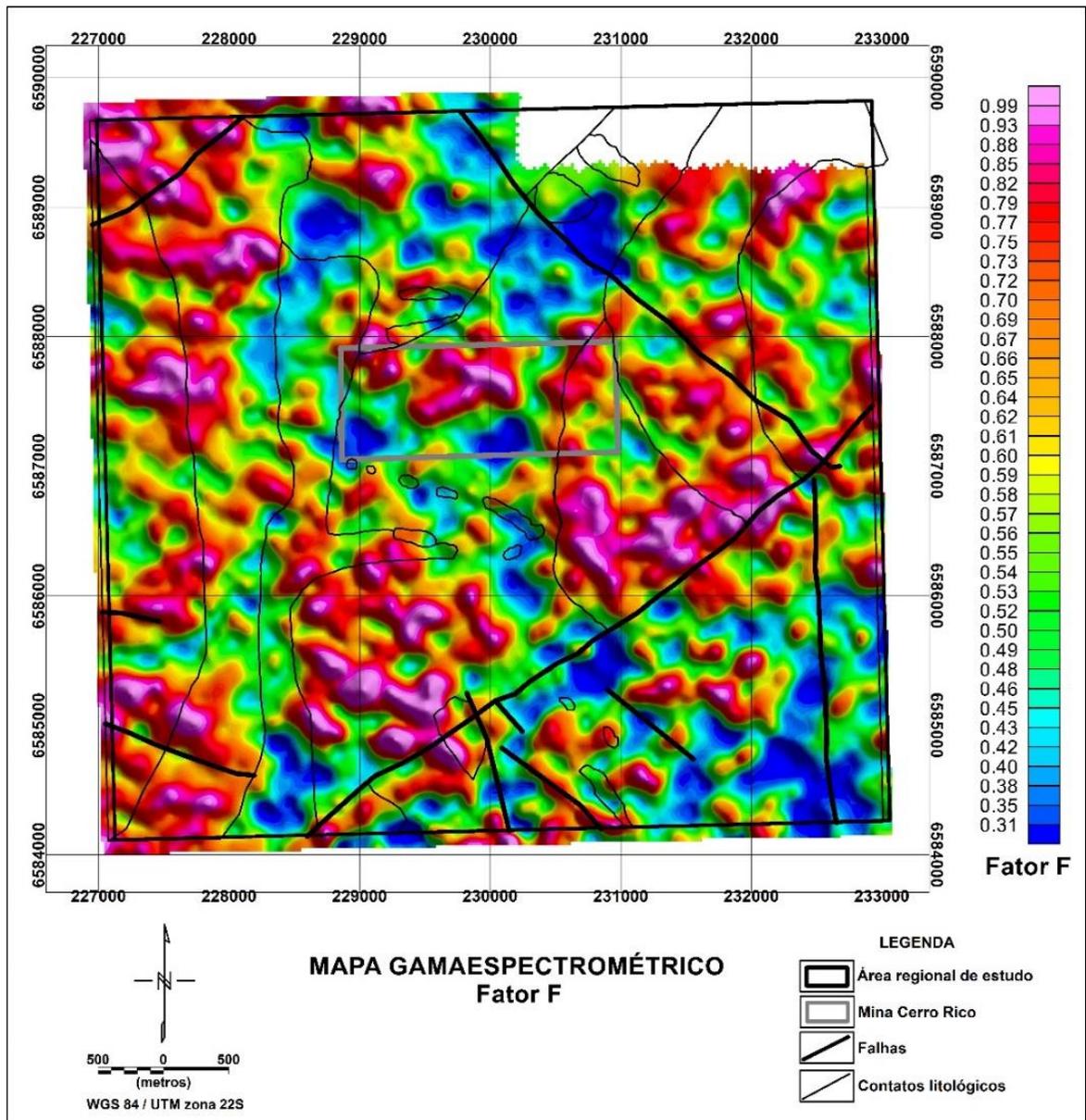
Fonte: autor (2016)

Figura 47 – Mapa gamaespectrométrico do urânio anômalo (Ud).



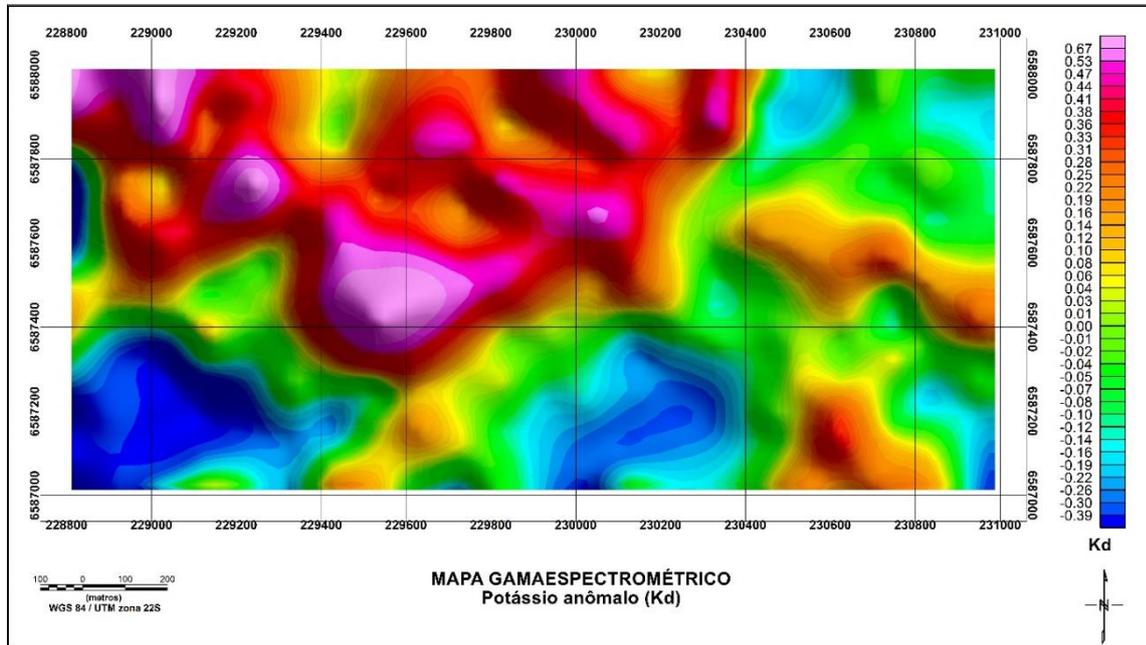
Fonte: autor (2016)

Figura 48 – Mapa gamaespectrométrico do Fator F.



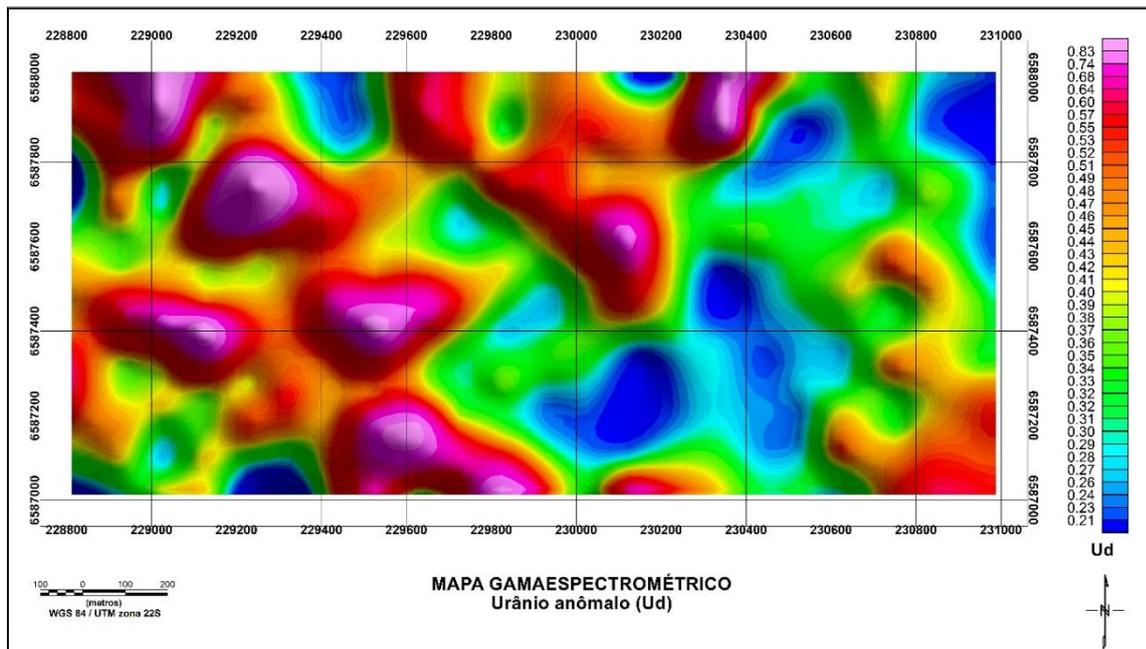
Fonte: autor (2016)

Figura 49 – Mapa gamaespectrométrico do potássio anômalo (Kd) para a área da Mina Cerro Rico.



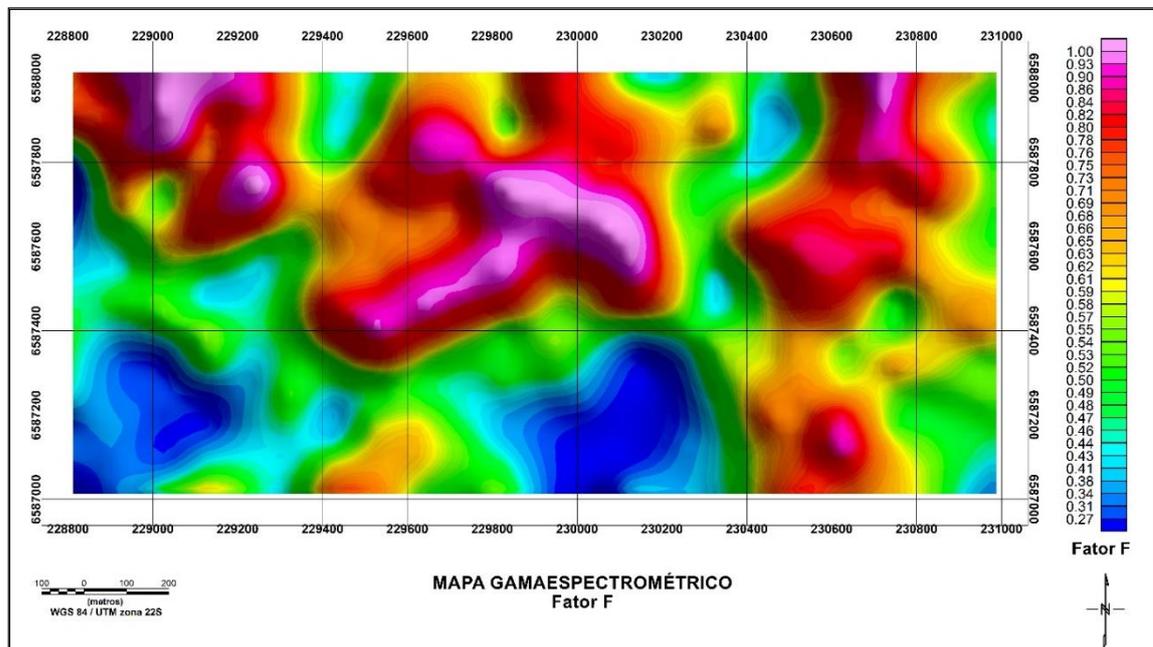
Fonte: autor (2017)

Figura 50 – Mapa gamaespectrométrico do urânio anômalo (Ud) para a área da Mina Cerro Rico.



Fonte: autor (2017)

Figura 51 – Mapa gamaespectrométrico do Fator F para a área da Mina Cerro Rico.

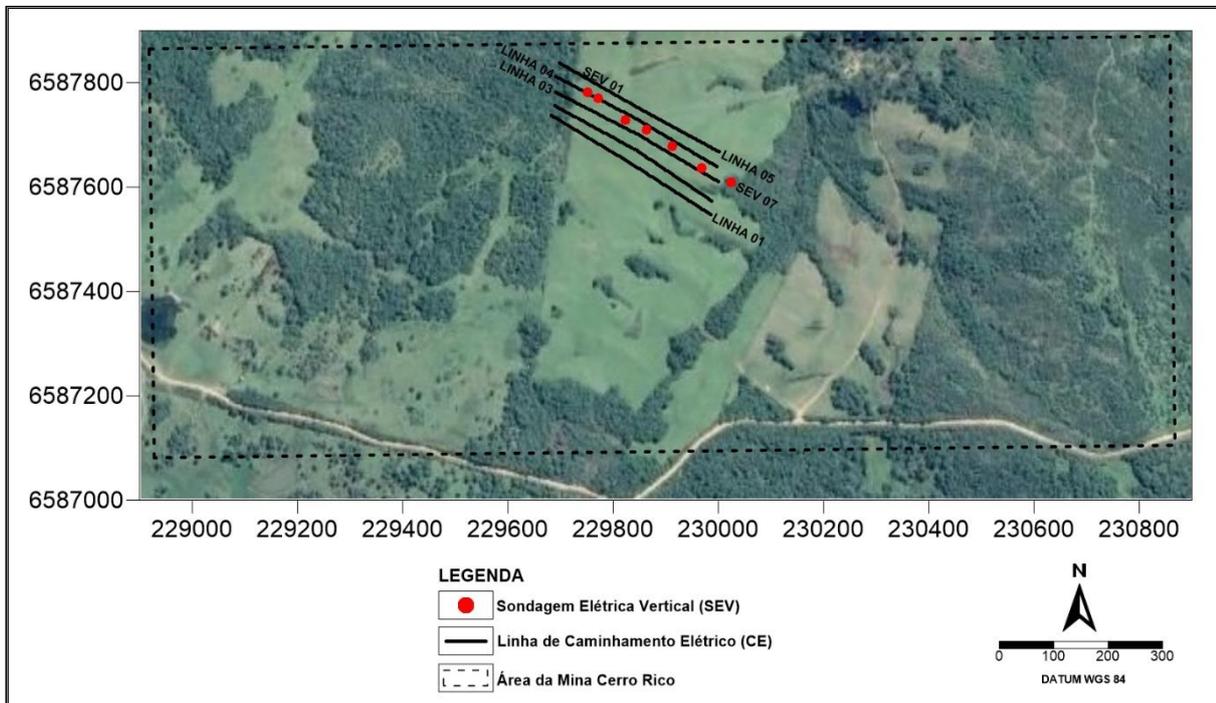


Fonte: autor (2017)

### 8.3 Dados geolétricos

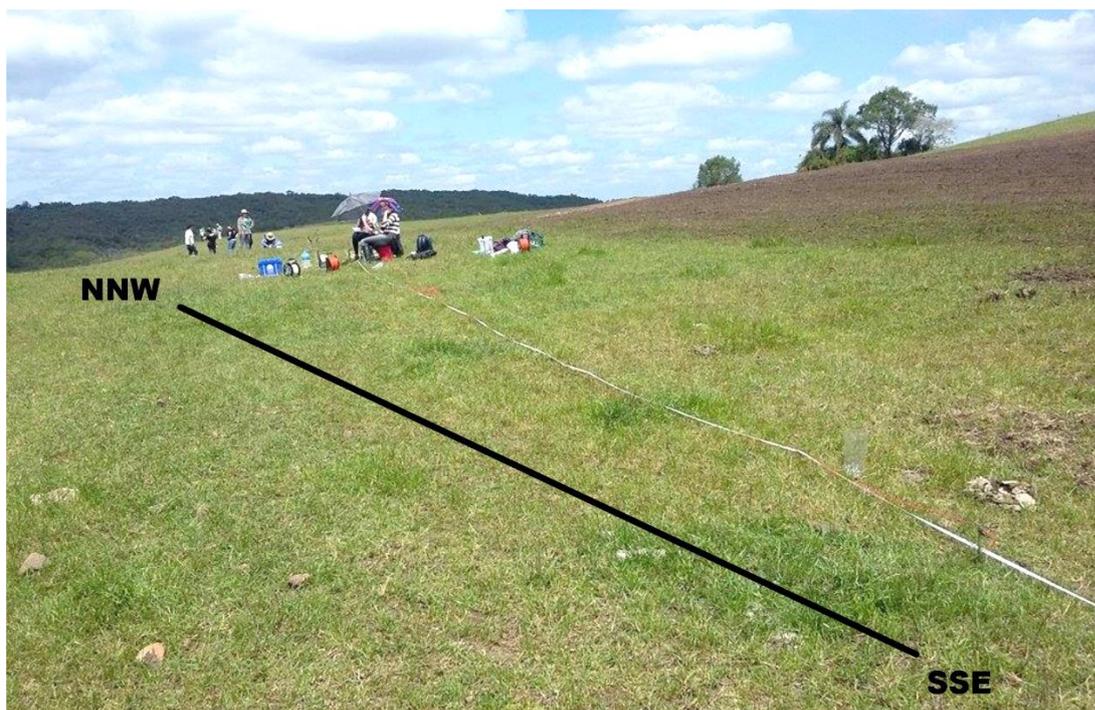
Na aquisição dos dados de eletrorresistividade e dos dados de IP, foi empregada a técnica de SEV, utilizando o arranjo Wenner com o espaçamento máximo  $\overline{C1C2} = 93$  m, por meio do qual foram realizadas medições simultâneas de resistividade elétrica e de cargabilidade elétrica. A técnica de CE foi realizada com arranjo Dipolo-Dipolo, espaçamento entre os eletrodos de 5 m e linhas de 360 m de extensão onde se obteve medições de resistividade elétrica. Foram levantadas sete SEVs posicionadas ao longo de um perfil geofísico disposto perpendicularmente ao eixo preferencial do setor anômalo do mapa da anomalia do Fator F (figura 54) e cinco linhas de CE, conforme uma malha regular, com espaçamento entre as linhas de medição de 25 m (figura 52). Na figura 53 pode-se observar a área do levantamento geofísico terrestre.

