

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME ALCALDE**

**DADOS AEROGEOFÍSICOS MAGNETOMÉTRICOS E  
GAMAESPECTROMÉTRICOS INTEGRADOS COM MODELOS GEOELÉTRICOS  
EM ESCALA DE DETALHE NA ÁREA DA MINA CERRO RICO – LAVRAS DO  
SUL – RS**

**Caçapava do sul**

**2019**

**GUILHERME ALCALDE**

**DADOS AEROGEOFÍSICOS MAGNETOMÉTRICOS E  
GAMAESPECTROMÉTRICOS INTEGRADOS COM MODELOS GEOELÉTRICOS  
EM ESCALA DE DETALHE NA ÁREA DA MINA CERRO RICO – LAVRAS DO  
SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

**Caçapava do Sul  
2019**

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) .

A346d Alcalde, Guilherme

DADOS AEROGEOFÍSICOS MAGNETOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS  
INTEGRADOS COM MODELOS GEOELÉTRICOS EM ESCALA DE DETALHE NA  
ÁREA DA MINA CERRO RICO - LAVRAS DO SUL - RS / Guilherme  
Alcalde.

105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade  
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2019.

"Orientação: Mário Jesus Tomas Rosales".

1. Aeromagnetometria. 2. Aerogamaespectrometria. 3.  
Resistividade. 4. Cargabilidade. 5. Susceptibilidade  
magnética. I. Título.

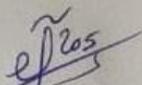
GUILHERME ALCALDE

DADOS AEROGEOFÍSICOS MAGNETOMÉTRICOS E  
GAMAESPECTROMÉTRICOS INTEGRADOS COM MODELOS  
GEOELÉTRICOS EM ESCALA DE DETALHE NA ÁREA DA MINA CERRO  
RICO – LAVRAS DO SUL – RS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Geofísica  
da Universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 10/12/2019

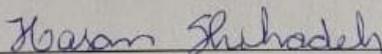
Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

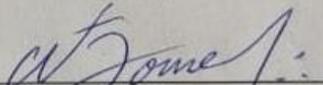
Orientador  
UNIPAMPA



---

Msc. Hasan Lopes Shihadeh

UFRGS



---

Geólogo Nilson Torres Dorneles

UNIPAMPA

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer muito a minha família, principalmente minha mãe Maria e meu padrasto Vicente por todo o apoio, carinho e paciência durante todos estes anos de graduação, sem vocês esta conquista certamente não teria sido possível, muito obrigado! Ao meu irmão Luciano e minha irmã Fernanda, pelos momentos de descontração nas voltas para casa aos finais de ano. Gostaria de agradecer também a uma pessoa muito especial, nos conhecemos no início da minha graduação e hoje não consigo imaginar minha vida sem ela, meu amor Daniela, muito obrigado por tudo que você fez por mim durante todo esse período em que estivemos juntos, pelos incentivos, pelas longas conversas, por todo seu carinho quando eu me desanimava com algo, pelas boas risadas, pela sua companhia nas noites em claro fazendo este trabalho, enfim, são tantos os motivos que eu tenho para te agradecer que eles não caberiam neste pequeno texto, mais uma vez, muito obrigado meu amor te amo muito!

Gostaria de agradecer também ao meu Pai Luís e a minha tia Malvina, que durante toda minha graduação sempre se preocuparam em saber se eu estava bem, se precisava de alguma ajuda e, quando precisava, estavam sempre presentes para me ajudar.

Agradeço também ao meu grande amigo Anderson, pela sua amizade que mesmo distante e muitas vezes com pouco contato devido a correria do dia a dia, provou o que significa ser um amigo de verdade. Agora, meus agradecimentos aos amigos que a Geofísica me deu, vamos lá, Paulo Roberto, Mateus Fernandes, Matheus Freire, Daniel, Barbara, Bruna, Vitor, Welynton e Felipe Augusto, obrigado por todos os momentos passados juntos, nos almoços no RU, trabalhos em grupos, durante as aulas, saídas de campo, churrascos da turma, pelas noites de CS, pelas muitas risadas, enfim, vocês são foda rapaziada! só agradece.

Agradeço a empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda., por cederem gentilmente os dados aerogeofísicos e por permitirem acesso físico a área de pesquisa

Por último, mas não menos importante, agradeço ao meu orientador e amigo Professor Mario Rosales por todo conhecimento transmitido, pelas conversas e por me ensinar que a Geofísica não é suquinho de uva! Agradeço a todos os funcionários

da UNIPAMPA e a todos que já foram meus professores, não apenas durante a graduação, mas durante toda minha formação escolar, Obrigado!

“Tudo aquilo que o homem ignora não existe para ele. Por isso o universo de cada um se resume ao tamanho do seu saber”.

Albert Einstein

## RESUMO

A área de pesquisa abrange a Mina Cerro Rico e está localizada 7 km a leste da cidade de Lavras do Sul, delimitada pelas coordenadas geográficas longitudes -53, 81200 W - 53,83400 W e latitudes -30, 81100 S -30,81870 S. A ocorrência mineral de Ouro (Au), Prata (Ag) e Cobre (Cu) está relacionada à presença de zonas de alteração hidrotermal e está condicionada à 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. O principal objetivo desta pesquisa é atualização do mapeamento geológico geofísico da área em uma escala de detalhe de 1 : 5.000, integrando e interpretando dados geofísicos aéreos e terrestres em escala de detalhe, a fim de identificar e caracterizar áreas de alteração hidrotermal associadas a zonas de falha e/ou fraturas, possivelmente relacionadas à mineralização de metais base (Ag, Cu e Au). Os dados aerogeofísicos e as descrições litológicas dos furos de sondagem foram gentilmente cedidos pela Amarillo Mineração do Brasil Ltda. Os dados aerogeofísicos utilizados pertencem ao levantamento aerogeofísico gamaespectrométrico e aeromagnetométrico - Projeto Lavras do Sul - Rio Grande do Sul, 2007. Os dados de resistividade elétrica e de cargabilidade (IP) formam parte de um conjunto de dados geoeletricos compilados de trabalhos geofísicos anteriores na área de estudo, assim como o acréscimo de novos dados adquiridos segundo duas direções preferências NW-SE e SW-NE, visando a criação de uma malha de distribuição espacial dos dados de cargabilidade (IP) para área com a finalidade de confeccionar um modelo geofísico 3D. Dados de susceptibilidade magnética foram adquiridos em uma malha regular com intervalos de amostragem de aproximadamente 60 metros em setores da área de estudo que se caracterizaram por altos valores de cargabilidade (IP) e baixos valores de resistividade, assim como pela caracterização de patamares anômalos de Fator F, Urânio anômalo (Ud) e Potássio anômalo (Kd), critérios indicativos que sugerem a presença de zonas de alteração hidrotermal. Os resultados geoeletricos de cargabilidade se mostraram eficientes para delimitação de setores da área de estudo com potenciais alvos atrativos para prospecção mineral, com valores de cargabilidade maiores que 8 mV/V que coincidem com as anomalias de Kd, Ud e Fator F. Rochas do relevo do topo andesítico se caracterizam por valores maiores que 3000

Ohm.m, intervalos de valores de resistividade na ordem de 200-500 Ohm.m caracterizam a presença de camadas de tufo vulcânico riolítico aglomerado e derivados dos mesmos. Conforme a proposta do modelo geofísico-geológico 2D, para a área da Mina Cerro Rico, pode-se inferir segundo critérios interpretativos que o relevo do topo andesítico se encontra a uma profundidade de aproximadamente 25 a 35 metros, caracterizado pela presença de um relevo irregular, afetado por falhas e/ou fraturas. Camadas de solo com fragmentos de rochas vulcânicas e a presença de solos silto-argilosos caracterizam uma profundidade de 2 a 15 metros. Conforme critérios geofísicos sugere-se que a direção preferencial das estruturas geológicas mineralizadas apresenta um *Trend* na direção NW.

Palavras-Chaves: aeromagnetometria, aerogamaespectrometria, resistividade, cargabilidade, susceptibilidade magnética.

## Abstract

The research area covers the Cerro Rico Mine and is located 7 km east of the city Lavras do Sul, delimited by the geographical coordinates longitudes -53, 81200 W - 53,83400 W and latitudes -30, 81100 S -30,81870 S. The mineral occurrence of Au, Ag and copper (Cu) is related to the presence of hydrothermal alteration zones and is conditioned to the existence of quartz veins that present northwest (NW) and east - west (E - W) preferential directions, present in the rocks characterized as tufts, andesites, rhyolitic spills and volcanic conglomerates of the Formação Hilário (604 - 590 Ma), belonging to the Bom Jardim Group, or Bom Jardim Alogrupo. The main objective of this research is to update the geophysical geological understanding of the area in a detail scale of 1: 5,000, integrating and interpreting aerial and terrestrial geophysical data in detail scale, in order to identify and characterize hydrothermal alteration areas associated with zones of failure and / or fractures, possibly related to metal mineralization (Ag and Cu and Au). Aerogeophysical data and lithological descriptions of drillholes were kindly provided by Amarillo Mineração do Brasil Ltda. The aerogeophysical data used in this research belong to the gamma-spectroscopic and aeromagnetometric aerogeophysical survey - Lavras do Sul Project - Rio Grande do Sul, 2007. The electrical resistivity and chargeability (IP) data form part of a geoelectric data set compiled from previous geophysical works in the study area, as well as the addition of new data to be acquired in two preferences directions NW-SE and SW-NE , aiming the creation of a spatial distribution mesh of the electrical resistivity and chargeability (IP) data for the study area in order to make a 3D geophysical model. Magnetic susceptibility data will be acquired in a regular grid with sampling intervals of approximately 60 meters in sectors of the study area characterized by high chargeability (IP) values and low resistivity values, as well as the characterization of anomalous Factor F, Anomalous uranium (Ud) and Anomalous potassium (Kd), indicative criteria that suggest the presence of hydrothermal alteration zones. The geoelectric results were efficient to delimit sectors of the study area with potential attractive targets for mineral prospecting, with values greater than 8 mV / V that coincide with the anomalies of Kd, Ud and Factor F. Rocks of the andesitic top are characterized by values greater than 3000 Ohm.m, resistivity values in the range of 200-500 Ohm.m characterize the presence of layers of agglomerated and derived rhyolitic volcanic tufts. According to the proposal 2D geophysical-geological model, for

the Cerro Rico Mine area, it can be inferred from interpretative criteria that the andesitic top is at a depth of approximately 25 to 35 meters, characterized by the presence of an irregular relief, affected by failures and/or fractures. Layers of soil with volcanic rock fragments and the presence of silty clay soils characterize a depth of 2 to 15 meters. According to geophysical criteria it is suggested that the preferred direction of mineralized geological structures presents a Trend in the NW direction.

Keywords: aeromagnetometry, aerogamaespectrometry, resistivity, chargeability, magnetic susceptibility.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	4
Figura 2 - Mapa geológico do Complexo Intrusivo de Lavras do Sul .....	7
Figura 3 - Mapa geológico simplificado da área da Mina Cerro Rico integrado com pontos de amostragem aerogeofísicos, falhas inferidas por geofísica, perfis geofísicos, domínios litogeofísicos e furos de sondagem.....	8
Figura 4 - MDE integrado com falhas inferidas por geofísica, perfis geofísicos, domínios gamaespectrométrico e furos de sondagem.....	10
Figura 5 - Esquema gráfico das anomalias de (A) Kd, (B) Ud, (C) Fator F e (D) Mapa ternário do hidrotermalismo em composição colorida RGB dos parâmetros Fator F, Kd e Ud respectivamente nos perfis geofísicos A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE).....	20
Figura 6 - Esquema gráfico das anomalias de Ud, Kd e Fator F nos perfis geofísicos A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE). .....	21
Figura 7 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-188 .....	22
Figura 8 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-189. ....	22
Figura 9 - Modelo 2D de cargabilidade para os perfis A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE). .....	23
Figura 10 - Modelos geológicos 2D para os perfis A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE). .....	24
Figura 11 - Transecta SW – NE da Anomalia Magnética Residual (AMR), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.....	45
Figura 12 - Transecta SW - NE da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção SE.....	46
Figura 13 - Transecta NW – SE da Anomalia Magnética Residual (AMR), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.....	47
Figura 14 - Transecta NW - SE da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.....	48
Figura 15 - Mapa da Anomalia Magnética Total.....	49
Figura 16 - Mapa da Anomalia Magnética Residual, mostrando falhas inferidas por geofísica, perfis magnetométricos, perfis geoeletricos e área de estudo. ....	50
Figura 17 - Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando falhas inferidas por geofísica, perfis magnetométricos, perfis geoeletricos e área de estudo. ....	51

Figura 18 - Mapa da Anomalia Magnética Residual continuação para cima à 500 metros (UPP).....	52
Figura 19 - Mapa da Amplitude do Sinal analítico (ASA)continuação para cima à 500 metros ASA (UPP). .....	53
Figura 20 - Mapa da anomalia do Gradiente Horizontal (135 graus).....	57
Figura 21 - Mapa da anomalia do Gradiente Horizontal (45 graus).....	57
Figura 22 - Mapa integrado da anomalia do Sinal Analítico ilustrando o posicionamento dos furos de sondagem, os perfis geoeletricos, contorno das anomalias gamaespectrométricas de Kd, Ud e fator F, falhas inferidas por critérios geofísicos e área de estudo. ....	66
Figura 23 - Esquema gráfico do Perfil magnetométrico regional E-E' e F-F' da anomalia magnética residual e anomalia da Amplitude do Sinal Analítico. ....	67
Figura 24 - Curva de cargabilidade aparente da região do CILS .....	68
Figura 25 - Curva de resistividade aparente da região do CILS.....	69
Figura 26 - Perfil A-A': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.....	70
Figura 27 - Perfil B-B': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.....	71
Figura 28 - Perfil C-C': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.....	72
Figura 29 - Perfil A-A': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico. .	74
Figura 30 - Perfil B-B': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico. .	75
Figura 31 - Perfil C-C': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico..	75
Figura 32 - Perfil A-A': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.	76
Figura 33 - Perfil B-B': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.	76
Figura 34 - Perfil C-C': Modelo 2D de cargabilidade. ....	77
Figura 35 - Perfil C-C': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.	77
Figura 36 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-186. ....	78
Figura 37 - Perfil C-C': Modelo geológico 2D a partir de dados de resistividade verdadeira. ....	79
Figura 38 - Mapa de anomalia de cargabilidade (mV/V). Profundidades: 10, 20 e 30 metros. ....	80
Figura 39 - Esquema gráfico da anomalia de cargabilidade (mV/V) versus profundidade. Profundidade: 10, 20, 30 metros. ....	81

Figura 40 - Mapa preliminar da anomalia de susceptibilidade magnética para área de estudo. ....	82
Figura 41 - Esquema gráfico ilustrando anomalia de sinal analítico, resistividade e relevo topográfico.....	83
Figura 42 - Esquema gráfico integrado da amplitude do sinal analítico, urânio anômalo e derivadas direcionais.....	84
Figura 43 - Esquema gráfico integrado de anomalia do Fator F, resistividade e cargabilidade.....	85
Figura 44 - Esquema gráfico das anomalias de cargabilidade e resistividade nos perfis geofísicos A-A', B-B' e C-C'.....	86
Figura 45 - perfil A-A': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade. ....	87
Figura 46 - Perfil B-B': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade. ....	87
Figura 47 - Perfil C-C': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade. ....	88
Figura 48 - Perfil A-A': Modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.	89
Figura 49 - Perfil B-B': Modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.	89
Figura 50 - Perfil C-C': modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.	90
Figura 51 - Mapa integrado da área de estudo com imagem de satélite.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Susceptibilidade magnética de minerais .....	26
Tabela 2 - Susceptibilidade magnética de rochas .....	27
Tabela 3 - Conteúdo médio $FeO$ -, $Fe_2O_3$ e $TiO_2$ (vol %) de algumas rochas.....	29
Tabela 4 - Parâmetros do levantamento aerogeofísico Projeto Lavras do Sul - Rio Grande do Sul,2007 .....	37
Tabela 5 - Resistividade, cargabilidade, espessura da camada e litologia conforme os modelos geoeletricos. ....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

km – Quilômetros

m – Metros

E – Leste

W – Oeste

S – Sul

N – Norte

NW – Noroeste

NE – Nordeste

SW – Sudoeste

SE – Sudeste

Au – Ouro

Ag – Prata

Cu – Cobre

Ma – Milhões de anos

IP – Polarização Induzida

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

CE – Caminhamento Elétrico

RGB – Red, Green, Blue

Kd – Potássio Anômalo

Ud – Urânio Anômalo

3D – Três Dimensões (Largura, Altura, Profundidade)

ESRG – Escudo Sul Rio-Grandense

TSG – Terreno São Gabriel

ZCCS – Zona de Cisalhamento de Caçapava do Sul

TMAP – Terreno Metamórfico de Acréscimo de Palma

APVSS - Associação Plutono-Vulcano-Sedimentar Seival

ASLS – Associação Shoshonítica de Lavras do Sul

CILS – Complexo Intrusivo de Lavras do Sul

°C - Graus Celsius

Fm – Formação

h – Altura

mV/V – Mili-volt por Volt

eTh – Equivalente da concentração de Tório

eU – Equivalente da concentração de Urânio

ASA – Amplitude do Sinal Analítico

AMR – Anomalia Magnética Residual

UPP – Continuação para Cima

nT – Nano Tesla

nT/m – Nano Tesla por metro

SI – Sistema Internacional

Ba – Bilhões de anos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Geral .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>3</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>3</b>
<b>5 CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>4</b>
<b>5.1 Geologia Regional.....</b>	<b>5</b>
<b>5.2 Geologia local.....</b>	<b>7</b>
<b>5.2.1 Modelo Digital de Elevação do Terreno.....</b>	<b>9</b>
<b>5.3 Sistema hidrotermal magmático .....</b>	<b>11</b>
<b>5.3.1 Depósitos de Minérios epitermais de alta sulfetação .....</b>	<b>11</b>
<b>6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>6.1 Métodos Elétricos .....</b>	<b>13</b>
<b>6.2 Método Gamaespectrométrico.....</b>	<b>14</b>
<b>6.3 Método Magnetométrico .....</b>	<b>17</b>
<b>6.4 Revisão de trabalhos geofísicos anteriores na área de estudo .....</b>	<b>18</b>
<b>6.4.1 Resultados gráficos de trabalhos geofísicos anteriores na área de estudo .....</b>	<b>19</b>

<b>7 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS.....</b>	<b>25</b>
7.1 Susceptibilidade magnética .....	25
7.2 Propriedades magnéticas das rochas .....	27
7.3 Propriedades elétricas das rochas e minerais .....	29
<b>8 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>30</b>
8.1 Métodos elétricos.....	30
8.1.1 Método da eletrorresistividade .....	30
8.1.2 Método da Polarização induzida .....	31
8.1.3 Técnica da Sondagem elétrica vertical.....	32
8.2 Método Gamaespectrométrico .....	32
8.3 Método magnetométrico.....	33
8.3.1 Lei de Ampère.....	33
8.3.2 Lei de Biot-Savart.....	34
8.3.3 Magnetização das rochas.....	35
<b>9 ETAPAS DOS TRABALHOS GEOFÍSICOS .....</b>	<b>36</b>
9.1 Dados geofísicos aéreos .....	36
9.1.2 Tratamento dos dados aeromagnetométricos.....	38
9.1.2.1 Correção do erro de Paralaxe .....	38
9.1.2.2 Nivelamento dos perfis .....	39
9.1.2.3 Remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) .....	39

<b>9.1.3 Processamento dos dados magnetométricos .....</b>	<b>40</b>
<b>9.1.3.1 Gridagem Bi-direcional .....</b>	<b>40</b>
<b>9.1.3.2 Aplicação de filtros .....</b>	<b>41</b>
<b>9.1.3.2.1 Continuação Analítica.....</b>	<b>41</b>
<b>9.1.3.2.2 Amplitude do Sinal Analítico .....</b>	<b>42</b>
<b>9.1.3.2.3 Derivadas direcionais .....</b>	<b>42</b>
<b>9.2 Dados geofísicos terrestres .....</b>	<b>43</b>
<b>9.2.1 Dados geoeletricos .....</b>	<b>43</b>
<b>9.2.2 Dados de susceptibilidade magnética.....</b>	<b>44</b>
<b>10 RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
<b>10.1 Resultados geofísicos aéreos .....</b>	<b>44</b>
<b>10.1.1 Resultados geofísicos magnetométricos.....</b>	<b>45</b>
<b>10.2 Resultados Geofísicos Terrestres .....</b>	<b>67</b>
<b>10.2.1 Consistência dos Dados Geoeletricos .....</b>	<b>67</b>
<b>10.2.1.1 Qualidade da aquisição dos Dados de Resistividade (SEV) .....</b>	<b>67</b>
<b>10.2.2 Resultados Geoeletricos .....</b>	<b>73</b>
<b>10.2.3 Resultados de susceptibilidade magnética .....</b>	<b>81</b>
<b>11 INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS .....</b>	<b>82</b>
<b>12. CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A cidade de Lavras do Sul está localizada a 322 Km a sudoeste da capital do estado do Rio Grande do Sul Porto Alegre, e possui acessos pelas rodovias BR-290, BR-392 e ERS-357. O município de Lavras do Sul é o único município do estado que surgiu e se formou devido a exploração de ouro (PANORAMA LAVRENSE, 2019) fato que ocorreu ao final do século XVIII (IBGE, 2019). O começo oficial da mineração de ouro em Lavras do Sul data no final do século XIX, nesta época o ouro era explorado em aluviões, no arroio Camaquã das Lavras e seus afluentes. A exploração do ouro em filões começou apenas em 1845, com a chegada da empresa The Rio Grande do Sul Gold Mining Company.

A área da pesquisa abrange a Mina Cerro Rico e localiza-se a 7 km ao leste da cidade de Lavras do Sul, e delimita-se pelas coordenadas geográficas: Longitudes: 53, 81200 W - 53,83400 W e as Latitudes: 30,81100 S - 30,81870 S. A ocorrência mineral de ouro (Au), prata (Ag) e cobre (Cu), encontra-se condicionada à 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. A geologia local da área se caracteriza-se pela presença de rochas pertencentes à Formação Hilário que são descritas como piroclásticas, tufos, efusivas (subvulcânicas) e conglomerados vulcânicos (GASTAL et al., 2015). As porções com mineralizações na região da Mina Cerro Rico se encontram predominantemente em tufos, os quais sofreram alteração hidrotermal devido a fluidos vindos das porções intrusivas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul e águas meteóricas. Segundo Bongioiolo (2006), estas alterações desencadearam principalmente porções mineralizadas e alteradas relacionadas a metais como Au e Cu.

Este projeto visa a integração de dados aerogamaespectrométricos, aeromagnetométricos, dados de suscetibilidade magnética, de eletrorresistividade e de Polarização Induzida (IP) com a finalidade de atualizar o mapeamento geológico e geofísico da área da Mina Cerro Rico em uma escala de detalhe de aproximadamente 1: 5.000. Os dados geoeletricos foram adquiridos utilizando as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com arranjo Wenner e de Caminhamento Elétrico (CE) com

arranjo dipolo-dipolo dispostos em dois perfis com direções NW-SE (Perfil A-A') e SW-NE (Perfil B-B'). Os dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos utilizados neste trabalho foram gentilmente cedidos pela empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda, e o levantamento destes dados foi realizado pela empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda no ano de 2007.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Atualizar o mapeamento geológico e geofísico da área da Mina Cerro Rico em uma escala de detalhe de aproximadamente 1: 5.000, e esclarecer questões relacionadas com a identificação de zonas de falhas e/ou de fraturas propostas por Alcalde et al., (2018), presentes na área de estudo que servem de condutos para a circulação de fluidos favorecendo processos de hidrotermalismo e por consequência processos de gênese de mineralização metálica.

### **2.2 Específicos**

Caracterização geofísica geológica dos domínios gamaespectrométricos identificados a partir da interpretação dos mapas ternários dos radioelementos K (%), eU (ppm) e eTh(ppm), e dos atributos Fator F, Urânio Anômalo (Ud) e Potássio Anômalo (Kd), estes últimos indicadores de processos hidrotermais.

Identificação da profundidade do relevo do topo andesítico, assim como as zonas de falhas afetando as irregularidades presentes no relevo do mesmo, a partir do processamento e interpretação de dados magnetométricos.

Identificar zonas de fraturas e/ou falhas a partir da integração e interpretação dos dados gamaespectrométricos e geoeletrônicos que poderiam estar associados a

presença de condutos favoráveis para circulação de fluídos relacionados com processos hidrotermais na área de estudo.

Confeccionar modelos geológicos 2D com base na interpretação de dados geoeletricos de resistividade verdadeira (Ohm.m) e de cargabilidade verdadeira (mV/V).

Confeccionar modelos geológicos 2D com base na interpretação de cargabilidade (IP) para a área de estudo visando a identificação de possíveis setores com provável presença de veios mineralizados de sulfetos metálicos e a direção preferencial das estruturas geológicas mineralizadas.

### **3 JUSTIFICATIVA**

A escolha da Área da Mina Cerro Rico se justifica pelo fato de a área possuir inúmeras informações geológicas e geofísicas obtidas a partir de trabalhos geológicos e geofísicos anteriores em escala regional.

A existência de furos de sondagens oferece informação sobre a presença de diferentes litologias em profundidade, incluindo a identificação do relevo do topo andesítico em alguns setores da área.

A área de estudo apresenta uma cobertura de dados aerogeofísicos (gamaespectrométricos e magnetométricos) de alta resolução que se encontram disponíveis para a execução do presente projeto de pesquisa levantamento aerogeofísico - Projeto Lavras do Sul - Rio Grande do Sul, 2007.

A presença de resultados satisfatórios oriundos de trabalhos geofísicos anteriores (ALCALDE et al., 2018) e (LEANDRO, 2017), sugerem a necessidade da realização de estudos geofísicos e geológicos em Escala aproximada de 1:5.000.

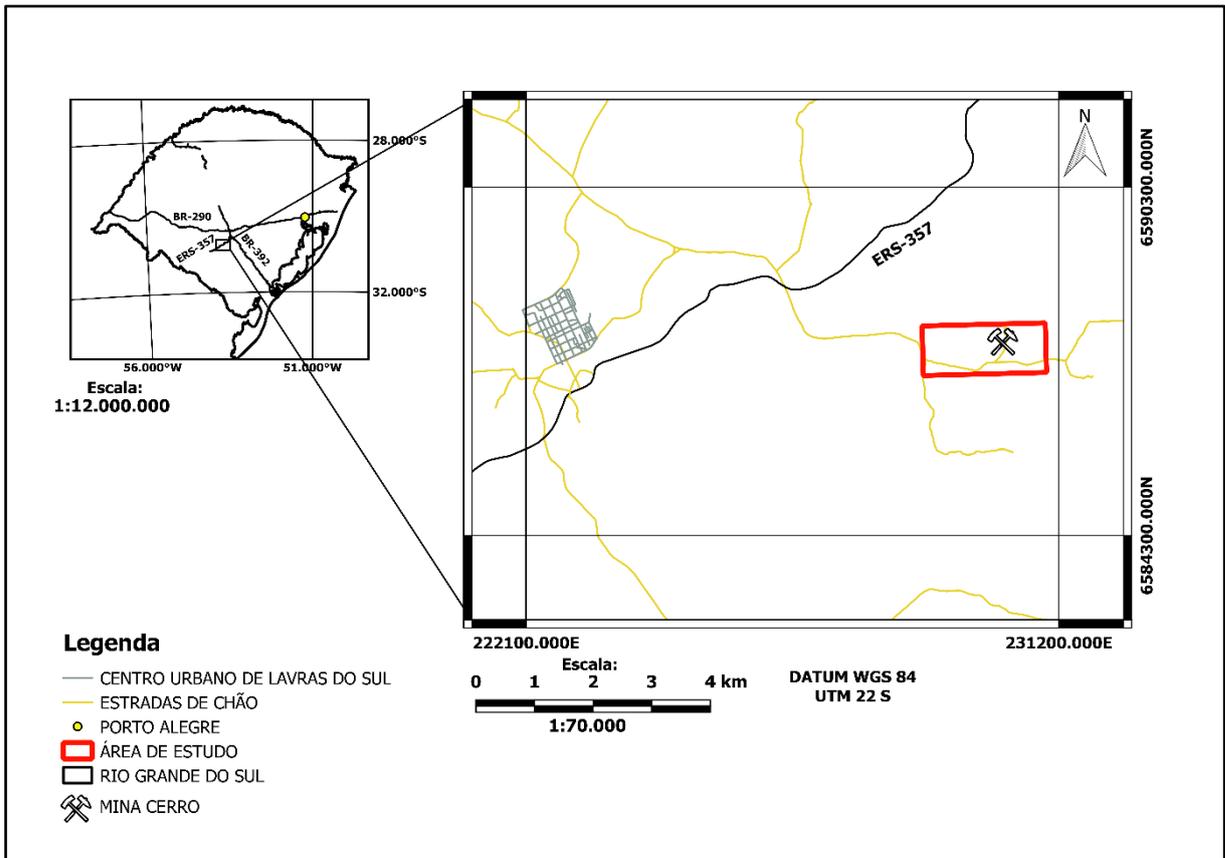
### **4 ÁREA DE ESTUDO**

O município de Lavras do Sul está localizado à 322 Km da capital Porto Alegre, saindo da capital pelo acesso à rodovia BR-290 e seguindo por cerca de 250 km nesta rodovia, haverá um acesso para a rodovia BR-390, prosseguindo por cerca de 25 Km

e chegando no município de Caçapava do Sul segue-se pela rodovia estadual ERS-357 até o município de Lavras do Sul.

A área da pesquisa está localizada cerca de 7 km ao leste do centro da cidade de lavras do Sul (Figura 1) e delimita-se pelas coordenadas geográficas: Longitudes: 53, 81200 W - 53,83400 W e as Latitudes: 30,81100 S - 30,81870 S. Atualmente a detenção da licença de pesquisa mineral da Mina Cerro Rico pertence a empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: autor, 2019. *Shapefiles* obtidos na base de dados DNIT.

## 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.

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.

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:

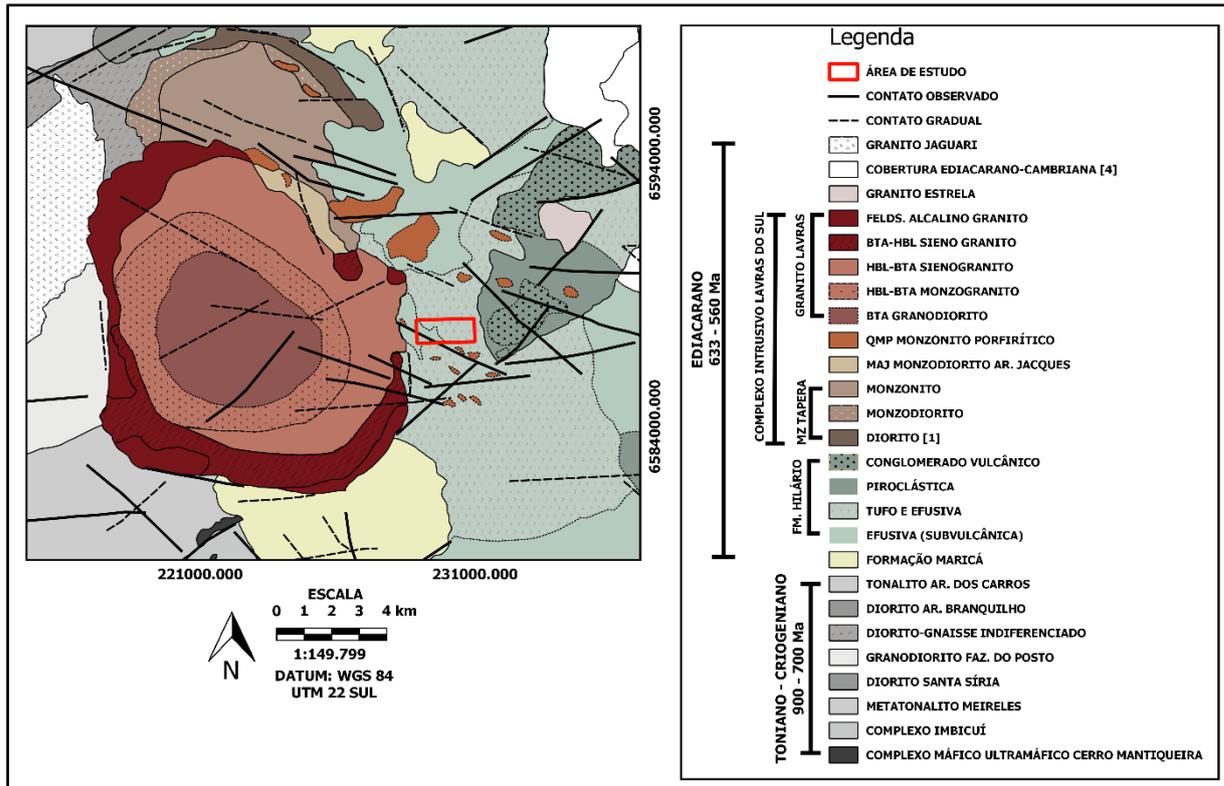
- i. deposição dos sedimentos da Fm. Maricá sobre o embasamento constituído de gnaisses e metagranitóides, gerando uma bacia de retroarco da Orogênese Brasileira (CHEMALE., 2000);
- ii. ocorrência de uma instabilidade tectônica no Neoproterozóico (últimos estágios da Orogenia Brasileira), associada a 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.

Bongioiolo (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.

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 (Figura 2) que cortam as rochas da Fm. Hilário apresentam notadamente a influência de eventos hidrotermais, demonstrando a influência de eventos tectônicos e magmáticos concomitantemente e posteriores à formação das encaixantes do Hilário.

