



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA  
ASSOCIADA A INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE NA  
PROSPECÇÃO DE ZONA MINERALIZADA NO *GREENSTONE BELT*  
FAINA, GOIÁS**

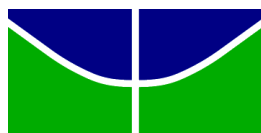
Dissertação de Mestrado n° 130

**Maria Cristina Souza Alagia**

Brasília – DF

2018

---



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA  
ASSOCIADA A INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE NA  
PROSPECÇÃO DE ZONA MINERALIZADA NO *GREENSTONE BELT*  
FAINA, GOIÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas  
Área de Concentração: Geofísica.

**Orientador:** Prof. Dr. Welitom Rodrigues  
Borges

Brasília – DF

2018

---



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
LABORATÓRIO DE GEOFÍSICA APLICADA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA  
ASSOCIADA A INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTIFONTE NA  
PROSPECÇÃO DE ZONA MINERALIZADA NO *GREENSTONE BELT*  
FAINA, GOIÁS**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
(Instituto de Geociências/UnB – Orientador)

---

Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares  
(Instituto de Geociências/UnB – Orientador)

---

Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos  
(Universidade Federal de Goiás)

Brasília – DF  
2018

---

---

Dedico essa dissertação às minhas  
sobrinhas Maria Valentina e Donatella.

---

---

## AGRADECIMENTOS

Gratidão.

Ao Instituto de Geociências pela oportunidade, bem como professores, servidores e colegas de pós-graduação. Em especial as mulheres cientistas, líderes, que são minha inspiração diária.

Ao meu orientador de mestrado professor Welitom Borges, pelo conhecimento, confiança, paciência e todo suporte, agradecer também ao seu orientando de Doutorado Eduardo (Dudu ou B2) por toda ajuda e disponibilidade. Ao meu orientador de graduação Maximilian Fries por todo o apoio desde a graduação.

Toda minha família, por compreender essa distância, essa ausência. Em especial, as mulheres da minha vida, mamãe, tia Ana e tia Marcia por não me permitirem fraquejar ou desistir, mesmo que inconscientemente.

Minhas amigas, de rocha ou não, por simplesmente 'estarem lá' de inúmeras formas e particularidades: Miloka, Line, Marty, Mori, Lulu, Jessy. Miloka, obrigada, ainda, por me dar meu primeiro afilhado no meio desse caos.

A empresa Orinoco Brasil Mineração, pela disponibilidade dos dados e pela oportunidade de trabalhar ao lado de gigantes.

---

---

A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

---

---

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>   | <b>7</b>  |
| RESUMO.....  | 7         |
| ABSTRACT.....  | 9         |
| 1.1 APRESENTAÇÃO.....  | 10        |
| 1.2 OBJETIVOS.....   | 11        |
| 1.2.2 Objetivos Específicos.....   | 11        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA.....   | 12        |
| 1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....   | 12        |
| 1.5 HISTÓRICO DE INVESTIGAÇÃO NA ÁREA.....   | 13        |
| 1.6 CONTEXTO GEOLÓGICO.....  | 15        |
| 1.7 MÉTODOS DE TRABALHO.....   | 19        |
| • Eletromagnético Transiente.....  | 19        |
| • Magnetometria e Susceptibilidade Magnética.....  | 21        |
| • Radiométrico.....  | 24        |
| • Eletrorresistividade.....  | 26        |
| • Polarização Induzida.....  | 27        |
| • Domínio do Tempo:.....   | 28        |
| • Domínio da Frequência:.....  | 29        |
| 1.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 33        |
| <b>CAPÍTULO 2.....</b>   | <b>36</b> |
| <i>Análise de parâmetros de aquisição de polarização induzida no domínio da frequência para caracterização de zona aurífera associada a sulfetos disseminados no Greenstone Belt Faina, Goiás.....</i> | <i>36</i> |

---

---

|  |           |
|--|-----------|
| RESUMO .....   | 36        |
| ABSTRACT .....   | 37        |
| 2.1 INTRODUÇÃO.....  | 38        |
| 2.2 GEOLOGIA LOCAL .....   | 40        |
| 2.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....   | 42        |
| 2.4 ANÁLISE DE DADOS .....   | 45        |
| 2.5 MODELAGEM .....  | 52        |
| 2.6 CORRELAÇÃO COM ÁREAS MINERALIZADAS .....   | 56        |
| 2.7 CONCLUSÕES .....   | 63        |
| 2.8 AGRADECIMENTOS .....   | 64        |
| 2.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 64        |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>  | <b>66</b> |
| <i>Processamento e integração de dados geofísicos em área brownfield, na determinação de continuidade de mineralização de ouro, Greenstone Belt Faina-GO .....</i> | <i>66</i> |
| RESUMO .....   | 66        |
| ABSTRACT .....   | 67        |
| 3.1 INTRODUÇÃO.....  | 68        |
| 3.2 GEOLOGIA .....   | 70        |
| 3.3 BASE DE DADOS .....  | 71        |
| 3.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....   | 74        |
| • Eletromagnético Transiente.....  | 74        |
| • Magnetometria e Susceptibilidade Magnética .....   | 74        |
| • Radiométrico .....   | 75        |
| • Eletrorresistividade e Polarização induzida .....  | 75        |
| 3.5 ANÁLISE DOS DADOS .....  | 77        |
| • Eletromagnético Transiente.....  | 77        |
| • Magnetometria e Susceptibilidade Magnética .....   | 81        |

---



---

|   |     |
|---|-----|
| • Radiométricos.....                                | 85  |
| • Eletrorresistividade e Polarização induzida ..... | 86  |
| 3.6 INTEGRAÇÃO .....                                | 93  |
| 3.7 CONCLUSÕES .....                                | 98  |
| 3.8 AGRADECIMENTOS .....                            | 99  |
| 3.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                | 100 |