Figura 52 – Localização da área de estudo mostrando as linhas de CE e o posicionamento das SEVs.



Fonte: autor (2016), adaptado de *Google Earth Pro*

Figura 53 – Imagem da área do levantamento geofísico terrestre.



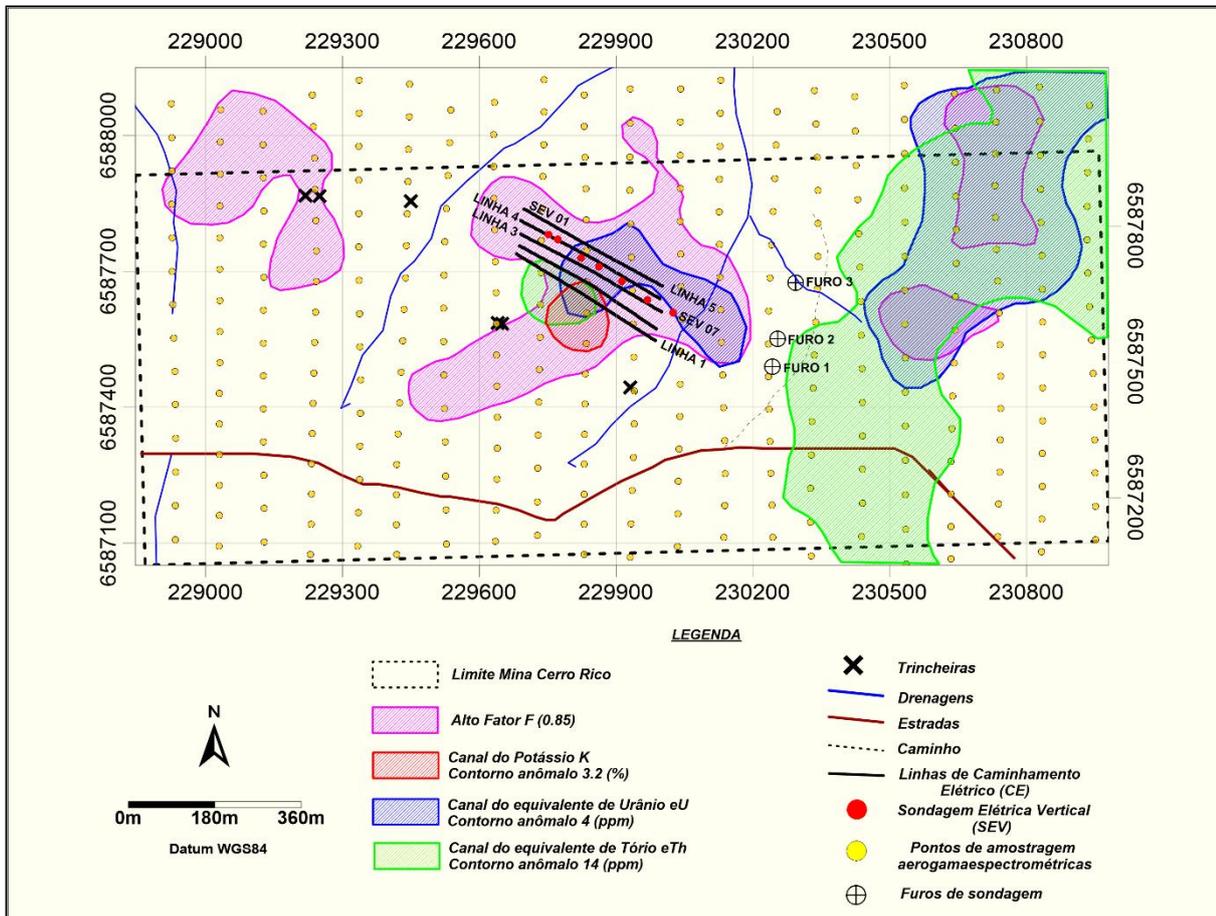
Fonte: autor (2017)

O equipamento utilizado na aquisição dos dados de eletrorresistividade e de IP foi o *Syscal Pro*, fabricado pela *Iris Instruments* – França, o mesmo foi programado com as seguintes configurações: tensão transmitida (400 V – 800 V) e tempo de leitura 4000 ms.

Para calcular a distribuição de resistividade elétrica e de cargabilidade elétrica no subsolo se utilizam programas que se auxiliam de algoritmos de inversão para realizar os cálculos e as estimativas geométricas dos modelos para os dados de resistividade e cargabilidade medidos em campo. No caso da SEV as curvas de resistividade aparente obtidas em campo, em função da distância  $C1C2\sqrt{2}$  se ajustam mediante um algoritmo matemático visando encontrar um modelo de camadas de resistividade e/ou cargabilidade elétrica em função da profundidade (1D), cuja resposta de resistividade aparente seja correlacionável com os dados observados no campo.

Para a inversão dos dados da SEV foi utilizado o programa *IPI2win* versão 3.1.2 desenvolvido pela *Moscow State University*.

Figura 54 – Mapa de isocontornos anômalos (Fator F, K, eTh e eU), mostrando o posicionamento das linhas de medição de CE e das SEVs.

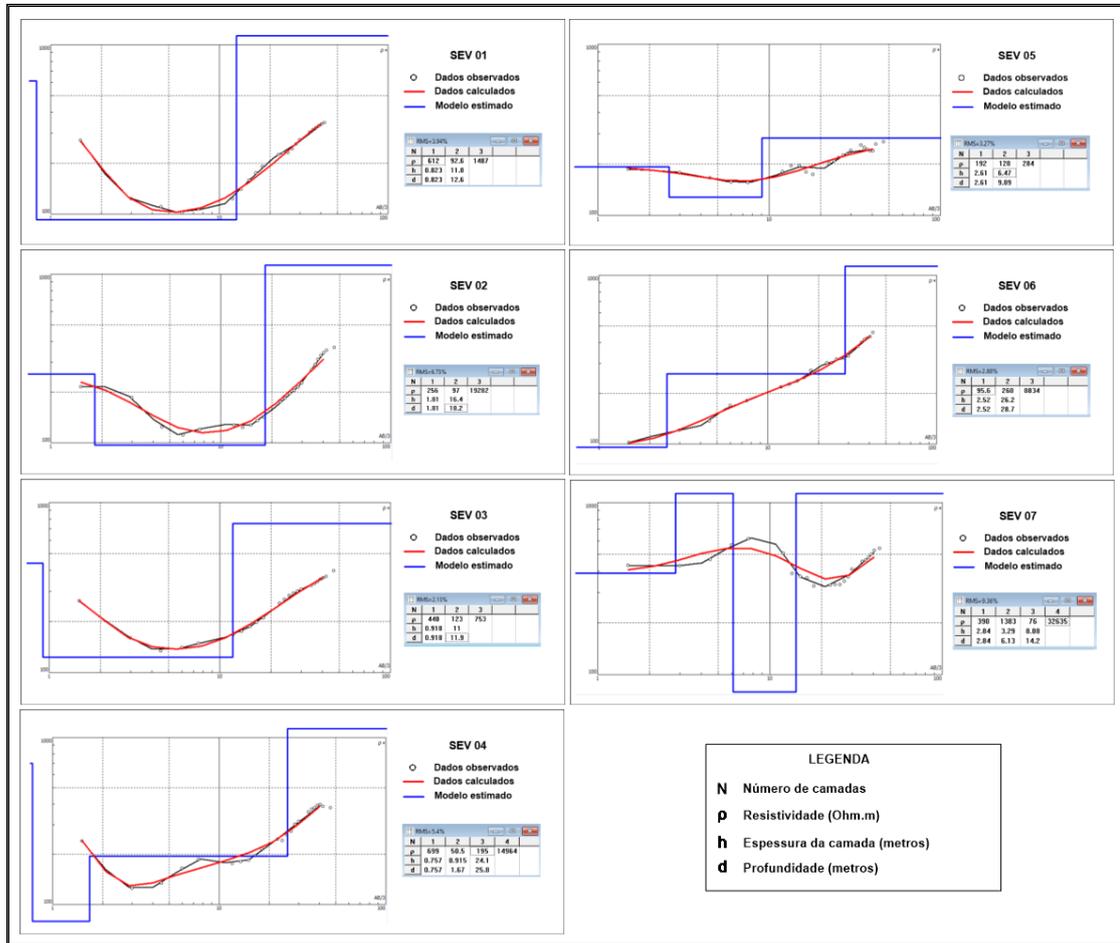


Fonte: autor (2016)

As figuras 55 e 57, mostram os modelos 1D obtidos para os dados de resistividade e de cargabilidade elétrica, correspondentes as SEVs levantadas na área de estudo.

Nas tabelas 4 e 5, são apresentados os resultados dos modelos geoeletricos 1D de resistividade e de cargabilidade, com as suas respectivas interpretações.

Figura 55 – Modelos estimados para as curvas de resistividade aparente, correspondentes as SEVs realizadas na área de estudo.



Fonte: autor (2016)

Tabela 4 – Resistividades e espessuras das camadas conforme os modelos geoeletricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro Rico.

SEV 1			
Camada	Espessura (m)	Resistividade (Ohm.m)	Interpretação
1	0 – 0,823	612,00	Solo seco
2	0,823 – 12,60	92,60	Camada de tufo com espessura significativa (~ 12 m)
3	12,60 – ∞	1487,00	Andesito com alteração
SEV 2			
Camada	Espessura (m)	Resistividade (Ohm.m)	Interpretação
1	0 – 1,81	256,00	Solo seco

2	1,81 – 18,20	97,00	Camada de tufo com espessura significativa (~ 16 m)
3	18,20 – ∞	19282,00	Andesito
<b>SEV 3</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 0,918	440,00	Solo seco
2	0,918 – 11,90	123,00	Camada de tufo com espessura significativa (~ 11 m)
3	11,90 – ∞	753,00	Andesito com alteração
<b>SEV 4</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 0,757	699,00	Solo com presença de argilominerais
2	0,757 – 1,67	50,50	?
3	1,67 – 25,80	195,00	Camada de tufo com espessura significativa (~25 m), possível zona de fratura
4	25,80 – ∞	14964,00	Andesito
<b>SEV 5</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 2,61	192,00	Tufo com possível zona de fratura e acúmulo de óxidos metálicos
2	2,61 – 9,09	128,00	Camada de tufo com espessura significativa (~ 6 m), com possível zona de fratura, presença de água
3	9,09 – ∞	284,00	Tufo com possível zona de fraturas, presença de água
<b>SEV 6</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 2,52	95,60	Solo silto argiloso
2	2,52 – 28,7	260,00	Camada de tufo com espessura significativa (~ 26 m)
3	28,7 – ∞	8834,00	Andesito
<b>SEV 7</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistividade (Ohm.m)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 2,84	390,00	Solo silto argiloso
2	2,84 – 6,13	1383,00	?
3	6,13 – 14,2	76,00	?
4	14,2 – ∞	32635,00	Andesito

Fonte: autor (2017)

Após o processamento das SEVs 01, 02 e 03, verificou-se a presença de três camadas geoeletricas, e as curvas foram classificadas como do tipo H ( $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ),

segundo Orellana (1972). Por apresentarem similaridade no resultado das curvas, foi possível correlacionar estas três SEVs lateralmente. As primeiras camadas, com espessuras que variam de 0,8 a 2 m, aproximadamente, e resistividades de 612, 256 e 440 Ohm.m, correspondem a camadas de solo. As segundas camadas, que apresentaram as espessuras mais significativas, variando de 11 a 16 m e resistividades de 92,6, 97 e 123 Ohm.m, menos resistivas que as primeiras camadas, correspondem aos tufos com alteração. As terceiras camadas, apresentaram altas resistividades com valores de 1487, 19282, com exceção da última camada da SEV 03, que apresentou valor de 753 Ohm.m. Nas SEVs 01 e 02, as últimas camadas foram interpretadas como andesito e na SEV 03, a última camada foi interpretada como andesito com alteração.

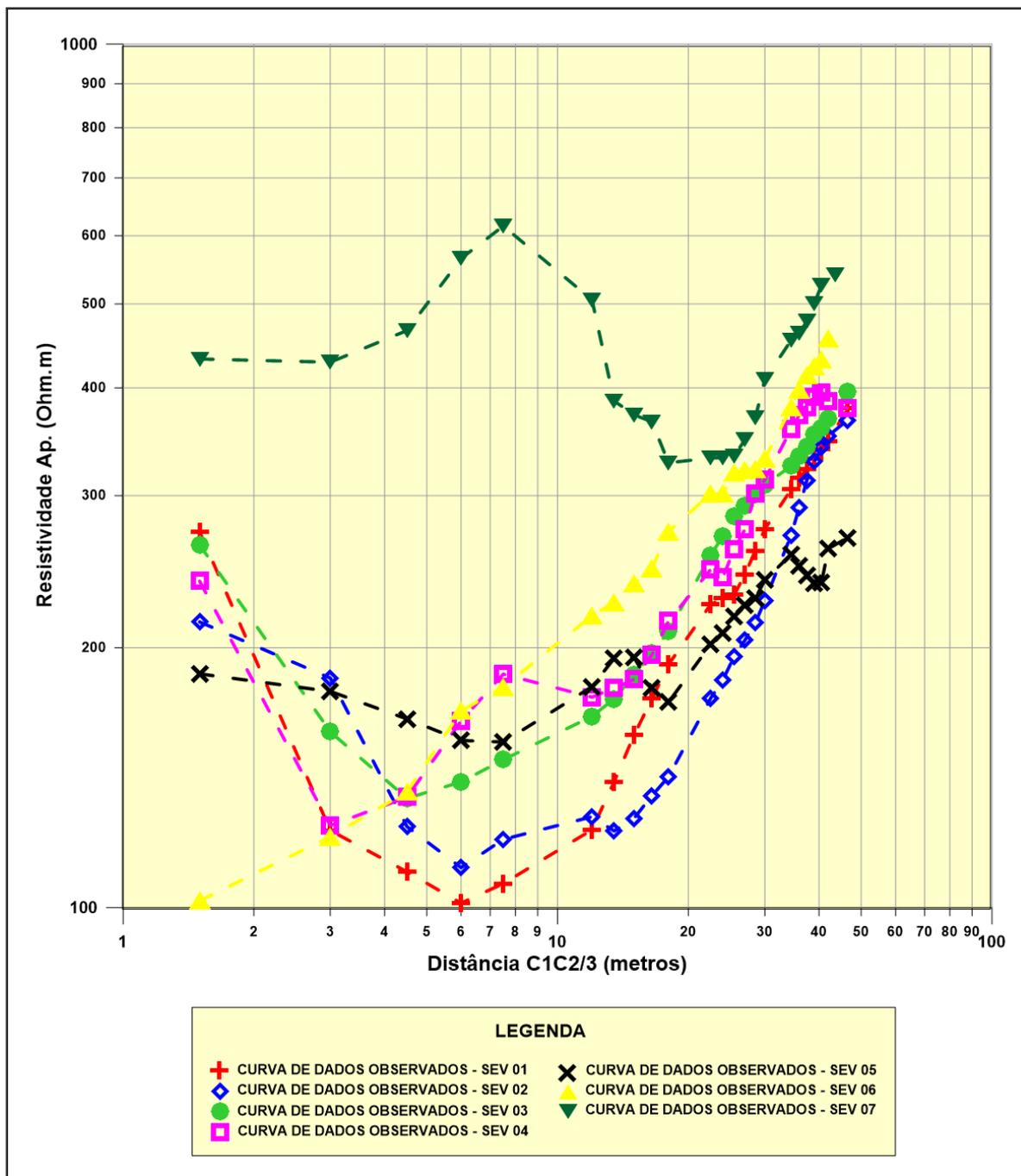
A SEV 04 apresentou quatro camadas geoeletricas, esta curva é classificada como do tipo HA ( $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ ), segundo Orellana (1972). A primeira camada possui uma espessura de 0,757 m e uma resistividade de 699 Ohm.m, indicando a presença de solo com presença de argilominerais. A segunda camada apresentou uma baixa resistividade (50,5 Ohm.m), com espessura de 0,915 m, após análise do modelo para a SEV 04, observou-se que esta camada foi representada no modelo por apenas um ponto observado e a partir desta análise optou-se por correlacionar essa camada com a terceira camada da SEV 04 e a segunda camada das SEVs 01, 02 e 03. A terceira camada, apresentou baixa resistividade (195 Ohm.m), essa camada apresentou a espessura mais significativa (~25 m) e foi interpretada como tufos com possível zona de fratura. A quarta camada é a que possui maior valor de resistividade, 14.965 Ohm.m, correspondendo ao andesito.