Figura 2 - Mapa geológico do Complexo Intrusivo de Lavras do Sul



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

## 5.2 Geologia local

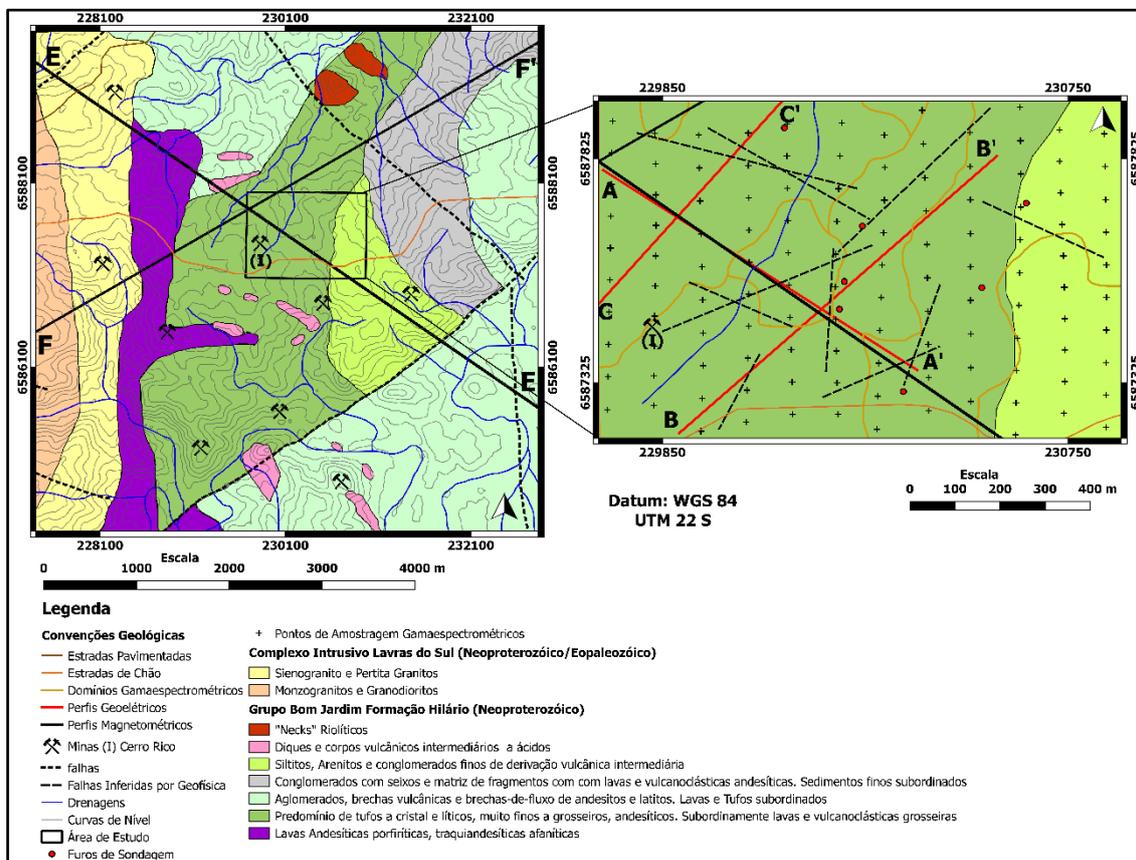
Na área correspondente a Mina Cerro Rico, são encontradas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas com algumas porções contendo material sedimentar como brechas. Estas rochas correspondem a Fm. Hilário e são descritas como piroclásticas, tufos, efusivas (subvulcânicas) e conglomerados vulcânicos (GASTAL 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).

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 (Figura 3) correspondem as porções vulcânicas (genericamente basaltos e andesitos) e piroclásticas (tufos, lapili tufos e brechas) (JANIKIAN, 2004).

Figura 3 - Mapa geológico simplificado da área da Mina Cerro Rico integrado com pontos de amostragem aerogeofísicos, falhas inferidas por geofísica, perfis geofísicos, domínios litogeofísicos e furos de sondagem



Fonte: autor (2019), modificado de Minerar (1998).

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

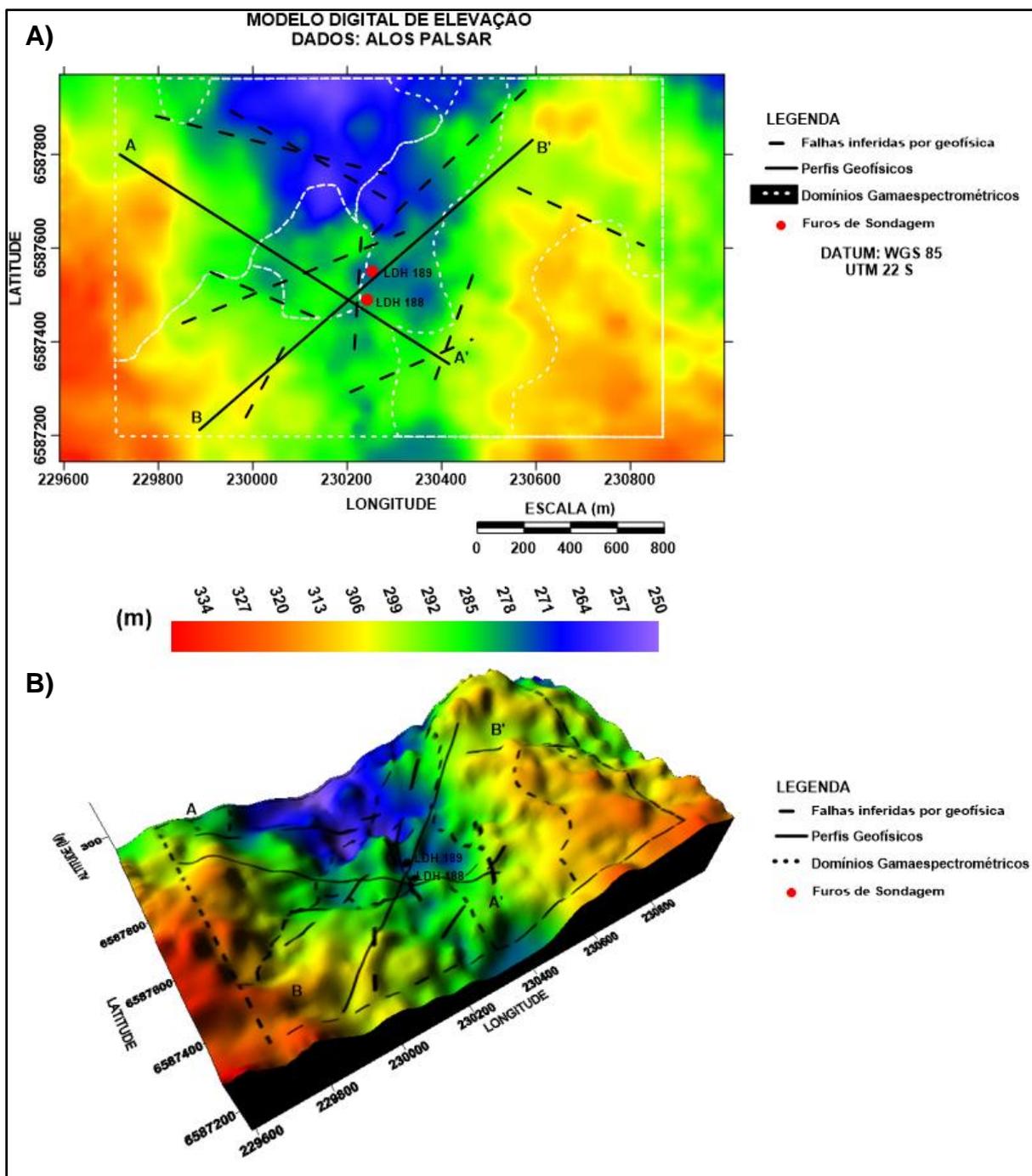
stocks de quartzo monzonito porfirítico e pelo granito peralcalino Estrela (GASTAL et al., 2015).

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 Complexo Intrusivo Lavras do Sul (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.

### **5.2.1 Modelo Digital de Elevação do Terreno**

A figura 4 (a) apresenta o modelo digital de elevação de terreno (MDE). O modelo foi confeccionado a partir dos dados do satélite *ALOS PALSAR*, que possui uma resolução espacial em superfície de 12.5 metros. A figura 4 (b) ilustra o MDE da área de estudo com visualização 3D, é possível identificar que os domínios gamaespectrométricos definidos por Alcalde et al., (2018) podem ser correlacionados de alguma maneira com o comportamento do relevo topográfico.

Figura 4 - MDE integrado com falhas inferidas por geofísica, perfis geofísicos, domínios gamaespectrométrico e furos de sondagem.



Fonte: Dados topográficos obtidos do projeto ALOS PALSAR, autor, 2019.

### **5.3 Sistema hidrotermal magmático**

Em um sistema hidrotermal magmático, a energia necessária para formação de um depósito mineral é essencialmente a energia térmica, oriunda da intrusão magmática (BIONDI 2003).

Em profundidade quando a pressão hidrostática supera a litostática a intrusão magmática libera fluido aquoso. Este fenômeno é denominado primeira ebulição. Não é comum que o fluido aquoso que sai do magma na primeira ebulição forme sistemas hidrotermais importantes e de interesse econômico. Grande parte dos sistemas hidrotermais de interesse econômico são formados por fluidos liberados durante a segunda ebulição, que ocorre em profundidades entre 1 e 2 km, como consequência da separação de fluidos aquosos da fusão silicatada, que foi causada pela cristalização dos minerais. Este fluido aquoso deixa a intrusão na forma supercrítica, a temperaturas superiores a 500°C. Estes fluidos são formados basicamente por derivados de água juvenil magmática, no qual sua composição química e quantidades de sais dissolvidos dependem do tipo do magma e da quantidade de encaixante que a intrusão possa ter assimilado (BIONDI 2003).

Dependendo das condições em que o processo ocorre o sistema hidrotermal se desenvolverá mais, ou menos completamente. Quando o desenvolvimento do sistema é completo, haverá, precipitação de metais e assim será gerado um corpo mineralizado, se o fluido existente no sistema for de alguma forma desestabilizado por algum fenômeno físico e/ou químico (armadilha). Quando a armadilha não existir o fluido irá se dispersar no meio, sem que ocorra formação do depósito mineral. Caso a armadilha exista, os elementos químicos que compõe o minério irão precipitar e junto com eles irá ocorrer a reação das fases líquida e vapor residuais na rocha encaixante, formando alterações hidrotermais associadas a mineralizações (BIONDI 2003).

#### **5.3.1 Depósitos de Minérios epitermais de alta sulfetação**

Formado em profundidades mais rasas, depósitos minerais de alta sulfetação possuem características que indicam envolvimento de componentes magmáticas em sua formação. Durante o início de sua formação estes depósitos são caracterizados por extensas lixiviações da rocha hospedeira por fluídos com PH alto (<2), e composição similar ao dos vapores de magma misturados com águas meteóricas. A lixiviação cria poros com resíduos de sílica que podem, conseqüentemente, hospedar depósitos de minérios de Au (ouro), Cu (cobre) e Sulfetos de Ferro (HEDENQUIST & LOWENSTERN., 1994).

Inclusões de fluidos em depósitos minerais, relacionados a minérios de cobre (Cu) e quartzo, indicam que o fluido de mineralização pode possuir uma salinidade baixa em zonas mais rasas, e alta salinidade em maiores profundidades. Esta separação de líquidos de baixa salinidade associados com minérios de alta sulfetação, sobre líquidos de alta salinidade em profundidade, é diferente das observadas em depósitos profundos de Cu, onde as soluções de alta salinidade coexistem com as soluções de baixa salinidade. Esta separação pode ser causada pela alta densidade da salmoura, que pode não ascender facilmente a profundidades mais rasas. Esta correlação entre Cu e Au em ambientes relativamente oxidados de alta sulfetação e ambientes pórfiros, sugerem que ambos os minerais podem ser transportados em condições similares mesmo que em zonas de mineralizações de alta sulfetação epitermal está relacionada a baixas temperaturas e líquidos menos salinos (HEDENQUIST & LOWENSTERN, 1994).

## **6 Revisão Bibliográfica**

Nesta seção faz-se uma breve revisão sobre o uso dos métodos da polarização induzida (IP), resistividade, gamaespectrometria e magnetometria na prospecção de mineralizações auríferas e polimetálicos.

## 6.1 Métodos Elétricos

Rêgo (2001), realizou levantamentos de polarização induzida espectral, com arranjo dipolo-dipolo, na prospecção de alvos sulfetados, responsáveis por concentrações auríferas associadas com crosta lateríticas e veios de quartzo no depósito do Alvo Breves, Mina do Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Pará. Nestes levantamentos foram identificadas anomalias de cargabilidade, sugerindo a presença de sulfetos disseminados em profundidade, o que possibilitou a locação de furos de sonda. Após a realização da sondagem constatou-se que os furos interceptaram expressivos intervalos com sulfetos disseminados, preenchendo fraturas em padrão stockwork, mineralizados em Cu (cobre), Au (ouro), Ag (prata), Sn (estanho), Mo (molibdênio) e Bi (bismuto), atestando a eficiência do método na prospecção de minerais metálicos.

Douglas et al (1997) em um estudo sobre depósito de cobre e ouro em um stock granítico hidrotermalizado, situado no Monte Miligan, Canadá, obtiveram altos valores de cargabilidade, com o arranjo polo-dipolo, coincidentes com a maior concentração de ouro e cobre do campo. Esses autores tentaram correlacionar dados de susceptibilidade magnética com os dados de IP. No geral a resposta de cargabilidade se mostrou fiel aos dados geológicos, enquanto os dados de susceptibilidade apresentaram-se restritos a alta concentração de óxidos presentes na área.

White (2001) apresenta estudos com os métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida, em um depósito de cobre e ouro pórfiro, localizado no sul da China. O minério está contido em rochas vulcânicas básicas a intermediárias e vulcanoclásticas, assentadas sobre calcários e sotopostos por quartzitos, arenitos e andesitos. Os resultados possibilitaram a caracterização de zonas de alta cargabilidade concomitantes a zonas de baixa resistividade, associadas a concentrações minerais comprovadas por meio de sondagem.

Calachibete (2016) utilizou o método IP na área conhecida como Baixada Cuiabana, Mato Grosso, em depósitos onde as mineralizações ocorrem em veios de quartzo e disseminados nas rochas encaixantes, ou seja, mineralização do tipo boxwork. A ocorrência de minério de chumbo associado a ouro e outros elementos em algumas feições de cisalhamento, provocaram o equilíbrio de cargas, reduzindo o

sinal de cargabilidade entre 3 e 5 mV/V. Em *trends* onde os sulfetos indicativos de ouro e pirita e arsenopirita ocorrem isolados, o sinal de cargabilidade aumenta consideravelmente, em torno de 20 mV/V.

Jiang et al (2009) realizaram pesquisas geológicas-geofísicas em um dos maiores depósitos de ouro no cinturão de Jidong, China. Esses autores visualizaram um contraste de propriedade elétrica entre os corpos geológicos. Os extratos rochosos indicaram baixa resistividade e alta polarização, assim, para aquela região, zonas anômalas são coincidentes com as principais estruturas e com granitos pórfiros. Posteriormente, por meio de sondagens, constatou-se uma significativa mineralização aurífera.

Shin e Shin (2016) analisaram a resposta de IP, no domínio do tempo, e as características petrológicas de depósitos do tipo skarn. Os valores de cargabilidade das rochas mineralizadas foram superiores aos das rochas não metálicas (carbonatos). Esses autores verificaram que as características de IP nas rochas mineralizadas são dependentes das características dos minerais de minério. Em rochas não mineralizadas houve pouca diferença de cargabilidade, enquanto que a variação nos seus valores de tempo de decaimento da polarização foi influenciado pelo teor de feldspato (sericitização) e do tamanho dos grãos de calcita (recristalização). Dessa forma, a resposta do método em rochas não mineralizadas está diretamente relacionada com o grau de alteração hidrotermal.

## 6.2 Método Gamaespectrométrico

Neto e Ferreira (2003) utilizaram a integração de dados exploratórios de fontes diversas, com enfoque na gamaespectrometria prospectiva para ouro, na região da Folha Botuverá – SC. O contexto geológico é marcado por rochas metamórficas do complexo Brusque e corpos granitoides intrusivos conhecidos como Valsungana e Guabiruba. A área encerra as mais importantes ocorrências de ouro da região leste catarinense, com destaque aos filões de quartzo presentes em diversas regiões da área de estudo. A partir dos dados gamaespectrométricos foram geradas imagens de K, eTh e eU e de suas razões (eTh/K, eU/eTh e eU/K), Fator F, além de imagens dos

parâmetros Kd e Ud. Estes parâmetros foram avaliados através de perfis o que permitiu discriminar as principais unidades geológicas e proceder a comparação entre os diversos maciços granitoides em termos do grau de alteração hidrotermal e do potencial para ouro. Estes resultados possibilitaram três novos alvos exploratórios para ouro na Folha Botuverá.

Menezes et al (2006) utilizou dados aerogeofísicos em conjunto com técnicas de processamento digital de imagens com a finalidade de realizar uma prospecção regional para ouro no Grupo Paranoá. O modelo prospectivo utilizado para definição de alvos potenciais envolve a associação das mineralizações auríferas a veios de quartzo sulfetados em zonas hidrotermais. A identificação de possíveis zonas hidrotermais na região estudada deu-se através da utilização de técnicas de análise de principais componentes em imagens TM-landsat 5 em conjunto com a interpretação dos dados aerogeofísicos, em especial o mapa ternário. Foram selecionados os alvos que preenchem os pré-requisitos estabelecidos no modelo prospectivo. Alguns dos alvos selecionados nesta pesquisa correspondem a garimpos de ouro conhecidos na região.

Barbuena (2012) utilizou dados geofísicos e de sensoriamento remoto para ampliação do conhecimento geológico da região conhecida como Província Aurífera de Alta Floresta, situada na porção centro-sul do Cráton Amazônico. Para esta pesquisa o autor utilizou dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos assim como dados terrestres. A comparação dos dados aéreos com os dados terrestres mostrou que apesar da diferença considerável de escala e de amostragem, os padrões são mantidos em ambos os tipos de levantamento. Os dados terrestres proporcionaram a produção de modelos prospectivos para depósitos de ouro baseados em técnicas de Análise por Principais Componentes e lógica de Fuzzy. As anomalias gamaespectrométricas extraídas dos dados geofísicos foram comparadas com as características espectrais da vegetação e de solos/rochas extraídas do processamento de dados ASTER. O estudo demonstrou que existe uma forte correlação espacial entre zonas ricas em potássio e anomalias espectrais de vegetação, indicando que assinaturas geofísicas e geobotânicas podem ser utilizadas de maneira a complementar na vetorização de depósitos de ouro na Província Aurífera de Alta Floresta.

Após revisarem diversos trabalhos e estudarem as relações entre os radionuclídeos em diferentes ambientes mineralizados, Dickson e Scott (1997)

constatarem que as assinaturas gamaespectrométricas em depósitos de ouro são muito variáveis, mas, pode-se observar que o enriquecimento de potássio geralmente acompanha estas mineralizações, podendo ser usado como guia para a localização indireta de concentrações auríferas. As mineralizações ocorrem geralmente em veios de quartzo, e não podem ser identificadas através do método da gamaespectrometria, porém, as rochas encaixantes hidrotermalizadas com as mineralizações de quartzo podem ser identificadas através de halos potássicos. Uma revisão anterior feita por Hoover e Pierce (1990), apontou a importância do potássio nos processos hidrotermais em áreas mineralizadas. Estes processos são marcados pela grande interação fluido-rocha, com lixiviação de alguns elementos e concentração de outros em um sistema físico-químico aberto com reações de troca, que implicam em modificações mineralógicas, texturais e químicas nas rochas afetadas.

Efimov (1978 apud Gnojek e Prichystal 1985) propôs uma série de relações entre os radioisótopos, destacando a expressão  $F = K(eU/eTh)$ , denominada Fator F. Esta expressão permite ressaltar o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório e assim indicar áreas com alteração hidrotermal associadas a mineralizações. Os teores dos radioelementos podem ser suscetíveis a efeitos ambientais, pedogenéticos, geomorfológicos, geoquímicos e variações litológicas (DICKSON E SCOTT 1997; WILFORD et al 1997). Segundo Saunders et al (1987), o tório que apresenta menor mobilidade geoquímica entre o potássio e o urânio, pode ser usado como controle litológico para definir valores ideais de potássio e urânio de cada amostra, para futuramente suprimir tais efeitos. Assim Saunders et al (1987) propuseram uma normalização do potássio e do urânio pelo tório que pode ser calculada através das equações (18,19,20 e 21):

$$K_i = \left( \frac{\text{média de } K_s}{\text{média de } Th_s} \right) Th_s \quad (18)$$

$$U_i = \left( \frac{\text{média de } U_s}{\text{média de } Th_s} \right) Th_s \quad (19)$$

$$K_d = \frac{(K_s - K_i)}{K_i} \quad (20)$$

$$U_d = \frac{(U_s - U_i)}{U_i} \quad (21)$$

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

Pires (1995) empregou pela primeira vez este método na prospecção mineral, identificando com sucesso zonas de alteração hidrotermal em Crixás-Guarinos, Goiás, através da utilização do parâmetro do Kd. Após esta experiência novas aplicações destas técnicas juntamente com o Fator F, foram relatados por Ferreira et al (1998), Blum (1999), Carvalho (1999), Quadros (2000), Biondi et al (2001), Cainzos (2001), Fornazzari et al (2001), dentre outros.

### **6.3 Método Magnetométrico**

Carrino et al (2007) utilizou dados gamaespectrométricos e magnetométricos na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás, como ferramentas chave para mapeamentos litológicos e estruturais proporcionando discussões sobre assinaturas geofísicas de litotipos específicos e estratégias para realce de alvos favoráveis a exploração de depósitos de Au-Pd-Pt (ouro, paládio e platina), Cu-Mo-Au e Fe (cobre, molibdênio, ouro e ferro).

Carneiro et al (2006) realizou um estudo na parte sudeste do Cráton Amazônico, estado do Pará. Parte significativa das ocorrências minerais da referida província está vinculada geologicamente a estruturas que compõe dois sistemas de falhas. O estudo apresentou resultados obtidos da interpretação realizada a partir da fusão de dados magnetométricos e altimétricos, como ferramenta auxiliar na compreensão do quadro estrutural relacionado à Falha Carajás. Os resultados permitiram estabelecer a relação das feições interpretadas a partir da imagem de fusão com os principais domínios geomorfológicos e magnéticos reconhecidos na região. Estes resultados demonstram o potencial de aplicação desses métodos na análise de outras áreas com características metalogenéticas similares às da Amazônia, como forma de facilitar e orientar programas regionais de exploração mineral.

Ferreira (2014) utilizou dados de propriedades físicas de rocha como susceptibilidade magnética e emissão de raios gama provenientes dos radioelementos potássio (K), eTh (Tório) e eU (urânio), para caracterizar formações ferríferas bandadas e minério de ferro aliados com dados multifonte que incluem furos de sondagem e produtos derivados de dados aerogeofísicos de alta resolução (magnetometria e gamaespectrometria). O estudo foi realizado no depósito de minério de ferro N4WS, Serra Norte, Província Mineral de Carajás. Os produtos derivados dos dados aerogeofísicos que recobrem o denominado Bloco Serra Norte foram previamente interpretados para melhor entendimento da variação das propriedades físicas in situ. Os corpos mineralizados com alto teor de ferro e ricos em hematita apresentaram baixo gradiente magnético, muitas vezes não sendo mapeados pela magnetometria. As feições magnéticas observadas estão associadas, de forma geral, ao protominério jaspilítico. Os resultados das medições das propriedades físicas foram, segundo o autor, bastante satisfatórios, sendo possível observar clara diferenciação dos litotipos estudados através da susceptibilidade magnética. Os resultados indicaram a separação de dois tipos de jaspilitos e zonas anômalas dentro do minério de ferro.

#### **6.4 Revisão de trabalhos geofísicos anteriores na área de estudo**

O processamento dos dados aerogamaespectrométricos realizado por Alcalde et al., (2018) seguiu uma metodologia convencional para a prospecção mineral, onde foram confeccionados mapas de imagens dos valores anômalos das concentrações dos radioelementos, destacando os mais relevantes: mapa do Fator F, ( $F = K(eU/eTh)$ ), mapa do potássio anômalo (Kd), mapa do urânio anômalo (Ud) e mapa ternário de composição colorida RGB dos parâmetros Kd, Ud e Fator F.

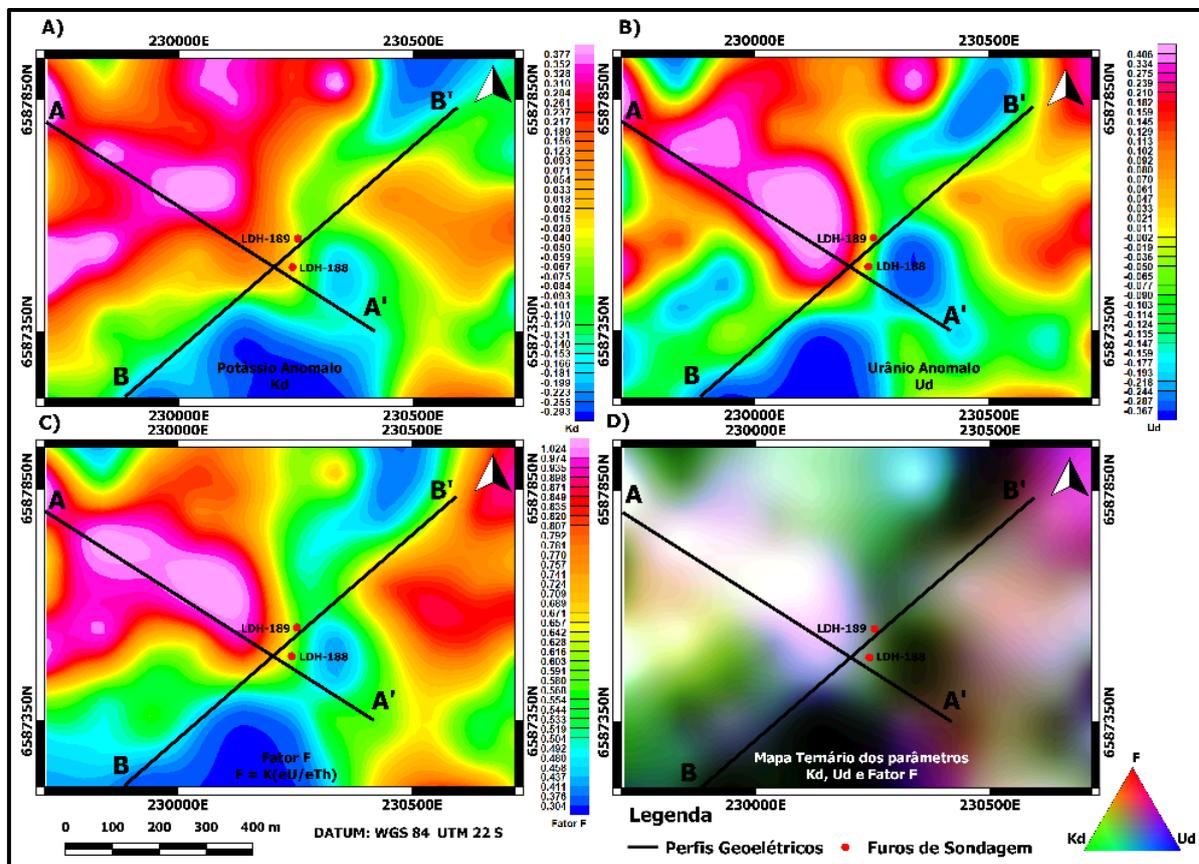
Os dados de Polarização Induzida (IP) foram adquiridos com a técnica de Caminhamento Elétrico (Arranjo Dipolo-Dipolo) e com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (Arranjo Wenner), ao longo de dois perfis geofísicos regionais, segundo duas direções preferenciais: Perfil B - B' (SW – NE), e Perfil A - A' (NW – SE). Como resultado da integração e interpretação dos dados gamaespectrométricos, dados de resistividade e de polarização induzida foram confeccionados dois modelos

geofísicos-geológicos 2D, que relacionam o comportamento das anomalias do Fator F, do potássio anômalo (Kd) e do urânio anômalo (Ud), com as anomalias de IP (ALCALDE et al., 2018).

#### **6.4.1 Resultados gráficos de trabalhos geofísicos anteriores na área de estudo**

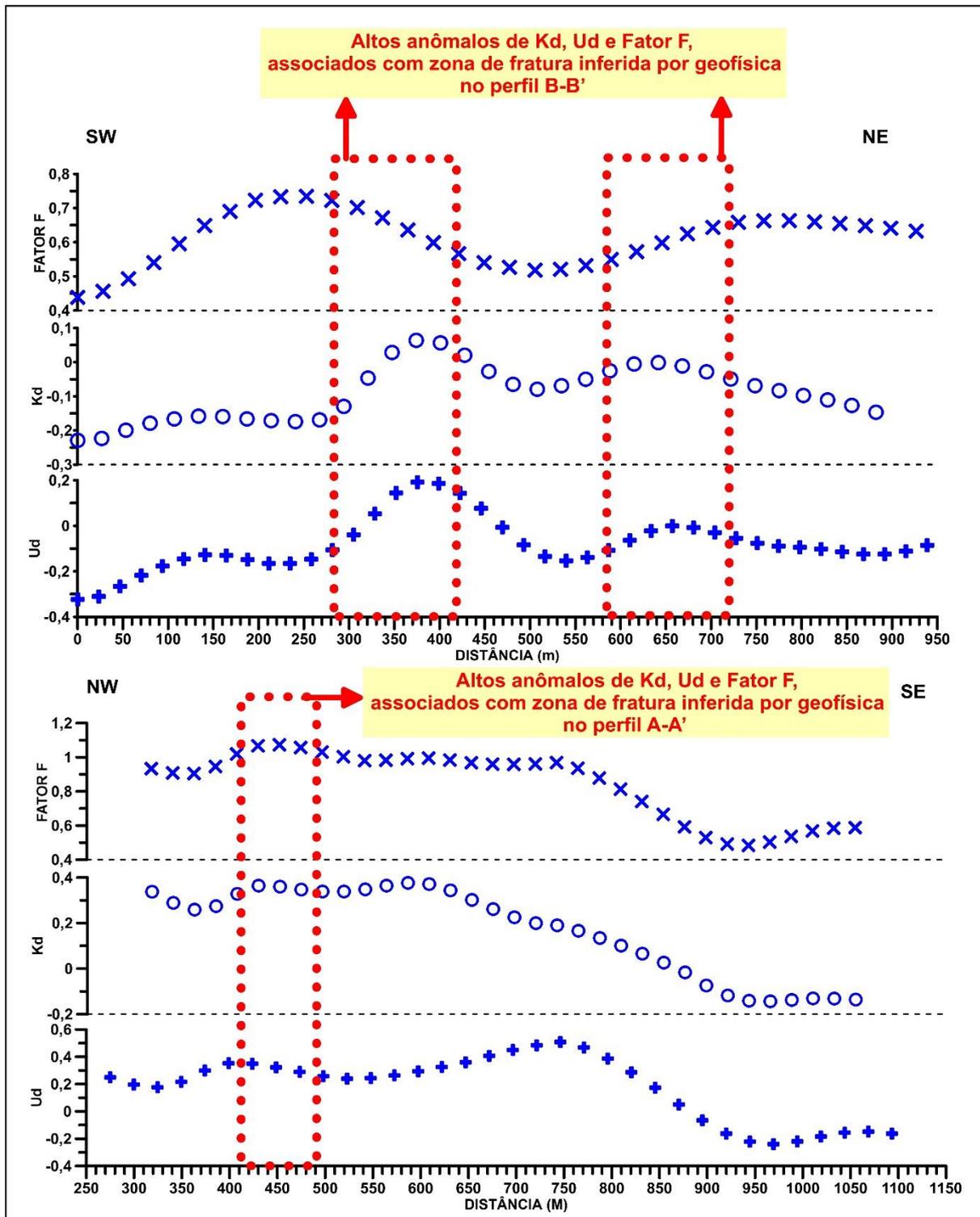
Na porção central da área de estudo conforme os gráficos das anomalias de Ud, Kd e Fator F (Figura 5); para o perfil geofísico A - A' (NW-SE), observa-se um patamar significativo no comportamento das anomalias de Fator F, Potássio anômalo e Urânio anômalo, isto é: intervalo de valores para o Fator F de 1,0 a 1,04; intervalo de valores para o Kd de 0,44 a 0,46 e intervalo de valores para o Ud de 0,52 a 0,54. Para o perfil geofísico B - B' (SW-NE), observa-se um patamar de menor amplitude das anomalias, comparado-o com o perfil A - A', isto é: intervalo de valores para o Fator F de 0,70 a 0,78; intervalo de valores para o Kd de aproximadamente 0,1 e intervalo de valores para o Ud de 0,1 a 0,2. Este comportamento se deve ao fato do perfil geofísico B - B' (SW - NE) estar posicionado na borda sudeste das anomalias de Fator F, Kd e Ud (Figura 6). O posicionamento destes perfis em campo obedeceu a um critério de interpretação geofísico-geológico, por estarem próximos aos furos de sondagem LDH-188 e LDH-189 (Figura 7 e 8) de maneira a correlacionar as litologias presentes no furo com os modelos geológico-geofísicos propostos para os perfis A - A' e B - B'. Conforme se observa na Figura 5 no mapa ternário de composição colorida RGB dos parâmetros Kd, Ud e Fator F (Figura 5D), sugere-se na presença de anomalias caracterizadas pela cor branca, altos valores de Fator F, Kd e Ud associados a processos de hidrotermalismo, os quais se caracterizam pelo enriquecimento destes dois radioelementos (ALCALDE et al., 2018).