---

---

## LISTA DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>7</b>  |
| Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo com os limites dos <i>Greenstones Belts</i> de Faina e Goiás (Santa Rita), separados pela Falha de Faina. ....   | 11        |
| Figura 1.2 – Limites e subdivisão do Terreno Arqueano de Goiás (JOST <i>et al</i> , 2014). ....   | 16        |
| Figura 1.3 – Mapa geológico regional dos <i>Greenstones Belts</i> de Faina e Santa Rita, separados pela Falha de Faina e limitados pelos complexos Granito-Gnáissicos Uv, a SW, e Anta, a NE (modificado de CPRM,2004). ....               | 17        |
| Figura 1.4 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de Orinoco, 2017). ....   | 18        |
| Figura 1.5 – Princípio físico do método eletromagnético transiente: Campo primário (A). Indução eletromotiva (B). Campo secundário (C). (modificado de MCNEILL, 1980) .....   | 20        |
| Figura 1.6 - Espectro de raios gama natural (MILSOM, 1989). ....  | 25        |
| Figura 1.7– Configuração dos principais arranjos eletródicos, e seus respectivos fatores geométricos. A distância correspondente a $\infty$ (infinito) geralmente é superior a 20 vezes a distância de ‘a’ (Modificado de LOKE, 2004). .... | 27        |
| Figura 1.8– Efeito de Polarização Induzida com aplicação de um pulso de corrente com polaridade (REYNOLDS, 1997). ....  | 28        |
| Figura 1.9– Curva de decaimento de potencial com a identificação das áreas onde registram-se as cargabilidades (a) $M_i$ (parcial) e (b) $M_g$ (global) (REYNOLDS, 1997). ....  | 29        |
| Figura 1.10– Representação esquemática do aumento do efeito de Polarização Induzida ( $V_{Pa}$ para $V_{Pc}$ ) com o acréscimo do tempo de carga (REYNOLDS, 1997).....  | 30        |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>36</b> |
| Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo com os limites dos <i>Greenstones Belts</i> de Faina e Goiás (Santa Rita), separados pela Falha de Faina. ....   | 40        |
| Figura 2.2 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de ORINOCO, 2017). ....   | 41        |
| Figura 2.3 – Fotografias evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento <i>SYSCAL PRO</i> em campo.....  | 43        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| Figura 2.4– Imagem aérea de veículo aéreo não tripulado (VANT) da área de pesquisa com a localização da linha de teste de <i>Stack</i> e o contexto geológico sobreposto. ....   | 44        |
| Figura 2.5 – Distribuição dos erros de resistividades aparentes registradas com diferentes <i>stacks</i> para os dez níveis de profundidade investigados. Notam-se que uma maior variância dos registros a partir do nível 8. ....                       | 46        |
| Figura 2.6– Gráfico da mediana do desvio padrão e do coeficiente de variação de Pearson. ....  | 47        |
| Figura 2.7– Gráfico das diferenças das resistividades com <i>stacks</i> diferentes por nível de investigação. ....   | 47        |
| Figura 2.8– Simulação de gráfico exponencial que atenda ao número de níveis desejado, para a definição do multiplicador do expoente (aproximadamente 0.3) ....   | 48        |
| Figura 2.9 - Gráficos <i>Stacks versus</i> Multiplicador do expoente $x$ , para a definição do número de <i>stack</i> (entre 14 e 15 <i>stacks</i> para o gráfico linear).....   | 49        |
| Figura 2.10 – Coeficiente de variação de Pearson, Desvio Padrão das diferenças dos valores de <i>stack</i> (DIF 5-3, DIF 5-1 DIF 3-1, respectivamente) plotados em seções. ....  | 50        |
| Figura 2.11 – Modelos de resistividade elétrica registrados em único local, com empilhamentos de registros distintos e respectiva distribuição de pontos. Modelos com <i>stack</i> de (A) 5 leitura, (B) 3 leituras, e (C) 1 leituras.....               | 53        |
| Figura 2.12 - Seções de resistividade (RES), porcentagem de frequência efetiva (PFE) e fator metal (FM) dos arranjos Dipolo-dipolo, <i>Wenner</i> e <i>Wenner-Schlumberger</i> , todas as seções com a mesma escala de cores (para cada parâmetro). .... | 54        |
| Figura 2.13 - Imagem aérea de VANT da área de pesquisa sobreposta ao mapa geológico com a localização das linhas 01, 02 e 03, de correlação geológica. ....  | 56        |
| Figura 2.14 – Seções da Linha 01, ao nordeste da cava da antiga mina. Seção de RES, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.....   | 58        |
| Figura 2.15 – Seções da Linha 02, ao nordeste da cava da antiga mina. RES, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente. ....   | 60        |
| Figura 2.16 – Seções da Linha 03, ao sudoeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.....  | 62        |
| <b>CAPÍTULO 3.....</b>   | <b>66</b> |

---

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1– Mapa de localização da área de estudo com os limites dos <i>Greenstone Belts</i> de Faina e Goiás (Santa Rita).....   | 69 |
| Figura 3.2 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de ORINOCO, 2017).....  | 70 |
| Figura 3.3 – Malhas de geofísica e geoquímica sobrepostas a imagem aérea de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), respectivamente: magnetometria (A), radiometria (B), Transiente Eletromagnético 200 (C), Transiente Eletromagnético 100 (D), susceptibilidade magnética do solo (E), geoquímica do solo (F) e da rocha (G) e polarização induzida no domínio da frequência (H)..... | 72 |
| Figura 3.4 - Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral e seções de Polarização induzida no domínio do tempo e eletrorresistividade. Seções 01, 02, 03, apresentadas nesse trabalho (modificado de ORINOCO, 2017).....  | 73 |
| Figura 3.5 – Fotografias evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento <i>SYSCAL PRO</i> em campo.....  | 76 |
| Figura 3.6 – Rotina de cálculo de parâmetros, filtragem, inversão, modelagem e integração de dados geoeletricos usada neste trabalho. ....  | 77 |
| Figura 3.7– Resposta canal 1 Transiente Eletromagnético – <i>loop</i> de 200m.....  | 78 |
| Figura 3.8 – Resposta canal 1 Transiente Eletromagnético - <i>loop</i> de 100m. ....  | 78 |
| Figura 3.10 - Respostas dos canais 1,3,8,10 e 16 do Transiente Eletromagnético com um <i>loop</i> de 200m. ....   | 80 |
| Figura 3.9 – Respostas dos canais 1,3,8,10 e 16 do Transiente Eletromagnético com um <i>loop</i> de 100m. ....  | 80 |
| Figura 3.11 - Mapa de Amplitude do sinal analítico dos dados magnéticos.....  | 81 |
| Figura 3.12 - Espectro de potência radial para os dados magnéticos e profundidade estimada. ....  | 82 |
| Figura 3.13 - Apresentação do formato de filtragem a partir do espectro de potência radial. ....  | 83 |
| Figura 3.14 - Mapa de Amplitude do sinal analítico dos dados magnéticos. (A) Filtro TMI – anomalias profundas, (B) Filtro TMI – anomalias intermediárias, (C) Filtro TMI – anomalias  |    |