Na SEV 05 também se identificou três camadas geoeletricas, a curva desta SEV foi classificada como do tipo H ( $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ), segundo Orellana (1972). As duas primeiras camadas da SEV 05 apresentaram baixas resistividades, 192 e 128 Ohm.m, respectivamente. Após analisar o valor de resistividade da primeira camada em conjunto com o valor de cargabilidade da primeira camada (6,17 mV/V), concluiu-se que corresponde a camada de tufo com possível zona de fratura e acúmulo de óxidos metálicos. A segunda camada, que possui espessura significativa (~ 6 m), corresponde a possível zona de fratura com presença de água. A terceira camada de resistividade 284 Ohm.m, foi interpretada como camada de tufo com possível zona de fraturas e presença de água.

A SEV 06 foi realizada com espaçamento máximo  $\overline{C1C2} = 84$  m. Após seu processamento, verificou-se a presença de três camadas geelétricas. A curva desta SEV foi classificada como do tipo A ( $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ), segundo Orellana (1972), apresentando uma curva com comportamento diferente das curvas das SEVs anteriores. A primeira camada com espessura de 2,52 m e resistividade de 95,6 Ohm.m, foi interpretada como solo silto argiloso. A segunda camada apresentou uma resistividade de 260 Ohm.m e a espessura mais significativa (~ 26 m), esta camada corresponde aos tufos. A terceira camada, com resistividade de 8834 Ohm.m, foi interpretada como andesito.

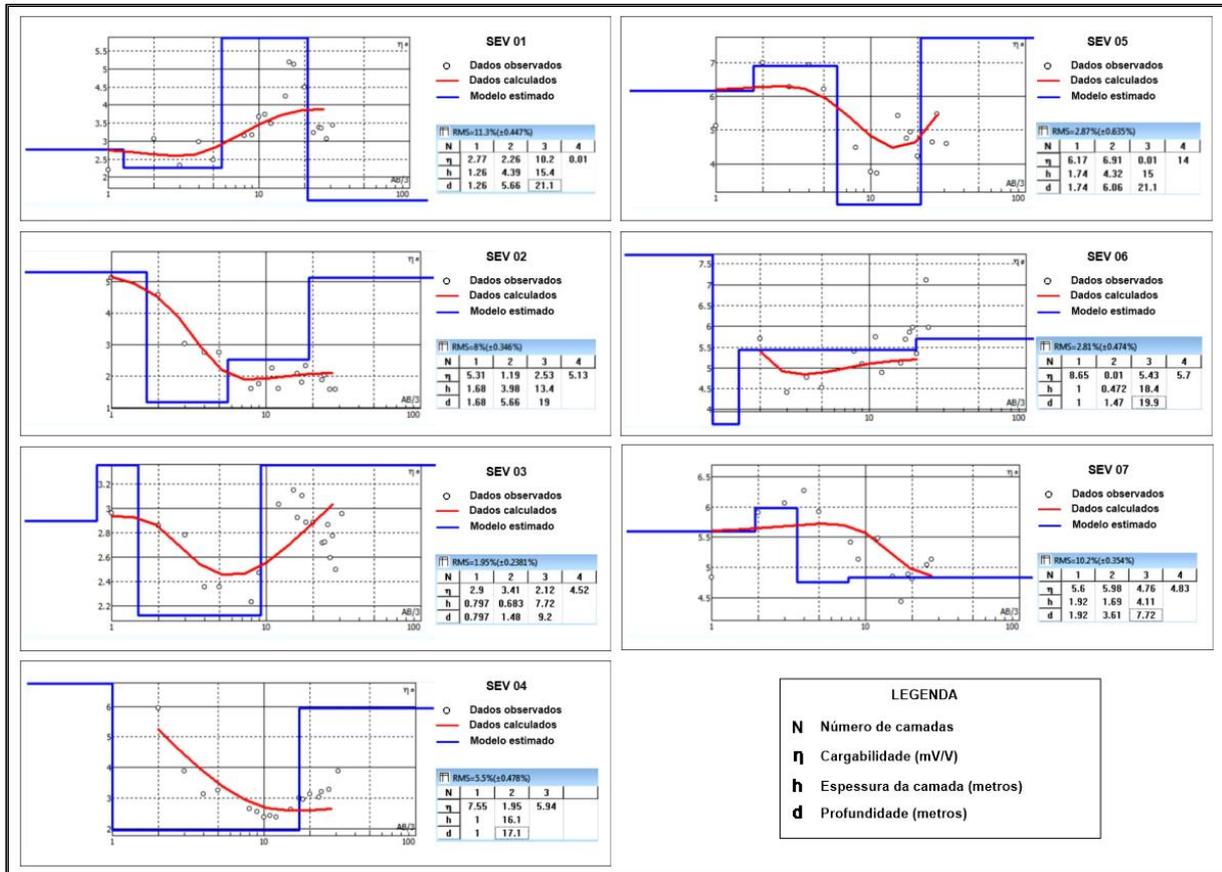
A SEV 07 teve espaçamento máximo  $\overline{C1C2} = 87$  m. Após seu processamento, verificou-se a presença de quatro camadas geelétricas. Conforme pode ser observado na figura 56, o comportamento da curva de dados observados da SEV 07 foi diferente das outras curvas correspondentes as SEVs estudadas, apresentando uma diferença em um patamar superior de resistividades da ordem de 200 Ohm.m, podendo estar associada a presença de uma outra litologia na área de estudo, com características mais resistivas próximo a superfície. A primeira camada de resistividade 390 Ohm.m e espessura de 2,84 m foi interpretada como solo silto argiloso. A segunda e terceira camadas de resistividades 1383 e 76 Ohm.m e espessuras de 3,28 e 8,04 m, por apresentarem valores diferentes das outras camadas, referente as outras SEVs, não foram interpretadas. A quarta camada de resistividade 32635 Ohms.m foi interpretada como andesito.

Figura 56 – Curvas de campo de resistividade aparente oriundas dos dados adquiridos nas SEVs.



Fonte: autor (2016)

Figura 57 – Modelos estimados para as curvas de cargabilidade aparente, correspondentes as SEVs realizadas na área de estudo.



Fonte: autor (2016)

Tabela 5 – Cargabilidades e espessuras das camadas conforme os modelos geoeletricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro Rico.

SEV 1			
Camada	Espessura (m)	Cargabilidade (mV/V)	Interpretação
1	0 – 1,26	2,77	Solo seco
2	1,26 – 5,66	2,26	Tufo
3	5,66 – 21,1	10,20	Camada de tufo com espessura significativa (~ 15 m) com valor anômalo de cargabilidade associado a zona de fratura com provável presença de óxidos metálicos.

<b>SEV 2</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 1,68	5,31	Solo seco
2	1,68 – 5,66	1,19	Solo argiloso úmido
3	5,66 – 19,00	2,53	Camada de tufo com espessura significativa (~ 13 m)
4	19,00 – ∞	5,13	Andesito
<b>SEV 3</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 0,80	2,90	Solo seco
2	0,80 – 1,48	3,41	Solo úmido
3	1,48 – 9,20	2,12	Camada de tufo com espessura significativa (~ 8 m)
4	9,20 – ∞	4,52	Andesito com alteração
<b>SEV 4</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 1,00	7,55	Solo com presença de argilominerais
2	1,00 – 17,10	1,95	Camada de tufo com espessura significativa (~ 16 m), possível zona de fratura
3	17,10 – ∞	5,94	Tufo
<b>SEV 5</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 - 1,74	6,17	Camada de tufo com valor anômalo de cargabilidade, presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos
2	1,74 - 6,06	6,91	Camada de tufo com valor anômalo de cargabilidade, presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos
3	6,06 - 21,10	1,00	Camada de tufo com espessura significativa (~ 15 m), zona de fratura, podendo estar preenchida com material quartzoso
4	21,10 - ∞	14,00	Camada de tufo com valor anômalo de cargabilidade, presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos

<b>SEV 6</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 1	8,65	Solo silto argiloso
2	1,47 – 19,9	5,43	Camada de tufo com espessura significativa (~ 18 m)
3	19,9 – ∞	5,70	Tufo
<b>SEV 7</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>	<b>Interpretação</b>
1	0 – 1,92	5,60	Solo silto argiloso
2	1,92 – 3,61	5,98	Solo silto argiloso
3	3,61 – 7,72	4,76	Camada de tufo com espessura significativa (~ 4 m)
4	7,72 – ∞	4,83	Tufo

Fonte: autor (2017)

As SEVs 01, 02 e 03 apresentaram modelos de quatro camadas para os dados de cargabilidade.

Na SEV 01 os valores de cargabilidade variaram entre 0,01 e 10,2 mV/V. A primeira camada apresentou cargabilidade igual a 2,77 mV/V e espessura de 1,26 m e foi interpretada como solo seco. A segunda camada apresentou cargabilidade igual a 2,26 mV/V, espessura de 4,39 m e foi interpretada como camada de tufo. A terceira camada, apresentou um valor anômalo de cargabilidade de 10,2 mV/V e espessura significativa (~ 15 m), foi associada a zona de fratura com provável presença de óxidos metálicos. E a quarta camada apresentou cargabilidade de 0,01 mV/V e iniciou a 21,1 m de profundidade, após análise do modelo estimado para a SEV 01, observou-se que a quarta camada não representa um valor aproximado ao valor observado e por ser uma camada considerada de espessura infinita, o valor encontrado no modelo estimado foi considerado tendencioso.

No trabalho realizado por Rigoti & Blanco (1985) no CILS, foi considerado como anomalias de IP valores próximos ao patamar de 10,2 mV/V, verificado na terceira camada desta SEV. Essa anomalia foi associada pelos autores, a áreas mineralizadas em ouro em que a pirita seria a responsável pela anomalia.

Na SEV 02 a primeira camada possui cargabilidade igual a 5,31 mV/V e espessura de 1,68 m e foi interpretada como solo seco. A segunda camada tem

cargabilidade igual a 1,19 mV/V, espessura de 3,98 m e foi interpretada como solo argiloso úmido. A terceira camada tem cargabilidade igual a 2,53 mV/V, possuindo a espessura mais significativa (~ 13 m) e foi interpretada como tufo. E a quarta camada com cargabilidade de 5,13 mV/V e início a 19 m de profundidade, foi interpretada como andesito.

Na SEV 03 a primeira camada possui cargabilidade igual a 2,9 mV/V e espessura de aproximadamente 0,8 m e foi interpretada como solo seco. A segunda camada com cargabilidade igual a 3,41 mV/V e espessura de 0,7 m aproximadamente, foi interpretada como solo úmido. A terceira camada tem cargabilidade igual 2,12 mV/V e possui uma a espessura mais significativa (~ 8 m), foi interpretada como tufo. A quarta camada tem cargabilidade igual a 4,52 mV/V e início a 9 m de profundidade, foi interpretada como andesito com alteração.

O modelo de cargabilidade para a SEV 04 apresentou três camadas. A primeira camada possui cargabilidade igual a 7,55 mV/V e espessura de 1 metro e foi interpretada como solo com presença de argilominerais. A segunda camada tem cargabilidade igual a 1,95 mV/V possui a espessura mais significativa (~ 16 m) e foi interpretada como camada de tufo com possível zona de fraturas. A terceira camada tem cargabilidade igual a 5,94 mV/V e se inicia a 17,1 m de profundidade, sendo interpretada como tufo.

As SEVs 05, 06 e 07 também apresentaram modelos de quatro camadas para os dados de cargabilidade.

Na SEV 05 a primeira camada possui cargabilidade igual a 6,17 mV/V e espessura de 1,74 m e foi interpretada como camada de tufo com presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos. A segunda camada apresentou cargabilidade igual a 6,91 mV/V, espessura de 4,32 m e foi interpretada como camada de tufo com presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos. A terceira camada possui cargabilidade igual 1,0 mV/V e uma espessura significativa de (~15 m), sendo interpretada como camada de tufo com zona de fratura, podendo estar preenchida com material quartzoso. A quarta camada com apresentou um valor de cargabilidade de 14 mV/V e iniciou a 19 m de profundidade e foi interpretada como camada de tufo com presença de zona de fratura com acúmulo de óxidos metálicos. A SEV 05 por estar em uma zona de talude topográfico, seguindo o raciocínio de

critério interpretativo de camadas espessas com valores anômalos de cargabilidade ( $> 7\text{mV/V}$ ), coincidindo com valores baixos de resistividade, na ordem de 200 Ohm.m a 300 Ohm.m, corresponde a zonas de fraturas. Segundo Rosales *et al.* 2016, presença de zonas de fraturas em afloramentos ou próximas a superfície em contextos geológicos de corpos intrusivos, podem estar caracterizadas pela presença de percolação de água.

A primeira camada da SEV 06 possui cargabilidade igual a 8,65 mV/V e espessura de 1 m e foi interpretada como solo silto argiloso. A segunda camada tem cargabilidade igual a 0,01 mV/V, espessura de 0,43 m e termina a 1,47 m de profundidade, esta camada também pode ser considerada tendenciosa, pois o valor do modelo estimado difere muito dos valores encontrados nas outras camadas e o valor estimado não está representado por nenhum ponto observado. A terceira camada tem cargabilidade igual 5,43 mV/V e possui uma espessura significativa de (~18 m), sendo interpretada como camada de tufo. A quarta camada possui cargabilidade de 5,7 mV/V e inicia a 19,9 m de profundidade e também foi interpretada como tufo.

Na SEV 07 a variação de cargabilidade foi de 4,76 a 5,98 mV/V. A primeira camada com cargabilidade igual a 5,6 mV/V e espessura de 1,92 m foi interpretada como solo silto argiloso. A segunda camada possui cargabilidade igual a 5,98 mV/V, espessura de 1,69 m e também corresponde ao solo silto argiloso. A terceira camada tem cargabilidade igual 4,76 mV/V e possui a espessura mais significativa (~4 m) e foi interpretada como camada de tufo. A quarta camada com cargabilidade de 4,83 mV/V e início a 7,72 m de profundidade também corresponde a camada de tufo.

Na aquisição dos dados de resistividade com a técnica de CE foram realizadas 5 linhas de medição, com espaçamento de aproximadamente 25 m entre elas, dispostas em superfície segundo a direção NW-SE, conforme ilustrado na figura 52. O equipamento utilizado na aquisição dos dados de CE foi o *Syscal Pro*, (*Iris Instruments* – França), programado com as seguintes configurações: 600 V de tensão e tempo de leitura de 1000 ms. O processamento e a inversão dos dados foram realizados com o programa *RES2DINV* (*Geotomo Software*, 2010), onde se obteve modelos 2D, em termos de distância *versus* profundidade (figuras 58, 59, 60, 61 e 62).