Figura 5 - Esquema gráfico das anomalias de (A) Kd, (B) Ud, (C) Fator F e (D) Mapa ternário do hidrotermalismo em composição colorida RGB dos parâmetros Fator F, Kd e Ud respectivamente nos perfis geofísicos A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE).



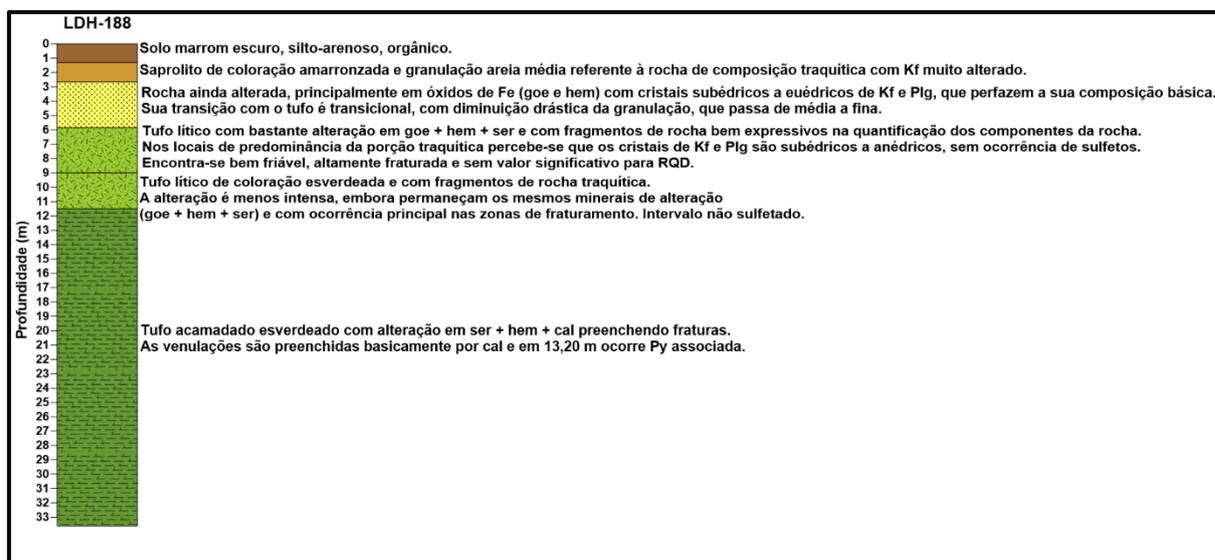
Fonte: Alcalde, G. et al., 2018.

Figura 6 - Esquema gráfico das anomalias de Ud, Kd e Fator F nos perfis geofísicos A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE).



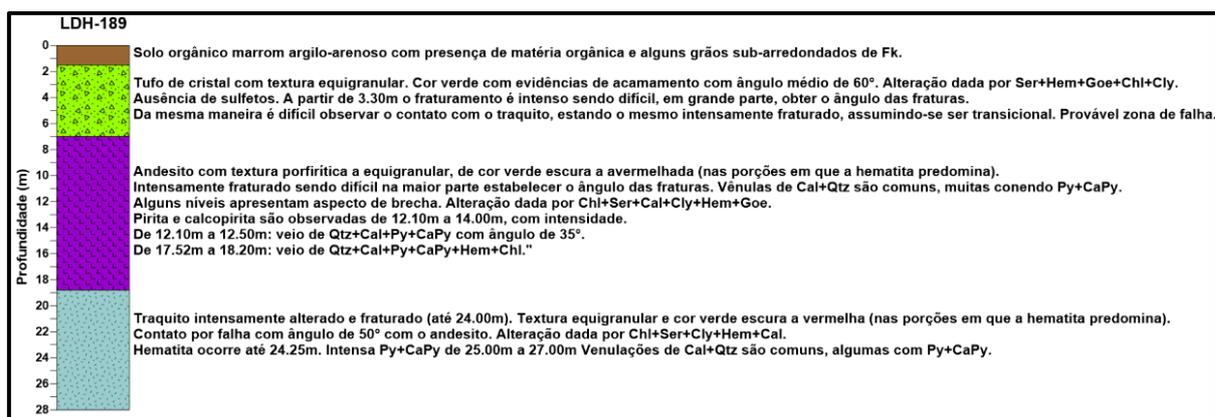
Fonte: Alcalde, G. et al., 2018.

Figura 7 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-188



Fonte: Amarillo, 2007.

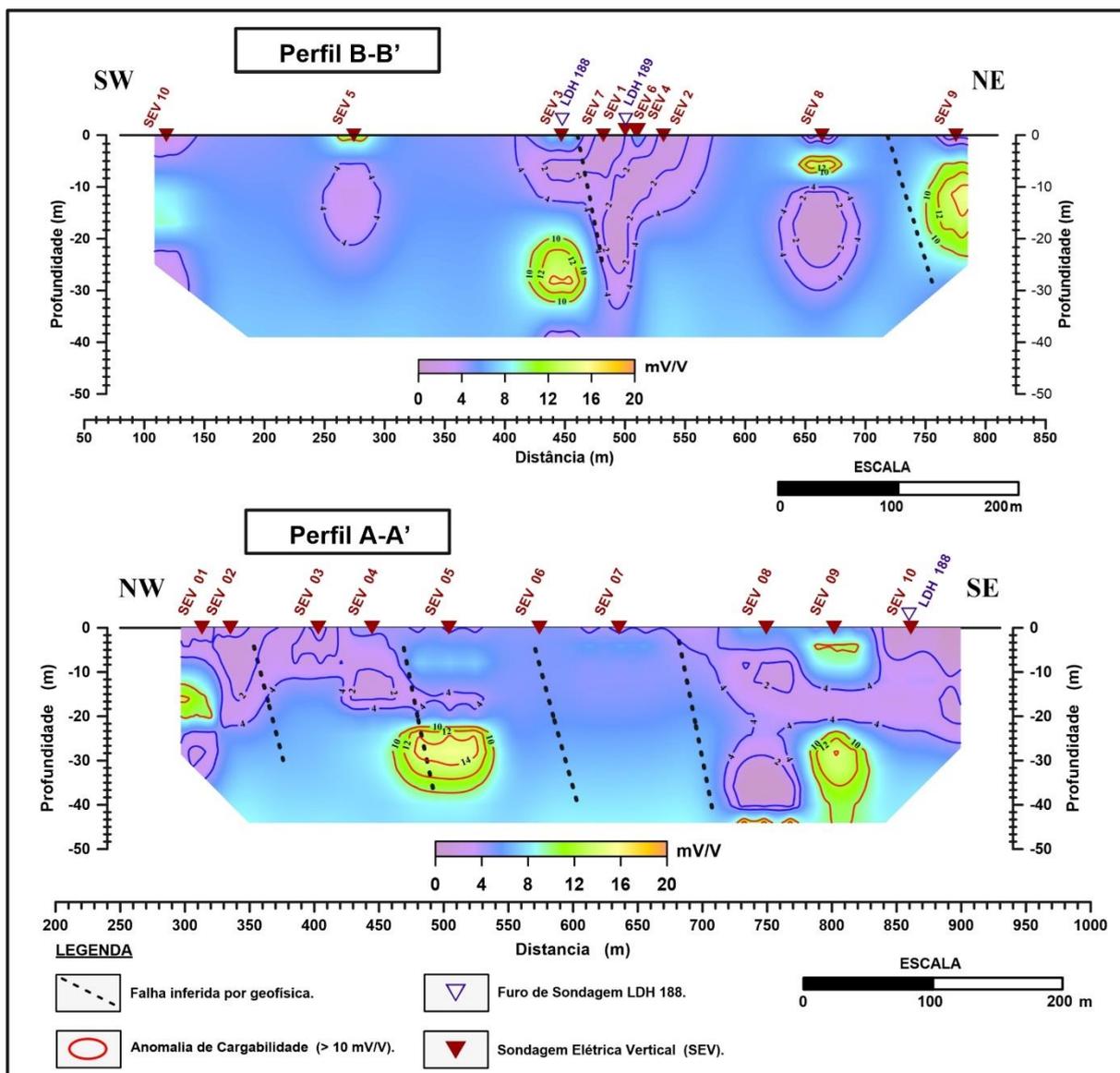
Figura 8 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-189.



Fonte: Amarillo, 2007.

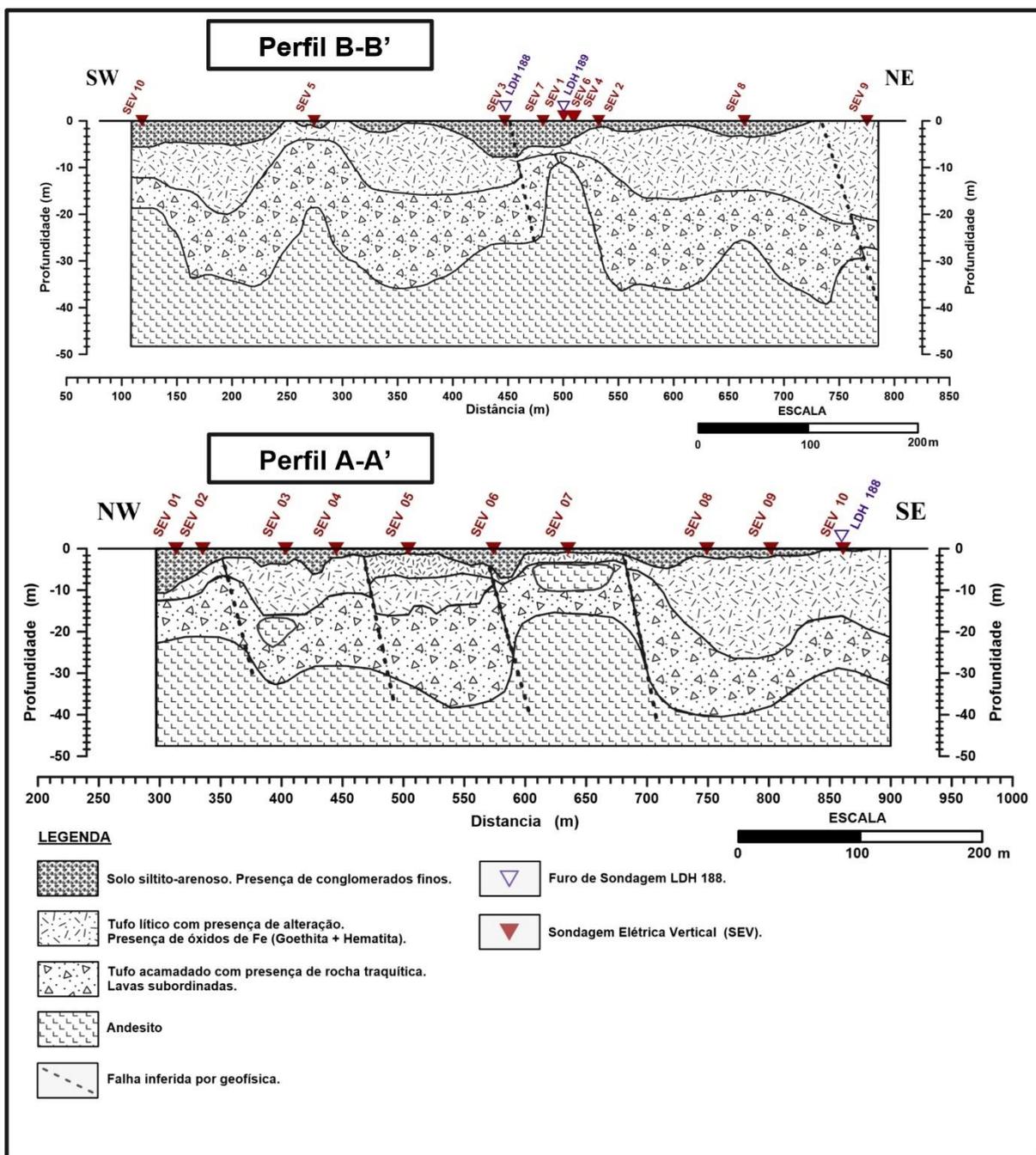
Nos modelos 2D de dados de IP para os perfis A-A' e B-B' observam-se anomalias de cargabilidade com valores de 10 a 14 mV/V (Figura 9), em profundidades aproximadas de 25 - 30 metros, o que sugere que estejam associadas a presença de mineralização metálica, isto é, presença de óxidos metálicos, vinculada com zonas de falhas e/ou fraturas que apresentam continuidade em profundidade, podendo estar afetando o relevo do topo andesítico (Figura 10).

Figura 9 - Modelo 2D de cargabilidade para os perfis A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE).



Fonte: Alcalde, G. et al., 2018.

Figura 10 - Modelos geológicos 2D para os perfis A - A' (NW-SE) e B - B' (SW-NE).



Fonte: Alcalde, G. et al., 2018.

Após análise destes resultados Alcalde et al., (2018) observou que os altos valores de Fator F, Kd, e do Ud, para os dois perfis sugerem um enriquecimento de potássio e urânio nestes setores, podendo estar associados a provável presença de processos hidrotermais. O enriquecimento dos teores do K e do U, encontram-se diretamente associados aos processos de sericitização, cloritização e potassificação, que acompanham o hidrotermalismo na gênese dos depósitos metálicos, estes processos podem estar sendo favorecidos pela presença de água em zonas de fraturas e/ou falhas, inferidas pela geofísica. Conforme os modelos geológicos 2D para o Perfil A - A' e Perfil B - B', para a área da Mina Cerro Rico, pode-se inferir segundo critérios interpretativos, que o topo do relevo andesítico se encontra a uma profundidade de aproximadamente 25 a 35 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 tufos com lavas subordinadas, caracterizam um intervalo de profundidades entre 5 a 25 m.

É notório ressaltar que a interpretação dos modelos geológicos (Perfil A - A' e Perfil B - B') foi baseada na correlação com a descrição das litologias dos furos de sondagem LDH-188 e LDH-189. A provável presença de fraturas preenchidas por veios de quartzo, com possível presença de mineralização metálica, caracteriza alguns setores da área com anomalias de cargabilidade (IP) com valores em torno de 12 - 14 mv/V, resultando em alvos potenciais atrativos, para dar continuidade e orientar futuras pesquisas relacionadas à prospecção aurífera na Mina Cerro Rico (ALCALDE et al., (2018).

## **7 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS**

### **7.1 Susceptibilidade magnética**

Susceptibilidade magnética é uma propriedade física inerente aos materiais que diz respeito a capacidade que tem um material em magnetizar-se sob a ação de uma estimulação magnética. A tabela 1 apresenta os valores de susceptibilidade

magnética de alguns minerais comuns e a tabela 2 apresenta os valores de susceptibilidade magnética de algumas rochas comuns.

Tabela 1 - Susceptibilidade magnética de minerais

<b>Minerais</b>	<b>Susceptibilidade Magnética (<math>k</math>)<math>\times 10^{-3}</math> no S.I média</b>
<b>Grafite</b>	<b>0,1</b>
<b>Quartzo</b>	<b>-0,01</b>
<b>Argila</b>	<b>0,2</b>
<b>Carvão</b>	<b>0,02</b>
<b>Calcopirita</b>	<b>0,4</b>
<b>Cassiterita</b>	<b>0,9</b>
<b>Hematita</b>	<b>6,5</b>
<b>Cromita</b>	<b>7</b>
<b>Pirita</b>	<b>1,5</b>
<b>Pirrotita</b>	<b>1500</b>
<b>Ilmenita</b>	<b>1800</b>
<b>Magnetita</b>	<b>6000</b>

Fonte: TELFORD et al., 1990.

Tabela 2 - Susceptibilidade magnética de rochas

Rochas		Susceptibilidade Magnética ( $k$ ) $\times 10^{-3}$ no S.I	
		Variação	Média
Sedimentares	Dolomita	0-0,9	0,1
	Calcário	0-3	0,3
	Arenito	0-20	0,4
	Folhelho	0,01-15	0,6
Metamórficas	Anfibolito	-	0,7
	Xisto	0,3-3	1,4
	Filito	-	1,5
	Gnaisse	0,1-25	2
	Serpentino	3-17	1,5
	Quartzito	0-35	4
	Ardósia	0-50	6
Ígneas	Granito	0,2-35	2,5
	Riolito	0-50	1,7
	Olivina- Diabásio	1-160	2,5
	Dolerito	0,3-200	17
	Diabásio	1-90	25
	Gabro	0,2-175	60
	Basalto	0,6-120	70
	Diorito		70

Fonte: Extraído de TELFORD

## 7.2 Propriedades magnéticas das rochas

As propriedades magnéticas das rochas são dadas pela soma das propriedades magnéticas dos minerais magnéticos que a rocha contém. Estas propriedades são

muito variáveis dentro de um tipo de rocha, dependendo da composição química, e da forma de cristalização, além das deformações de sua estrutura causadas durante sua formação.

Existem diversos grupos de materiais magnéticos, e nestes materiais o comportamento da susceptibilidade magnética ( $k$ ) é completamente diferente. Os três principais grupos de materiais com diferentes valores de  $k$  são: (a) diamagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) ferromagnéticos.

As substâncias diamagnéticas quando submetidas a um campo magnético induzido adquirem magnetização de intensidade fraca e sentido contrário ao do campo. Conseqüentemente, minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa, já que a fraca intensidade da magnetização provém do pequeno valor de susceptibilidade dessas substâncias, enquanto que o sentido contrário ao campo possibilita que se atribua um sinal negativo a susceptibilidade.

A susceptibilidade dos materiais paramagnéticos é positiva e cerca de,  $10^{-4}$ , isto é, também é muito pequena. Estes adquirem uma magnetização induzida paralela ao campo magnético aplicado.

Os ferromagnéticos são geralmente caracterizados por valores de susceptibilidade elevados e positivos, e são capazes de manter a magnetização na ausência de dispositivos externos que gerem campo magnético. A susceptibilidade das rochas é definida principalmente pela presença de materiais ferromagnéticos, tal como magnetita. Podemos observar o conteúdo médio de  $FeO$ -,  $Fe_2O_3$  -, e  $TiO_2$  nas rochas mais comuns na tabela 3.

Tabela 3 - Conteúdo médio  $FeO$ -,  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$  (vol %) de algumas rochas

<b>Tipos de rochas</b>		<b><math>FeO</math></b>	<b><math>Fe_2O_3</math></b>	<b><math>TiO_2</math></b>
<b>Rochas intrusivas</b>	<b>Granito</b>	<b>1,78</b>	<b>1,57</b>	<b>0,39</b>
	<b>Sienito</b>	<b>3,28</b>	<b>2,74</b>	<b>0,67</b>
	<b>Diorito</b>	<b>4,40</b>	<b>3,16</b>	<b>0,84</b>
	<b>Gabro</b>	<b>5,95</b>	<b>2,84</b>	<b>0,97</b>
	<b>Dunito</b>	<b>5,54</b>	<b>1,65</b>	<b>0,48</b>
<b>Rochas extrusivas</b>	<b>Riolito</b>	<b>0,31</b>	<b>2,64</b>	<b>0,38</b>
	<b>Tracito</b>	<b>2,62</b>	<b>2,38</b>	<b>0,57</b>
	<b>Dacito</b>	<b>1,90</b>	<b>3,33</b>	<b>0,77</b>
	<b>Andesito</b>	<b>3,13</b>	<b>5,38</b>	<b>1,36</b>
	<b>Basalto</b>	<b>6,37</b>	<b>1,08</b>	<b>0,25</b>
<b>Rochas sedimentares</b>	<b>Areia</b>	<b>0,30</b>	<b>4,03</b>	<b>0,65</b>
	<b>Xisto</b>	<b>2,46</b>	<b>4,03</b>	<b>0,65</b>
	<b>Calcário</b>	<b>-</b>	<b>0,54</b>	<b>0,06</b>

Fonte: Modificado de Schön, 2004.

### 7.3 Propriedades elétricas das rochas e minerais

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.

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.

## **8 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **8.1 Métodos elétricos**

#### **8.1.1 Método da eletrorresistividade**

No método da resistividade é gerada uma corrente elétrica artificial que através de um par de eletrodos é introduzida na subsuperfície e, assim, é possível medir uma diferença de potencial gerada pela passagem desta corrente. Esta diferença de potencial é afetada pelas propriedades físicas das rochas presentes em subsuperfície (KEAREY et al., 2002). Através desta variação da corrente devido as diferentes propriedades físicas das rochas, é possível determinar diferentes litologias sem a necessidade de sondagens.

A resistência de um material é definida pela lei de Ohm, para um condutor cilíndrico de resistência  $R$ , comprimento  $L$ , e com uma área  $A$ , a resistividade  $\rho$  é definida pela equação 1.

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

No SI (Sistema Internacional) a resistividade é dada em ohm.m.

Para medição da resistividade em subsuperfície é necessário considerar que a corrente não flui como em um condutor cilíndrico, considerando um único eletrodo de corrente na superfície de um meio de resistividade uniforme a corrente irá fluir a partir do eletrodo de forma radial gerando uma superfície esférica.

Desta forma devido a simetria podemos aplicar a equação de Laplace para coordenadas esféricas (TELFORD et al., 1990), assim pode-se determinar a resistividade do meio em subsuperfície através da equação 2.

$$\rho = \frac{2\pi rV}{I} \quad (2)$$

Onde o parâmetro  $\rho$  é a resistividade,  $V$  é o potencial,  $I$  é a corrente elétrica e  $r$  é a distância entre o eletrodo de corrente e onde o potencial é medido.

Grande parte dos arranjos utilizados nos métodos geoeletricos trabalham com dois eletrodos de potencial, assim, quando a distância entre os dois eletrodos de potencial é finita, o potencial em qualquer ponto próximo a superfície será afetado pelos eletrodos de corrente (TELFORD et al., 1990), deste modo a diferença de potencial entre os eletrodos C e D será descrita na equação 3.

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right] \quad (3)$$

Isolando  $\rho$  para obter o parâmetro da resistividade temos a equação 4.

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left[ \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]} \quad (4)$$

### 8.1.2 Método da Polarização induzida

Para ilustrar o fenômeno da Polarização Induzida é necessário considerar um arranjo padrão com quatro eletrodos, como no método da resistividade, e que a corrente que flui pelo circuito seja cortada abruptamente. A tensão medida pelos eletrodos de potencial não cai imediatamente para zero, ela irá decair gradualmente a partir do momento em que o fluxo de corrente é interrompido (TELFORD et al.,

1990). A medição do decaimento da tensão sobre um determinado intervalo de tempo é chamada de IP no domínio do tempo (KEAREY et al., 2002).

Existem dois mecanismos que podem gerar este tipo de fenômeno nas rochas, um deles é a polarização de membrana ou eletrolítica, e o outro mecanismo é a polarização de eletrodo. É válido ressaltar que para este estudo a polarização de eletrodo será o mecanismo gerador do fenômeno de IP predominante, já que esse mecanismo se desenvolve em rochas com a presença de minerais metálicos.

### 8.1.3 Técnica da Sondagem elétrica vertical

Vários tipos de arranjos já foram testados para levantamentos de resistividade, entretanto, apenas alguns estão sendo usados até os dias de hoje (TELFORD et al., 1990). Para a técnica da SEV utilizada neste estudo, será adotado o arranjo Wenner, neste tipo de arranjo os eletrodos são espaçados uniformemente em uma linha ao longo de uma área de interesse.

Ou seja  $r_A = R_B = a$  e  $r_b = R_A = 2a$ , assim a equação (4) pode ser reescrita como:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

Na técnica da SEV as medidas são feitas de forma pontual, ou seja, quanto maior a abertura dos eletrodos maior a profundidade alcançada, segundo Orellana (1972) a profundidade teórica alcançada é de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da abertura de AB. Durante a realização deste trabalho os resultados obtidos com as SEV'S serão utilizados de forma a complementar os resultados de Caminhamento Elétrico, garantindo assim uma maior cobertura do substrato geológico.

### 8.2 Método Gamaespectrométrico

O método radiométrico é amplamente utilizado para o mapeamento geológico porque, através dele é possível identificar as diferentes assinaturas radioativas das

rochas (KEAREY et al., 2002). Os principais elementos de interesse na radiometria são o Urânio ( $U^{238}$ ), Tório ( $Th^{232}$ ) e o Potássio ( $K^{40}$ ), estes três elementos são os únicos de ocorrência naturais que possuem radioisótopos capazes de produzir raios gama com energia e intensidade suficientes para serem medidos (MINTY, 1997). Tanto a aerogamaespectrometria quanto a radiometria terrestre medem a abundância relativa destes elementos através da detecção da radiação gama emitida por estes elementos (FERREIRA, 2002).

A radiação gama se forma a partir da desintegração do núcleo de um elemento liberando apenas radiação eletromagnética, energia que é frequentemente emitida a partir dos núcleos excitados (TELFORD et al., 1990). Como não apresentam carga a radiação gama não pode ser desviada por campos elétricos ou magnéticos (MINTY, 1997).

Quando um elemento instável se desintegra e libera energia na forma de radiação alfa, beta ou gama ocorre outro processo conhecido como decaimento radioativo, após a liberação em forma de radiação este elemento perde um número atômico e assim um novo elemento é formado. O decaimento radioativo pode levar a formação de um elemento estável ou a uma série de decaimentos até que seja formado um elemento estável (KEAREY et al., 2002).

### 8.3 Método magnetométrico

#### 8.3.1 Lei de Ampère

Ampère foi capaz de encontrar uma expressão relativamente simples (equação 7) para mensurar a força da interação das chamadas correntes elementares:

$$dF(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{dl(p) \times [dl(q) \times L_{qp}]}{L_{qp}^3} \quad (7)$$

Onde  $I_1$  e  $I_2$  são magnitudes das correntes nos elementos lineares  $dl(p)$  e  $dl(q)$ , respectivamente, e a sua direção que coincide com a densidade de corrente;  $L_{qp}$  a

distância entre esses elementos e é dirigido a partir do q, até ao ponto p, que pode ser localizada no centro destes elementos; onde  $\mu_0$  é uma constante igual a:

$$\mu_0 = 4\pi \times \frac{10^{-7} H}{m} \quad (8)$$

Esta constante é conhecida também como permeabilidade magnética do vácuo. A unidade é utilizada no sistema de unidades S.I. em que a distância é medida em metros e força em Newtons. Integrando, a Equação 9 caracteriza a força atuando em algum ponto em uma linha de corrente  $L_1$ , causada por todos os elementos da linha  $L_2$ .

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{dl(p) \times [dl(q) \times L_{qp}]}{L_{qp}^3} \quad (9)$$

Este é um exemplo da utilização do princípio de sobreposição de correntes arbitrárias e fechadas. Assim, a força F representa um somatório contínuo (integral) das forças aplicadas em diferentes pontos do mesmo circuito, esta relação entre a força F e correntes é conhecida como Lei de Ampère para circuitos fechados com correntes constantes.

### 8.3.2 Lei de Biot-Savart

É possível perceber a semelhança entre a lei de Ampère e a lei da atração de Newton, elas descrevem uma força entre correntes primárias ou massas elementares. Então, por analogia com o campo gravitacional provocado pelas massas elementares, podemos pensar em um campo existente devido à ação da força F, e esse campo é chamado de campo magnético. A Equação 10 estabelece a relação entre um elemento de corrente e o campo magnético, é chamada Lei de Biot-Savart.

$$dB(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \frac{dl(q) \times L_{qp}}{L_{qp}^3} \quad (10)$$

Considerando que o vetor densidade de corrente  $j$  e o vetor  $dl$  tem a mesma direção, e que o volume elementar é igual a  $dV = dSdl$  então, podemos representar o produto  $I dl$  como:

$$dB(p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{j(q) \times L_{qp}}{L_{qp}^3} dV \quad (11)$$

A equação 11 descreve o campo magnético devido ao volume elementar  $j$ , com a densidade de corrente  $q$ . Existem dois tipos correntes relacionadas ao campo magnético: corrente de condução e corrente de magnetização.

$$j = j_c + j_m \quad (12)$$

Sendo  $j_c$  e  $j_m$  vetores de densidade de corrente que caracterizam a distribuição das correntes de condução e de magnetização.

Pode-se frequentemente encontrar o campo magnético referido como  $H$ , porém existem diferenças no significado físico entre este e o campo magnético relacionado como  $B$ . Podemos entender  $B$  como o campo gerado pela a verdadeira força magnética atuando em uma corrente primária, e  $H$  como resultado da força caracterizada pela densidade dos momentos dipolares, isto é, uma distribuição de correntes de magnetização. Tal combinação dificilmente pode ser explicada a partir de um ponto de vista físico, em outras palavras, a função  $H$  é um conceito puramente matemático. A Equação (13) relaciona estes campos  $B$  e  $H$  diferentes apenas pela constante  $\mu_0$ , o que não muda o fato de que eles são fundamentalmente diferentes:

$$B = \mu_0 H \quad (13)$$

No Sistema Internacional (S.I) o campo magnético é medido em Teslas.

### 8.3.3 Magnetização das rochas

Rochas apresentam dois tipos principais de magnetização: induzida  $M_i$  e remanescente ou remanente  $M_r$ . O primeiro tipo está relacionado à componente de magnetização produzida em resposta a um campo magnético aplicado, ou seja, um campo secundário induzido o qual desaparece quando o campo magnético é removido.

A magnetização remanescente é a magnetização que permanece após a remoção de um campo magnético, que é adquirida durante a cristalização dos minerais magnéticos da rocha, os quais se orientam segundo a direção do campo magnético atuante na Terra na época de sua cristalização. A força de magnetização induzida é aproximadamente proporcional ao campo aplicado, sendo a constante de

proporcionalidade conhecida como susceptibilidade magnética  $k$ . Assim, quando um campo magnético  $H$  é aplicado, a magnetização induzida e total é dada por:

$$M_i = k.H \quad (14)$$

A força de magnetização total  $M_t$  é um vetor resultante da soma da magnetização remanescente e da magnetização induzida, segundo a Equação (15).

$$M_t = k.H + M_r \quad (15)$$

## 9 ETAPAS DOS TRABALHOS GEOFÍSICOS

### 9.1 DADOS GEOFÍSICOS AEREOS

Os resultados gamaespectrométricos obtidos em trabalhos anteriores (ALCALDE et al., 2018) servirão de subsídio na interpretação geológica-geofísica dos modelos confeccionados para área de estudo.

Os dados aerogeofísicos utilizados na pesquisa foram gentilmente cedidos pela empresa Amarillo Mineração do Brasil Ltda, pertencentes ao Levantamento aerogeofísico - Projeto Lavras do Sul - Rio Grande do Sul, o qual foi executado no ano 2007 pela empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. A tabela 4 detalha os parâmetros adotados pela empresa para realização dos aerolevantamentos.

Tabela 4 - Parâmetros do levantamento aerogeofísico Projeto Lavras do Sul - Rio Grande do Sul, 2007

<b>Intervalo entre as leituras</b>	<b>0,1 segundos para o magnetômetro</b> <b>1,0 segundos para o espectrômetro</b>
<b>Velocidade da aeronave (nominal)</b>	<b>270 Km/h</b>
<b>Intervalo das amostras (nominal)</b>	<b>8-10 metros (mag)</b> <b>80-100 metros (gama)</b>
<b>Espaçamento das linhas de voo</b>	<b>100 metros</b>
<b>Espaçamento entre as linhas de gravação</b>	<b>1.000 metros</b>
<b>Altura do voo</b>	<b>100 metros</b>

Fonte: Modificado de *Airborne Geophysical Gradiometry and Gammaspectrometry Survey Lavras do Sul Project* – Rio Grande do Sul. Julho, 2007.

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, possuindo uma área total de 226,64 km<sup>2</sup>.

A aeronave opera com uma configuração magnética de gradiente horizontal (sensores nas asas e cauda). Sensores de vapor de césio com bombeamento óptico, *Geometrics G822-A*, foram instalados nas pontas das asas e dentro de um ferrão na cauda. Um fluxômetro de três eixos e um magnetômetro *Develco 9200* foram instalados dentro da cauda da aeronave. Devido à proximidade física dos sensores primários (Césio) nas aeronaves, os sinais medidos são influenciados pelos efeitos dinâmicos causados pelo movimento da aeronave através do campo magnético da Terra. O magnetômetro *fluxgate* fornece dados magnéticos direcionais, que são posteriormente usados para corrigir ou compensar os sinais magnéticos primários desses efeitos. Foi utilizado um compensador magnético em tempo real *RMS AADC II* já que este instrumento processa sinais emitidos por sensores de Césio usando contadores internos e, subsequentemente, compensando sinais processados de

efeitos dinâmicos de aeronaves usando dados magnéticos direcionais fornecidos pelo equipamento.

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)*.

## 9.1.2 Tratamento dos dados aeromagnetométricos

### 9.1.2.1 Correção do erro de Paralaxe

O processamento dos dados brutos do magnetômetro de Césio pelo sistema de aquisição da aeronave introduz um retardamento de tempo nos dados magnetométricos compensados, bem como a posição da antena receptora do GPS em relação à posição do sensor magnetométrico, causam uma defasagem entre o valor de posicionamento (X e Y) e o valor do campo que está sendo amostrado num mesmo intervalo de tempo, sendo assim, uma correção denominada Correção Paralaxe ou Correção de *Lag* deve ser aplicada.