---

---

|  |    |
|--|----|
| rasas, (D) ASA (Filtro TMI – anomalias profundas), (E) ASA ( Filtro TMI – anomalias intermediárias), (F) ASA (Filtro TMI – anomalias rasas).....   | 84 |
| Figura 3.15 - Mapa de susceptibilidade magnética do solo.....  | 85 |
| Figura 3.16 – Mapa RGB gamaespectrometria. ....  | 86 |
| Figura 3.17 – Seções da Linha 01, ao nordeste da cava da antiga mina. Seção de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente. ....  | 88 |
| Figura 3.18 – Seções da Linha 02, ao nordeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.....  | 90 |
| Figura 3.19 – Seções da Linha 03, ao sudoeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.....  | 92 |
| Figura 3.20 - Dados geofísicos da área integrados em plataforma 3D para análise qualitativa: (A) Mapa gamaespectrométrico, razão K/Th. (B) Mapa gamaespectrométrico de Potássio. (C) Mapa gamaespectrométrico de Tório. (D) Mapa gamaespectrométrico de Urânio. (E) Mapa magnetométrico com o filtro ASA (F) Mapa eletromagnético Transiente Eletromagnético 100 Hz. (G) Mapa geológico com topografia e o contorno da antiga mina. .... | 94 |
| Figura 3.21 – Seções de Fator Metal dispostas em <i>software</i> 3D ( <i>Oasis Montaj</i> ), é possível verificar 3 tendências principais de alto Fator Metal,: (1) Primeiro nível zona mineralizada - conhecido, (2) Segundo nível zona mineralizada - conhecido, (3) anomalia coincidente com teor positivo de ouro na seção 02 (Anomalia I). Todos os níveis com tendência NE/SW...   | 95 |
| Figura 3.22 – Mapa de anomalia de solo (Orinoco, 2016) .....   | 96 |
| Figura 3.23 – Modelos de Fator Metal, que faz correspondência a alteração hidrotermal nordeste e sudoeste integrados (Superfície vermelha). ....   | 97 |

---

## LISTA DE TABELAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>7</b>  |
| Tabela 1.1 - A abundância dos principais radioisótopos. ....  | 24        |
| Tabela 1.2 - Largura da janela de energia usada por um espectrômetro de raio $\gamma$ típico (MILSOM, 1989). ....   | 25        |
| Tabela 1.3 - Concentrações radioativas em rochas (adaptado TELFORD et al., 1990).....   | 26        |
| Tabela 1.4 – Variações nas definições de Efeito de Frequência e Fator Metal, e seus respectivos autores e ano de publicação. ....   | 31        |
| Tabela 1.5 – Cargabilidade típica de alguns materiais geológicos (modificada de TELFORD et al., 1990).....  | 32        |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>36</b> |
| Tabela 2.1 – Variações nas definições de Efeito de Frequência e Fator Metal, e seus respectivos autores e ano de publicação. ....   | 43        |
| Tabela 2.2 – Análise estatística dos dados para o teste de <i>stack</i> . Média e mediana para o Desvio Padrão (DP), e Coeficiente de variação de Pearson (CV) dos dados de cada nível de investigação. ....  | 45        |
| Tabela 2.3 – Parâmetros de profundidade, número de pontos antes e após a filtragem, obtidos nos conjuntos de dados registrados com os arranjos Dipolo dipolo, <i>Wenner</i> e <i>Wenner-Schlumberger</i> com ciclos de corrente com períodos de 2 e 8 segundos..... | 51        |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>66</b> |

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIF – formação ferrífera bandada  
CV – Coeficiente de Variação de Pearson  
DD – Dipolo dipolo  
DP – Desvio Padrão  
E – Leste  
EF – Efeito de Frequência  
GBF – *Greenstone Belt* Faina  
IP – Polarização Induzida  
FM – Fator Metal  
K – Potássio  
MJSA – Mineração Jenipapo SA  
N – Norte  
NE – Nordeste  
NW – Noroeste  
PFE – Efeito percentual de frequência  
RES – Eletrorresistividade  
RVR - *Roving Vector Receiver*  
S – Sul  
SE – Suldeste  
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas  
SW – Suldoeste  
Th – Tório  
TMI – *Total Magnetic Intensity* (Campo Anômalo Total)  
TTG – Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito  
U – Urânio  
UTM – Universal Transversa de Mercator  
VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado  
W – Oeste  
WE – *Wenner*  
WS – *Wenner-Schlumberger*