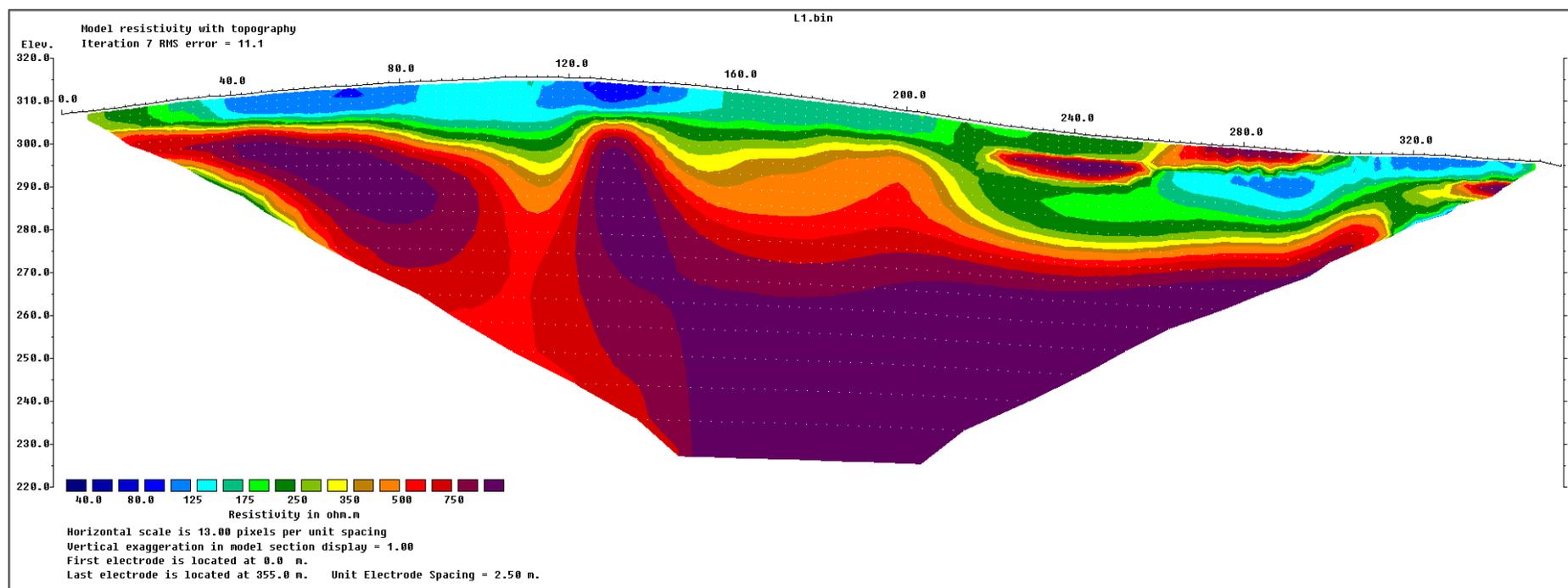
Ressalta-se, nos modelos geoeletricos 2D, correspondentes as linhas 03, 04 e 05 de CE (figuras 60, 61 e 62), a presença de um forte gradiente de resistividade com

um caráter regional e irregular ao longo das linhas, apresentando valores maiores que  $10^4$  Ohm.m, localizado a uma profundidade aproximada de 20 m a 30 m, associado com o comportamento do relevo do embasamento andesítico.

Próximo a superfície do terreno, na porção central das linhas 03, 04 e 05, em um intervalo de profundidade de aproximadamente 5 m a 15 m, destaca-se a presença de contrastes laterais de resistividades, correlacionados com algumas assinaturas que podem estar associadas a diferentes pacotes de solo com acúmulo de matérias, com diferentes variações de resistividade, em um setor da área que sugere a presença de fraturas e/ou falhas, acompanhando o comportamento de um relevo topográfico mais suave.

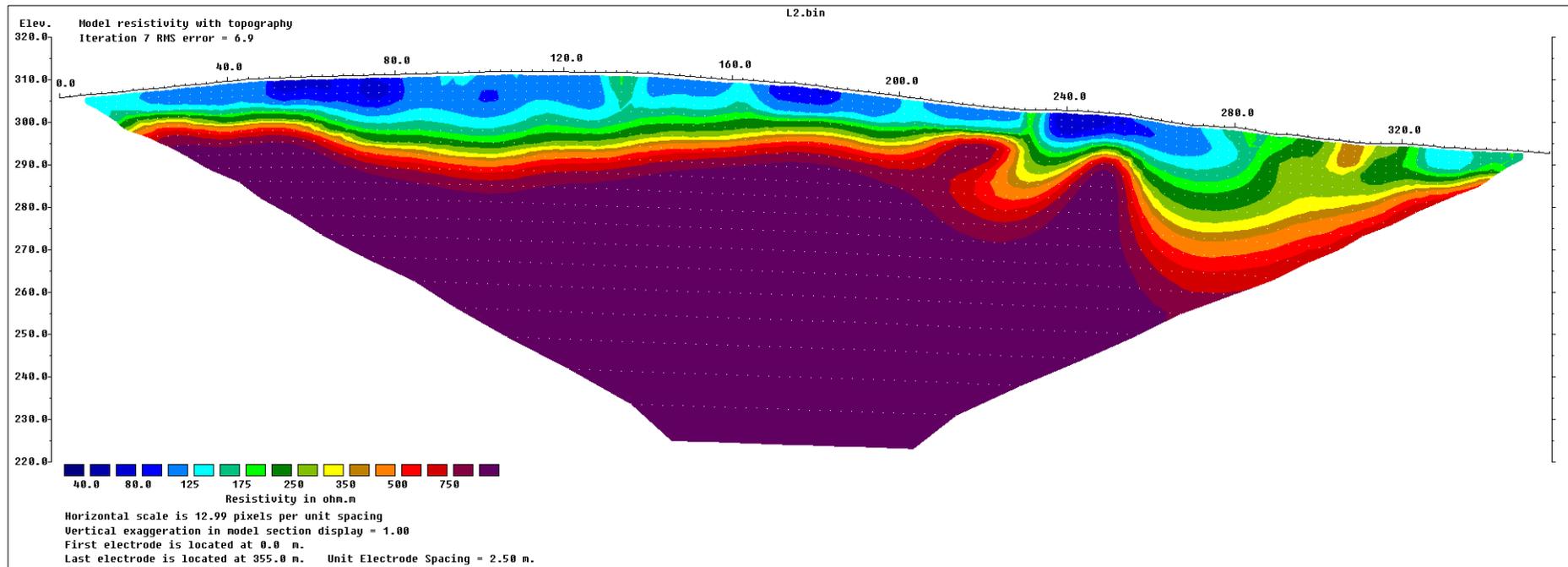
A figura 63 mostra um modelo 3D, com os dados de resistividade, obtidos a partir dos modelos 2D correspondentes as linhas de medição de CE.

Figura 58 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 01.



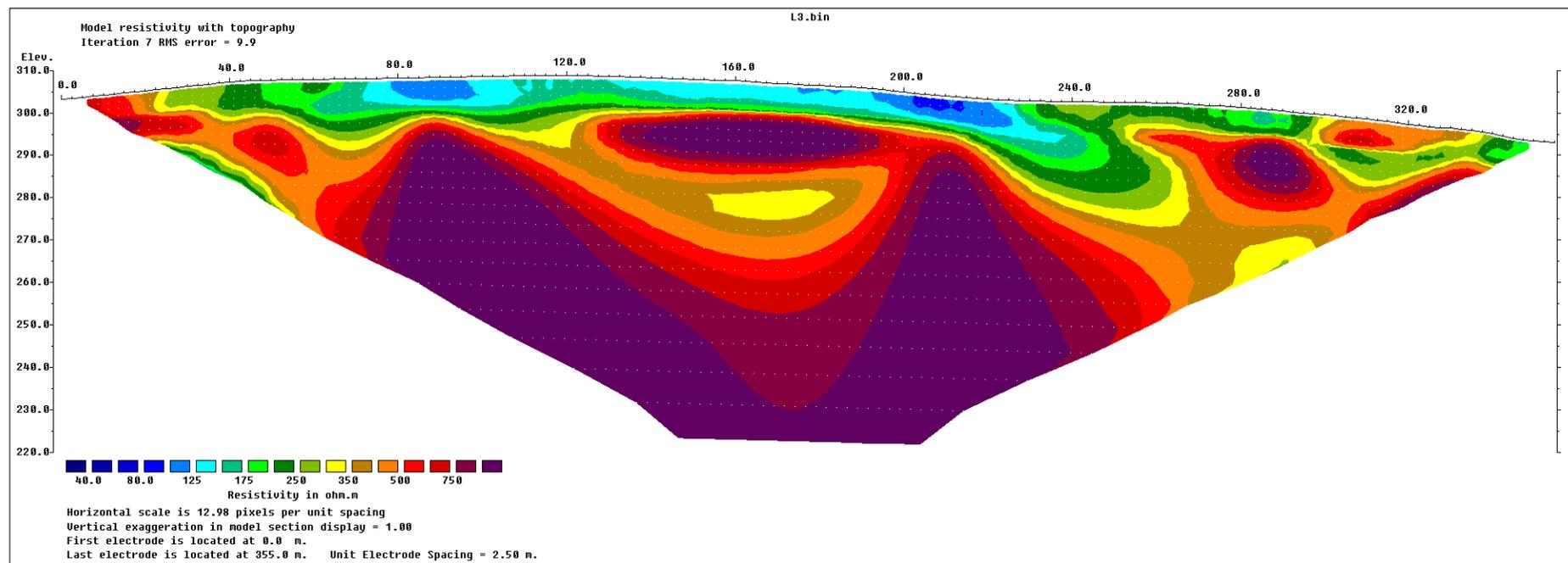
Fonte: autor (2016)

Figura 59 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 02.



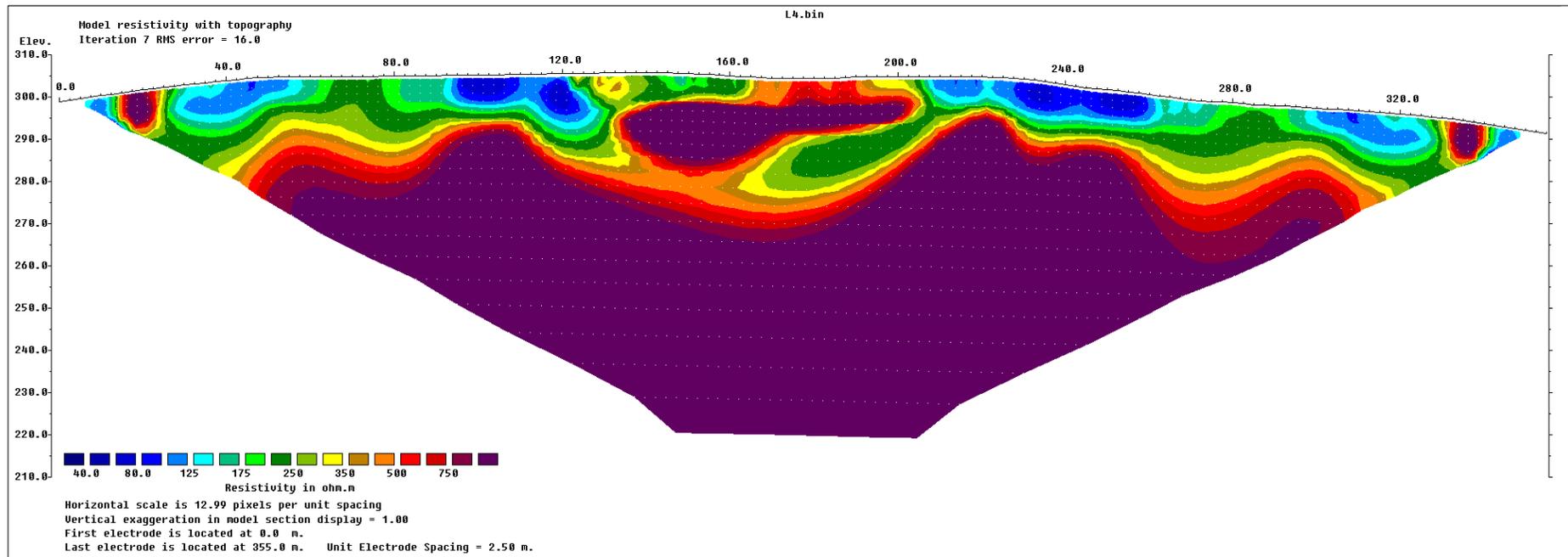
Fonte: autor (2016)

Figura 60 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 03.



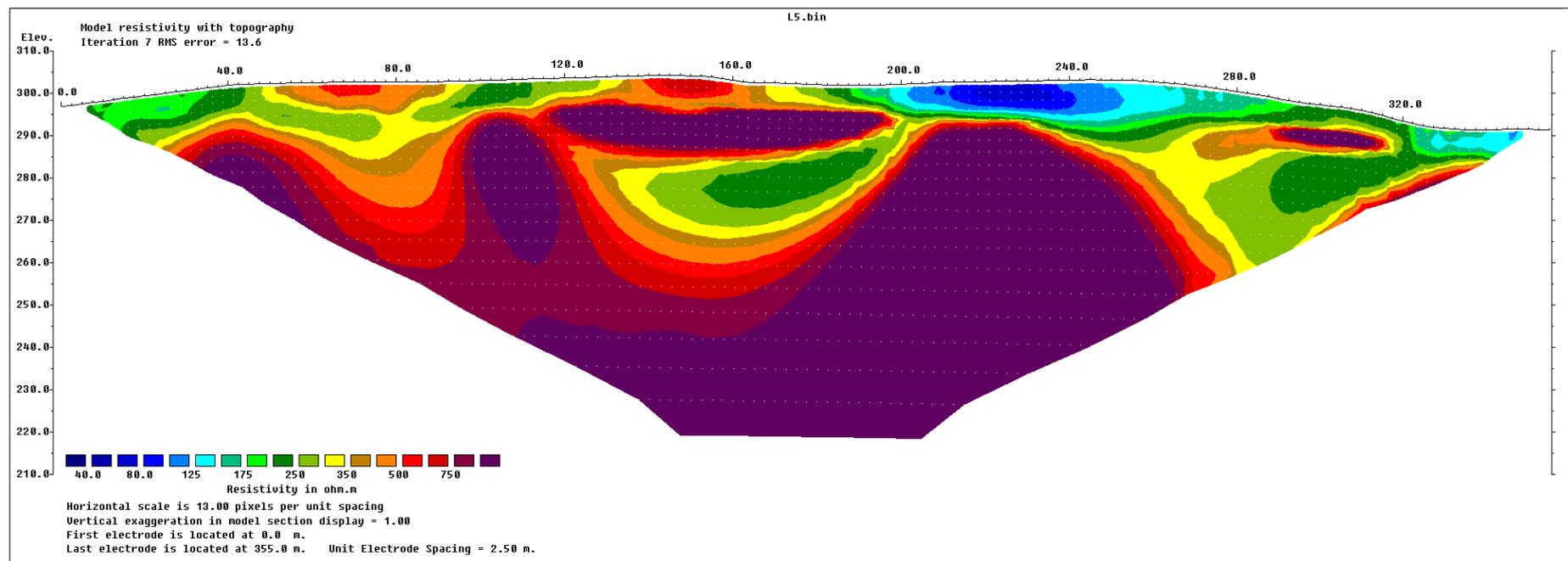
Fonte: autor (2016)

Figura 61 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 04.