O erro de paralaxe corresponde à defasagem nos tempos de medição do magnetômetro e altímetros com o sistema de posicionamento. Assim, o erro de paralaxe é determinado a partir de uma linha voada em sentidos opostos sobre uma mesma feição magnética anômala reconhecida no terreno. A correção a ser aplicada corresponde ao valor deslocado do tempo de amostragem, de modo a que as duas feições se tornem coincidentes como demonstrado na equação 16.

$$Fc_{(t_0)} = Fc_{(t_0 \pm Ip)} \quad 16$$

Onde  $Fc$  é o valor do Campo Magnético Total corrigido do erro Paralaxe,  $t_0$  é o tempo da amostragem e  $Ip$  é o valor do intervalo de tempo a ser deslocado no banco de dados.

Não se adiciona nenhum valor ao Campo Magnético e sim desloca-se os valores em relação ao tempo em que foram amostrados os pontos, ou seja, o valor do

Campo Magnético após a correção Paralaxe sofre apenas um reposicionamento temporal dentro do banco de dados.

### **9.1.2.2 Nivelamento dos perfis**

A aplicação do nivelamento consiste, basicamente, no ajuste das linhas de controle com base na média das diferenças (ou diferença de 1ª ordem) com as linhas de voo. Este procedimento assume que tais diferenças estão distribuídas de forma aleatória, de forma que um *trend* de no máximo 1ª ordem define o desnível entre as linhas de voo e controle.

O procedimento compreende duas etapas distintas, conforme a seguir:

1º - As linhas de controle são niveladas por aplicação de valores que reduzam as diferenças com as linhas de voo a valores mínimos. Este procedimento assume que existem cruzamentos suficientes para modelar adequadamente as diferenças de nível entre as linhas de controle;

2º - Após o nivelamento das linhas de controle, todas as linhas de voo são ajustadas às linhas de controle, de forma que os valores do campo magnético encontrado nos seus cruzamentos sejam equivalentes.

### **9.1.2.3 Remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF)**

A remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) consiste, basicamente, na definição da superfície de tendência que expressa o comportamento do campo geomagnético internacional na área do projeto.

Esta superfície foi definida com base no valor do IGRF, tendo sido considerada a altitude de 100 m, referida ao ano de 2007. O campo magnético total corrigido para cada um dos pontos amostrados foi obtido pela subtração, ao campo total micronivelado, do valor do IGRF calculado para o ponto. Os valores resultantes são os valores anômalos do campo (campo magnético total reduzido do IGRF).

### 9.1.3 Processamento dos dados magnetométricos

No processo de confecção das malhas regulares para obtenção dos mapas torna-se necessário realizar um processo de interpolação entres esses dados, criando-se uma representação de dados suavizada e regular. A transposição dos valores obtidos nas linhas de voo para a malha regular é normalmente efetuada mediante um algoritmo que usa uma determinada função para definir o valor de cada nó da malha, com base nos pontos mais próximos das linhas de voo contidas no arquivo. Segundo Vasconcelos et al., (1994) a célula deve ter o tamanho de  $\frac{1}{4}$  do espaçamento entre as linhas de voo, que é o valor ideal para que se minimize a variação dos dados pontuais na geração da malha regular. A gridagem se refere ao processo de interpolação de dados, onde se cria uma malha ou grade de dados regular, com células do mesmo tamanho e espaçamento, em um sistema de coordenadas conhecidas. Os sistemas de “gridagem” mais aplicados à prospecção geofísica são: Mínima Curvatura, *Krigagem* e Bi-direcional.

#### 9.1.3.1 Gridagem Bi-direcional

É uma técnica numérica utilizada para dados de levantamento em linhas regulares e paralelas, linhas paralelas que possuam as mesmas linhas de controle ou linhas paralelas irregulares. A gridagem Bi-Direcional é ideal para dados de levantamentos geofísicos aéreos potenciais, especialmente quando a densidade de dados é muito alta. Consiste em uma interpolação linear ao longo das duas direções seguindo: N-S - geralmente as direções das linhas de voo com paralelo teórico UTM do *grid*. E-W - seguindo o ponto definido pelo cruzamento dos meridianos UTM (N-S) com os paralelos (E-W) – função *spline* cúbica. Direção normal às linhas de voo – função *spline* bicúbica. O algoritmo do BIGRID a ser utilizado neste trabalho é composto também por um filtro não linear que elimina os ruídos de alta frequência

(*spikes*) e um parâmetro realce de *trends* que evita o aparecimento de feições lineares compostas de várias anomalias de pequenos comprimentos de onda.

### 9.1.3.2 Aplicação de filtros

Filtragem é um conceito genérico que serve para descrever o efeito resultante por uma operação matemática em ambos os domínios (tempo e/ou frequência), onde ela pode ser representada por uma convolução ou por uma multiplicação. A filtragem está entre os métodos que foram desenvolvidos para facilitar interpretações geológicas pela transformação de dados (ALMEIDA., 2013).

Estas transformações, efetuadas sobre o campo magnético de intensidade total, em geral, não definem diretamente a distribuição de fontes causadoras de anomalias, porém elas frequentemente proporcionam informações qualitativas que ajudam a construir um entendimento geral da natureza das fontes (ALMEIDA., 2013).

#### 9.1.3.2.1 Continuação Analítica

O campo potencial de uma fonte de espaço livre, medido ao longo do plano de observação de um avião pode ser continuado acima ou abaixo (NAIDU & MATHEW, 1998). Esse filtro responde através da representação espectral das derivadas do campo potencial.

O campo definido a uma altura  $h$  (o valor de  $h$  é positivo quando a continuação está acima do plano de observação do avião e negativo quando é abaixo) com respeito ao plano de observação é obtido por:

$$\phi(x, y, h) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\pi}^{+\pi} d\phi_0(u, v) e^{(-sh)} e^{j(ux+vy)} \quad (15)$$

Onde  $\phi_0$  é o campo potencial no plano de observações e  $s = \sqrt{u^2 + v^2}$ . Podemos então concluir que um filtro para a continuação do campo tem uma resposta dada através da equação (16).

$$A(u, v) = e^{(-sh)} \quad (16)$$

Quando  $h > 0$  a resposta do filtro de continuação analítica (para cima) é uma função exponencial decrescente, quando  $h < 0$  a resposta do filtro de continuação analítica (para baixo) é uma função exponencial crescente.

### 9.1.3.2.2 Amplitude do Sinal Analítico

O conceito de Sinal Analítico 2D foi desenvolvido por Nabighian (1972,1974). Esta técnica é caracterizada por não ter dependência com relação a direção do vetor magnetização da fonte, ou seja, pode ser correlacionada a intensidade de magnetização da fonte.

A amplitude do sinal analítico 3D, em um ponto qualquer com coordenada  $(x,y)$ , pode ser obtido a partir de três gradientes ortogonais do campo magnético total através da seguinte equação:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (17)$$

Neste caso  $|A(x, y)|$  é a Amplitude do Sinal Analítico no ponto de coordenadas  $(x,y)$  e  $T$  é a Anomalia Magnética de Intensidade Total no ponto de coordenadas  $(x,y)$  (ROEST et al., 1992.).

Segundo Roest et al (1992), o Sinal Analítico da Anomalia Magnética de Intensidade Total reduz os dados magnéticos a anomalias cujo sinal máximo coincide com as bordas dos corpos magnetizados e cuja forma pode ser usada para determinar as profundidades destas bordas.

### 9.1.3.2.3 Derivadas direcionais

Geralmente a utilização da primeira derivada acentua gradientes nas bordas de corpos magnéticos pela equação de Davis, 1986.

Para o campo potencial (Equação x) a derivada vertical é dada por:

$$f_z(x, y) = -\frac{\partial \phi(x, y, h)}{\partial z} = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\pi}^{+\pi} d\Phi_0(u, v) se^{j(ux+vy)} \quad (18)$$

Com a utilização das derivadas direcionais, componentes de alta frequência em um conjunto de dados são amplificadas em diferentes graus. Ou seja. Resposta da função impulso no domínio da frequência para cada fase. Pode-se salientar que a chamada derivada direcional é uma operação não-linear que pode ser descrita em termos de um filtro linear com uma operação. Pode ajudar a definir um contato brusco entre as duas rochas tipos possuindo diferentes magnetizações (NAIDU & MATHEW, 1998).

## 9.2 Dados geofísicos terrestres

### 9.2.1 Dados geoeletricos

Na aquisição dos dados de eletrorresistividade e dos dados de IP, será empregada a técnica de SEV, utilizando o arranjo Wenner com o espaçamento máximo de  $AB/2 = 90$  m, por meio do qual serão realizadas medições simultâneas de resistividade elétrica e de cargabilidade elétrica.

O equipamento utilizado na aquisição dos dados de eletrorresistividade e de IP será o *Syscal Pro*, fabricado pela *Iris Instruments* – França, o mesmo foi programado com as seguintes configurações: tensão transmitida (800 V) e tempo de leitura 2 s.

Para calcular a distribuição de resistividade elétrica e de cargabilidade elétrica no subsolo serão utilizados programas que auxiliam 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  $AB/2$  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 será utilizado o programa *IPI2win* versão 3.1.2 desenvolvido pela *Moscow State University*.

A partir dos dados da inversão será confeccionado um modelo geofísico 3D a partir de dados de cargabilidade (IP) para a área de estudo visando a identificação de possíveis setores com provável presença de veios mineralizados de sulfetos metálicos.

### **9.2.2 Dados de susceptibilidade magnética**

Para as medições de susceptibilidade Magnética será utilizado um suscetílimetro *KT-10 Magnétic Sucetibility Meter Terraplus (Terraplus, Inc)*, pertencente à UNIPAMPA.

Dados de susceptibilidade magnética serão adquiridos em uma malha regular com intervalos de amostragem de aproximadamente 60 metros em setores da área de estudo identificados por Alcalde et al., (2018) que se caracterizem por altos valores de cargabilidade (IP) em torno de 12 - 14 mV/V e baixos valores de resistividade em torno de 150 - 200 Ohm.m, assim como pela caracterização de patamares anômalos de Fator F, Urânio anômalo (Ud) e Potássio anômalo (Kd), critérios indicativos que sugerem a presença de zonas de alteração hidrotermal. E destacar nestes setores a presença de óxidos ferrosos associados com mineralizações de Pirrotita e Hematita, o que poderia sugerir a identificação de patamares anômalos de valores de susceptibilidade magnética.

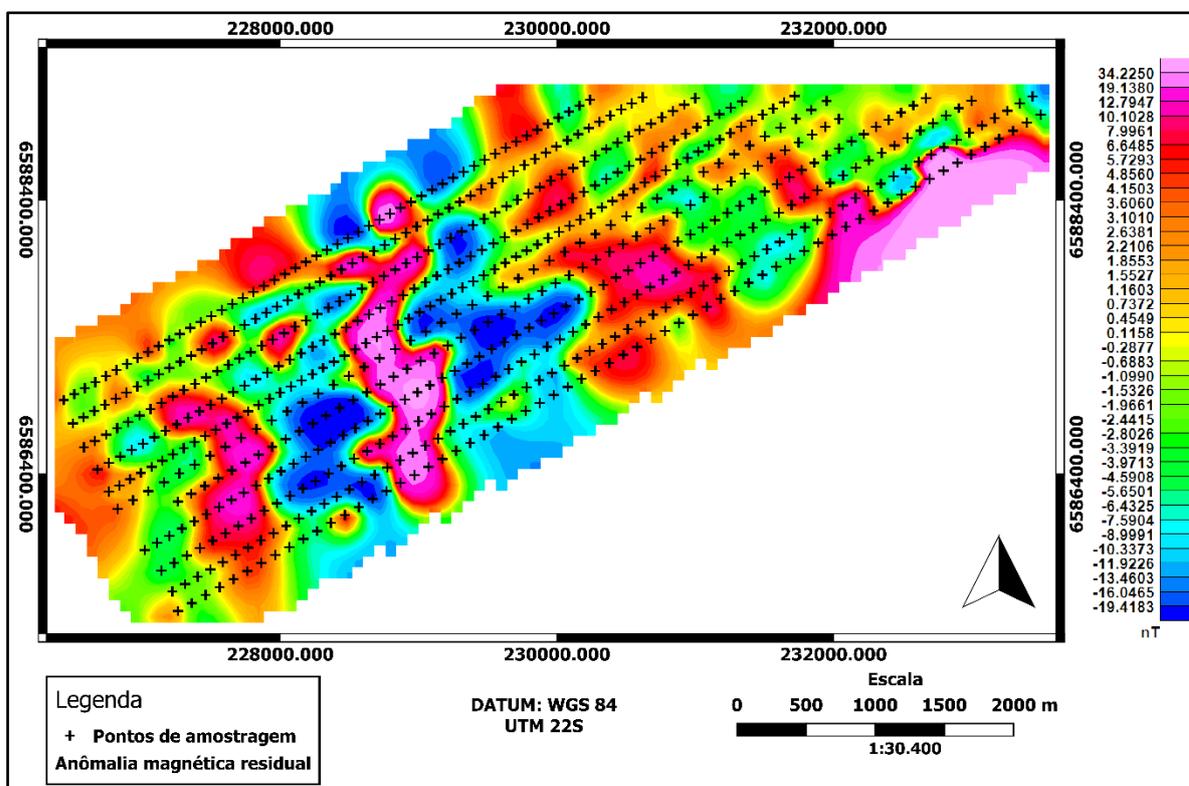
## **10 RESULTADOS**

### **10.1 Resultados geofísicos aéreos**

### 10.1.1 Resultados geofísicos magnetométricos

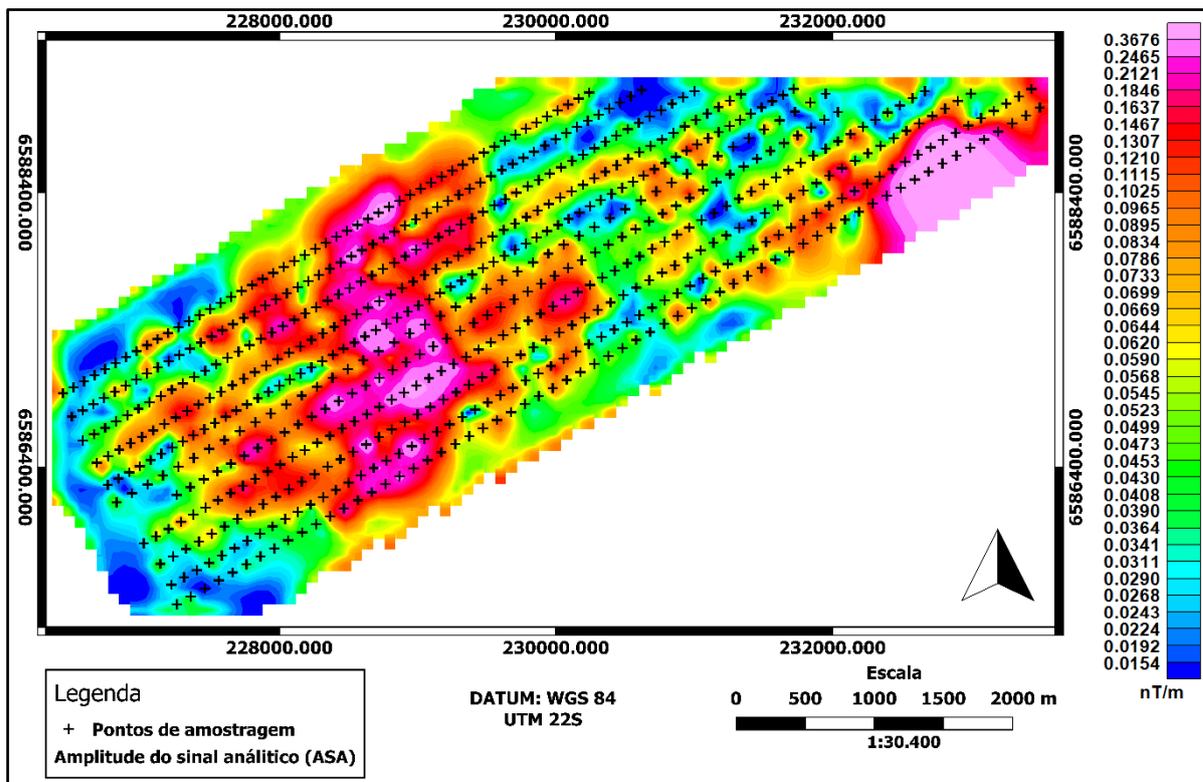
As figuras 11, 12, 13 e 14 mostram a malha de pontos nas direções SW-NE (para as imagens 11 e 12) e NW-SE (para as imagens 13 e 14) obtida pelo processamento pós remoção do efeito criado pela resposta magnetométrica do corpo andesítico aflorante localizado a oeste da área de estudo conforme ilustrado na figura 15.

Figura 11 - Transecta SW – NE da Anomalia Magnética Residual (AMR), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.



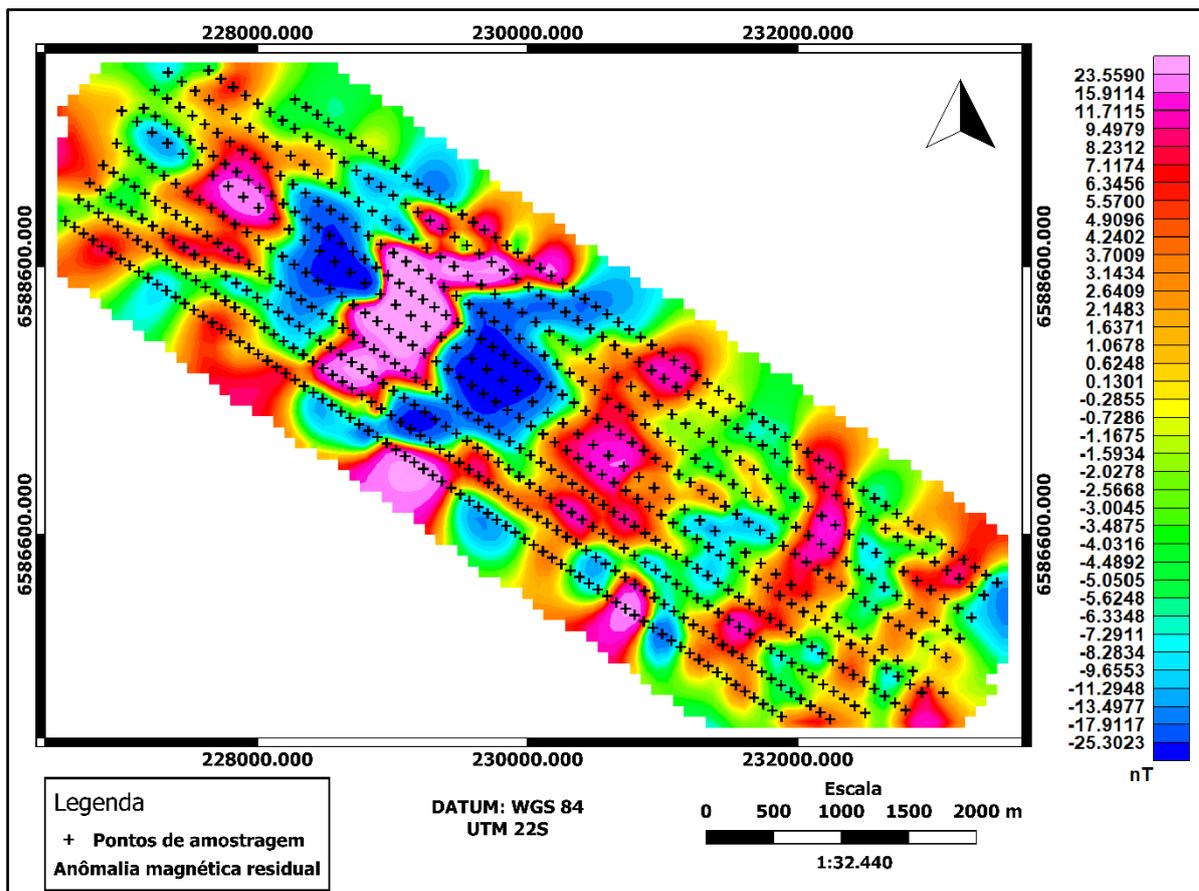
Fonte: autor, 2019.

Figura 12 - Transecta SW - NE da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção SE.



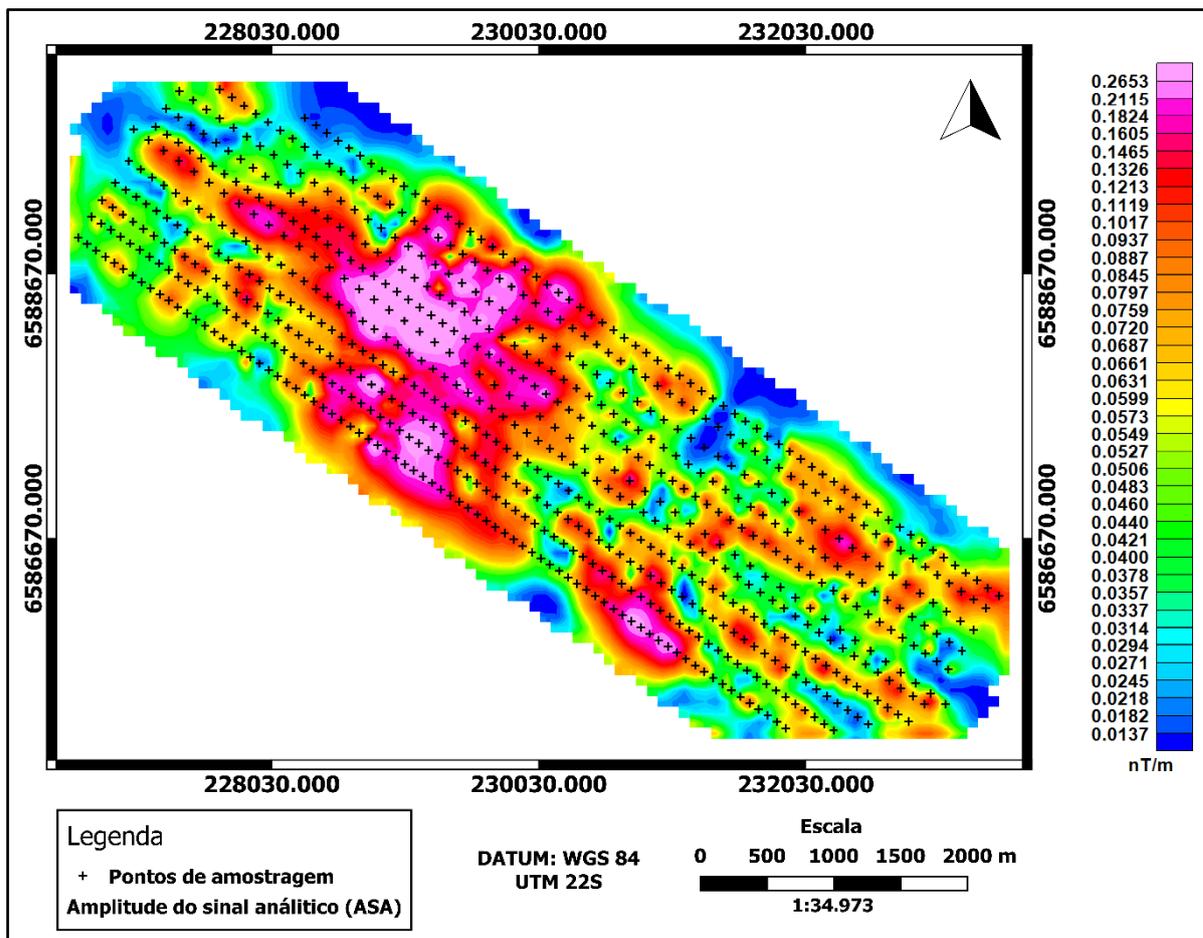
Fonte: autor, 2019.

Figura 13 - Transecta NW – SE da Anomalia Magnética Residual (AMR), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.



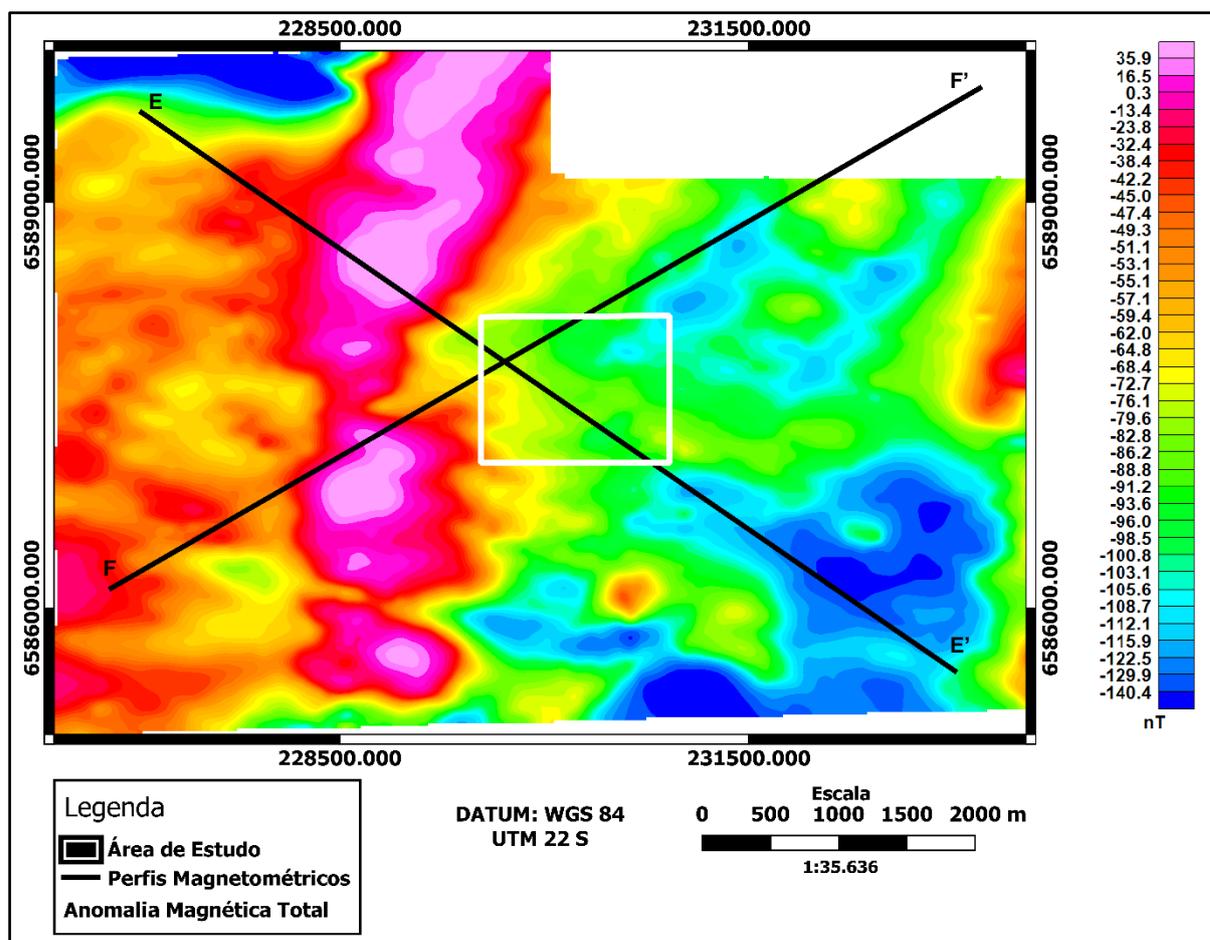
Fonte: autor, 2019.

Figura 14 - Transecta NW - SE da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando a malha de pontos obtidas pós processamento na direção NE.



Fonte: autor, 2019.

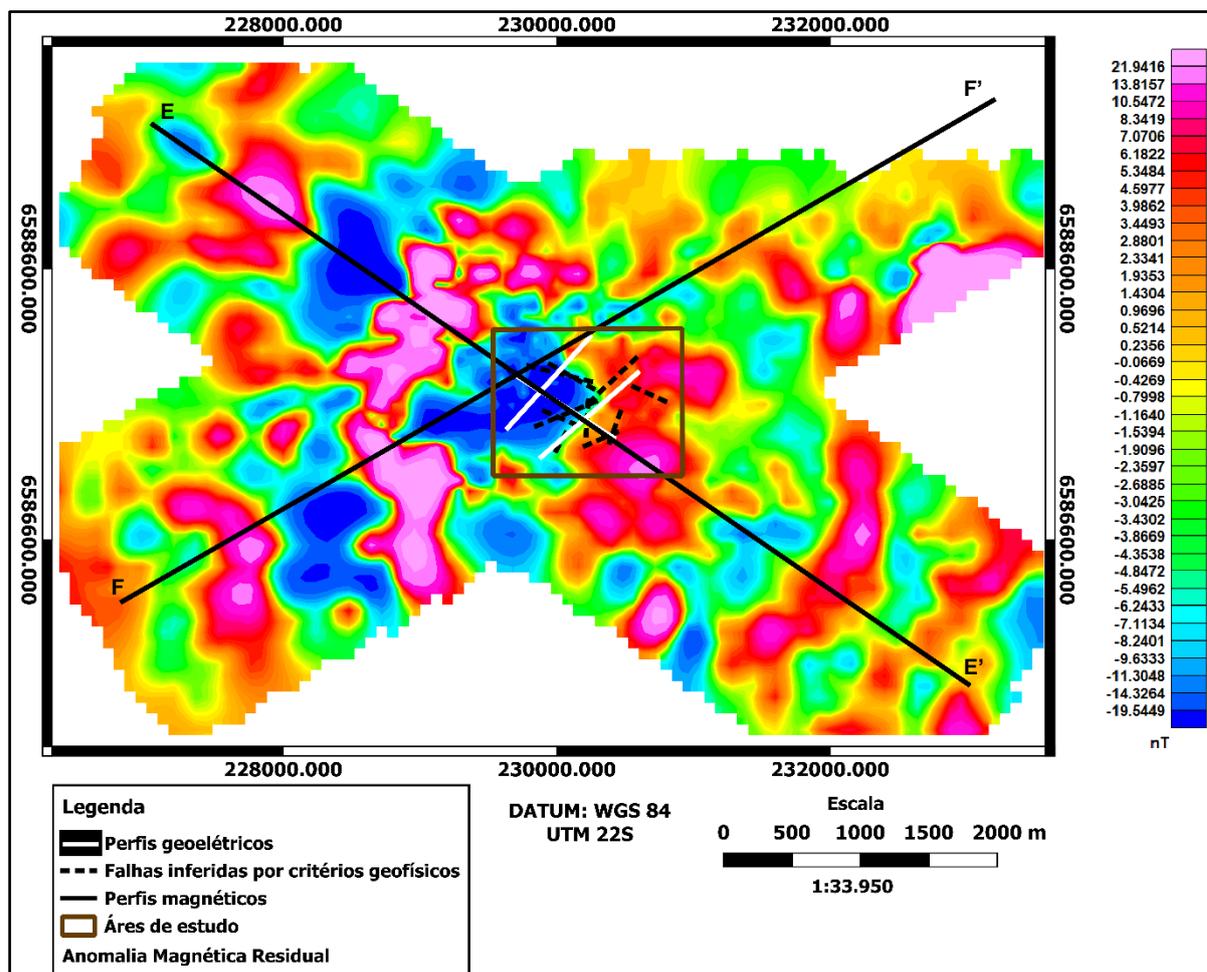
Figura 15 - Mapa da Anomalia Magnética Total.



Fonte: autor, 2019.

A área de estudo (Figura 16) caracteriza-se pela presença de um sinal negativo mais intenso de aproximadamente -16 nT na porção noroeste e um sinal positivo de menor amplitude com aproximadamente 7 nT na porção sudeste.

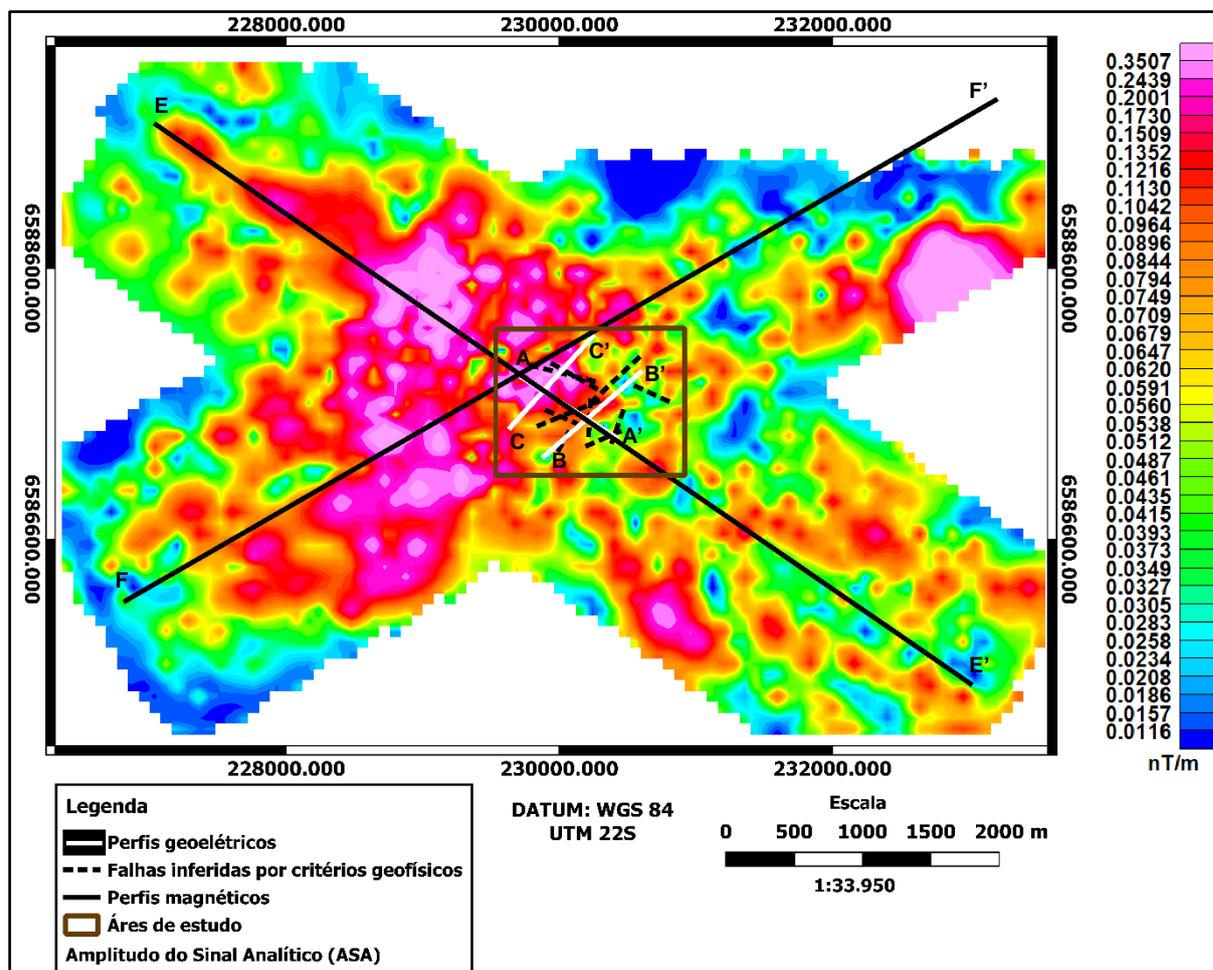
Figura 16 - Mapa da Anomalia Magnética Residual, mostrando falhas inferidas por geofísica, perfis magnetométricos, perfis geolétricos e área de estudo.