## CAPÍTULO 1

### RESUMO

A área de estudo localiza-se em Faina-GO, no *Greenstone Belt* Faina, especificamente dentro do Bloco Arqueano de Goiás, o qual por sua vez está inserido dentro da Faina de Dobramentos Brasília, Província Tocantins. No final dos anos 90, diversos projetos geofísicos sobrepostos foram realizados no Alvo Sertão, dentre os quais estão os levantamentos: magnetométrico, radiométrico, transiente eletromagnético e susceptibilidade magnética. Esse trabalho propôs o reprocessamento e integração desses dados, além da aplicação do método polarização induzida no domínio da frequência, até então não testado na área, objetivando: (i) atestar a importância da utilização de métodos geofísicos na exploração mineral, (ii) verificar a potencialidade do método da polarização induzida no domínio da frequência na identificação de zonas mineralizadas segundo o contexto geológico em questão, (iii) auxiliar através de delimitação das anomalias em ambiente 3D os trabalhos de modelamento geológico do corpo mineralizado e (iv) orientar os trabalhos de sondagem e atestar o potencial de crescimento do alvo. Primeiramente são apresentados os resultados de testes de aquisições 2D com diferentes parâmetros, realizados com o método da polarização induzida no domínio da frequência em uma área com confirmação de mineralização aurífera sulfetada. No campo foram realizados testes de razão sinal-ruído em função de número de leituras por ponto e de configuração de eletrodos (Dipolo dipolo, *Wenner* e *Wenner-Schlumberger*) com períodos de injeção de corrente com 2 e 8 segundos, o que possibilitou o cálculo das resistividades, das porcentagens de frequência efetiva e dos fatores metal indicados por diferentes bibliografias. A análise dos dados de campo indicou os parâmetros de aquisição de dados mais efetivos para se obter uma resposta geofísica de qualidade. Os resultados com os diferentes arranjos eletródicos indicam que, apesar de ter uma baixa razão sinal/ruído, o método Dipolo dipolo apresentou contraste lateral mais marcante em todos os parâmetros testados (resistividade, porcentagem do efeito de frequência e fator metal), além de possuir o menor tempo de aquisição, o que o torna mais viável. A reanálise e integração dos dados antigos antecederam a campanha completa de polarização induzida no domínio da frequência e foi fundamental na definição da área do levantamento, disposição das linhas e parâmetros de aquisição. Todos os dados de geofísica fornecidos indicaram um corredor com sinal e geometria coincidente à área de ocorrência dos halos de alteração hidrotermal, onde a mineralização está inserida (área da antiga lavra), as tendências das anomalias geofísicas indicam potencial de mineralização em aberto segundo a direção sudoeste. Essa informação foi validada pelas seções de eletrorresistividade, fator metal



e porcentagem de frequência efetiva realizadas nesse projeto. Foram realizadas um total de 15 linhas de aquisição de resistividade, seguidos do processamento, inversão, integração dos dados e, por fim, realizada a modelagem direta do pacote potencialmente mineralizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eletromagnético Transiente, *Greenstone Belt* Faina, Magnetometria, Ouro sulfetado, Polarização Induzida, Radiometria.

**ABSTRACT**

*The study area is located in Faina-GO, under a Greenstone Belt, called Greenstone Belt Faina. At the end of the 1990s, several contiguous and overlapping geophysical projects were carried out at the Sertão Range, among which the geophysical surveys were: magnetometric, radiometric, transient electromagnetics and magnetic susceptibility. This work proposed the reprocessing and integration of these data, besides the application of induced polarization method (frequency domain), not yet tested in the area, to attest the importance of geophysics in mineral exploration, and to verify the potentiality of the polarization method induced in the identification of mineralized zones in the Sertão target geological context. Firstly, this work presents the results of 2D acquisitions carried out with the frequency domain induced polarization method in an area with confirmation of sulfided gold mineralization. In the field, tests of signal-to-noise ratio were performed according to the number of readings per point, and electrode configuration (Dipole dipole, Wenner and Wenner-Schlumberger) with current injection periods of 2 and 8 seconds. the calculation of resistivities, percentages of effective frequency and metal factors indicated by different bibliographies. Field data analysis indicated the most effective data acquisition parameters to obtain a quality geophysical response. The results with different electrode arrangements indicate that, despite having a low signal-to-noise ratio, the Dipole dipole method showed more marked lateral contrast in all the parameters tested (resistivity, percent frequency effect and metal factor), in addition, it has the shortest acquisition time, which makes it more feasible. After tests, the reanalysis and integration of the old data preceded the induced polarization (frequency domain) campaign and was fundamental in the definition of the survey area, lines layout and acquisition parameters. All geophysical data provided indicated a corridor with sign and geometry coincident to the area of previous mineralization (area of the old mining), the trend follows to the southwest that should be verified later. This information was validated by the sections of electroresistivity, metal factor and percentage frequency effect performed in this project. A total of 15 lines of resistivity acquisition were performed, followed by processing, inversion, data integration and direct modeling of the potentially mineralized package.*

**KEYWORDS:** *Transient Electromagnetic, Greenstone Belt Faina, Magnetometry, Gold Sulphide, Induced Polarization, Radiometry.*

## 1.1 APRESENTAÇÃO

No Brasil, a busca por metais preciosos ocorreu a partir do Governo Geral implantado pela Coroa Portuguesa em 1549, o primeiro registro de ouro data de 1560, enquanto a primeira jazida de ouro está datada em 1590, localizada em Paranaguá-PR. Aos poucos a área no interior do território brasileiro, principalmente a região central, foi desbravada pelos Bandeirantes. A partir da proliferação de novas descobertas, formou-se a mina de Santa Rita no município de Faina, tornando-se um dos primeiros núcleos auríferos do estado de Goiás, o qual passou por três períodos diferentes de mineração (PALACIM, 1976; PINTO, 2000; SILVA, 2002; SILVA e ROCHA, 2008): 1 – século XVII e XIX: ação desbravadora, feito dos Bandeirantes; 2 – século XX: garimpos; e 3 – século XXI: exploração industrial (mineradoras).

Na região de Faina, as mineralizações ocorrem em rochas que compõem o *Greenstone Belt* Faina (RESENDE *et al.*, 1998). Genericamente define-se um *Greenstone Belt* como “(...) corpo longo e estreito, de idade Arqueana composto por sequências vulcanossedimentares em fácies de xisto verde” (VEARNCOMBE *et al.*, 1986).

Apesar dos afloramentos de terrenos arqueanos contemplarem relativamente uma pequena fração do planeta, até 1985, contribuíram com aproximadamente a metade da produção mundial de ouro, da qual 20% são provenientes de sequências vulcanossedimentares do tipo *Greenstone Belt*, este fato os tornam extremamente interessantes no ponto de vista econômico (XAVIER, 1985).

Neste contexto optou-se por desenvolver o estudo em um prospecto mineral na extremidade sudeste do *Greenstone Belt* Faina, Alvo Sertão (Figura 1.1). Neste alvo, o minério ocorre ao longo de uma zona de cisalhamento intensamente hidrotermalizada, com sulfetação, carbonatação e sericitização, que afetam camadas de formações ferríferas bandadas (BIFs) intercaladas com a sequência vulcânica ultramáfica. No fim dos anos 90, diversos projetos geofísicos contíguos e sobrepostos foram realizados pela Mineração Jenipapo SA (MJSA) no antigo *greenfield*, atual *brownfield* denominado Alvo Sertão – dentre os levantamentos geofísicos trabalhados estão: o método magnetométrico, radiométrico, transiente eletromagnético, susceptibilidade magnética– já explotado pela Sertão Brasil Mineração que, em quatro anos, produziu 268.883 onças de ouro, em volume oxidado, o que o tornou uma das minas a céu aberto com um dos menores custos operacionais do mundo (DARDENNE e SCHOBENHAUS, 2001; OLIVEIRA, 2009).