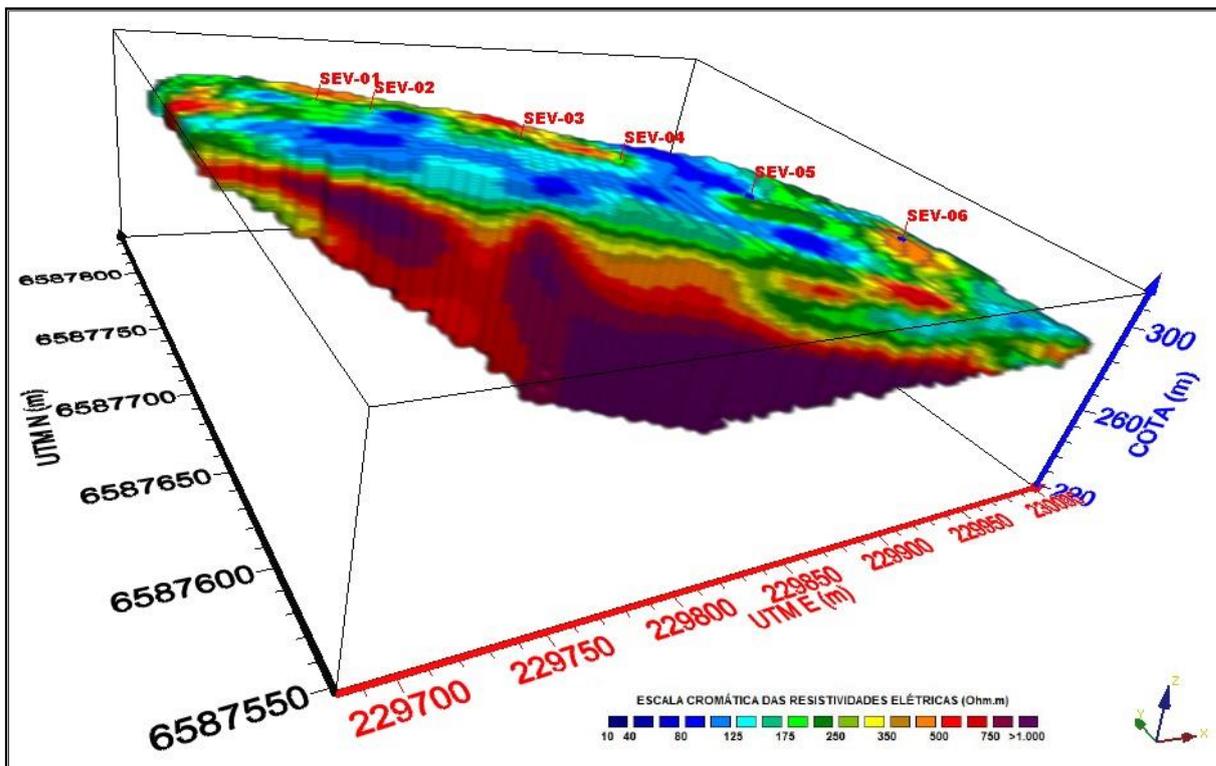
Fonte: autor (2016)

Figura 62 – Modelo 2D de resistividade elétrica para a linha 05.



Fonte: autor (2016)

Figura 63 – Modelo 3D de resistividade elétrica para a área de estudo.

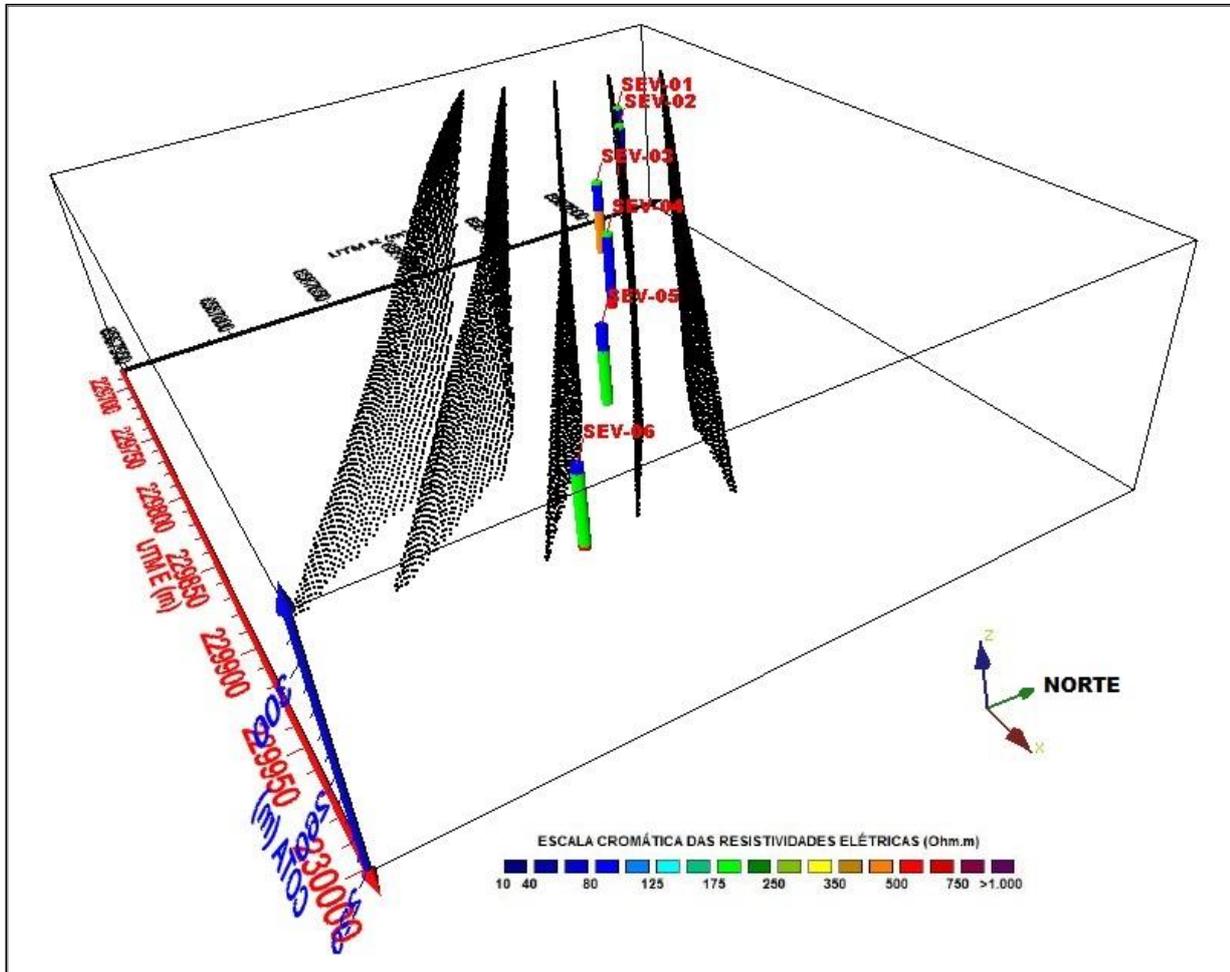


Fonte: autor (2017)

Conforme pode ser observado na figura 64, os posicionamentos das SEVs na área de estudo estão localizados na direção NW-SE entre as linhas 03 e 04 do CE.

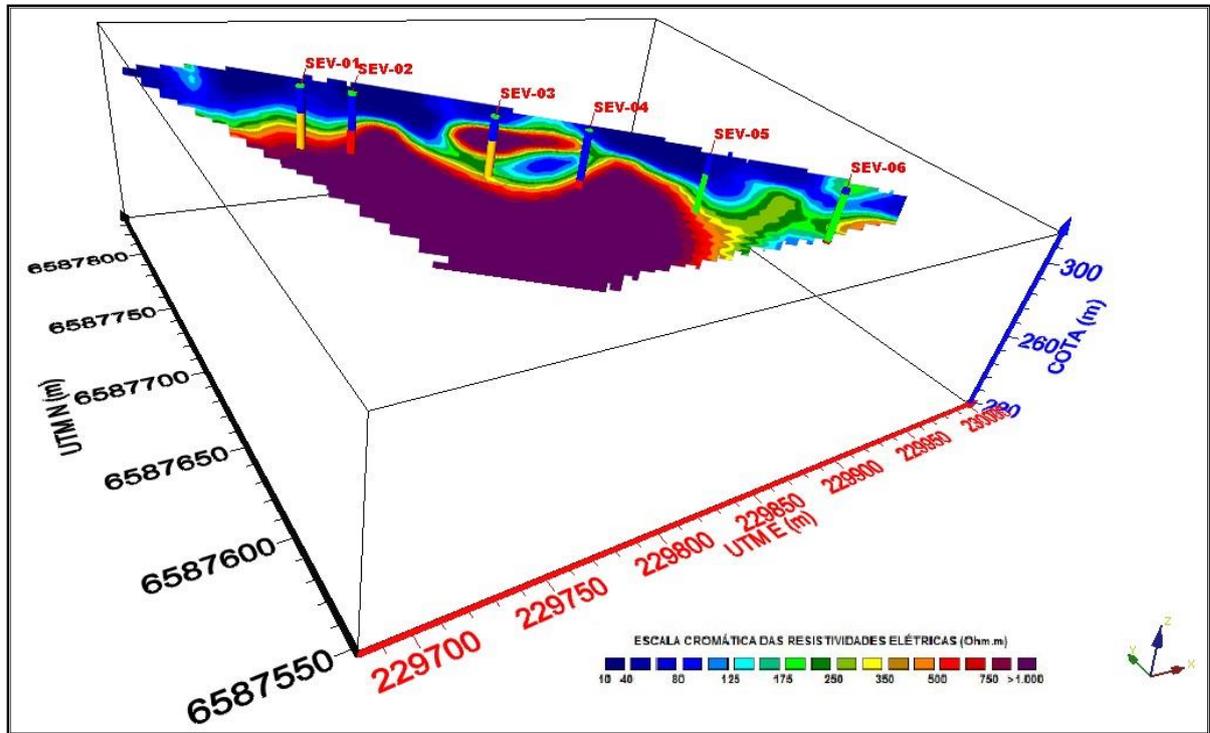
A figura 65 mostra um modelo 2D de resistividade, integrado com o posicionamento das colunas geoeletricas obtidas a partir do processamento dos dados de resistividade oriundos das SEVs.

Figura 64 – Esquema ilustrativo da localização das linhas de CE em conjunto com o posicionamento das SEVs na área de estudo.



Fonte: autor (2017)

Figura 65 – Modelo 2D de resistividade integrado com as colunas geoeletricas das SEVs.



Fonte: autor (2017)

## 9 INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A figura 66 ilustra uma proposta de modelo geoeletrico 2D que mostra de maneira integrada ao longo de um perfil geofisico, segundo a direcao NW-SE (Perfil A-A', figura 45), o comportamento das anomalias do Fator F, do potassio anômalo (Kd), do urânio anômalo (Ud), da razao K/Th e das resistividades elétricas, obtidas a partir da interpretaçao das colunas geoeletricas correspondentes as SEVs.

A informaçaõ geológica oriunda da descriçao das colunas litoestratigráficas dos furos de sondagem presentes na área de estudo (figuras 14, 15 e 16), serviu de subsídio para a interpretaçao das seções geoeletricas e a posterior confecção do modelo geoeletrico 2D proposto.

De maneira geral, ao longo da linha NW-SE, ressalta-se três patamares diferenciados no comportamento das anomalias do Fator F, do Kd, do Ud e da razao K/Th. Na porção NW, a qual se corresponde espacialmente com o posicionamento

das SEVs 01 e 02, observa-se um patamar mais baixo no comportamento das anomalias citadas anteriormente, isto é: a) intervalo de valores para o Fator F de 0,88 a 0,96; (b) intervalo de valores para o Kd de 0,36 a 0,4; c) intervalo de valores para o Ud de 0,44 a 0,48; d) intervalo de valores para razão K/Th de 0,23 a 0,24. Este comportamento de baixos valores do Kd e do Ud, em conjunto com baixos valores de Fator F e da razão K/Th, coincidindo com a presença de um alto topográfico, que sugere um aumento na concentração do eTh, podendo estar associado a presença de argilominerais e hidróxidos de ferro, resultado da presença do relevo do embasamento andesítico mais próximo à superfície.

Na porção central, a qual corresponde espacialmente com o posicionamento das SEVs 03, 04 e 05, observa-se um patamar mais alto no comportamento das anomalias, isto é: a) intervalo de valores para o Fator F de 1,0 a 1,04; b) intervalo de valores para o Kd de 0,44 a 0,46; c) intervalo de valores para o Ud de 0,52 a 0,54; d) valor para razão K/Th na ordem de 0,25. Este patamar caracterizado pela presença de altos valores de Fator F, do Kd, do Ud e da razão K/Th, o que sugere um enriquecimento de potássio e urânio nesta porção da área, podendo estar associado a provável presença de processos hidrotermais (OSTROVSKIY, 1973). Ambiente que pode ter sido favorecido pela presença de fraturas e/ou falhas inferidas por geofísica nessa porção da área.

A porção SE, corresponde espacialmente com o posicionamento das SEVs 06 e 07. Observa-se um patamar intermediário no comportamento da anomalia de Fator F e valores mais altos do Kd, do Ud e da razão K/Th, isto é: a) valor para o Fator F na ordem de 1,0; b) valor para o Kd na ordem de 0,48; c) valor para o Ud na ordem de 0,58; d) valor para razão K/Th na ordem de 0,25.

O enriquecimento dos teores do Kd e do Ud na porção SE das linhas, se encontram diretamente associados a processos de sericitização, cloritização e potassificação, que acompanham o hidrotermalismo na gênese dos depósitos metálicos, estes processos podem estar sendo favorecidos pela presença de zonas de fraturas e/ou falhas, inferidas pela geofísica nesta porção.

A tendência decrescente da razão K/Th e por consequência um aumento da concentração do tório, coincidindo espacialmente com o posicionamento da SEV 07, pode estar associada a uma acúmulo de argilominerais e de hidróxidos de ferro, em uma área caracterizada por um baixo do relevo topográfico (~290 m), e onde foi

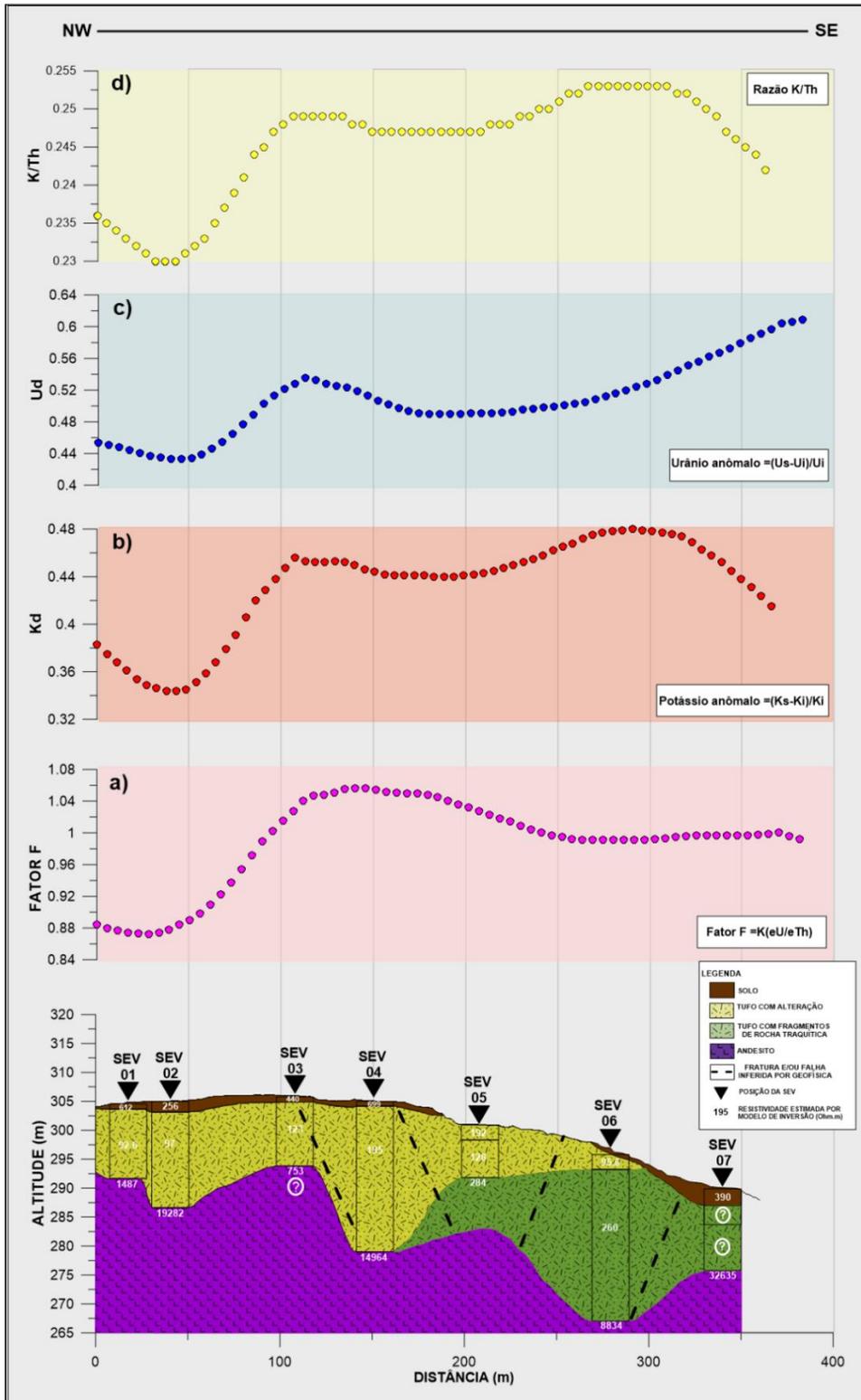
notado a presença de um alto do relevo do embasamento andesítico, critério interpretativo sustentado por informações geológicas oriundas da coluna litológica do furo de sondagem 1 (figura 14). A figura 67 mostra as seções geoeletricas de cargabilidade e de resistividade. Enquanto na SEV 05, observa-se valores anômalos de cargabilidade, considerando um *background* inferior a 5 mV/V para a área de estudo, as anomalias IP aparecem com valores maiores que 10 mV/V, podendo sugerir a presença de zonas de falhas e/ou fraturas com probabilidade da ocorrência de óxidos metálicos disseminados.