Fonte: autor, 2019.

A anomalia do ASA (Figura 17) é caracterizada pela presença de um alto da anomalia do sinal analítico identificando um eixo preferencial na direção WWN-EES.

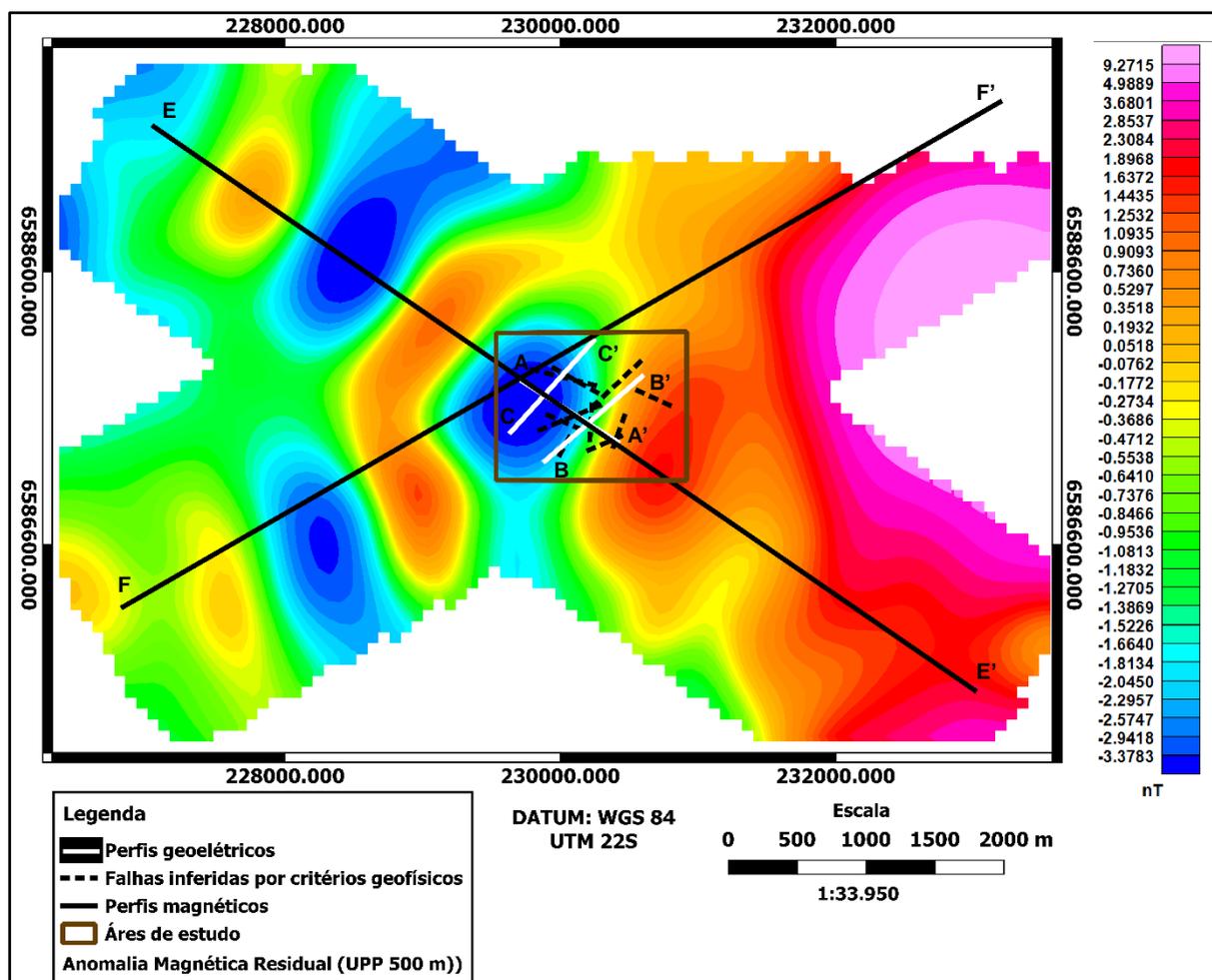
Figura 17 - Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mostrando falhas inferidas por geofísica, perfis magnetométricos, perfis geolétricos e área de estudo.



Fonte: autor, 2019.

A área de estudo na Figura 18 caracteriza-se pela presença de um par anômalo magnético caracterizado por um sinal positivo e um sinal negativo com maior comprimento de onda, o que sugere que a fonte magnética esteja associada a um corpo geológico com raiz profunda, podendo estar correlacionado com o relevo do topo andesítico.

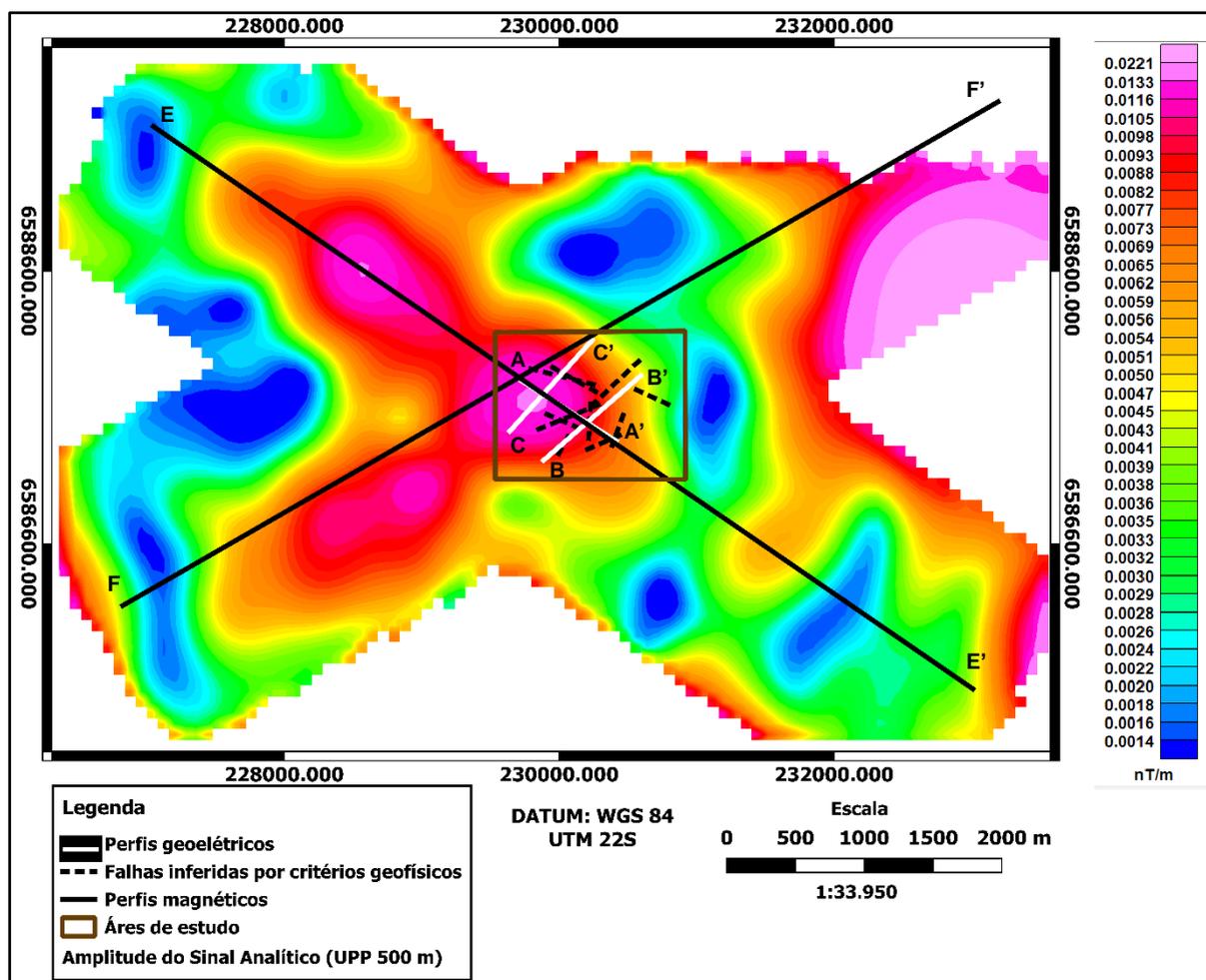
Figura 18 - Mapa da Anomalia Magnética Residual continuação para cima à 500 metros (UPP).



Fonte: autor, 2019.

A Anomalia do Sinal Analítico calculada para um nível de 500 metros de altitude (figura 19) caracteriza-se pela presença de um alto anômalo com um alto comprimento de onda englobando toda a área de estudo o que sugere uma fonte magnética associada a uma estrutura geológica de raiz profunda.

Figura 19 - Mapa da Amplitude do Sinal analítico (ASA) continuação para cima à 500 metros ASA (UPP).

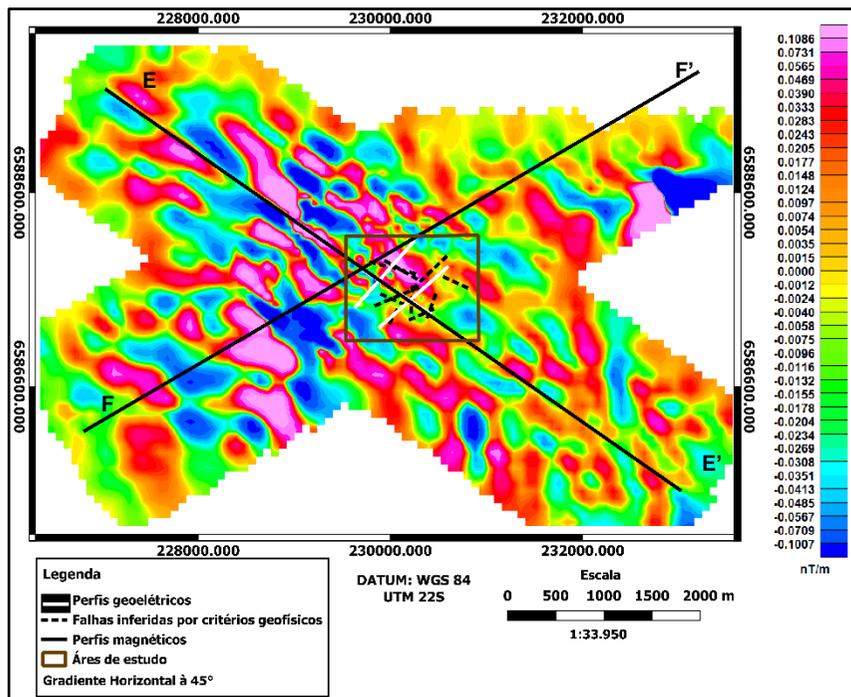


Fonte: autor, 2019.

O cálculo do gradiente horizontal à 45° ressalta estruturas magnéticas ou alinhamentos magnéticos perpendiculares a direção do cálculo, e de fato a Figura 20 revela alguns lineamentos orientados na direção noroeste-sudeste de continuidade regional ao longo de toda área de estudo que de alguma maneira coincidem com as direções de algumas falhas inferidas por critérios geofísicos na área de estudo. Para o cálculo do gradiente horizontal à 135° na área de estudo (figura 21), é possível observar a ausência de lineamentos na direção sudoeste-noroeste.

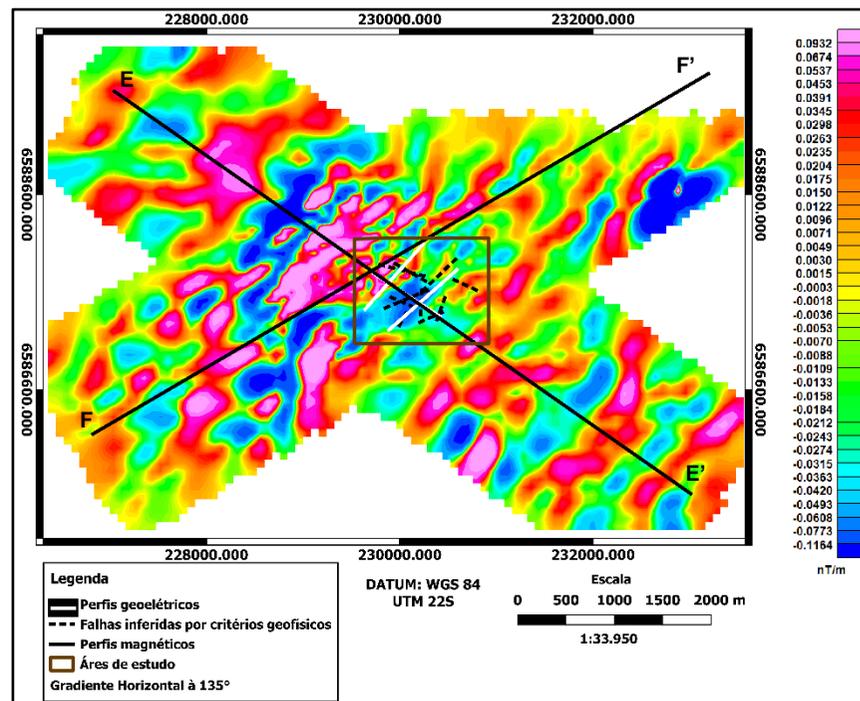
É notório que para a área de estudo os lineamentos magnéticos mais significativos se encontram preferencialmente orientados na direção noroeste-sudeste e provavelmente estejam associados a uma direção preferencial de um embasamento cristalino de composição básica orientado na direção NW que podem estar relacionados a altos do relevo do topo andesítico conforme resultados obtidos através dos modelos geoeletricos.

Figura 21 - Mapa da anomalia do Gradiente Horizontal (45 graus).



Fonte: autor, 2019.

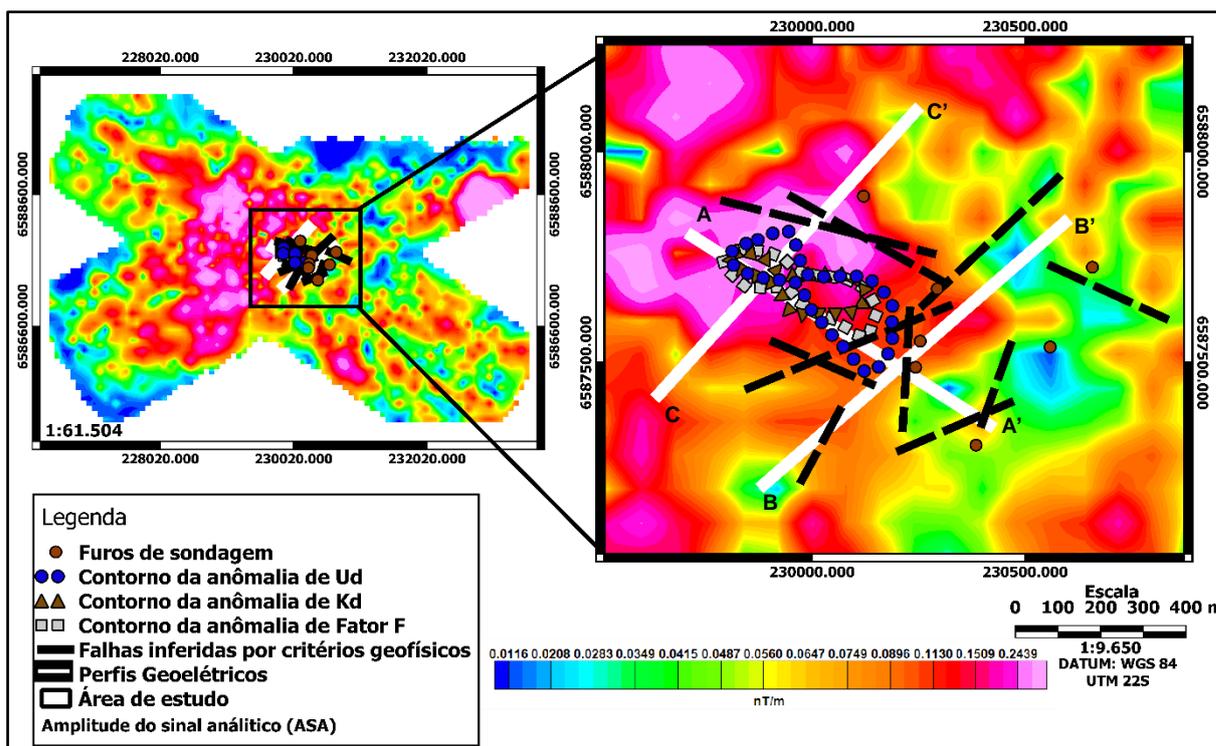
Figura 20 - Mapa da anomalia do Gradiente Horizontal (135 graus).



Fonte: autor, 2019.

Os contornos das anomalias de Kd, Ud e Fator F possuem direção preferencial NW SE (Figura 22), essas anomalias estão associadas a possível presença de alterações hidrotermais associadas com falhas e fraturas. Como estas anomalias possuem mesma direção preferencial e se encontram em um alto anômalo de ASA, é possível que estas anomalias gamaespectrométricas possuam continuidade em profundidade.

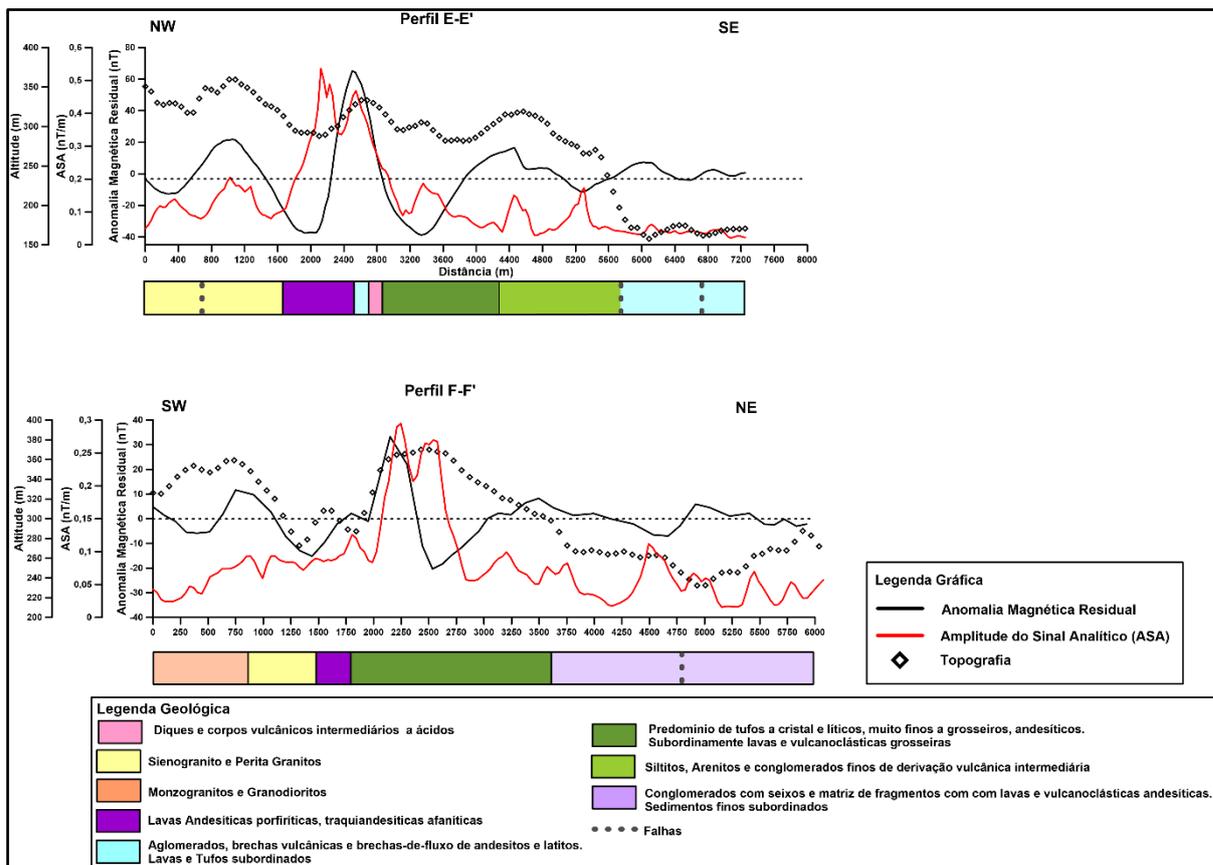
Figura 22 - Mapa integrado da anomalia do Sinal Analítico ilustrando o posicionamento dos furos de sondagem, os perfis geoeletricos, contorno das anomalias gamaespectrométricas de Kd, Ud e fator F, falhas inferidas por critérios geofísicos e área de estudo.



Fonte: autor, 2019.

Ao longo dos perfis magnetométricos regionais E-E' e F-F' observa-se a presença de pares anômalos da anomalia magnética residual (Figura 23), apresentando sinais de pouca amplitude que estão relacionados ao topo irregular do relevo andesítico coincidindo também com anomalias de curto comprimento de onda do sinal analítico na área da Mina Cerro Rico.

Figura 23 - Esquema gráfico do Perfil magnetométrico regional E-E' e F-F' da anomalia magnética residual e anomalia da Amplitude do Sinal Analítico.



Fonte: autor, 2019.

## 10.2 Resultados Geofísicos Terrestres

### 10.2.1 Consistência dos Dados Geoelétricos

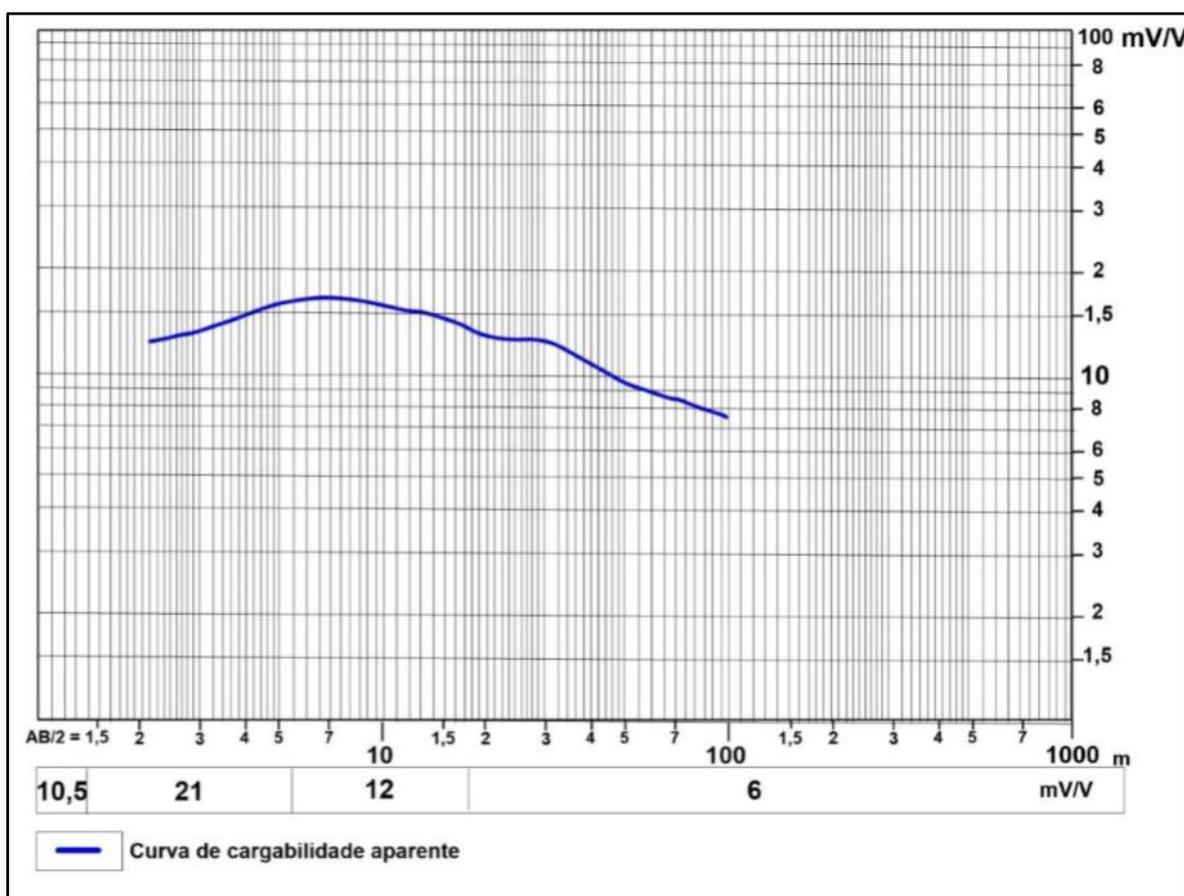
#### 10.2.1.1 Qualidade da aquisição dos Dados de Resistividade (SEV)

No trabalho realizado por Rigoti & Blanco (1985), foi efetuado um estudo geoelétrico utilizando os métodos de Eletroresistividade 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). No trabalho foram constatados intervalos anômalos de cargabilidade, normalmente associados a valores de resistividades média a baixa ( $\rho_a < 1500 \text{ Ohm.m}$ ). As anomalias IP foram consideradas com valores maiores que 8 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 piritita associada seria a responsável pela anomalia IP e a maior alteração da rocha seria responsável pela baixa resistividade. As Figuras 24 e 25 mostram as curvas de cargabilidade aparente e de resistividade aparente, respectivamente.

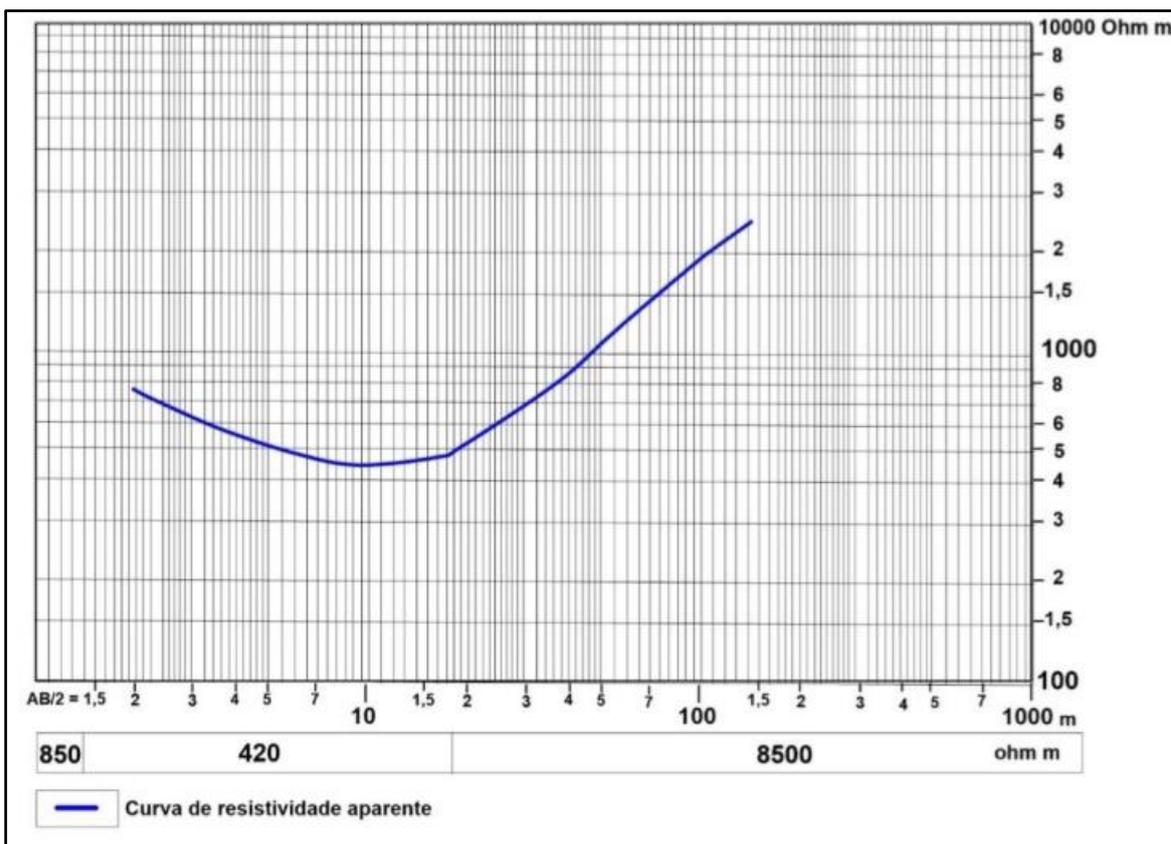
Se compararmos estes resultados obtidos por Rigoti & Blanco (1985) com os resultados obtidos para esta pesquisa, podemos perceber a consistência dos dados observados em campo de resistividade e de cargabilidade (IP) (Figuras 26, 27, 28).