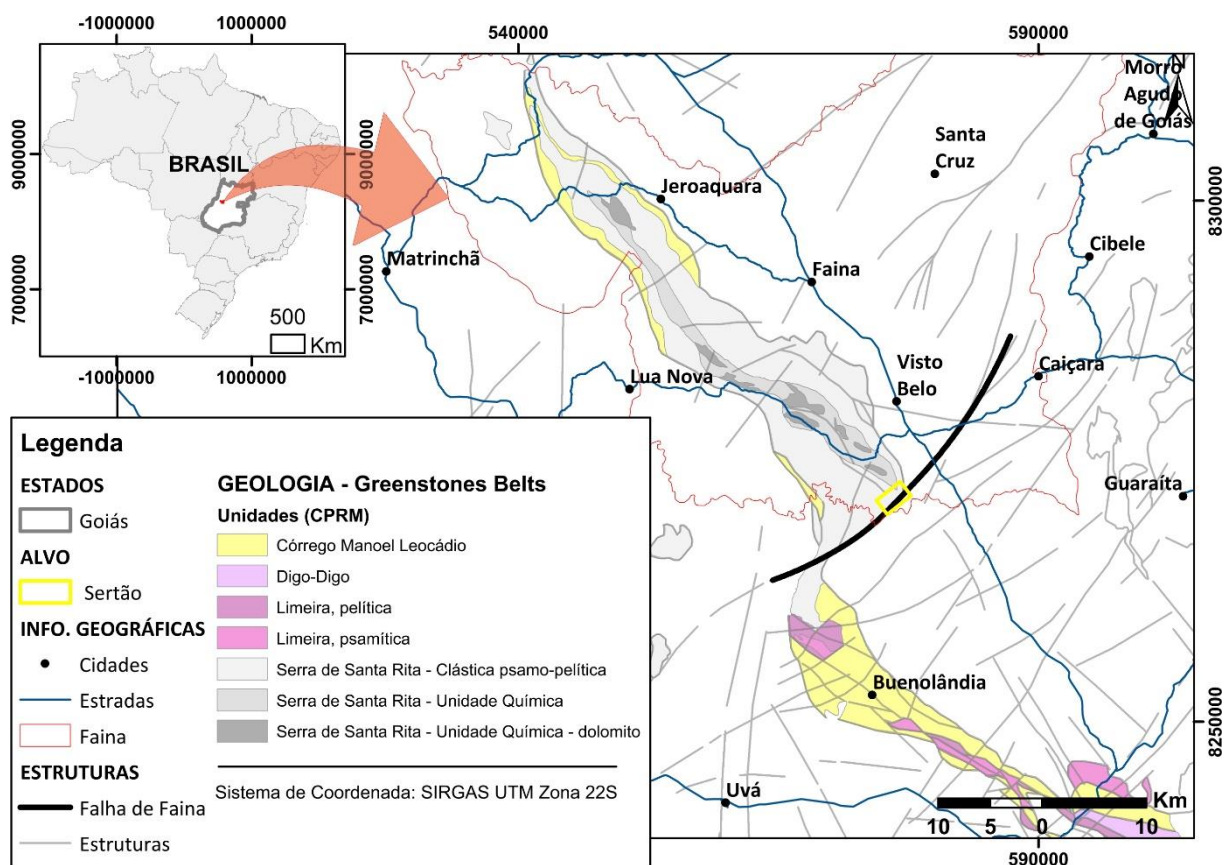


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo com os limites dos *Greenstones Belts* de Faina e Goiás (Santa Rita), separados pela Falha de Faina.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo refinar o modelo geológico prospectivo do Alvo Sertão a partir de integração de diferentes métodos geofísicos, testar parâmetros e verificar a aplicabilidade do método da polarização induzida (domínio da frequência) neste contexto geológico.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Testar e analisar parâmetros de aquisição de dados de polarização induzida no domínio da frequência (número de *stack* e arranjos), para a determinação de zonas de mineralizações auríferas;
- Verificar quais os melhores arranjos eletródicos, entre os arranjos Dipolo-dipolo, *Wenner e Wenner Schlumberger*, para a determinação de estruturas e variações faciológicas das unidades geológicas presentes na área da pesquisa;
- Analisar quais equações de porcentagem de frequência efetiva e de fator metal, presentes nas literaturas, obtém as melhores correlações com as zonas mineralizadas;

- Processar, analisar e integrar dados geofísicos e geológicos anteriores;
- Verificar a continuidade do corpo mineralizado ao norte e ao sul da antiga lavra;
- Melhorar a compreensão litológica e estrutural da área com modelos geológicos/geofísicos obtidos com as respostas geofísicas;
- Elaborar um modelo 3D direto do pacote mineralizado.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

O papel da geofísica na exploração mineral expandiu-se rapidamente nas últimas décadas. Apesar de atualmente ter sua importância reconhecida, na prática, ainda existem barreiras culturais à maior aceitação da geofísica na área de exploração mineral.

O método de polarização induzida é capaz de detectar pequenas quantidades de minerais em uma massa de rocha, além de vasta aplicação em outras situações. Desta maneira, o levantamento de Polarização Induzida no domínio do tempo tornou-se um dos métodos mais populares, entretanto o método do Polarização Induzida no domínio da frequência não possui a mesma popularidade.

A principal motivação deste trabalho é verificar a aplicabilidade do Polarização Induzida no domínio da frequência, integra-lo a outros métodos geofísicos e, se positivo, fomentar o uso da geofísica na área da mineração como uma ferramenta favorável nas campanhas precedentes a sondagem.