Na seção geoeletrica de maneira geral, observa-se irregularidades no relevo que caracteriza o topo andesítico, sugerindo que este pode estar sendo afetado por zonas de fraturas e/ou falhas que apresentam continuidade em profundidade. Na SEV 03, onde o topo aparece aproximadamente a 10 m de profundidade, apresentando valores de resistividade na ordem de 753 Ohm.m e de cargabilidade que variam entre 2,12 mV/V a 4,52 mV/V, este comportamento pode sugerir a presença de fraturas afetando o topo do embasamento e evidências do grau de alteração do topo rochoso. Presença de zonas de fraturas e/ou falhas são inferidas em profundidade acompanhando a porção da área que corresponde com o posicionamento das SEVs 04, 05 e 06.

A figura 68 mostra a integração de dados das anomalias de Fator F, do Kd e do Ud, e do comportamento dos valores de cargabilidade a 10 e 20 m de profundidade. Observa-se que nos setores caracterizados entre o posicionamento das SEVs 03 e 04 e das SEVs 05 e 06, valores anômalos de cargabilidade, superiores a 4 mV/V e 6 mV/V, respectivamente, apresentam uma continuidade em profundidade.

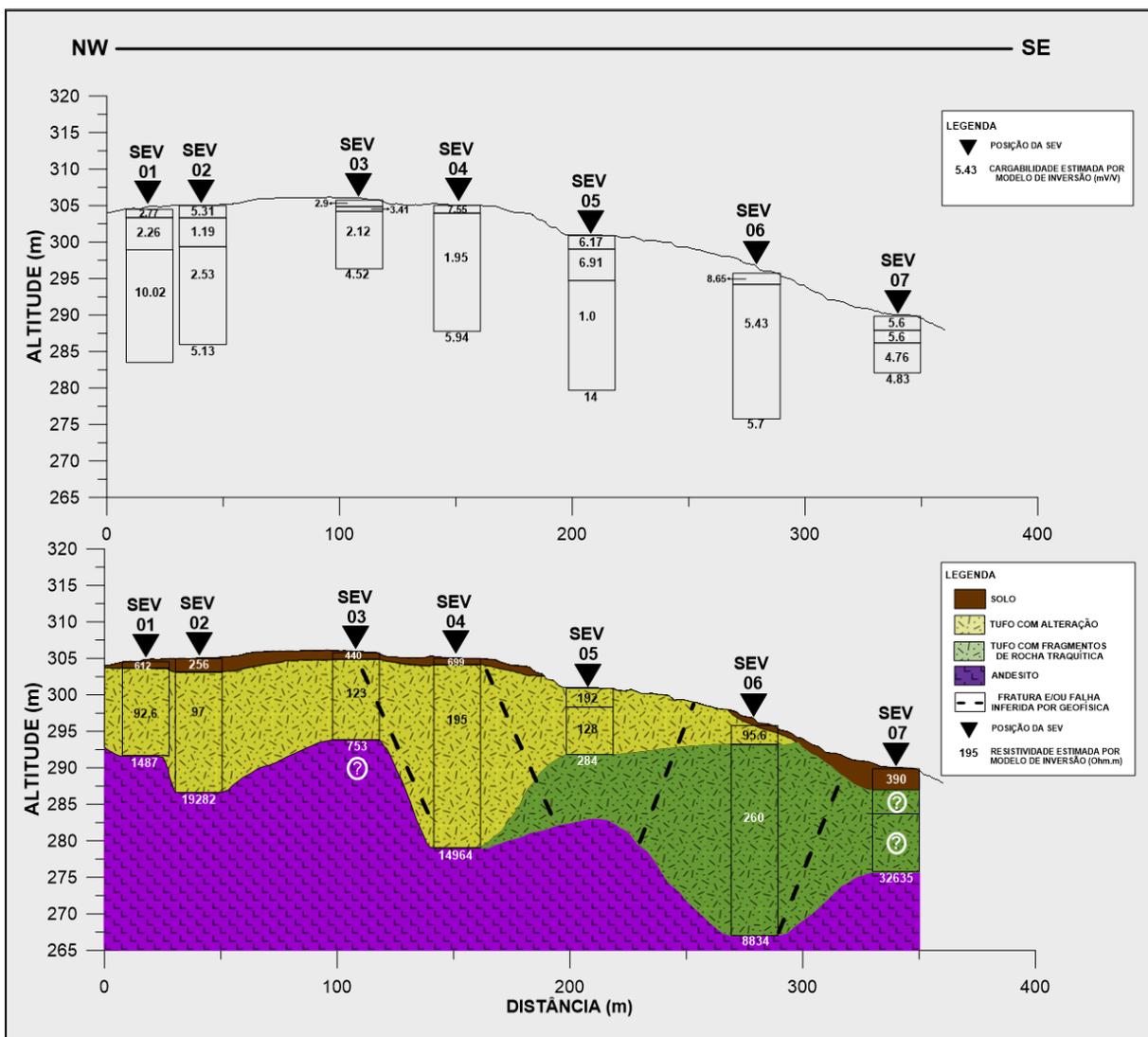
No setor entre as SEVs 03 e 04, também pode ser observado anomalias de Fator F, em torno de 1,6, e do Kd e do Ud, com valores anômalos de aproximadamente 0,44 e 0,52, respectivamente. Comportamento similar, também pode ser observado no setor caracterizado pelas SEVs 05 e 06, com valores anômalos de Fator F em torno de 1,2 a 1, do Kd (0,44 a 0,48) e do Ud (0,48 a 0,52). Estes setores podem estar associados a zonas de fraturas preenchidas por veios de quartzo com provável presença de óxidos metálicos disseminados.

Figura 66 – Integração dos dados aerogamaespectrométricos, geolétricos e geológicos.



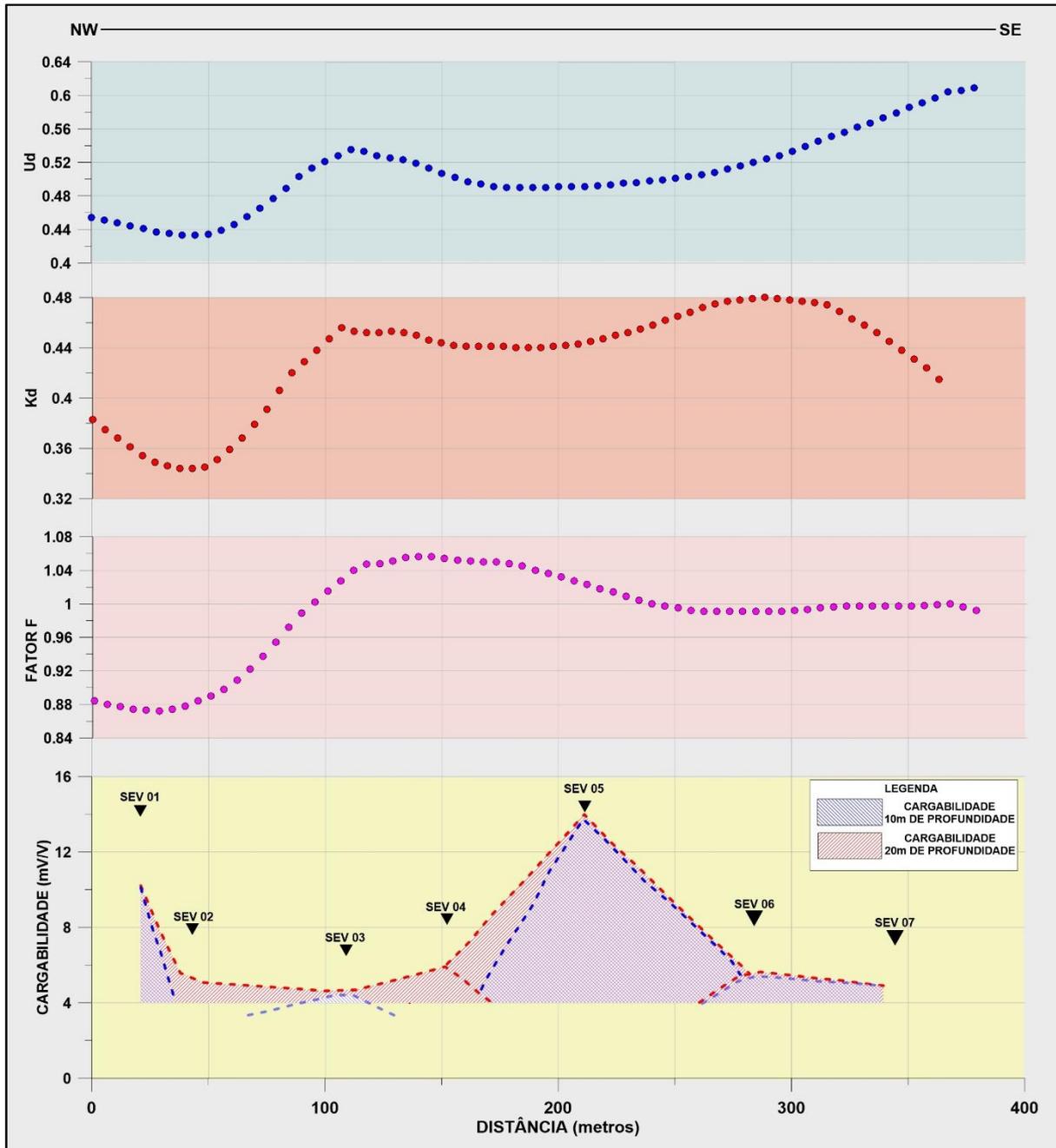
Fonte: autor (2017)

Figura 67 – Seções geolétricas de cargabilidade e de resistividade.



Fonte: autor (2017)

Figura 68 – Integração de dados das anomalias de Fator F, Kd e Ud e dos patamares anômalos de cargabilidade a 10 e 20 metros de profundidade.



Fonte: autor (2017)

Na figura 69 observa-se o comportamento dos valores de resistividade e de cargabilidade a 10 e 20 m de profundidade, integrados com a seção geológica. No setor caracterizado pela SEV 05, anomalias de cargabilidade ( $> 10$  mV/V) coincidindo com baixos resistivos ( $< 200$  Ohm.m). Esses patamares de cargabilidade e de

resistividade podem estar associados a zonas de fraturas e/ou falhas, que conforme critérios interpretativos podem apresentar continuidade em profundidade, podendo afetar o relevo do embasamento andesítico.

A figura 70 mostra um modelo 2D de cargabilidade e resistividade, a partir do processo de inversão dos dados das SEVs, para a área de estudo. Observa-se no setor caracterizado entre as SEVs 04, 05 e 06, anomalias de cargabilidade em torno de 12 mV/V, que coincidem espacialmente com a presença de um baixo resistivo com valores em torno de 200 Ohm.m um baixo resistivo. As SEVs 04 e 05, também correspondem com um setor anômalo de Fator F e do eU, conforme pode ser observado no mapa de contornos anômalos (figura 52). Os patamares anômalos de cargabilidade e os baixos valores de resistividade que caracterizam esse setor da área, são próximos aos valores encontrados no trabalho realizado pela empresa HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., para o Alvo Butiá (CILS) (figuras 20, 21, 23 e 25). Esta resposta geofísica sugere a presença de uma zona de fratura e/ou falha, que pode apresentar continuidade em profundidade, e que poderia estar associada com a ocorrência de sulfetos metálicos disseminados. Esta interpretação foi considerada de interesse para orientar as investigações futuras, nos alvos pesquisados pela empresa HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda.

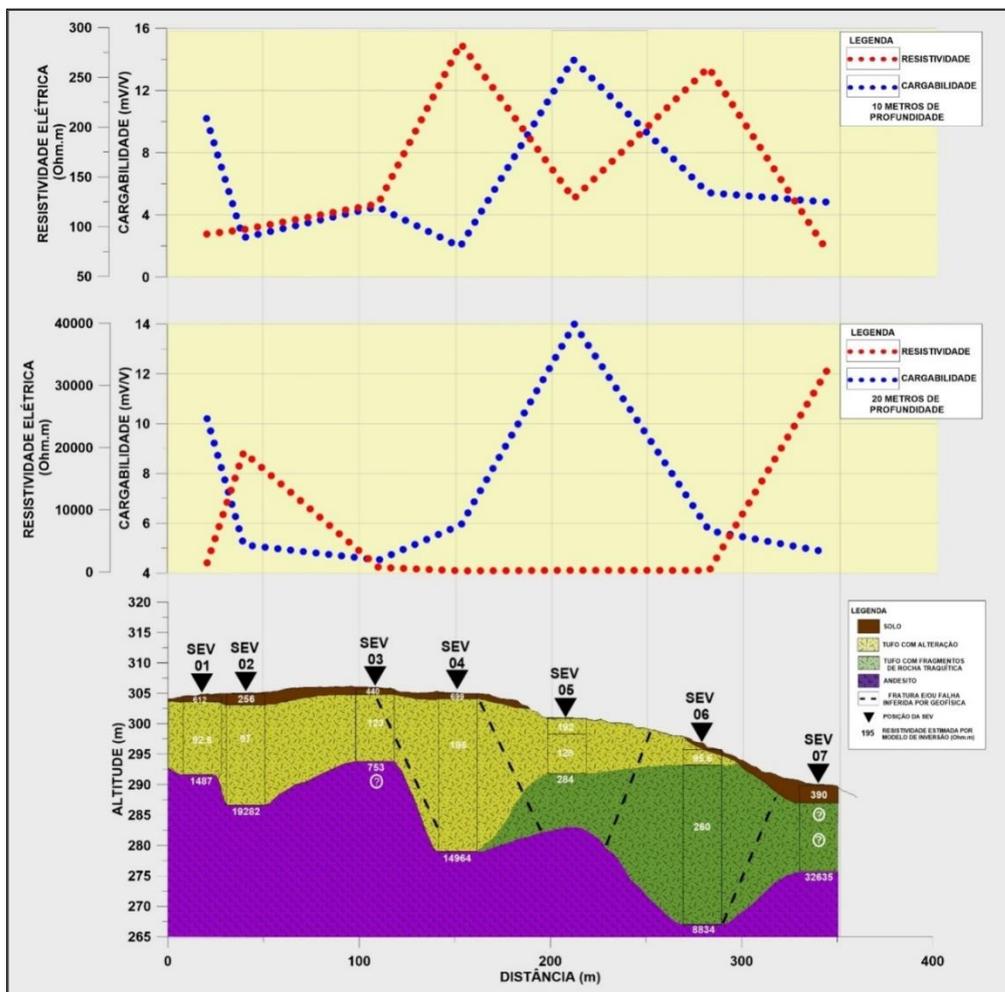
A figura 71 mostra um modelo geológico para a linha de CE 04 (figura 59), interpretado a partir dos resultados de resistividade elétrica em conjunto com a informação geológica oriunda dos furos de sondagem (figuras 14, 15 e 16). Optou-se por fazer o modelo da linha 04, pois é a linha mais próxima do levantamento da SEV, conforme pode ser observado na figura 63. As zonas de fratura e/ou falha presente no modelo foram inferidas a partir dos dados geofísicos.