Figura 24 - Curva de cargabilidade aparente da região do CILS



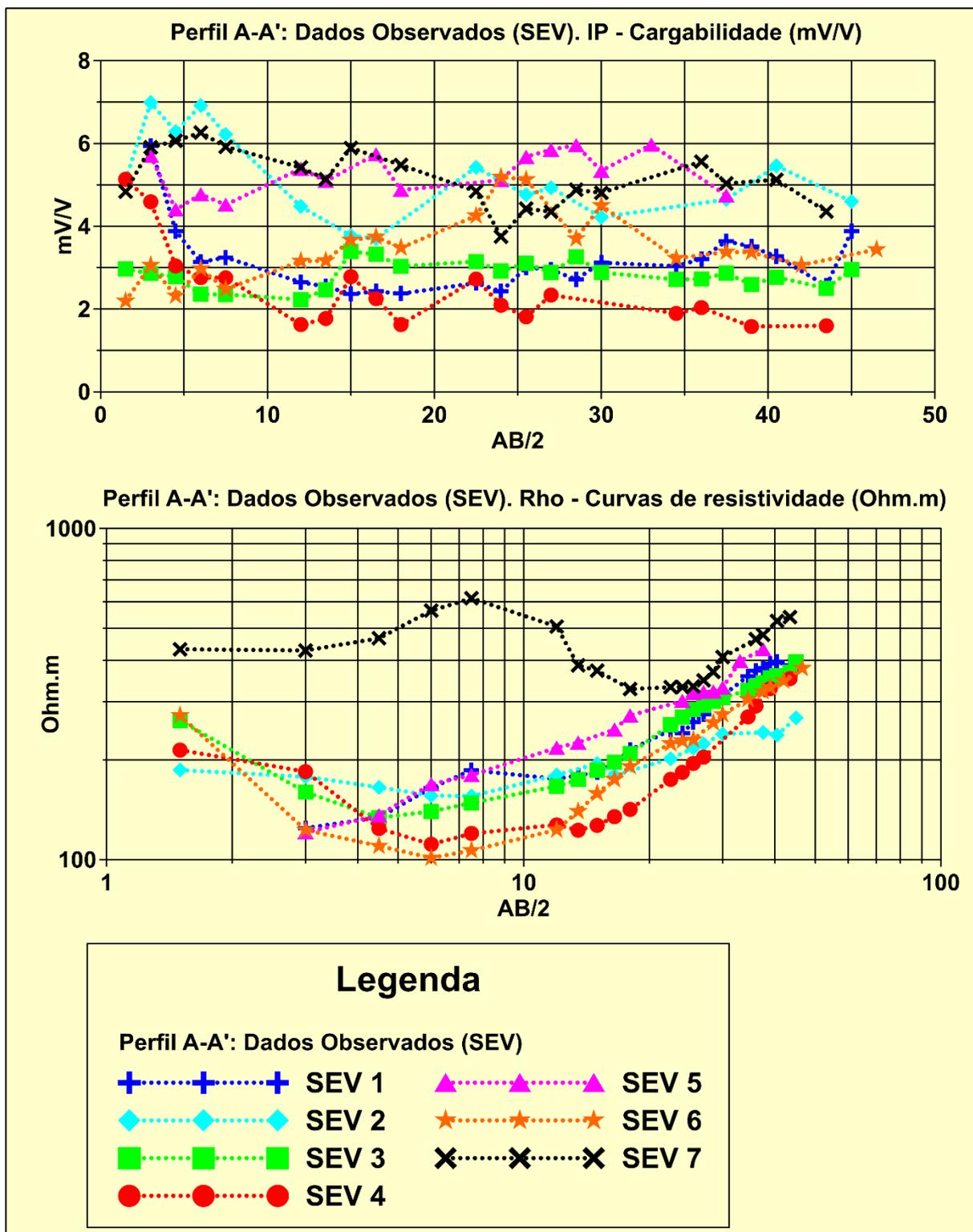
Fonte: modificado de Rigoti & Blanco (1985, p. 6)

Figura 25 - Curva de resistividade aparente da região do CILS



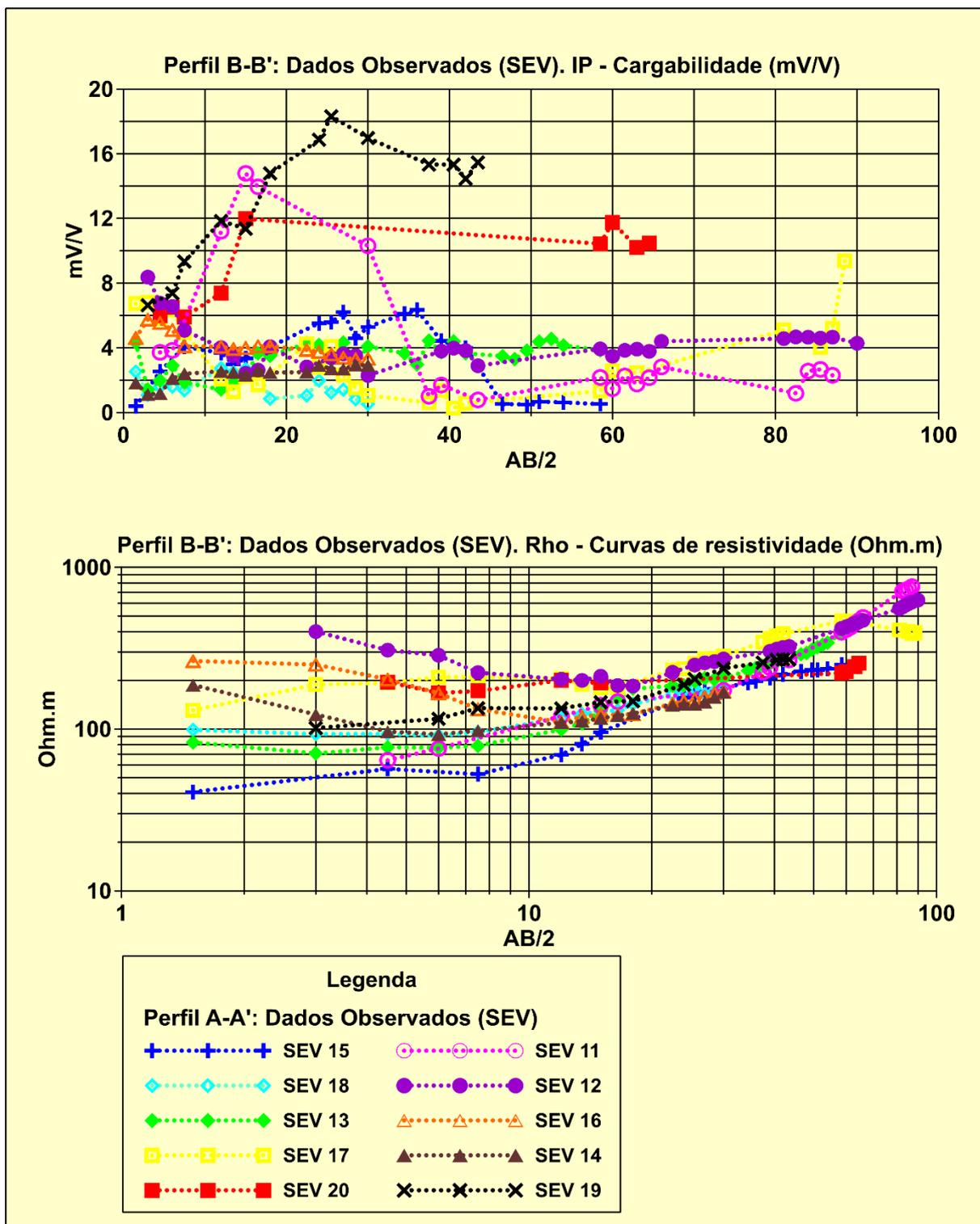
Fonte: modificado de Rigoti & Blanco (1985, p. 6)

Figura 26 - Perfil A-A': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.



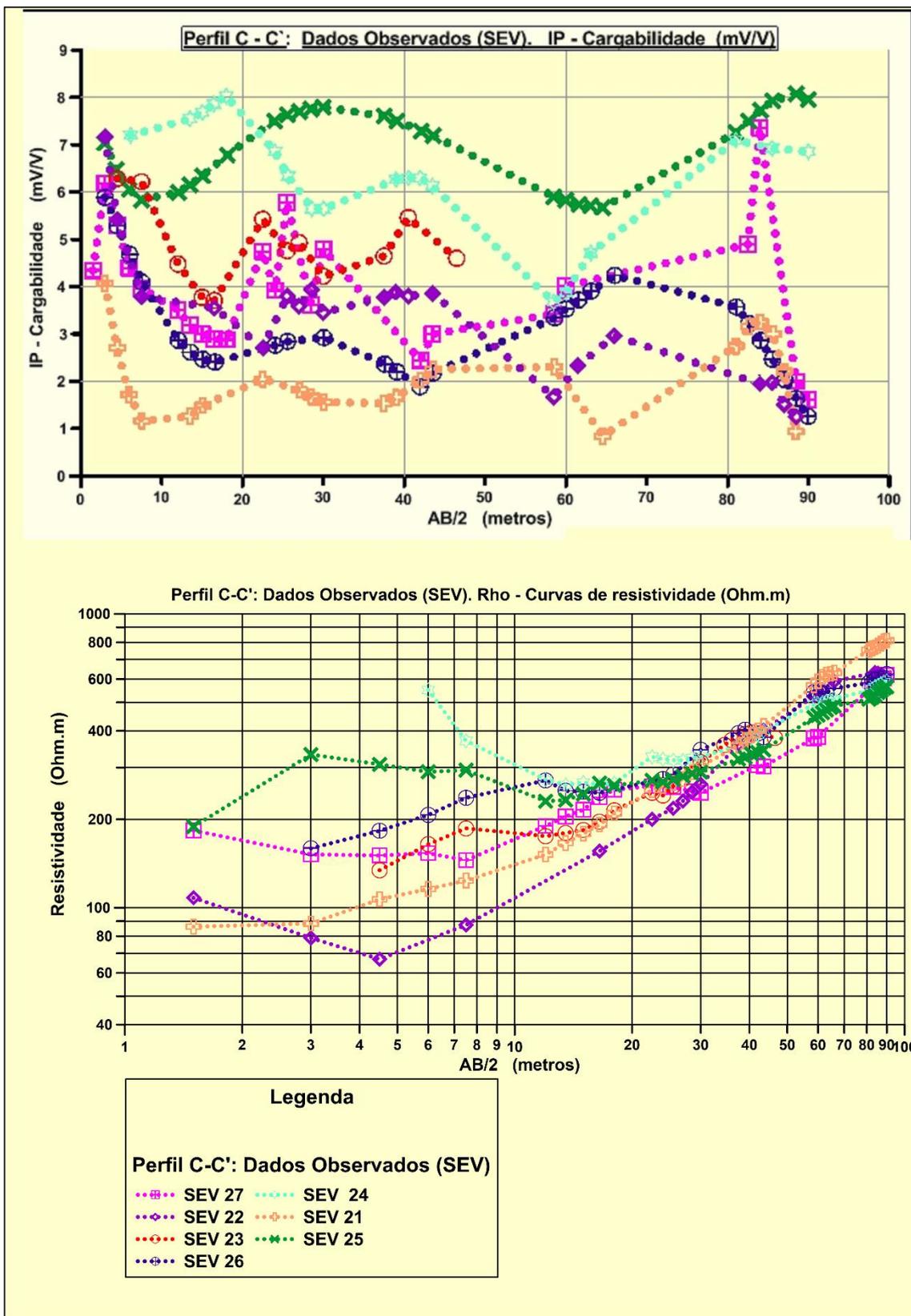
Fonte: autor, 2019.

Figura 27 - Perfil B-B': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.



Fonte: autor, 2019.

Figura 28 - Perfil C-C': Curvas de campo de resistividade oriundas dos dados adquiridos nas SEV'S.



Fonte: autor, 2019.

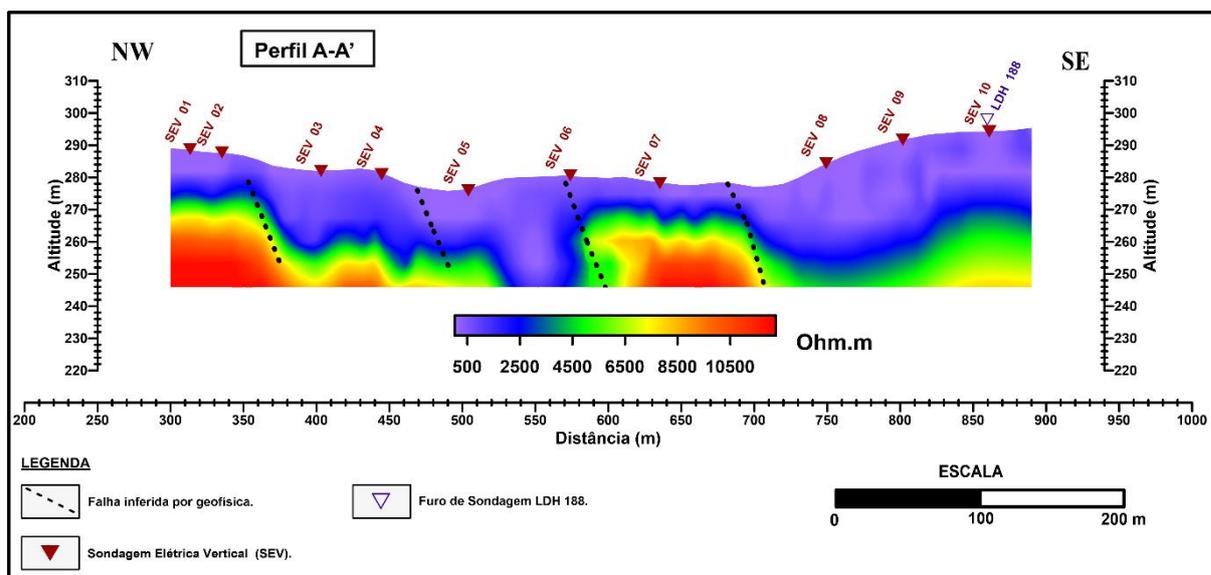
É possível perceber que em termos de patamares de ordem de grandezas tanto de resistividade como de cargabilidade comparados com trabalhos anteriores na área de estudo utilizando a mesma técnica, é notável que os intervalos de patamares de resistividade e cargabilidade (IP) obtidos por Rigot & Blanco (1985) e os patamares obtidos nesta pesquisa são compatíveis. Para os perfis de resistividade podemos observar valores de resistividade que variam para os três Perfis (A-A', B-B' e C-C') de 60 Ohm.m até aproximadamente 1000 Ohm.m, outro fator que demonstra a qualidade e a consistência dos dados utilizados para esta pesquisa é o formato da curva dos dados observados, quando comparamos estas curvas de resistividade com a de Rigot & Blanco podemos observar que a mesma possui um comportamento ascendente em todos os Perfis. Para as curvas de cargabilidade podemos observar que os valores de cargabilidade obtidos por Rigot e Blanco (1985) possuem amplitude na faixa de 5 até 12 mV/V, e os valores obtidos para esta pesquisa variam entre 1 até 8 mV/V sendo então, muito compatíveis com os resultados obtidos em trabalhos anteriores.

### **10.2.2 Resultados Geométricos**

As seções de cargabilidade e resistividade foram refeitas para os Perfis A-A' e B-B' aplicando a correção topográfica. A seção A-A' elaborada a partir dos dados de resistividade (Figura 24) delimita o topo do relevo andesítico irregular e afetado por falhas e/ou fraturas com valores de resistividade variando entre 2.500 Ohm.m para rocha mais alterada, e 6000 Ohm.m para rocha sem alteração. A seção B-B' (Figura 25) de forma semelhante, delimita o topo irregular do relevo andesítico afetado por falhas, com valores de resistividade variando entre 1.200 até 2.200 Ohm.m para rocha alterada e valores a partir de 3.00 Ohm.m metros para rocha inalterada. O Perfil C-C' (Figura 26) de forma semelhante aos Perfis A-A' e B-B' delimita o topo do relevo andesítico irregular e afetado por falhas e/ou fraturas com valores de resistividade variando entre 3.500 Ohm.m para rocha mais alterada até 6.500 Ohm.m para rocha sem alteração. A porção central do Perfil C-C' é caracterizada por uma depressão no topo do relevo andesítico marcada por falhas que afetam o topo do relevo andesítico e baixos valores de resistividade (~100 -500 Ohm.m).

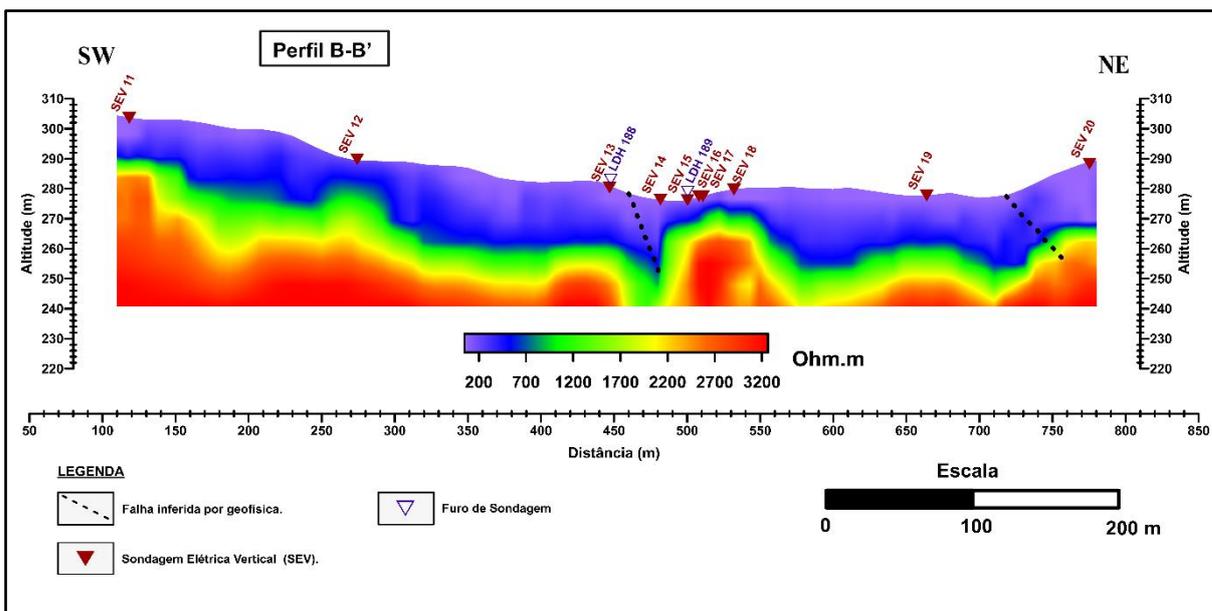
Através da análise da seção de cargabilidade elaborada para o Perfil A-A' (Figura 27) observa-se anomalias de cargabilidade com valores entre 10-14 mV/V em regiões com valores de baixa amplitude de resistividade e presença de falhas, e estes altos valores de cargabilidade estão associados a vales presentes na topografia irregular do topo do relevo andesítico. A seção de cargabilidade para o Perfil B-B' (Figura 28) apresenta de forma similar a seção para o Perfil A-A', um alto de cargabilidade com valores entre 10-14 mV/V em uma região afetada por falha e baixo resistivo relacionado ao topo do relevo andesítico. A seção de cargabilidade para o Perfil C-C' (Figura 29) apresenta valores de cargabilidade que variam entre 6-8 mV/V, de forma semelhante aos perfis A-A' e B-B' se encontra em uma região afetada por falhas e/ou fraturas. A Figura 30 retrata a seção de cargabilidade para o Perfil C-C' ilustrando o relevo topográfico com valores de cota variando na direção SW-NE de 320 metros até 260 metros, apresentando um relevo deprimido nesta direção. Ressalta-se para o perfil C-C' uma anomalia central (300-450 m) de formato verticalizado que se estende até 25 metros de profundidade. De acordo com a descrição litológica do furo de sondagem LDH-186 (Figura 31) há uma ausência de óxidos metálicos, fato evidenciado também pela seção de cargabilidade para o Perfil C-C'.

Figura 29 - Perfil A-A': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico.



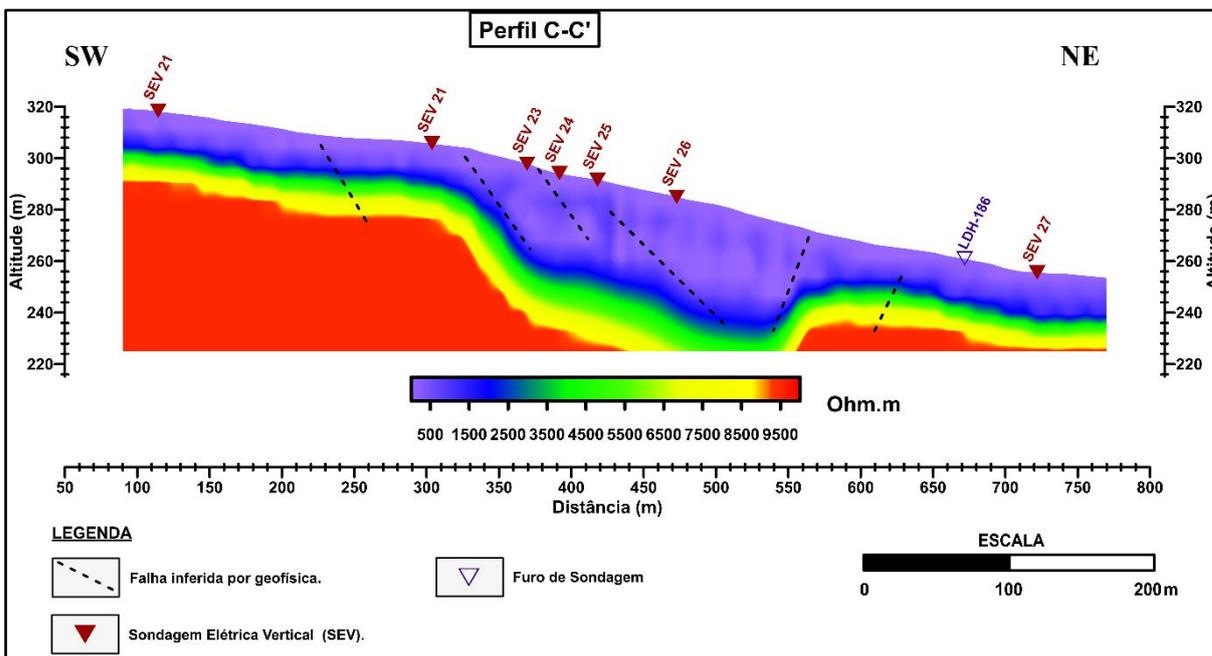
Fonte: autor, 2019.

Figura 30 - Perfil B-B': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico.



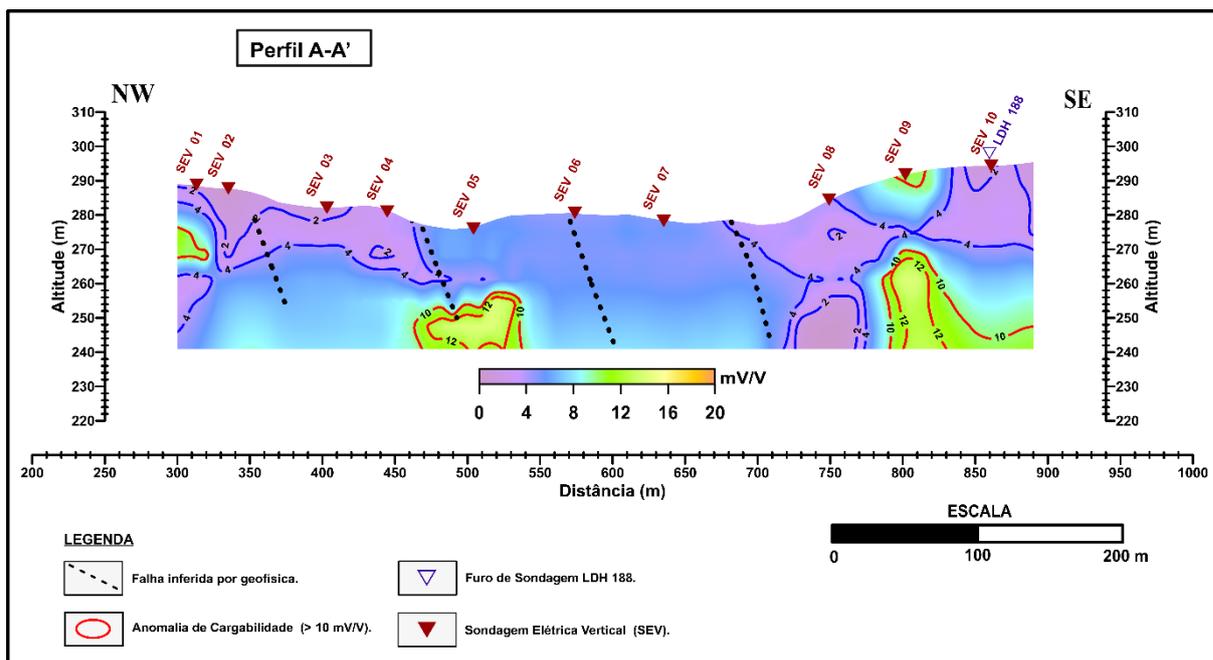
Fonte: autor, 2019.

Figura 31 - Perfil C-C': Modelo 2D de resistividade ilustrando o relevo topográfico.



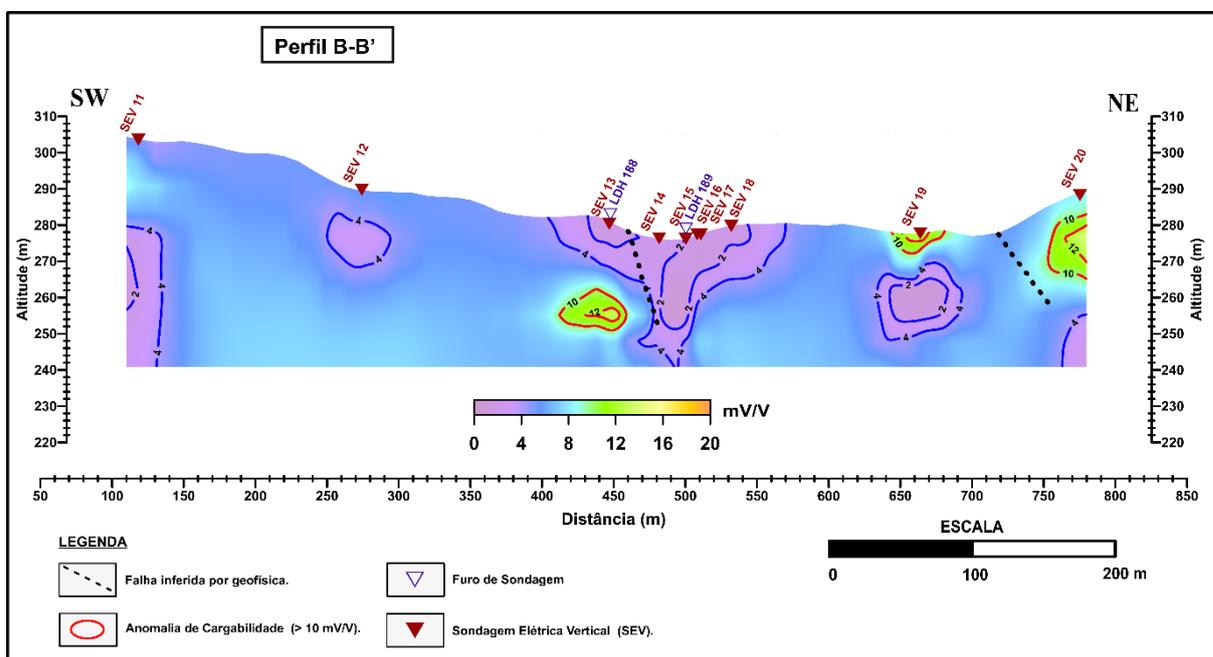
Fonte: autor, 2019.

Figura 32 - Perfil A-A': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.



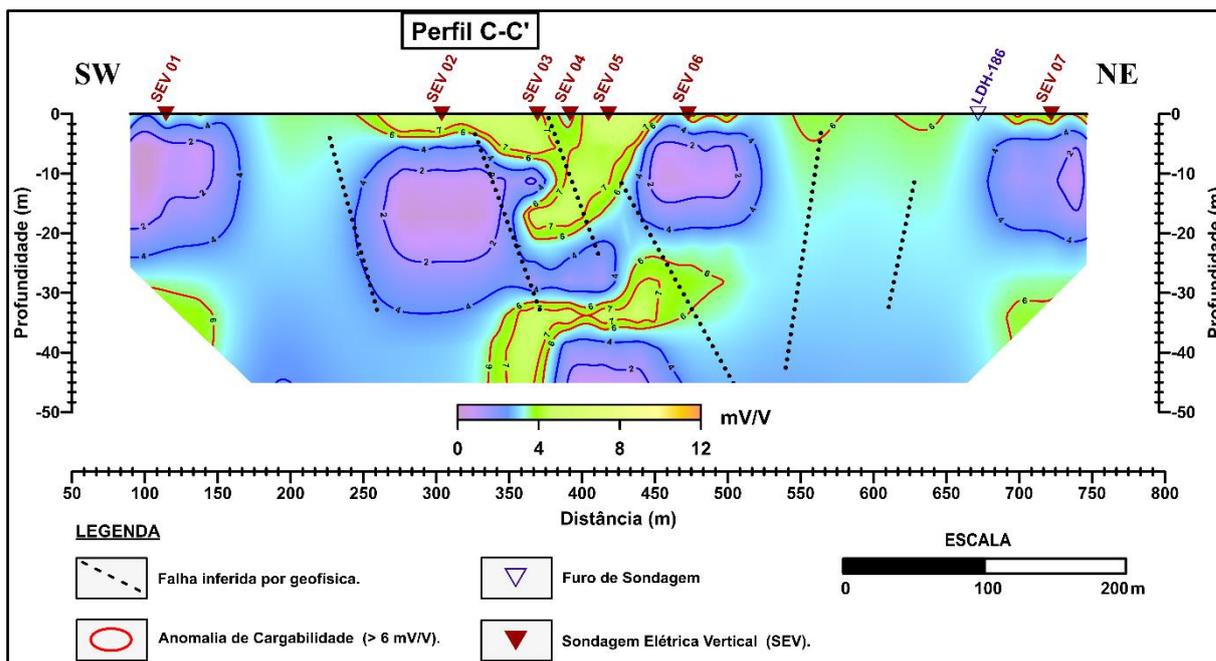
Fonte: autor, 2019.

Figura 33 - Perfil B-B': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.



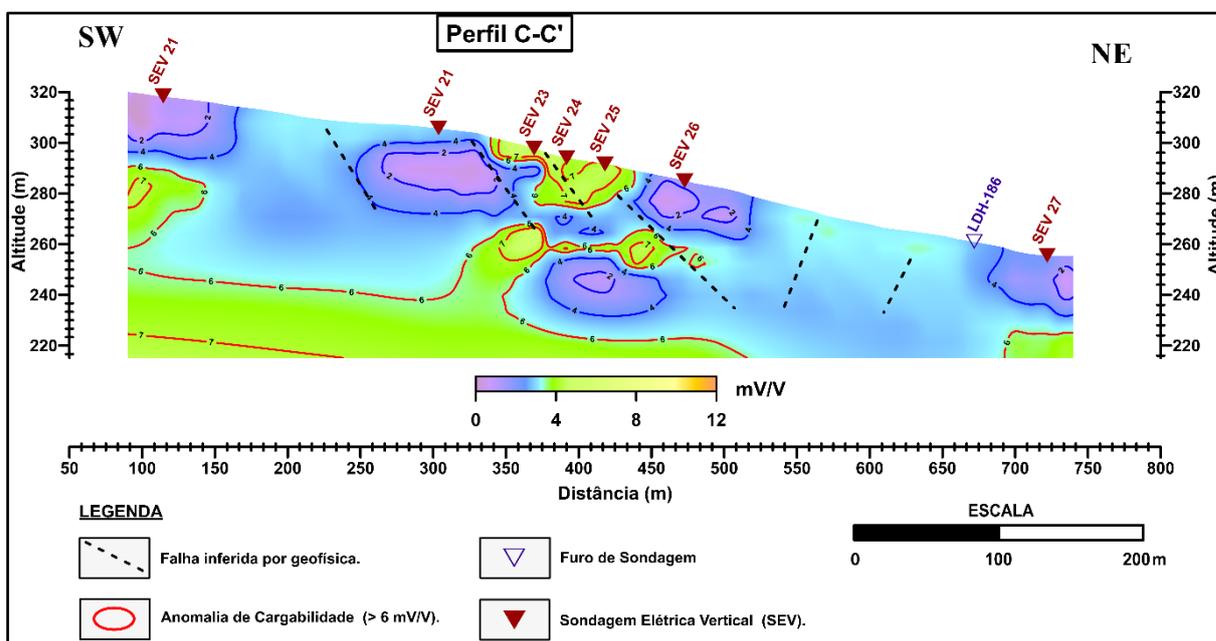
Fonte: autor, 2019.

Figura 34 - Perfil C-C': Modelo 2D de cargabilidade.



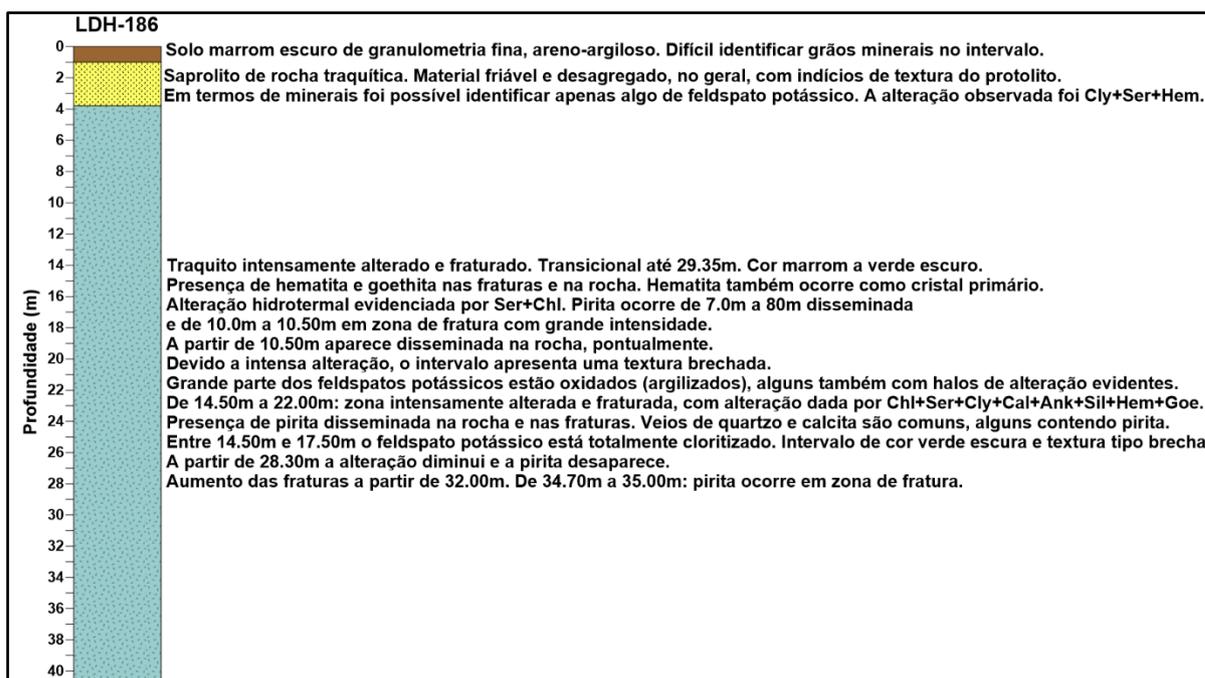
Fonte: autor, 2019.

Figura 35 - Perfil C-C': Modelo 2D de cargabilidade ilustrando o relevo topográfico.



Fonte: autor, 2019.