### **1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado está estruturada em três partes principais: a primeira parte (Capítulo 1) engloba a apresentação, objetivos, justificativa, histórico de investigação na área, contexto geológico e métodos de trabalho, que são subdivisões comuns aos dois artigos apresentados no Capítulo 2 e 3. A segunda parte (Capítulo 2) está organizada em formato de artigo intitulado “Análise de parâmetros de aquisição de polarização induzida no domínio da frequência para caracterização de zona aurífera associada a sulfetos disseminados no Greenstone Belt Faina, Goiás”. A terceira parte (Capítulo 3) também está organizada em formato de artigo e intitulado “Processamento e integração de dados geofísicos em área brownfield, na determinação de continuidade de mineralização de ouro, Greenstone Belt Faina-GO”. Nos Capítulos 2 e 3 são apresentados os materiais e métodos do trabalho, os resultados da pesquisa e as principais discussões.

## 1.5 HISTÓRICO DE INVESTIGAÇÃO NA ÁREA

Pohl (1951) descreve a atividade mineradora do ouro na região realizada pelos Bandeirantes a partir de 1680. Apesar de poucos relatos, sabe-se que a mineração do ouro teve início nas areias auríferas das drenagens da região. A atividade exploratória foi tão intensa que logo passaram a minerar os cascalhos nas partes mais profundas. Por volta de 1820, a produção do ouro foi substancialmente reduzida na região da Cidade de Goiás e Crixás em virtude do término das aluviões ricas, da dificuldade de se extrair ouro da serra (onde nas partes mais elevadas a água era escassa), e da falta de escravos. Neste período muitas lavras foram paralisadas (ORINOCO, 2017).

A empresa INCO desenvolveu trabalhos regionais na faixa Goiás paralelamente aos trabalhos desenvolvidos na faixa Crixás na década de 70. Quando estes últimos trabalhos revelaram a mineralização aurífera de Crixás, Mina III (ORINOCO *op cit.*).

A empresa UNIGEO (Grupo Anglo American) teve principal atuação no bloco de Goiás, especialmente nas proximidades da cidade de Goiás na Serra do Cantagalo, à procura de minério de ouro também na década de 70. Os alvos principais eram as lentes de conglomerados auríferos e uraníferos da Sequência da Serra do Cantagalo, que muito se assemelham aos conglomerados da região de Jacobina-BA, e às zonas de clorita-carbonato xistos (possível alteração de máficas) ao nordeste da cidade de Goiás. No bloco de Faina, a UNIGEO trabalhou durante o período de 1977 a 1987 e executou trabalhos de coleta de sedimentos de corrente e a abertura de malhas de solo locais (ORINOCO *op cit.*).

A NUCLEBRÁS atuou durante o final da década de 70 e no início da década de 80 nas proximidades da Serra do Cantagalo e ao longo da Serra do São Francisco nas imediações da cidade de Goiás. O alvo principal eram os conglomerados auríferos e uraníferos da Sequência da Serra do Cantagalo (ORINOCO *op cit.*).

Na década de 70 foi realizado um levantamento aerogeofísico (magnetometria e radiometria) a partir de um convênio entre os governos do Brasil e do Canadá. Este levantamento ficou conhecido como o Projeto Geofísico Brasil - Canadá e recobriu uma vasta área do território brasileiro nos estados de Goiás, Mato Grosso, Pará e Tocantins. O levantamento foi realizado com espaçamento de linha de voo de 2 km, de direção NS, e altura de voo de 150m (ORINOCO, *op cit.*).

A empresa Metais de Goiás S.A. (METAGO) desenvolveu trabalhos de pesquisa em praticamente toda a porção coberta pelo *Greenstone Belt* de Goiás-Faina. Um de seus alvos, a Frente Cubatão, compôs as 27 áreas investigadas e estendia-se desde a falha de Faina até as

adjacências da cidade do mesmo nome, sendo trabalhada entre 1980 a 1983 e descartada com relatório final negativo. Em algumas porções das áreas a empresa realizou amostragem de sedimento de corrente e mapeamento geológico básico, malhas de solo, trincheiras. Furos a diamante foram realizados ao norte do *Greenstone* (ORINOCO, *op cit.*).

As atividades garimpeiras mais recentes na Faixa de Goiás iniciaram-se em 1982 com trabalhos aluvionares na bacia do Rio Vermelho, que é o principal rio que corta a Faixa e drena todo o seu lado sul. Dentre as interdições e os retornos às atividades minerárias, os garimpos percorreram áreas diversas como: a bacia do Rio Vermelho, a bacia do Rio do Peixe, os córregos que drenam a extremidade norte da faixa Goiás, os afluentes do Rio do Peixe, os aluviões ao redor de Mozarlândia, o garimpo primário localizado próximo ao povoado de Santa Rita, entre outros. O garimpo na área foi registrado até o início das atividades de pesquisa da Orinoco Brasil Mineração nos anos de 2010 e 2012 (ORINOCO, *op cit.*).

Os primeiros mapeamentos geológicos da faixa Faina na escala 1:50.000 foram preparados pelos alunos do curso de graduação em geologia da Universidade de Brasília, sob a coordenação dos professores Aripilínio Antônio Nilson, Cesar Fonseca Ferreira Filho e Almir Neves Figueiredo em 1988. Desde então muitos trabalhos na área foram executados pelas Universidades em parceria com a Orinoco Brasil Mineração: Universidade de Brasília (UnB), Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Alguns destes trabalhos são usados como referência na atual pesquisa (ORINOCO, *op cit.*).

A MJSA desenvolveu pesquisas para ouro nas faixas de Goiás e de Faina desde 1992. A fase de exploração regional incluiu dentro dos trabalhos de campo a amostragem da fração fina do sedimento ativo de drenagens, a contagem de pintas de ouro em concentrado de bateia e a verificação geológica de algumas anomalias detectadas. Levantamentos aéreos de magnetometria e radiometria foram executados em toda porção dos *Greenstone Belt* de Faina e de Santa Rita. A fase de semi detalhe englobou as principais áreas e incluiu trabalhos de campo como adensamento da amostragem de sedimento e concentrado de bateia da fase regional, bem como linhas de amostragem de solo regional, mapeamento geológico e amostragem de rocha ao longo de estradas e perfis, mapeamento geológico de detalhe, amostragem geoquímica de solo, levantamentos geofísicos terrestres como magnetometria, radiometria, polarização induzida e eletromagnético, sondagem diamantada, sondagem a circulação reversa e abertura de poço (ORINOCO *op cit.*).