Nos modelos geoelétricos 2D, para as linhas de CE, observa-se uma assinatura com altos valores de resistividade (>1000 Ohm.m), entre os 120 e 200 m. Esse alto resistivo pode ser observado na SEV 03, a aproximadamente 10 m de profundidade, em um setor caracterizado por anomalias de Fator F, do Kd e do Ud (figura 64).

Segundo Rojas 2007, os tufos líticos e a cristal, na área da Mina Cerro Rico, mostram-se intercalados e acamadados. Esta intercalação também se dá com os andesitos. Este acamadamento pode estar relacionada a paleogeografia e/ou falhas de gravidade do tipo *grabens* e *horsts* que afetam a região.

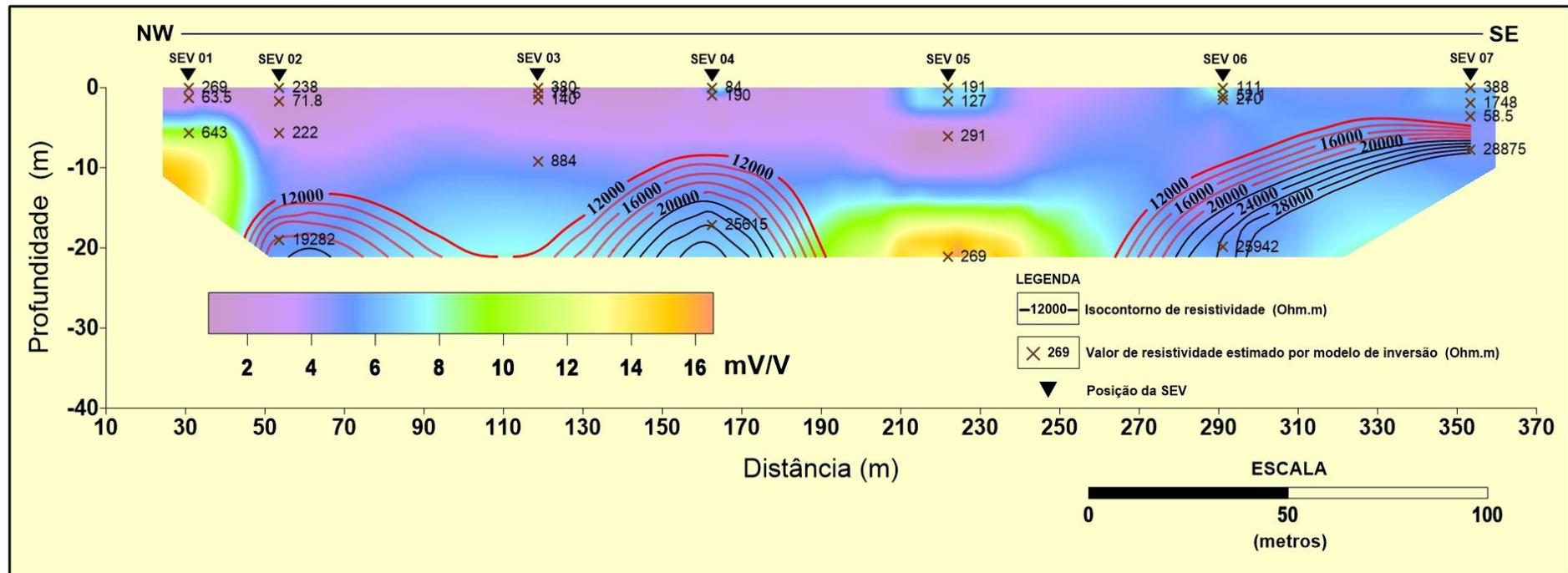
Portanto, sugere-se que a provável presença de um corpo andesítico, próximo da superfície, nas linhas de CE 03 e 04, poderia caracterizar um *horst* e uma área de fratura e/ou falha, justificando as anomalias de Fator F, do Kd e do Ud, no setor entre as SEVs 03 e 04, o que permitiria uma maior infiltração e/ou percolação das águas superficiais e a circulação das águas subterrâneas, indicando zonas que possam estar relacionadas com possível alteração hidrotermal.

Figura 69 – Integração dos patamares anômalos de resistividade e cargabilidade a 10 e 20 metros de profundidade com a seção geológica.



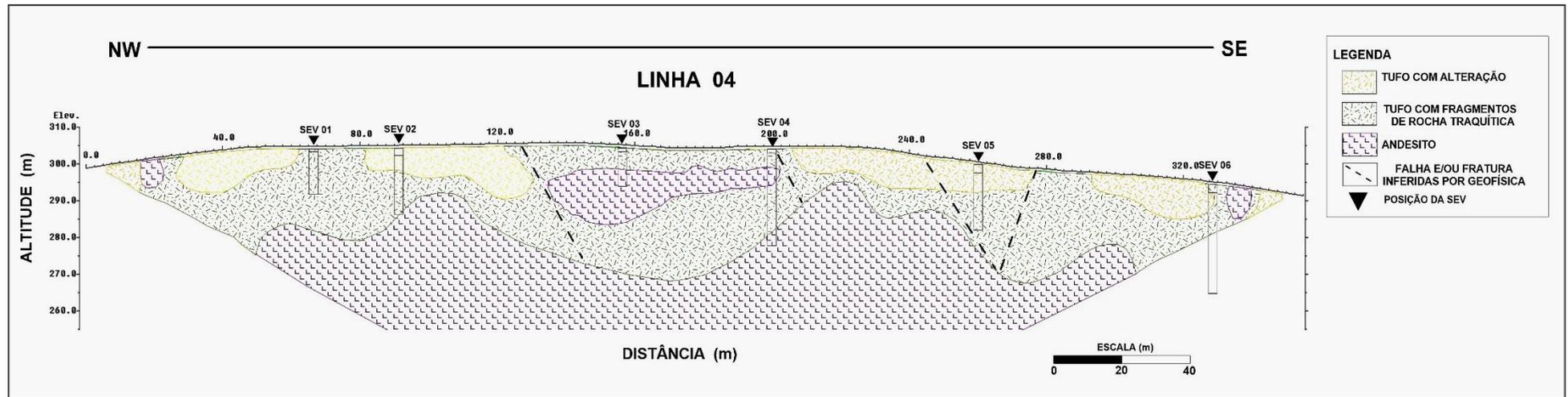
Fonte: autor (2017)

Figura 70 – Modelo 2D de cargabilidade e resistividade obtidos a partir da inversão dos dados das SEVs.



Fonte: autor (2017)

Figura 71 – Modelo geofísico-geológico gerado a partir da interpretação dos dados de resistividade elétrica para a linha de CE 04.



Fonte: autor (2017)

## 10 CONCLUSÕES

As técnicas de processamento dos dados aerogeofísicos utilizadas se mostraram eficientes para a confecção das imagens gamaespectrométricas da área de estudo.

As intrusões graníticas foram identificadas em todas as imagens gamaespectrométricas, mostrando um maior ressalte no mapa da Contagem Total (ppm) e no mapa Ternário dos três radioelementos (K, eTh e eU) em composição colorida RGB. O que revela o alto grau de eficiência e de resolução dos dados aerogamaespectrométricos, no auxílio e na complementação do mapeamento geológico.

Para abordagem geológica-geofísica em uma escala de detalhe, na área da Mina Cerro Rico, de aproximadamente 1,6 km<sup>2</sup>, a partir da interpretação do mapa Ternário, foram identificados cinco domínios radiométricos.

O Domínio 1, apresenta baixas concentrações de K, em torno de 1,2 % a 1,8 %, e concentrações intermediárias do eTh na ordem de 8,0 ppm a 11,8 ppm e do eU variando entre 2,8 ppm a 3,3 ppm. Esse domínio se caracteriza pela presença de um relevo topográfico mais acentuado (~347 m - 325 m). Enquanto o domínio 2, apresenta uma contribuição significativa dos radioelementos, onde as concentrações do K e do eU, são mais elevadas, na ordem de 2,4 % a 3,0 % para o K, 3,2 ppm a 4,8 ppm para o eU. As concentrações do eTh apresentam uma maior variação, na ordem de 8,0 ppm a 14,8 ppm. Esse domínio se caracteriza pela presença de um relevo topográfico com variação de 310 m a 280 m. Ressalta-se que o Domínio 2, coincide espacialmente com a localização dos levantamentos geofísicos terrestres.

O Domínio 3, apresenta uma contribuição significativa dos três radioelementos, de maneira regional na porção leste da área, com concentrações elevadas de K, eTh e eU. As concentrações de K variam na ordem de 2,7 % a 3,0 %, as concentrações de eTh variam de 13,0 ppm a 18,0 ppm e as concentrações de eU variam de 4,0 ppm a 4,8 ppm. Esse domínio está caracterizado por um relevo topográfico com pouca variação (~280 m - 320 m).

O Domínio 4, caracteriza-se pela menor contribuição dos três radioelementos, com baixas concentrações de K, variam na ordem de 1,6 % a 2,5 %, concentrações

intermediárias do eTh, na ordem de 10,2 ppm a 14,0 ppm e concentrações mais elevadas do eU, na ordem de 3,2 ppm a 3,6 ppm. Esse domínio apresenta um relevo topográfico mais acentuado, variando de 310 m a 325 m.

O Domínio 5, é o de maior abrangência regional na área de estudo e maior variação topográfica (~347 m - 285 m). A porção oeste possui concentrações de K que variam na ordem de 1,7 % a 2,6 %, as concentrações do eTh variam de 8,6 ppm a 13,0 ppm e as concentrações do eU variam de 2,0 ppm a 3,3 ppm. A porção central do domínio 5, corresponde ao domínio 2, e a porção sul é caracterizada por concentrações baixas de K e do eU, que variam de 1,7 % a 2,3 % e 2,0 ppm a 3,2 ppm, respectivamente e concentrações do eTh variando de 10,0 ppm a 14,4 ppm.

Crítérios interpretativos que permitem a identificação e caracterização dos diferentes domínios radiométricos na área da Mina Cerro Rico, nos sugerem a sua associação com a presença de diferentes litologias, em termos de possíveis variações na textura e na mineralogia das rochas e solos presentes na área.

Os perfis gamaespectrométricos integrados com os dados geoeletricos também possibilitaram a identificação de setores com possíveis zonas de fratura e/ou falha onde pode haver percolação de fluído hidrotermal com mineralizações metálicas e /ou auríferas.

Na porção central da área, a qual corresponde espacialmente com o posicionamento das SEVs 03, 04 e 05, observa-se um patamar mais alto no comportamento das anomalias, isto é: a) intervalo de valores para o Fator F de 1,0 a 1,04; b) intervalo de valores para o Kd de 0,44 a 0,46; c) intervalo de valores para o Ud de 0,52 a 0,54; d) valor para razão K/Th na ordem de 0,25. Este patamar caracterizado pela presença de altos valores de Fator F, do Kd, do Ud e da razão K/Th, o que sugere um enriquecimento de potássio e urânio nesta porção da área, podendo estar associado a provável presença de processos hidrotermais (OSTROVSKIY, 1973). Ambiente que pode ter sido favorecido pela presença de fraturas e/ou falhas inferidas por geofísica nessa porção da área.

No setor caracterizado pelas SEVs 03, 04, 05 e 06, observa-se patamares anômalos de Fator F, do Kd e do Ud, coincidentes com anomalias de cargabilidade de aproximadamente 8 mV/V – 12 mV/V, e baixos valores de resistividade em torno de 200 Ohm.m. Esses setores podem estar associados a zonas de fraturas

preenchidas com veios de quartzo, com prováveis ocorrências de óxidos metálicos disseminados.

Conforme a proposta do modelo geofísico-geológico 2D, para a área da Mina Cerro Rico, pode-se inferir segundo critérios interpretativos, que o topo do embasamento andesítico se encontra a uma profundidade de aproximadamente 20 a 30 m, caracterizado pela presença de um relevo irregular, muito provavelmente afetado por fraturas e/ou falhas. Camadas de solo com fragmentos de rochas vulcânicas, e/ou a presença de solos silto-argilosos, caracterizam um intervalo de profundidades entre 5 a 15 m. A provável presença de fraturas preenchidas por veios de quartzo, com possível presença de mineralização metálica, caracteriza alguns setores da área, resultando em potenciais atrativos, para dar continuidade e orientar futuras pesquisas relacionadas a prospecção aurífera na Mina Cerro Rico.

## **11 RECOMENDAÇÕES**

Conforme os resultados interpretativos do mapa de isocontornos anômalos (Fator F, K, eTh e eU) (figura 54), recomenda-se a realização de um levantamento de dados geoeletricos (resistividade e cargabilidade), com configurações técnicas similares as realizadas no trabalho, na porção central da área de estudo, com o posicionamento das linhas de medição na direção NE-SW.

Sugere-se a execução de uma linha de medição de dados de resistividade e cargabilidade com orientação NNE-SSW próximo ao posicionamento dos furos de sondagem 1, 2 e 3, com a finalidade de correlacionar os patamares anômalos e os parâmetros geométricos (i. e. espessura das camadas), obtidos a partir dos modelos geoeletricos (figuras 70 e 71) com a informação geológica oriunda das descrições dos furos de sondagem (figuras 14, 15 e 16). Propõe-se, um levantamento de propriedades físicas das rochas (susceptibilidade magnética) para identificar e caracterizar prováveis anomalias, que estejam associadas com litologias e que apresentem na sua composição óxidos metálicos.

Para identificar e caracterizar o regime de fraturas e/ou falhas na área, recomenda-se a realização de um levantamento geológico estrutural em escala de detalhe (aproximadamente 1: 3.000), na porção central da área de estudo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.P.M., CHEMALE JR., F., MACHADO, A. 2012. **LATE TO POST-OROGENIC BRASILIANO-PAN-AFRICAN VOLCANO-SEDIMENTARY BASINS IN THE DOM FELICIANO BELT, SOUTHERNMOST BRAZIL.** In. *Petrology – New Perspectives and Applications*. p 73-130.

ARAUJO, C.A.S. 2016. **ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E PARAGÊNESE MINERAL DA MINA CERRO RICO – LAVRAS DO SUL, RS – NOVOS DADOS E INTERPRETAÇÕES.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul.

ASTER Global DEM **VALIDATION SUMMARY REPORT.** Disponível em: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.JTP>

BLUM, M. L. B., 1999. **PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE GEOFÍSICA AÉREA NO BRASIL CENTRAL E SUA APLICAÇÃO À GEOLOGIA REGIONAL E À PROSPECÇÃO MINERAL.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. 229p.

BONGIOLO, E.M., 2006. **INTEGRAÇÃO DE DADOS MINERALÓGICOS, ISÓTOPOS ESTÁVEIS (O, H) E POROSIDADE DE ROCHAS (<sup>14</sup>C-PMMA) NO RECONHECIMENTO DA EVOLUÇÃO DA ALTERAÇÃO NO SISTEMA HIDROTHERMAL DE LAVRAS DO SUL/RS, BRASIL.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BORBA, A.W.; MISSUZAKI A.M.P.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N.J.; ONOE, A.T.; HARTMANN, L.A. 2008. **U-PB ZIRCON AND <sup>40</sup>AR-<sup>39</sup>AR K-FELDSPAR DATING OF SYN-SEDIMENTARY VOLCANISM OF THE NEOPROTEROZOIC MARICÁ FORMATION: CONSTRAINING THE AGE OF FORELAND BASIN INCEPTION AND INVERSION IN THE CAMAQUÃ BASIN OF SOUTHERN BRAZIL.**

BRAGA, A.C.O. 2007. **MÉTODOS DA ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA APLICADOS NOS ESTUDOS DA CAPTAÇÃO E CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA E PRÁTICA.** Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.

BRIGGS, I. C., 1974. **MACHINE CONTOURING USING MINIMUM CURVATURE.** *Geophysics*, 39(1):39-48

BURGUER, H.R.; SHEEHAN, A.F. & JONES, C.H. 2006. **INTRODUCTION TO APPLIED GEOPHYSICS: EXPLORING THE SHALLOW SUBSURFACE**, W.W. Norton & Company, Inc,.

CHEMALE, F JR. 2000. **EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO ESCUDO SUL-RIO-GRANDENSE**. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (eds). Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS, p.3-44.