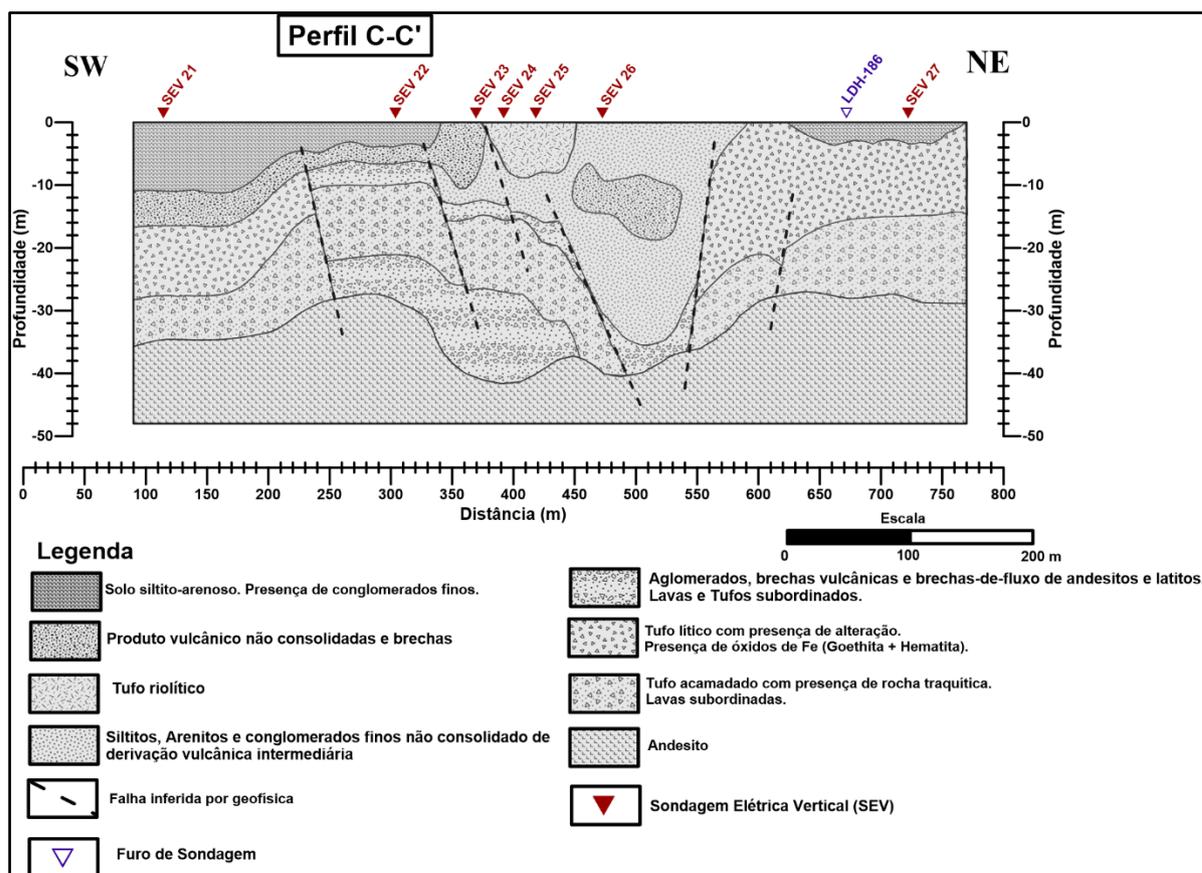
Figura 36 - Descrição litológica do furo de sondagem LDH-186.



Fonte: Amarillo, 2007.

O modelo geológico do Perfil C-C' (Figura 32) elaborado a partir de dados de resistividade verdadeira ilustra a presença de quatro litologias: camadas de tufo variando entre 4 a 28 metros de profundidade, materiais vulcânicos de diferentes granulometrias em regiões marcadas por presença de falhas acima de um topo do relevo andesítico. Neste modelo o topo do relevo andesítico varia de 35 a 45 metros de profundidade, com o topo do relevo andesítico irregular e afetado por falhas. O centro do modelo geológico (400-550 m) é caracterizado por uma estrutura deprimida na camada acima do topo do relevo andesítico afetada por falhas verticais profundas, pode-se sugerir que houve uma movimentação deste corpo controlado por falhas normais sobre gravidade.

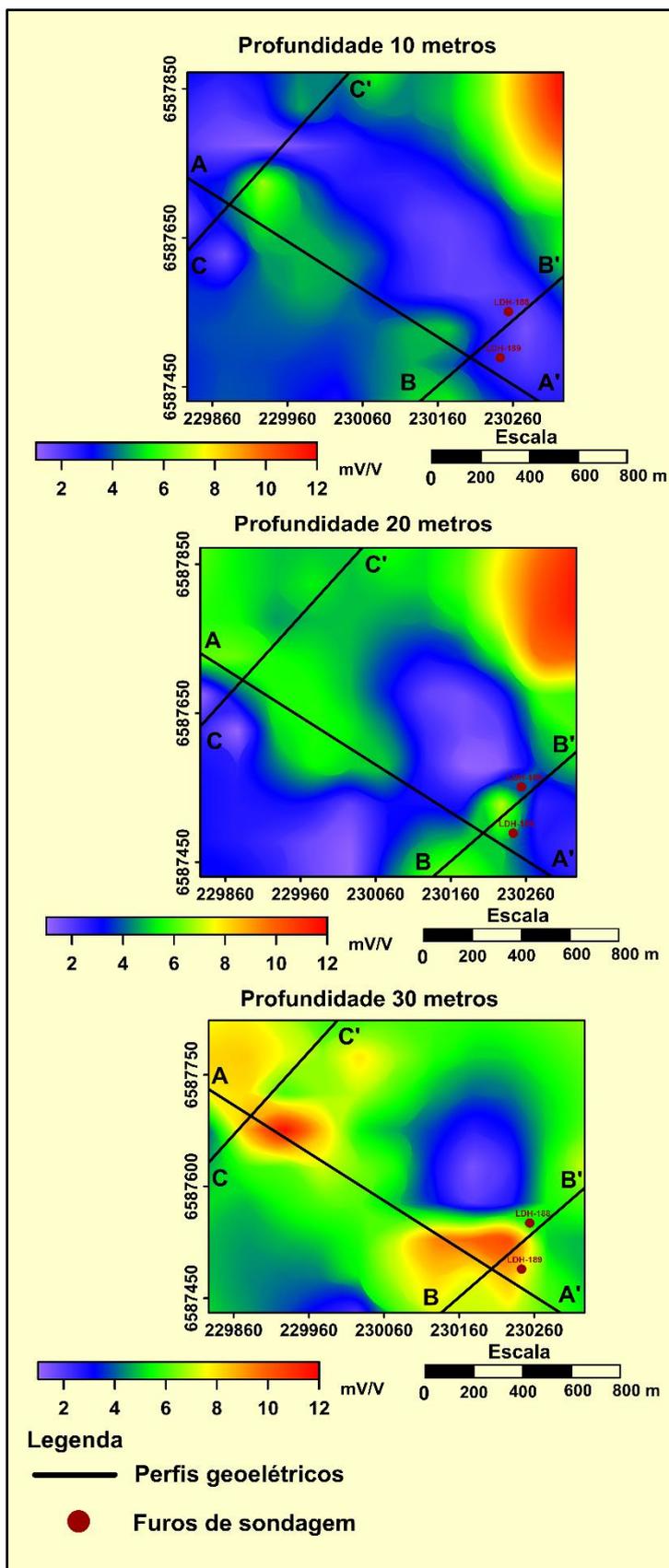
Figura 37 - Perfil C-C': Modelo geológico 2D a partir de dados de resistividade verdadeira.



Fonte: autor, 2019.

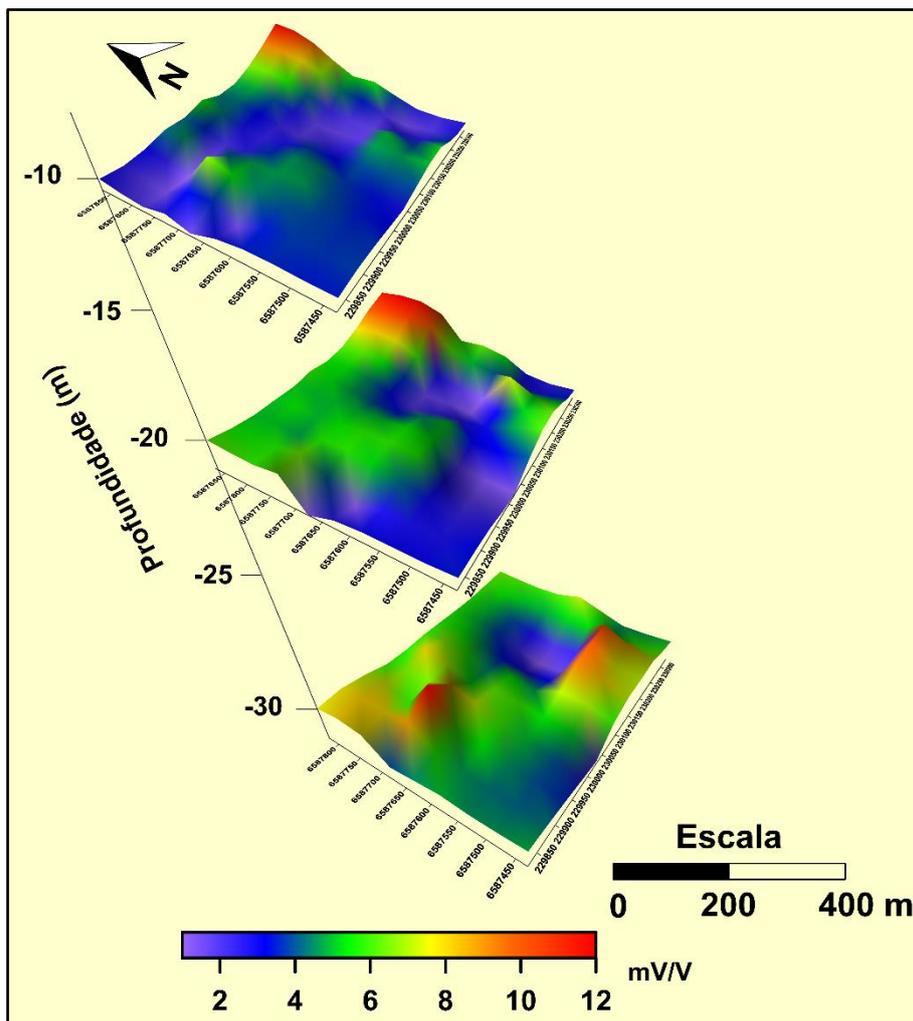
Os gráficos de anomalia de cargabilidade (Figura 33 e Figura 34) expõe um comportamento da anomalia de cargabilidade em profundidade até 30 metros e ressaltam uma direção preferencial da anomalia na direção NW evidente nas imagens á 10 metros, 20 metros e 30 metros de profundidade. A anomalia apresenta continuidade em profundidade ressaltando-se na profundidade de 30 metros assinaturas com valores na ordem de 10 mV/V.

Figura 38 - Mapa de anomalia de cargabilidade (mV/V). Profundidades: 10, 20 e 30 metros.



Fonte: autor, 2019.

Figura 39 - Esquema gráfico da anomalia de cargabilidade (mV/V) versus profundidade. Profundidade: 10, 20, 30 metros.

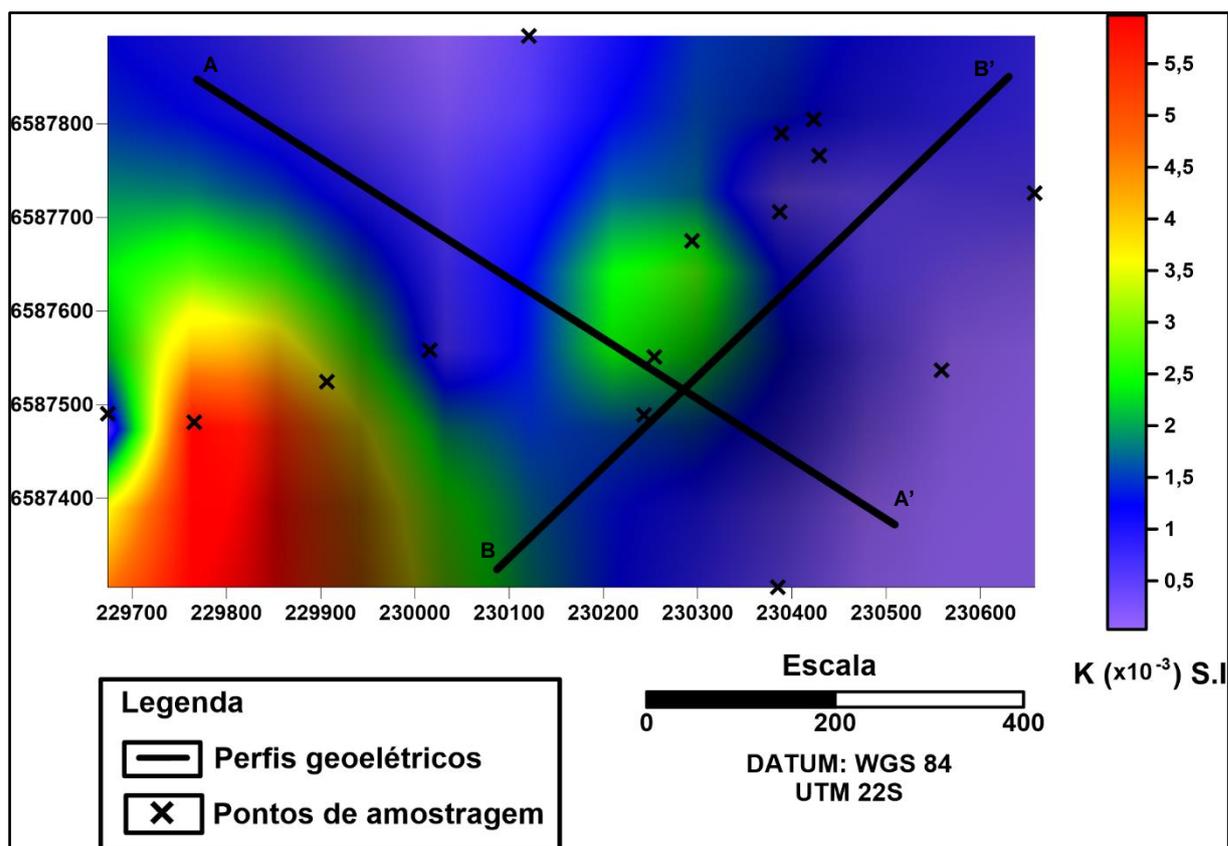


Fonte: autor, 2019.

### 10.2.3 Resultados de susceptibilidade magnética

A Figura 35 ilustra o mapa de contorno de susceptibilidade magnética feito a partir de dados já existentes na área de estudo, os resultados de susceptibilidade magnética irão ajudar na elaboração de um quadro sinótico favorável para ocorrência de óxidos metálicos associados a processos hidrotermais, através de sua correlação com outros perfis que ressaltam a presença de óxidos metálicos.

Figura 40 - Mapa preliminar da anomalia de susceptibilidade magnética para área de estudo.

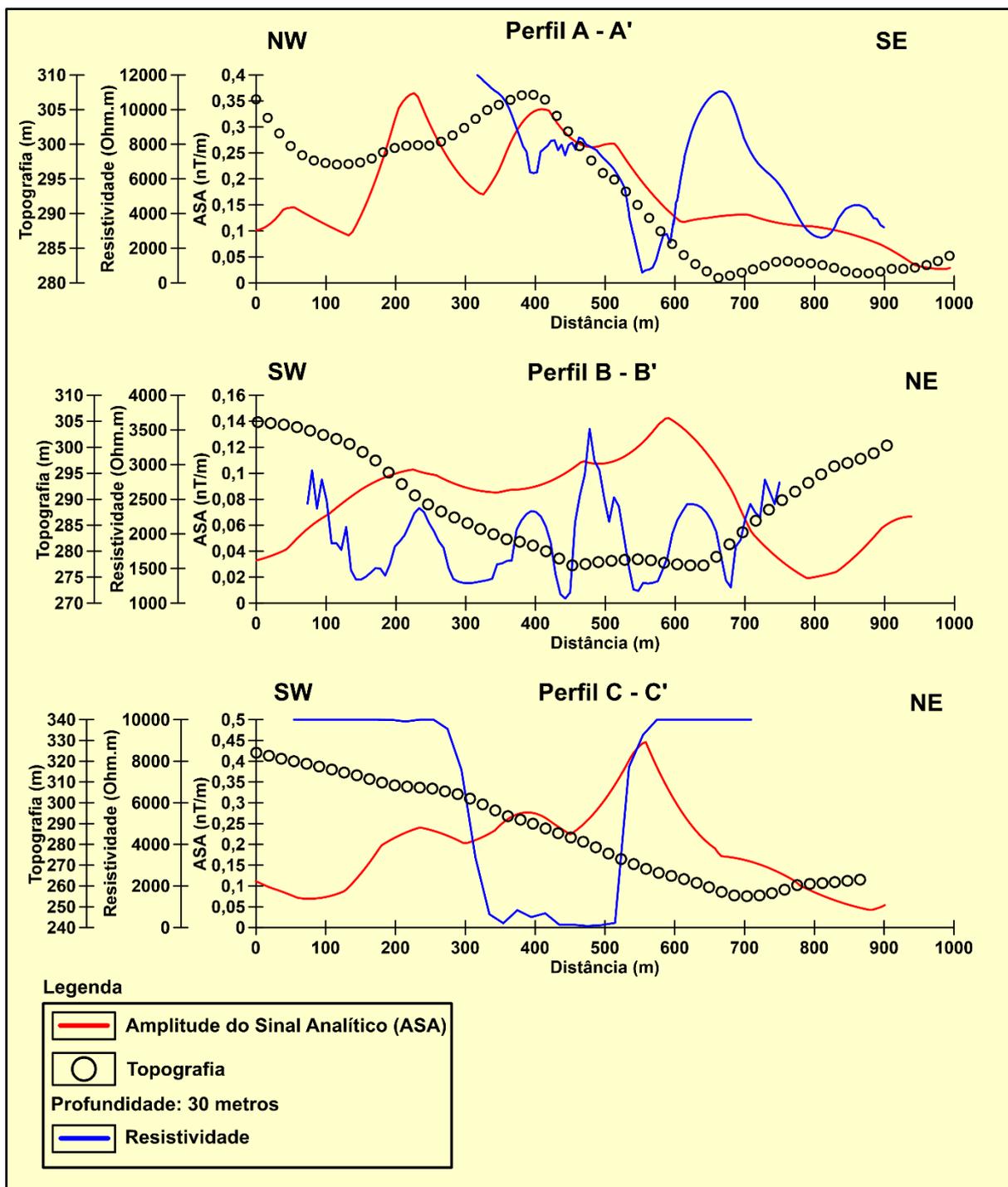


Fonte: autor, 2019.

## 11 INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS

Os altos de ASA são correlacionados a altos do topo do relevo andesítico com profundidades variando entre 20 e 25 metros, e altos valores de resistividade, maiores que 3.000 Ohm.m. Em algumas porções do perfil A-A' e B-B' os altos valores de resistividade, alto de asa e alto do relevo topográfico coincidem (conforme o modelo geológico) com altos no topo do relevo andesítico (Figura 36).

Figura 41 - Esquema gráfico ilustrando anomalia de sinal analítico, resistividade e relevo topográfico.

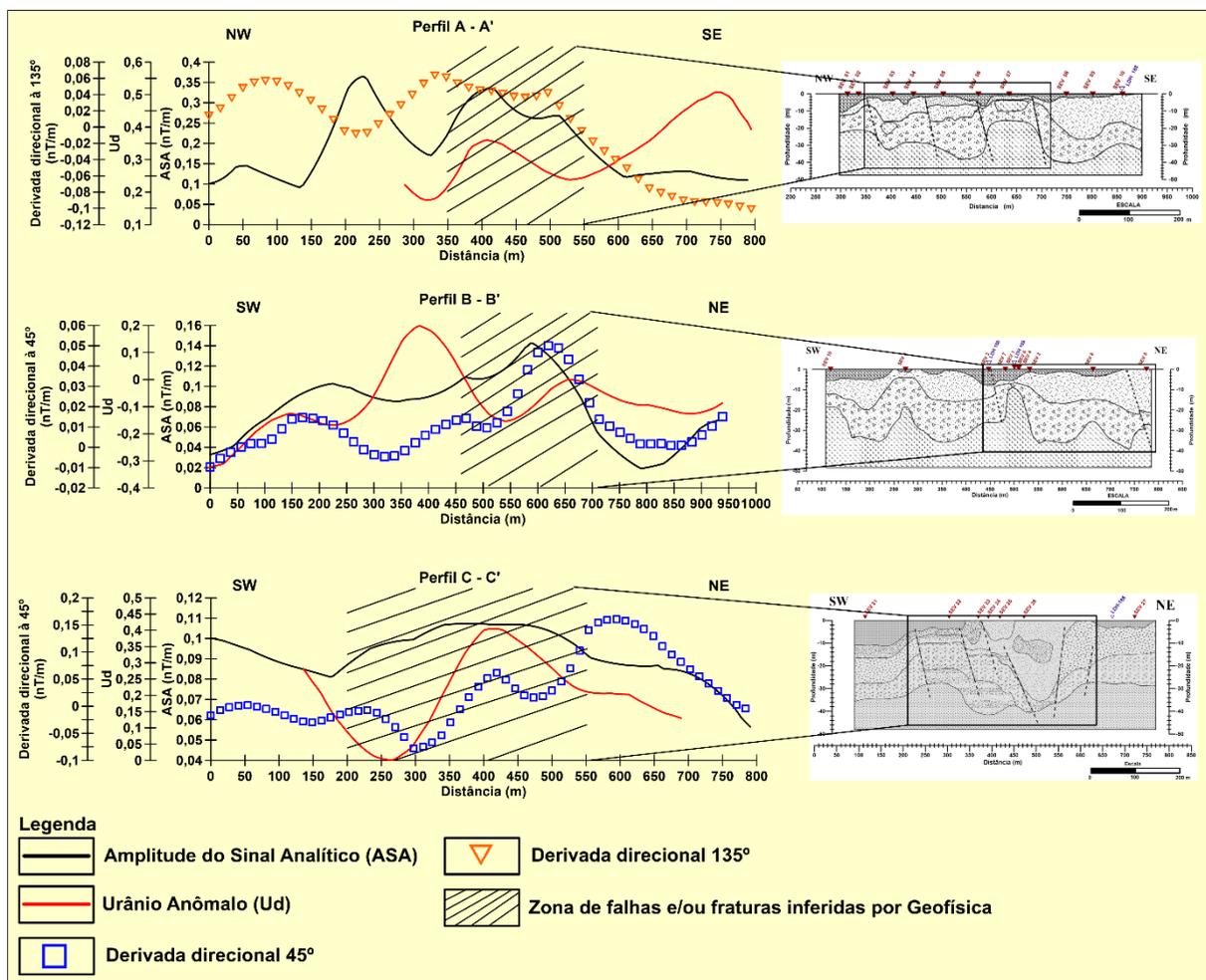


Fonte: autor, 2019.

Na Figura 37 foram utilizados alguns indicadores de falhas como Ud e as derivadas direcionais para correlacionar estes parâmetros com falhas que afetam o topo do relevo andesítico. A região central dos modelos geológicos, onde ocorre a maior presença de falhas, está representada nos gráficos por altos valores de Ud, altos valores das derivadas direcionais e altos da anomalia do sinal analítico que indica

um alto no topo do relevo andesítico, coincidindo com as falhas que afetam o topo do relevo andesítico.

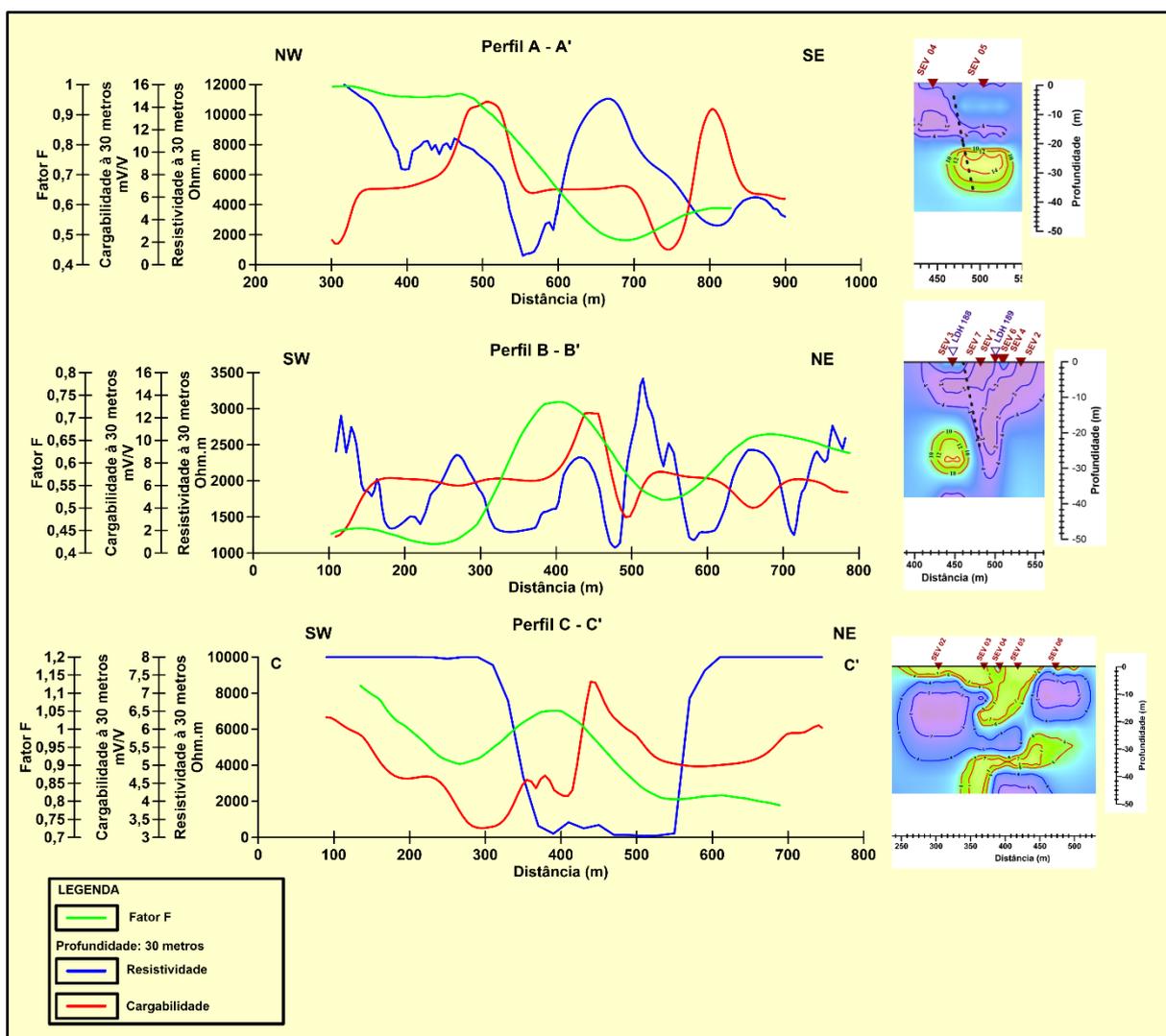
Figura 42 - Esquema gráfico integrado da amplitude do sinal analítico, urânio anômalo e derivadas direcionais.



Fonte: autor, 2019.

Os gráficos (Figura 38) ressaltam para os Perfis A-A', B-B' e C-C' um marco favorável de resposta para as anomalias de cargabilidade e resistividade que vem sendo sustentado por trabalhos anteriores (LEANDRO, 2017) que zonas favoráveis para ocorrência de óxidos metálicos associados a processos hidrotermais na área de estudo coincidem espacialmente com altos valores de cargabilidade (>8 mV/V), coincidindo espacialmente com baixos valores de resistividade (< 400 Ohm.m), e estes marcos de altos valores de cargabilidade coincidindo com baixos valores de resistividade ainda coincidem com altos de fator f que é um indicativo da ocorrência de processos hidrotermais caracterizando áreas favoráveis a formação de depósitos de óxidos metálicos.

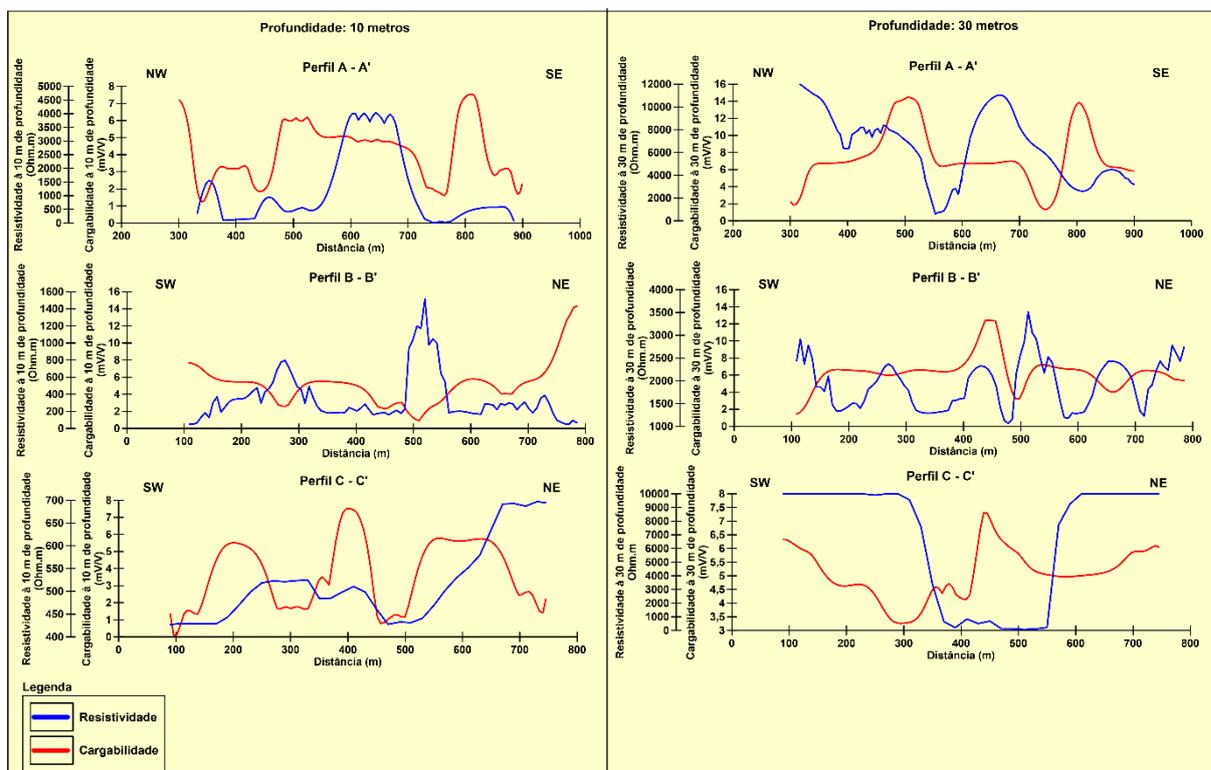
Figura 43 - Esquema gráfico integrado de anomalia do Fator F, resistividade e cargabilidade.



Fonte: autor, 2019.

A presença de altos anômalos de cargabilidade maiores que 8 mV/V e baixos de resistividade menores que 400 Ohm.m caracterizam setores favoráveis para ocorrência de óxidos metálicos nos perfis A-A' B-B' e C-C' (Figura 39), destacando que este quadro é mais evidente a uma profundidade de 30 metros. Este quadro de baixos resistivos correlacionados com altos de cargabilidade são critérios geofísicos fundamentais para prospecção de óxidos metálicos associados a atividade hidrotermal.

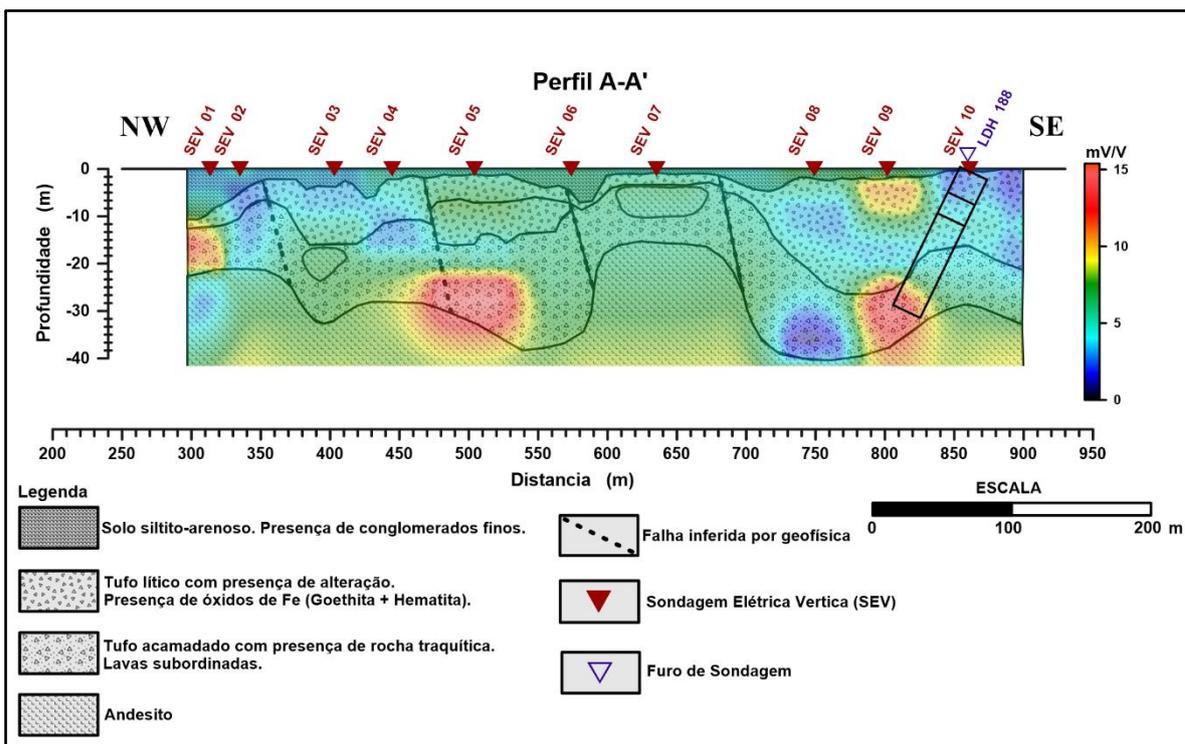
Figura 44 - Esquema gráfico das anomalias de cargabilidade e resistividade nos perfis geofísicos A-A', B-B' e C-C'.



Fonte: autor, 2019.