A Orinoco Brasil Mineração está listada na Bolsa de Valores da Austrália desde 2012. A empresa iniciou as pesquisas no alvo denominado Cascavel na região central do *Greenstone*

*Belt Faina*, em 2014 expandiu a área do projeto por meio de direito mineral. Na região, foram feitas amostragens de solo e rocha, sondagem diamantada, aerolevante geofísico (magnetometria e gamaespectrometria) na porção central e norte do *Greenstone Belt Faina* e geofísica terrestre (magnetometria, gravimetria, polarização induzida, eletroresistividade) nos principais alvos (ORINOCO *op cit.*).

## 1.6 CONTEXTO GEOLÓGICO

O Bloco Arqueano Goiás (Figura 1.2), ou Maciço de Goiás, está inserido dentro da Faixa de Dobramentos Brasília, Província Tocantins, representa um microcontinente envolvido nos processos colisionais brasileiros, que engloba os terrenos granito *Greenstone* de Goiás, Crixás e Guarinos-Pilar de Goiás, formados no Arqueano, acrescidos de terrenos ortognáissicos de idade paleoproterozóica (FUCK, 1994).

Os *Greenstone Belts* são associações vulcanossedimentares que ocorrem em meio a terrenos granito-gnáissicos, nas regiões cratônicas do globo. O *Greenstone Belt Faina*, objeto de estudo, localiza-se na porção sul do Bloco Arqueano Goiás e ocorre em um sinclínio NW-SE, com 60 km de comprimento e 10 km de largura média. Além disso, o *Greenstone Belt* em questão é limitado por dois complexos granito-gnáissicos, o Complexo Caiçara, a NE, e o Complexo Uvá, a SW (Figura 1.3), com evoluções geológicas distintas (JOST *et al.*, 2014).

Os complexos granito-gnáissicos são compostos em geral, por gnaisses tonalíticos a granodioríticos, subordinadamente graníticos. Nestes complexos são encontrados diques e stocks de diabásio, dolerito, e por vezes, ultramáficas (PIMENTEL *et al.*, 2004).

Dardenne *et al.* (1972) propôs o termo *Greenstone Belt* de Goiás para denominar rochas básicas-ultrabásicas associadas a metassedimentos aflorantes na região de Goiás-Faina. Porém, posteriormente Teixeira (1981) propôs dividir essa formação em duas, separadas por uma falha denominada Falha Faina, uma formação na região de Faina, GO, o *Greenstone Belt Faina* e uma formação na região ao sul da falha, o *Greenstone Belt Goiás* (ou Santa Rita).

Resende *et al.* (1998), em uma nova proposta estratigráfica, faz distinção entre os *Greenstone Belt Faina* e Goiás, e identifica no *Greenstone Belt Faina* dois grupos geológicos, o Serra de Santa Rita e o Furna Rica. O Grupo Serra de Santa Rita, unidade ultramáfica inferior, é formada por metakomatiitos (Formação Manoel Leocádio), seguidos de metabasaltos toleíticos (Formação Digo-Digo). O Grupo Furna Rica, unidade metassedimentar superior, abrange as formações Fazenda Tanque, Serra de São José e Córrego do Tatu. As rochas de ambas as sequências encontram-se metamorfizadas nas fácies xisto verde a anfíbolito inferior.