DAVIS, J. C, 1986. **STATISTICS AND DATA ANALYSIS IN GEOLOGY**. 2ªEd. Chichester. John Wiley & Sons, 646p.

DICKSON B.L., SCOTT K.M. 1997. **INTERPRETATION OF AERIAL GAMMA-RAY SURVEYS – ADDING THE GEOCHEMICAL FACTORS**. AGSO J. Australia Geology & Geophysics.

DNPM, 1998. **Distritos Mineiros do Estado do Rio Grande do Sul. 1º Distrito**. Ministério de Minas e Energia – Departamento de Nacional de Produção Mineral. Porto Alegre. 38 p.

EFIMOV, A. V., 1978. **MULTIPLIKATIVNYJ POKAZATEL DLJA VYDELENIJA ENDOGENNYCH RUD PÓ AEROGAMMASPEKTROMETRICESKIM DANNYM**. In: Metody rudnoj geofiziki, edited by: Naucno-proizvodstvennoje objedinenie “Geofizika” Leningrad.

ELIS, V.R., 1998. **AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS ELÉTRICOS DE PROSPECÇÃO GEOFÍSICANO ESTUDO DE ÁREAS UTILIZADAS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 264 p.

ELIS, V.R.; MENDONÇA, C. A.; PORSANI, J. L.; STROBINO, E.F. 2008. **O USO DE SONDAGENS DIPOLO-DIPOLO EM ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS E DE DEPÓSITOS DE RESÍDUOS**. Revista Brasileira de Geofísica.

FERREIRA, F. J. F; SOUZA. J. L.. 2002. **GAMAESPECTROMETRIA – FUNDAMENTOS, GEOQUÍMICA E DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS EM ROCHAS E SOLOS**.

FERREIRA, F.J.F., DAITX, E.C., STEVANATO, R., FORLIN, M. 2001. **ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA ESPECTRAL (SIP) APLICADOS À EXPLORAÇÃO MINERAL DE CHUMBO E ZINCO NOS CORPOS CANOAS 2 E CANOAS 3, VALE**

**DO RIBEIRA-PR.** 7º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Salvador.

FORNAZZARI NETO, L. & FERREIRA, F. J., 2003. **GAMAESPECTROMETRIA INTEGRADA A DADOS EXPLORATÓRIOS MULTIFONTE EM AMBIENTE SIG APLICADA À PROSPECÇÃO DE OURO NA FOLHA BOTUVERÁ, SC.** Revista Brasileira de Geociências, **33**(2-suplemento): 197-208.

GALLAS, J. D. F. 2000. **PRINCIPAIS MÉTODOS GEOELÉTRICOS E SUAS APLICAÇÕES EM PROSPECÇÃO MINERAL, HIDROGEOLOGIA, GEOLOGIA DE ENGENHARIA E GEOLOGIA AMBIENTAL.** 2000.Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

GASTAL, M.C. 1998. **SUÍTE INTRUSIVA SAIBRO, RS: AVALIAÇÃO DE UM MODELO PETROLÓGICO.** Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GASTAL, M.C.P.; LAFON, J.M.; FONSECA, F.J; MAGRO, F.U.S; REMUS, M.V.D; SOMMER, C.A. 2006. **REINTERPRETAÇÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS. DE ACORDO COM OS SISTEMAS VULCANO-PLUTÔNICOS DE SUBSIDÊNCIA. PARTE 1: GEOLOGIA, GEOFÍSICA E GEOCRONOLOGIA ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  E  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ).** Revista Brasileira de Geologia.

GASTAL, M. C.; FERREIRA, F. J. F.; CUNHA, J. U.; ESMERIS, C.; KOESTER, E.; RAPOSO, M. I. B.; ROSSETTI, M. M. M. 2015. **ALOJAMENTO DO GRANITO LAVRAS E A MINERALIZAÇÃO AURÍFERA DURANTE EVOLUÇÃO DE CENTRO VULCANO-PLUTÔNICO PÓS-COLISIONAL, OESTE DO ESCUDO SUL-RIOGRANDENSE: DADOS GEOFÍSICOS E ESTRUTURAIS.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GEOSOFT INCORPORATED. 2007. **MONTAJ MAGMAP FILTERING; 2-D FREQUENCY DOMAIN OF POTENTIAL FIELD DATA EXTENSION FOR OASIS MONTAJ** v 6.1. Toronto, Ontario, Canada.

GEOTOMO SOFTWARE, 2010. **RAPID 2-D RESISTIVITY & IP INVERSION USING THE LEAST-SQUARES METHOD, RES2DINV VER 3.59.** Geoelectrical Imaging 2D & 3D, Malásia.

GNOJEK, I. & PRICHYSTAL, A., 1985. **A NEW ZINC MINERALIZATION DETECTED BY AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY IN NORTHERN MORAVIA, CHECOSLOVÁQUIA.** Geoexploration, 23: 491-502.

GRASTY, R. L. 1979. **GAMMA-RAY SPECTROMETRIC METHODS IN URANIUM EXPLORATION - THEORY AND OPERATIONAL PROCEDURES**. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report.

HGeo – Tecnologia em Geociências Ltda., 2008. **AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS POLARIZAÇÃO INDUZIDA (TDIP) E MAGNETOMETRIA DE SUPERFÍCIE**. Relatório final. Projeto Lavras do Sul (RS). Alvos Butiá e Caneleira/ Paredão. 56 p.

HOOVER, D. B; HERAN, W. D.; HILL, P.L., 1992. **THE GEOPHYSICAL EXPRESSION OF SELECTED MINERAL DEPOSIT MODELS**. US Geological Survey. Open-File Report, 92-557 p.

HORBACH, R. KUCK, L. MARIMON, R.G. MOREIRA, H.L. FUCK, G.F. MOREIRA, M.L.O., MARIMON, M.P.C., PIRES, J.L., VIVIAN, O., MARINHO, D.A., TEIXEIRA, W.1986. **Geologia**. In: **Folha SH.22 Porto Alegre e parte da folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22. Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE (Levantamento de Recursos Minerais, 33), p: 29-312.

IAEA, 2003. **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. GUIDELINES FOR RADIOELEMENT USING GAMMA RAY SPECTROMETRY DATA**. Viena. IRIS Instruments, 2006, **Syscal Pro-User's Manual**. Standard & Switch (48 - 72 - 96 - 556 120) Version. IRIS, Orléans, 87 p.

IRVINE, R. J. & SMITH, M. J. 1990. **GEOPHYSICAL EXPLORATION FOR EPITHERMAL DEPOSITS**. Journal of Geochemical Exploration, n. 36, p. 375-412. 1990.

JANIKIAN, L., ALMEIDA, R.P., FRAGOSO-CÉSAR, A.R.S., FAMBRINI, G.L. 2003. **REDEFINIÇÃO DO GRUPO BOM JARDIM (NEOPROTEROZOICO III) EM SUA ÁREA-TIPO: LITOESTRATIGRAFIA, EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL E CONTEXTO TECTÔNICO**. Revista Brasileira de Geociências.

JANIKIAN, L. 2004. **SEQUÊNCIAS DEPOSICIONAIS E EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL DO GRUPO BOM JARDIM E DA FORMAÇÃO ACAMPAMENTO VELHO, SUPERGRUPO CAMAQUÃ, RIO GRANDE DO SUL**. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, Tese de Doutorado.

KAUL, P.F.T.; RHEINHEIMER, D. 1974. **PROJETO OURO NO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA**. Relatório Final em convênio com CPRM-DNPM, 290 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. **GEOFÍSICA DE EXPLORAÇÃO**. São Paulo, 438 p.

LIMA, E.F. 1995. **PETROLOGIA DAS ROCHAS VULCÂNICAS E HIPOABISSAIS DA ASSOCIAÇÃO SHOSHONÍTICA DE LAVRAS DO SUL, RS**. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 338 p.

LIMA, E.F.; NARDI, L.V.S. 1998. **The Lavras do Sul shoshonitic association: implications for origin and evolution eoproterozoic shoshonitic magmatism in shouthermost Brazil**. Journal of South American Earth Science.

LIZ, J.D. de. 2008. **ASSOCIAÇÃO SHOSHONÍTICA DE LAVRAS DO SUL (RS): PETROLOGIA, GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS-TRAÇO EM ZIRCÃO E APLICAÇÃO DE SLIDING NORMALIZATION NA AVALIAÇÃO DE FONTES MAGMÁTICAS**. Teses de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEXIAS, A.S. 2000. **ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E MINERALIZAÇÃO DE OURO ASSOCIADA NO DISTRITO AURÍFERO DE LAVRAS DO SUL/RS- A ÁREA DO BLOCO BUTIÁ**. Porto Alegre. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 360 p.

MEXIAS, A.S.; BONGIOLO, E.M.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L; FRANTZ, J.C. 2007. **ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS E MINERALIZAÇÕES NAS ROCHAS DA ASSOCIAÇÃO PLUTONO-VULCANO-SEDIMENTAR DA REGIÃO DE LAVRAS DO SUL – RS**. In: 50 anos de Geologia. Instituto de Geologia, Porto Alegre.

MINERAR, 1998. **MAPA GEOLÓGICO DA MINA CERRO RICO**. Projeto de Diagnóstico do Potencial Mineral do Município de Lavras do Sul.

MINTY, B. R. S. 1997. **FUNDAMENTALS OF AIRBONE GAMMA-RAY SPECTROMETRY**. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics.

MIRANDA, R. R. Prospectors Aerolevantamentos e Sitemas Ltda. 2007. **LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO GRADIOMÉTRICO E GAMAESPECTROMÉTRICO**. Projeto Lavras do Sul, Rio Grande do Sul.

NARDI, L.V.S., LIMA, E.F. 1985. **A ASSOCIAÇÃO SHOSHONÍTICA DE LAVRAS DO SUL, RS**. Revista Brasileira de Geociências, 15(2): 139-46 p.

OLIVEIRA, C.H.E. de, CHEMALE JR., F., JELINEK, A.R., BICCA, M.M., PHILLIPP, R.P. 2014. **U-PB AND LU-HF ISOTOPES APPLIED TO THE EVOLUTION OF THE LATE TO POST-OROGENIC TRANSTENTIONAL BASINS OF THE DOM FELICIANO BELT, BRAZIL.** Precambrian Research 246: p 240-255.

ORELLANA, E. 1972. **PROSPECCION GEOELECTRICA EM CORRIENTE CONTINUA**, Madrid.

OSTROVSKY, E. Ya., 1973. **ANTAGONISM OF RADIOACTIVE ELEMENTS IN WALLROCK ALTERATIONS FIELDS AND ITS USE IN AEROGAMMA SPECTROMETRIC PROSPECTING.** Internat. Geology Rev., 17 (4): 461-468.

OYHANTÇABAL P., SIEGESMUND S., WEMMER K. 2011. **THE RIO DE LA PLATA CRATON, A REVIEW OF UNITS, BOUNDARIES, AGES AND ISOTOPIC SIGNATURE.** International Journal of Earth Sciences 100:201-220.

PAIM, P. S. G., LOPES, R. C., CHEMALE JR, F. 1995. **ALOESTRATIGRAFIA, SISTEMAS DEPOSICIONAIS E EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DA BACIA DO CAMAQUÃ – VENDIANO SUPERIOR/ORDOVICIANO INFERIOR DO RS.** 6º Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia/ 1º Encontro de Geologia do Cone Sul. p: 39-50

PAIM, P.S.G., CHEMALE, F.Jr.; LOPES, R.C., 2000. **A BACIA DO CAMAQUÃ.** In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.), Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, CIGO/UFRGS.

PAIM, P.S.G., LOPES, R.C., 2000. **GEOLOGIA DA REGIÃO DAS MINAS DO CAMAQUÃ.** In: Ronchi, L.H., & Lobato, A.O.C.(Eds.), Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar. São Leopoldo, Unisinos.

PAIM, P. S.G., LOPES, R.C., WILDNER, W. 2014. **ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DA BACIA DO CAMAQUÃ (RS).** Ciência e Natura, v.36, n.3, p183-193.

PFLUG, K. A., KILLEN, P. G., MWENIFUNBO, C. J., 1997. **APPLICATION OF BOREHOLE GEOPHYSICS TO GOLD EXPLORATION.** In Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration". Edited by A. G. G. Gugins, 717-720 p.

PIRES, A. C. B., 1995. **IDENTIFICAÇÃO GEOFÍSICA DE ÁREAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL, CRIXÁS-GUARINOS, Goiás.** Revista Brasileira de Geociências, 25(1): 61-68 p.

RAMOS, A. R. N. L. 2010. **DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS AÉREOS APLICADOS AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E À EXPLORAÇÃO DE OURO NA REGIÃO DE FAZENDA NOVA, PORÇÃO LESTE DO ARCO MAGMÁTICO DE ARENÓPOLIS-GO.** Universidade de Brasília.

REICHEL, J. L. 1998. **DIAGNÓSTICO DAS POTENCIALIDADES MINERAIS DO MUNICÍPIO DE LAVRAS DO SUL.** Relatório Mineropar.

REMUS, M. V. D., McNAUGHTON, N. J., HARTMANN, L. A., KOPPE, J. C., FLETCHER, I. R., GROVES, D. I., PINTO, V. M. 1999. **GOLD IN THE NEOPROTEROZOIC JUVENILE BOSSOROCA VOLCANIC ARCO F SOUTHERNMOST BRASIL: ISOTOPIC CONSTRAINTS ON TIMING AND SOURCES.** Journal of South American Earth Sciences 12. 349-366 p.

RIGOTI, A.; BLANCO, R.G. 1985. **LEVANTAMENTO DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA APLICADO À PROSPECÇÃO DE OURO ASSOCIADO À PIRITA NOS GRANITOS DE LAVRAS DO SUL – RS.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO FILHO, P. M.; TESSARI, R. I. 1966. **Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul.** Rio de Janeiro: DNPM, 1966. Boletim nº 127.

ROBERTSON, J.F. 1966. **Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region.** IG-UFRGS, Notas e Estudos, 1(2):41-54.

ROJAS, J. N. L., 2007. **CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MINERAL DA MINA CERRO RICO – LESTE DE LAVRAS DO SUL – RS.** Monografia de conclusão de curso, UNISINOS.

ROSALES, M. J. T., SHIHADED, H. L., LEANDRO, C. G., 2016. **INVERSÃO DE DADOS DE POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP) E SUA APLICAÇÃO AO ESTUDO DE ZONAS HIDROTERMAIS ASSOCIADAS À MINERALIZAÇÃO AURÍFERA, NO COMPLEXO GRABÍTICO DE LAVRAS DO SUL (RS).** VIII Congreso Uruguayo de Geología. Intendencia de Montevideo, Uruguay.

SANTOS, E. L. DOS, BECKEL, J., MACEDO, P.M., GONZALES FILHO, F. & CHABAN, M. 1978. **DIVISÃO LITO-ESTRATIGRÁFICA DO EO-CAMBIANO NO PRÉ-CAMBRIANO SUPERIOR DO ESCUDO SUL-RIOGRANDENSE.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 6:2562-75.

SCHÖN, J. H. 2004. **PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS, FUNDAMENTAL AND PRINCIPLES OF PETROPHYSICS, HANDBOOK OF GEOPHYSICAL EXPLORATION, SEISMIC EXPLORATION**. Volume 18. Editora. Elsevier.

TELFORD, W. D.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E., 1990. **APPLIED GEOPHYSICS**, Second Edition. Cambridge University Press.

TORQUATO, J. R. & KAWASHITA, K., 1990. **RADIOATIVIDADE E PRINCÍPIOS FÍSICOS DA GEOCROLOGIA**. Revista de Geologia, 3: 101-121 p.  
UFRGS. 2004. **MAPA GEOLÓGICO DE PARTE DA FOLHA DE LAVRAS DO SUL – SH-22-Y-A-IV-3**. Trabalho de mapeamento, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

USTRA, A.T. 2008. **UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA COM AQUISIÇÃO DE DADOS 3D PARA CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DE UMA ÁREA À JUSANTE DO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BAURU – SP**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

VASCONCELOS, R. M., METELO, J. M.; MOTA, C. A.; Gomes, D. R., 1994. **GEOFÍSICA EM LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS NO BRASIL**. Rio de Janeiro. CPRM. 172 p.

ZACCHI, E. N. P., SILVA, A. M., 2009. **IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL ATRAVÉS DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS AO LONGO DA FAIXA MATEUS LEME-PITANGUI, MG**. 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil. 6 p.