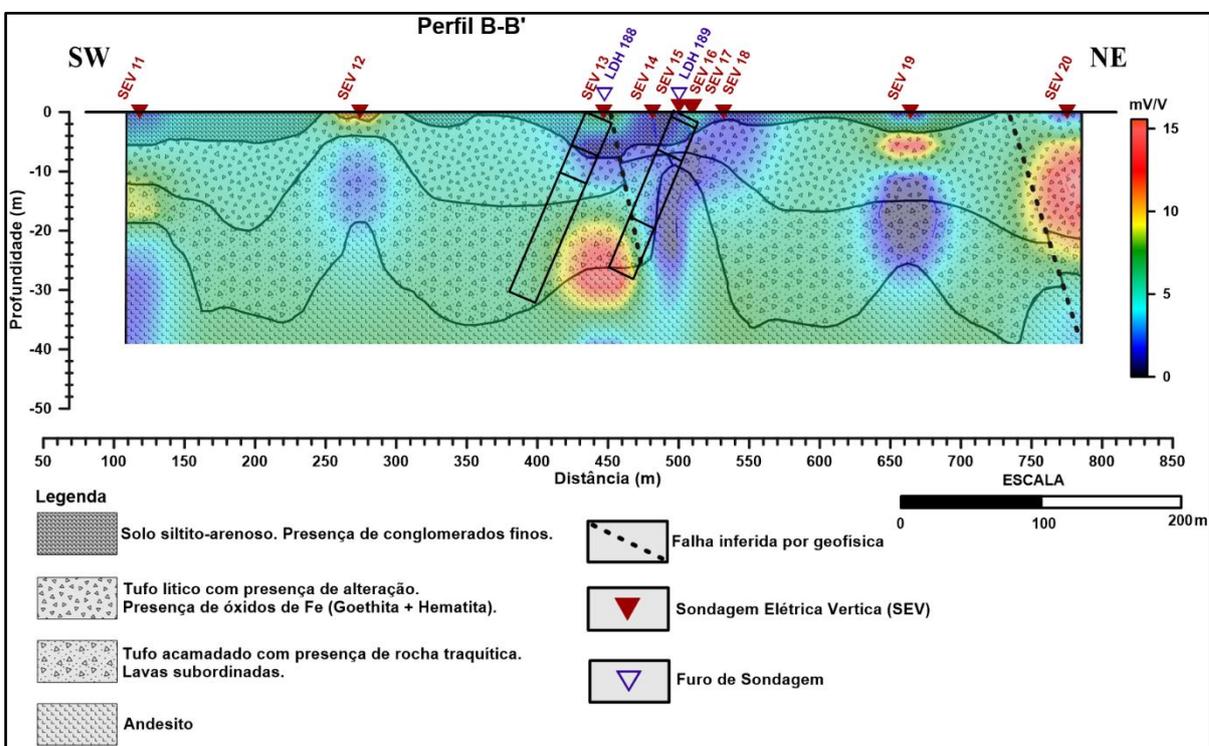
A Figura 40 ressalta que os altos de carga maiores que 8 mV/V se encontram localizados a aproximadamente 30 metros de profundidade no topo do relevo andesítico e, em zonas de depressão do topo do relevo que são afetadas por falhas. Na Figura 41 a anomalia de cargabilidade maior que 8 mV/V se localiza a uma distância de 450 metros no perfil, posicionada no topo do relevo e afetada por falhas. Para a Figura 42 a anomalia de cargabilidade localizada na porção central do modelo a aproximadamente uma distância de 350 metros é truncada por falhas verticalizadas com valores maiores que 8 mV/V em uma zona de depressão do topo do relevo andesítico onde todo o setor é controlado por falhas.

Figura 45 - perfil A-A': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade.



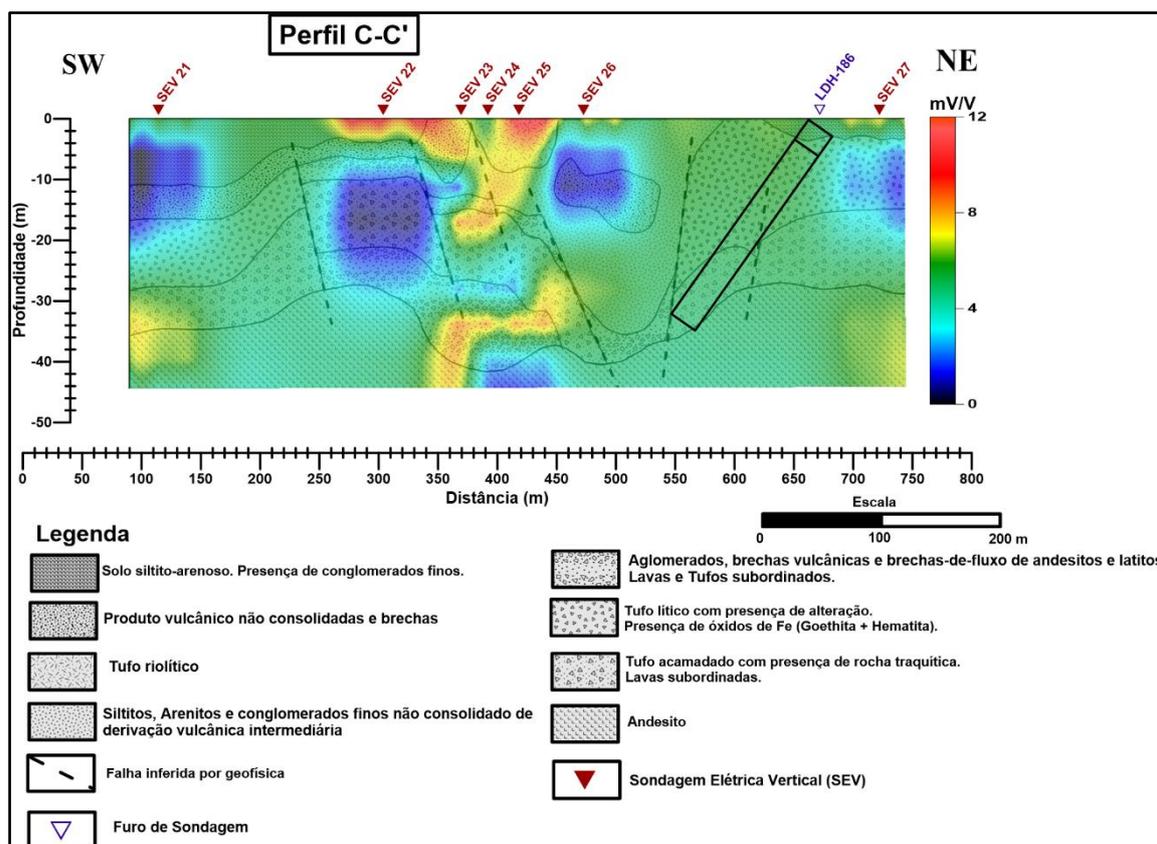
Fonte: autor, 2019.

Figura 46 - Perfil B-B': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade.



Fonte: autor, 2019.

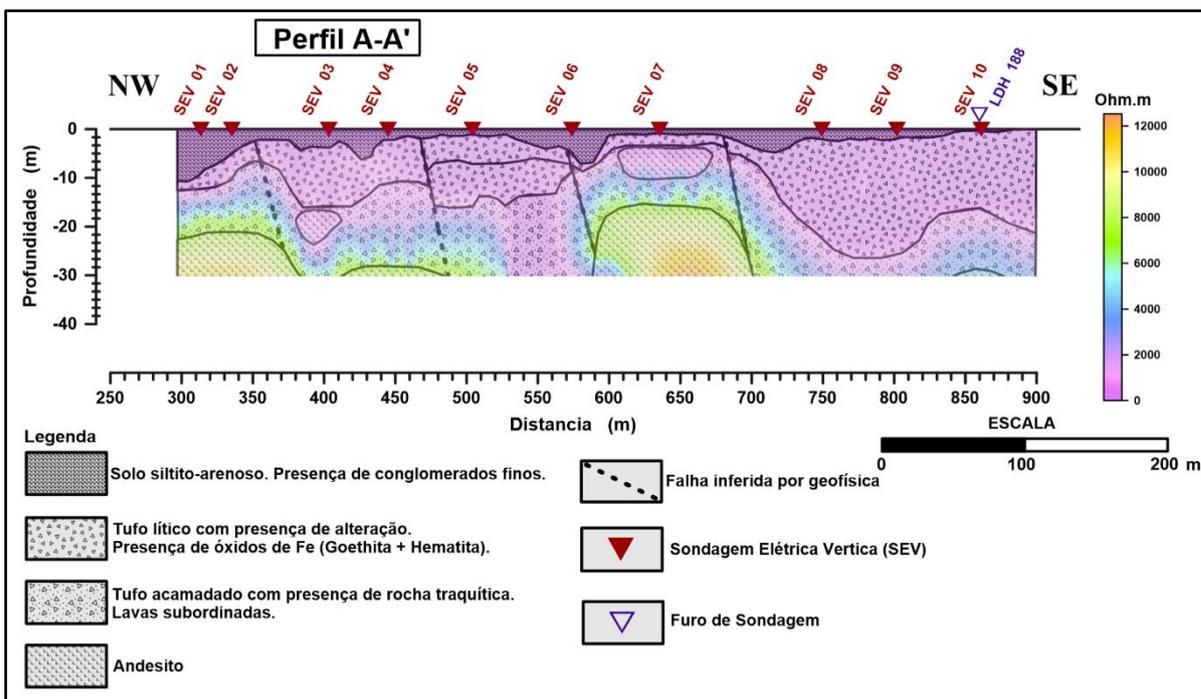
Figura 47 - Perfil C-C': Modelo geológico 2D integrado com seção de cargabilidade.



Fonte: autor, 2019.

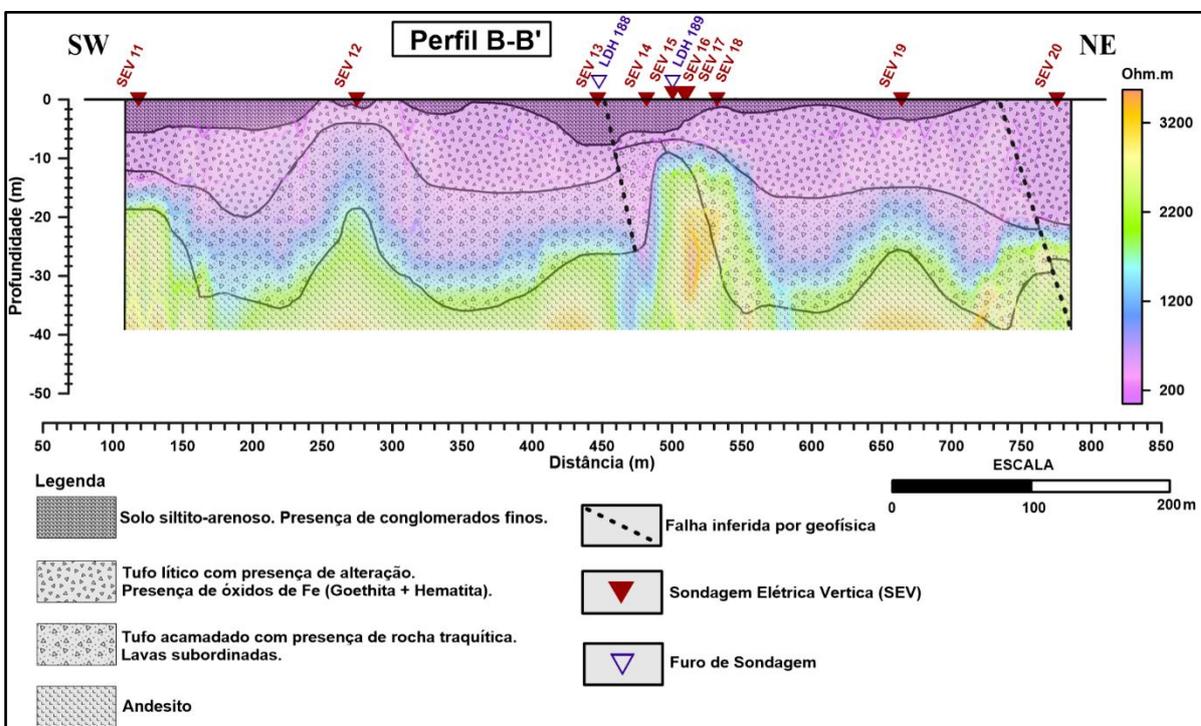
As seções de resistividade para os Perfis A-A', B-B' e C-C' (Figura 43, Figura 44 e Figura 45) caracterizam o topo do relevo andesítico com altos valores de resistividade e este topo irregular, é afetado por falhas e possui uma compartimentação de blocos. Uma faixa de valores de resistividade menores que 500 Ohm.m, caracteriza os tufo e todos produtos vulcânicos suprajacentes ao topo do relevo andesítico. Valores de resistividade maiores que 3.000 Ohm.m caracterizam o topo do relevo andesítico. Todos os perfis possuem falhas verticalizadas que apresentam continuidade e afetam o topo do relevo andesítico e controlam a compartimentação dos blocos. No perfil C-C', existe uma evidência de depressão do topo do relevo andesítico na porção central do modelo (450-600 metros) caracterizado por valores de resistividade menores que 500 Ohm.m e controlado por falhas verticais que sugerem movimentação vertical.

Figura 48 - Perfil A-A': Modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.



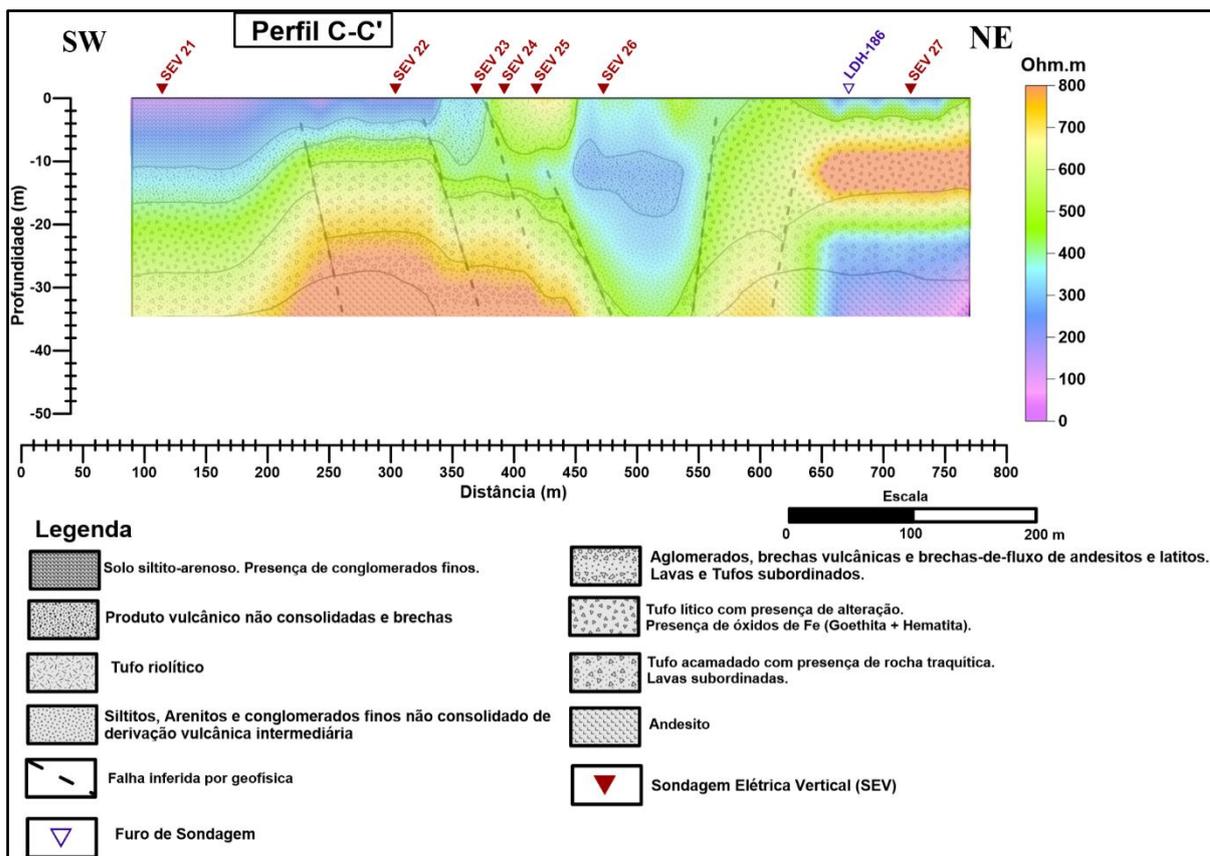
Fonte: autor, 2019.

Figura 49 - Perfil B-B': Modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.



Fonte: autor, 2019.

Figura 50 - Perfil C-C': modelo geológico 2D integrado com seção de resistividade.



Fonte: autor, 2019.

A Tabela 5 é um resumo integrado da caracterização litológica da área de estudo conforme os modelos geológicos confeccionados para os Perfis A-A', B-B' e C-C', caracterizando os valores de cargabilidade, os valores de resistividade e a profundidade característica para cada litologia.

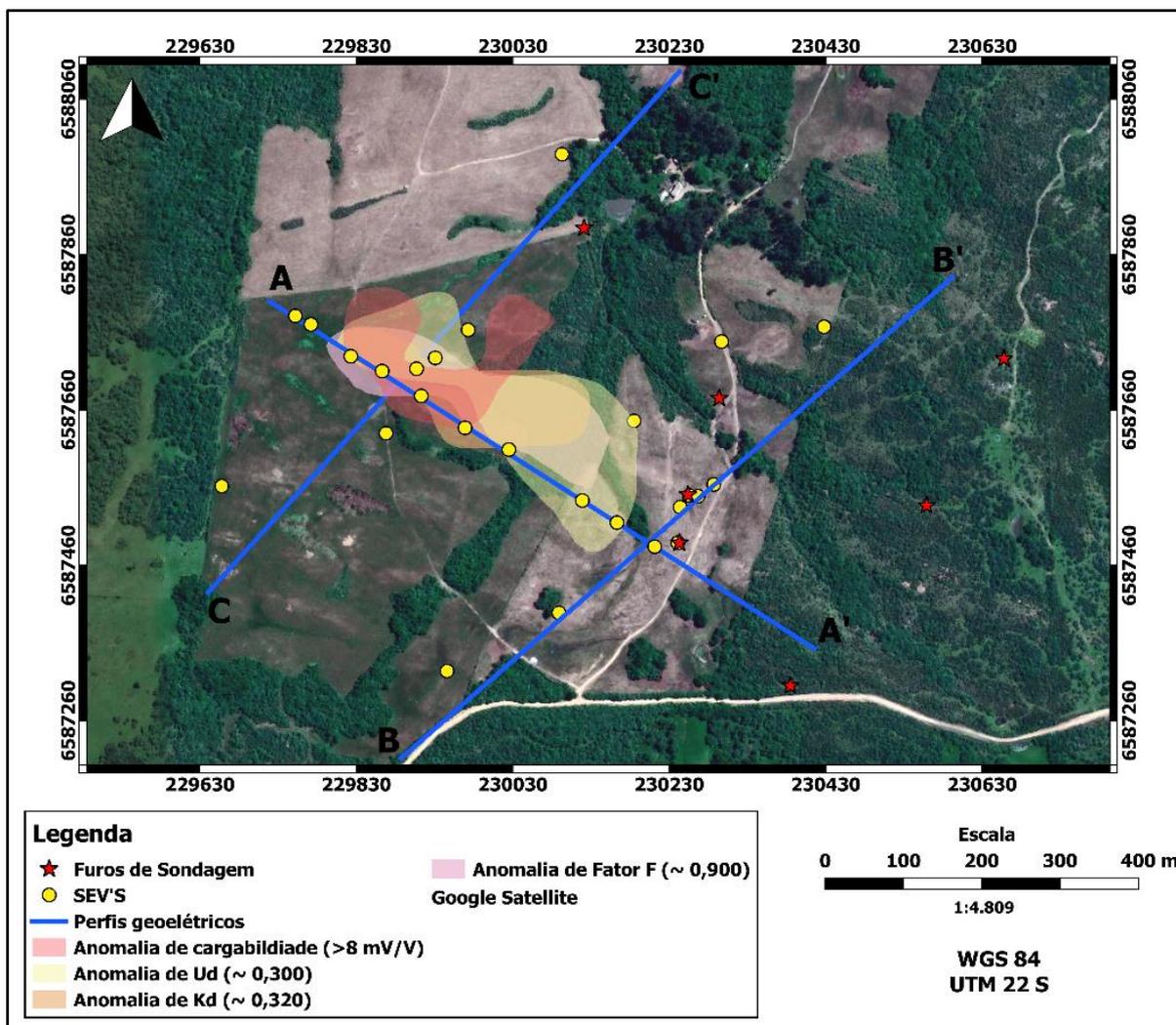
Tabela 5 - Resistividade, cargabilidade, espessura da camada e litologia conforme os modelos geoeletricos.

Simbolo	Litologia	Resistividade (Ohm.m)	Cargabilidade (mV/V)	Profundidade (metros)
	Solo siltito-arenoso. Presença de conglomerados finos.	130 Ohm.m	????	0 - 5m (Perfil A-A') 0 - 6m (Perfil B-B') 0 - 5m (Perfil C-C')
	Produto vulcânico não consolidadas e brechas	161 Ohm.m	????	10-14m (Perfil C-C')
	Tufo riolítico	240 Ohm.m	10 - 12mV/V (Perfil C-C')	0-8m (Perfil C-C')
	Siltitos, Arenitos e conglomerados finos não consolidado de derivação vulcânica intermediária	212 Ohm.m	????	0-34m (Perfil C-C')
	Aglomerados, brechas vulcânicas e brechas-de-fluxo de andesitos e latitos. Lavas e Tufos subordinados.	261 Ohm.m	6 - 8mV/V (Perfil C-C')	22-38m (Perfil C-C')
	Tufo lítico com presença de alteração. Presença de óxidos de Fe (Goethita + Hematita).	283 Ohm.m	8 - 12mV/V (Perfil A-A') 14 - 16mV/V (Perfil B-B')	4 - 26m (Perfil A-A') 4 - 18m (Perfil B-B') 14 - 30m (Perfil C-C')
	Tufo acamadado com presença de rocha traquítica. Lavas subordinadas.	298 Ohm.m	14 - 16mV/V (Perfil A-A') 14 - 16mV/V (Perfil B-B') 6 - 8mV/V (Perfil C-C')	14 - 36m (Perfil A-A') 19 - 36m (Perfil B-B') 18 - 30m (Perfil C-C')
	Andesito	5000 Ohm.m	????	30 - 45m (Perfil A-A') 20 - 45m (Perfil B-B') 30 - 45m (Perfil C-C')

Fonte: autor, 2019.

A Figura 46 ilustra o mapa integrado da área de estudo com imagem georreferenciada e o posicionamento das SEV'S, furos de sondagem e contorno anômalos de Kd, Ud, Fator F e anomalia de cargabilidade. É notável ressaltar a direção preferencial NW das anomalias cobrindo uma faixa alongada na direção NW de aproximadamente 100 metros, onde coincidem espacialmente as anomalias de Kd, Ud, Fator F e anomalia de cargabilidade (>8 mV/V), o que sugere que as estruturas mineralizadas na área de estudo se encontram na direção NW, sendo compatível com os modelos de Bongioiolo (2016, p. 32), é destacável que a presença de furos de sondagem na área de estudo parecem indicar que foram posicionados somente por critérios geológicos, não há, para a área de estudo, nenhum furo de sondagem que corte esta coincidência de contornos anômalos espacialmente orientados na direção NW, sugere-se para próximos trabalhos, que a integração de dados geofísicos utilizando gamaespectrometria, magnetometria e métodos geoeletricos de cargabilidade e de resistividade visam enriquecer a prospecção aurífera na área de estudo.

Figura 51 - Mapa integrado da área de estudo com imagem de satélite.



Fonte: autor, 2019. Imagem de satélite: Google Satellite, 2019.

## 12. CONCLUSÕES

As técnicas de processamento dos dados gamaespectrométricos se mostraram eficientes para a confecção das imagens gamaespectrométricas da área de estudo, delimitando contornos anômalos das anomalias de Kd, Ud e Fator F que coincidem espacialmente.

As técnicas de processamento dos dados magnetométricos se mostraram eficientes para confecção das imagens magnetométricas após utilização da técnica

de remoção da componente regional do campo para utilizar a componente residual do campo magnético na confecção dos mapas.

Os resultados geoeletricos de cargabilidade se mostraram eficientes para delimitação de setores da área de estudo com potenciais alvos atrativos para prospecção mineral, com valores de cargabilidade maiores que 8 mV/V que coincidem com as anomalias de Kd, Ud e Fator F.

Rochas do topo do relevo andesítico se caracterizam por valores maiores que 3000 Ohm.m, intervalos de valores de resistividade na ordem de 200-500 Ohm.m caracterizam a presença de camadas de tufo vulcânico riolítico aglomerados e derivados dos mesmos.

Os perfis gamaespectrométricos integrados com os dados geoeletricos também possibilitaram a identificação de setores com presença de zonas de fraturas e/ou falhas onde pode haver a percolação de fluido hidrotermal com mineralizações metálicas e/ou auríferas.

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 relevo andesítico se encontra a uma profundidade de aproximadamente 25 a 35 metros, caracterizado pela presença de um relevo irregular, afetado por falhas e/ou fraturas. Camadas de solo com fragmentos de rochas vulcânicas e a presença de solos silto-argiloso caracterizam uma profundidade de 2 a 15 metros.

Conforme critérios geofísicos interpretativos sugere-se que a direção preferencial das estruturas geológicas mineralizadas apresenta um *Trend* na direção NW.

### 13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDE, G., ROSALES, M. J. T., LEANDRO, C. G., GUIMARAES, M. F. S. B., DIAS, A. L. L. **Dados gamaespectrométricos e de polarização induzida aplicados a prospecção aurífera em lavras do sul - rs.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 49., 2018, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Sbg, 2018. p. 9227 - 9228.

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.

ALMEIDA, I. S. 2013. **Caracterização e modelagem 2D de uma intrusão Diorítica ao Sudoeste do Platô da Ramada – RS, a partir de dados aeromagnéticos e de susceptibilidade magnética.** Trabalho de conclusão de curso. UNIPAMPA

ACRES. ALOS geometric and radiometric specifications. 2007. Disponível em: <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>.

BARBUENA, D. **Processamento e modelagem de dados geofísicos e imagens ASTER aplicados à interpretação geológica e prospecção mineral na província aurífera de Alta floresta, MT.** 2012. 445 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências da Unicamp, Unicamp, Campinas - Sp, 2012.

BIONDI, J. C. Sistema hidrotermal magnmatico. In: BIONDI, João Carlos. **Processos metogenéticos e os depósitos minerais brasileiros.** Curitiba: Oficina de Textos, 2003. p. 99-162.

BIONDI J.C., BARTOSZECK M.K., Vanzela G.A. 2001. **Controles geológicos e geomorfológicos dos depósitos de caulim da Bacia de Campo Alegre (SC).** Rev. Bras. Geociências, 31:13-20.

BLOG PANORAMA LAVRENSE. **História de lavras do Sul**. Disponível em: <[https://www.panoramalavrense.com.br/p/historia\\_19.html/](https://www.panoramalavrense.com.br/p/historia_19.html/)>. Acesso em: 07 de Abril de 2019.

BONGIOLO, E.M., 2006. **Integração de dados mineralógicos, isótopos estáveis (o, h) e porosidade de rochas (14c-pmma) no reconhecimento da evolução da alteração no sistema hidrotermal de lavras do sul/rs, brasil**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p.

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.

CARNEIRO, C. C., CRÓSTA, A. P., SILVA, A. M., PINHEIRO, R. V. L. **Fusão de imagens altimétricas e aeromagnetométricas como ferramenta de interpretação geológica, exemplo da província mineral de carajás (pa)**. Revista Brasileira de Geofísica, [s.l.], v. 24, n. 2, p.262-271, jun. 2006.

CARVALHO M.T.N. **Integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos aplicados à prospecção de ouro nos greenstone belts de Pilar de Goiás e Guarinos, GO**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 229p.

CARRINO, T. A., FILHO, C. R. S., LEITE, E. P. **Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, Província Mineral de Carajás**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 3, p.307-320, set. 2007.

CAINZOS R.L.P. 2001. **Integração de dados geofísicos e geológicos de Cuba centro-oriental: contribuições à cartografia e exploração mineral regional.** Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Tese de Doutorado, 253p.

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.

DICKSON B.L. & SCOTT K.M. 1997. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors.** In: Airborne Magnetic and Radiometric Surveys, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17:187-200.

DOUGLAS W. OLDENBURG. **Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history.** *Mi Milligan-geophysics*, vol 62, No.5 (setember-october 1997); p. 1419-1431

FERREIRA F.J.F. & STEVANATO R. 1998. **Proposta de agrupamento de domínios gamaespectrométricos aplicada ao mapeamento geológico e à prospecção mineral.** In: SBG, Congr. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, Anais, 1:328.

FERREIRA, F. J. F.; SOUZA. J. L. 2002. **Gamaespectrometria – fundamentos, geoquímica e distribuição dos radioelementos em rochas e solos.**

FERREIRA, V. N. **Caracterização de formações ferríferas bandadas através de dados de propriedades físicas de rocha e sua integração com dados aerogeofísicos: o estudo de caso do corpo n4ws, serra norte - província de carajás.** 2014. 328 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Unb, Brasília, 2014.

FORNAZZARI NETO L., FERREIRA F.J.F., CAMPOS A.F. 2001. **Gamaespectrometria aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá-SC.** In: SBGf, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 7, Salvador, Proceedings.

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.; 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.

GNOJEK I. & PRICHYSTAL A. 1985. **A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia)**. *Geoexploration*, 23:491-502

HISTÓRICO LAVRAS DO SUL. IBGE, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/lavras-do-sul/historico>>. Acesso em: 07 de Abril de 2019.

HOOVER D.B. & PIERCE H.A. 1990. **Annotated Bibliography of GammaRay Methods Applied to Gold Exploration**. USGS Open-File Report, p.90-203.

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.

JANIKIAN, L., ALMEIDA, R.P., FRAGOSO-CÉSAR, A.R.S., FAMBRINI, G.L. 2003. **Redefinição do grupo bom jardim (neoproterozóico 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.

JIANG Z.H., FUQ., SONG X.J., YUAN G.P., XUANL., ZHANG D.H., GUAN C.J. and WANG H., (2009) **“The application and significance of the induced polarization method in exploration of the shear of Jidong - China,”** *Geology and Exploration*, 2.

JULIANA RIBEIRO (Brasil). **DNIT.** 2013. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>>. Acesso em: 10 maio 2019.

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 southernmost 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.

LEANDRO, G. C. 2017. **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 de Mestrado. UNIPAMPA.

MENEZES, P. T. L., ROIG, H. L., SILVA, G. B. MANE, M. A. **Prospecção mineral no Grupo Paranoá. reprocessamento de dados aerogamaespectrométricos e**

**interpretação integrada a imagens TM-LANDSAT 5.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 3, p.343-355, ago. 2006.

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.

MINTY, B. R. S. 1997. **Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry.** AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics.

NABLIGHIAN, M. N. **The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation.** *Geophysics*, 37. 501-517. 1972.

NABLIGHIAN, M. N. **Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section.** *Geophysics*, 39, 85-92. Oasis Montaj, V 6.4.2 (HJ) – Standart Edition. Copyright 2007, Geosoft Inc. 1974.

NAIDU & MATHEW, **Analysis of Geophysical Potential Fields**, Elsevier, Advances in Exploration Geophysics 5. 1998.

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.

FORNAZZARI N., L. FERREIRA, F. J. F. **Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente sig aplicada à prospecção de ouro na folha botuverá, sc.** Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n. 2, p.197-208, jun. 2003.

GEOSOFT INCORPORATED. 2007. **Montaj magmap filtering; 2-D frequency domain of potential field data extension for oasis montaj v 6.1.** Toronto, Ontario, Canada.

OLIVEIRA, C. H. E., 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.

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., WILDNER, W. 2014. **Estágios evolutivos da bacia do camaquã (rs).** Ciência e Natura, v.36, n.3, p183-193.

PIRES A.C.B. 1995. **Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás.** Rev. Bras. Geociências, 25:61-68

QUADROS T.F.P. 2000. **Integração de dados em ambiente SIG para mapeamento de favorabilidade mineral de ouro na Ilha Cristalina de Riviera (Uruguai).** Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Tese de Doutorado, 259p

RAMOS, L. N. R. A. **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 – UnB, Instituto De Geociências – IG, Laboratório De Geofísica Aplicada, Dissertação de Mestrado N° 272, Brasília - DF 2010.

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.

ROEST WRJ, VERHOEF J & PILKINGTON M. **Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal,** Geophysics, 57:116-125. 1992.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to Applied and Environmental Geophysics.** Ed. John Wiley and Sons. 796 p. 1997.

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.

SAUNDERS D.F., TERRY S.A., THOMPSON C.K. 1987. **Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data** in petroleum reconnaissance. Geophysics, 52:1547-1556

TERRAPLUS Inc. KT-10 Magnetic Susceptibility Meters. User guide < disponível em <http://www.terraplus.ca/products/pdf/KT-10.pdf>>

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

VASCONCELOS, R. M.; METELO, M. J.; MOTTA, A. C.; GOMES, R. D. - 1994 - **Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil.**CPRM, Rio de Janeiro.

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

WHITE, N. C., K. YANG, AND W. LI, in press, **Discovery of the Haboporphry Cu-Au-(Mo) system in southern China: its lessons forexploration everywhere:** Proceedings of the tenth biennial Societyfor Geology Applied to Mineral Deposits meeting.