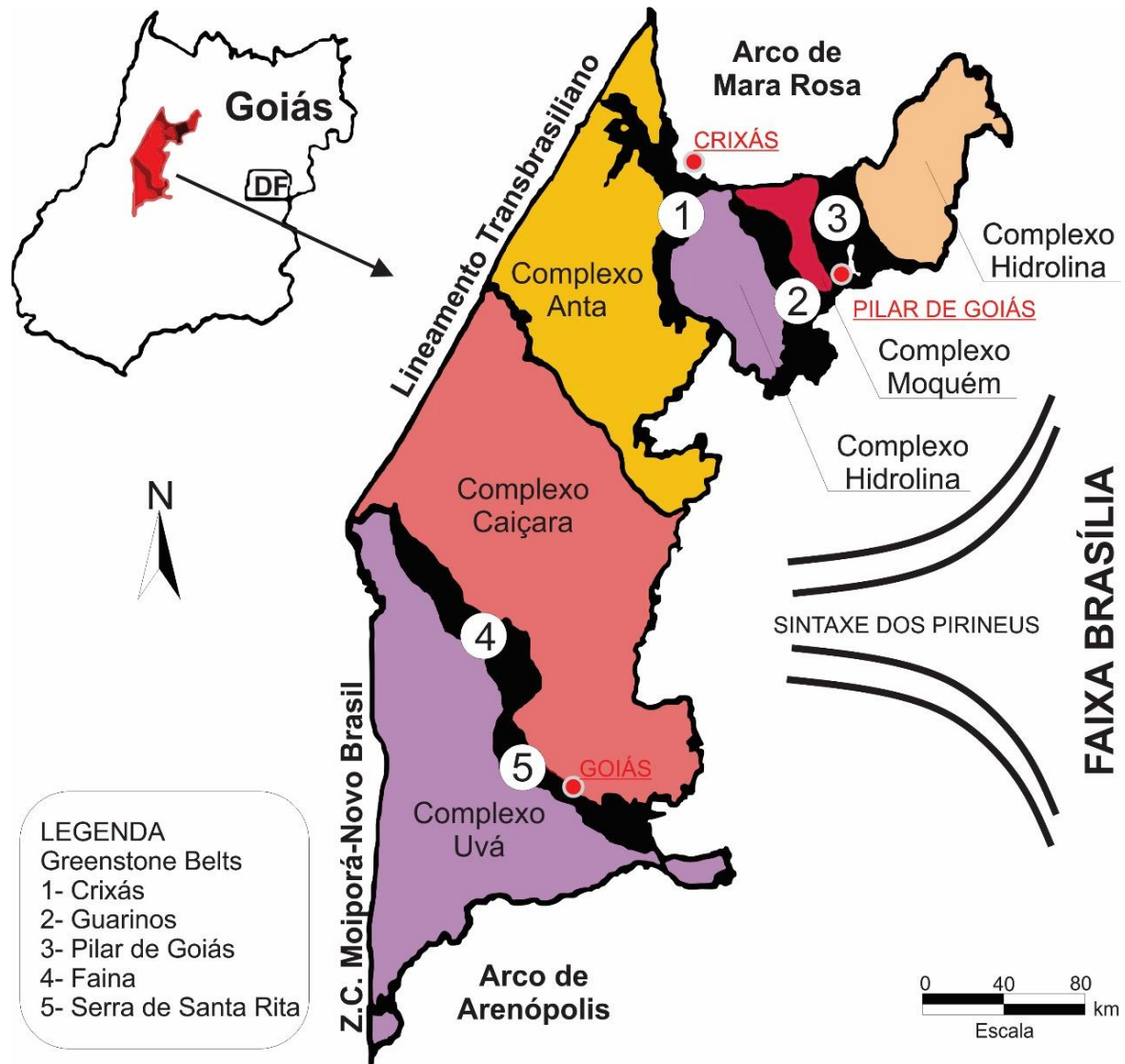


Figura 1.2 – Limites e subdivisão do Terreno Arqueano de Goiás (JOST *et al*, 2014).

O *Greentone Belt* Faina segundo o Serviço Geológico do Brasil (2004) é composto pelas formações Serra de Santa Rita e Córrego Manoel Leocádio. A Formações Serra de Santa Rita é dividida em Unidade Química e Unidade Psamo-pelítica. A unidade química é formada por filitos, metacherts ferruginosos e manganésíferos, clorita-quartzo xistos, grafita xistos, sericita quartzitos, metadolomitos e formações ferríferas; já a Formações Serra de Santa unidade Psamo-pelítica é constituída por clorita-sericita-quartzo-xistos e quartzitos. A Formação Córrego Manoel Leocádio é composta por metakomatiitos serpentizados, carbonato-talcos serpentinitos, talco serpentinitos, carbonato-talco xistos, clorita-talco xistos, tremolitos, tremolita-actinolita xistos, clorita-quartzo xistos, metacherts ferríferos, grafita metacherts, filitos e grafita filitos.

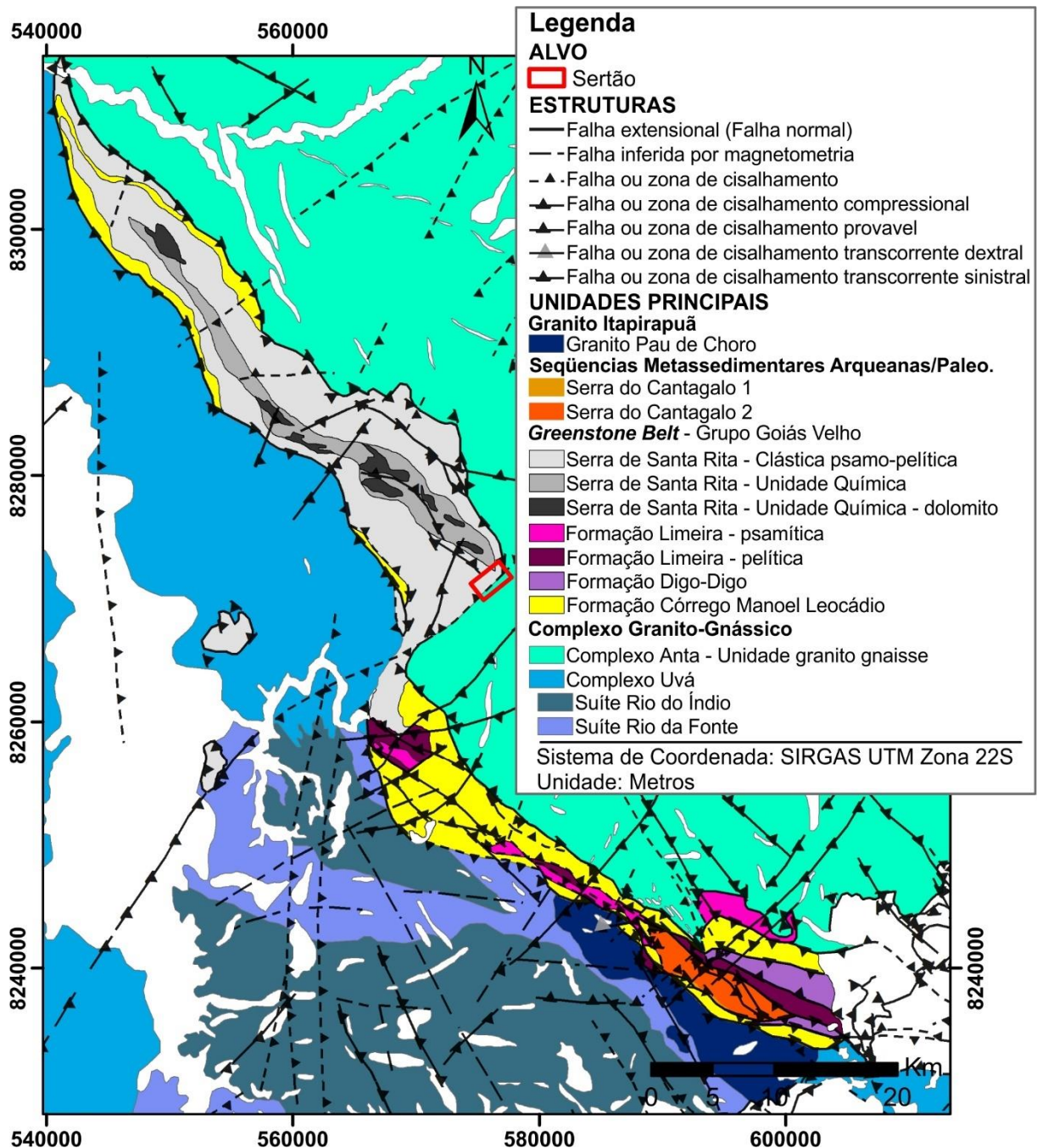


Figura 1.3 – Mapa geológico regional dos Greenstones Belts de Faina e Santa Rita, separados pela Falha de Faina e limitados pelos complexos Granito-Gnssicos Uv, a SW, e Anta, a NE (modificado de CPRM,2004).

Sob o mapa geológico de detalhe da rea (Figura 1.4), observa-se uma tendência NE-SW das litologias, sendo a site Tonalito-Trondhjemitito-Granodiorito (TTG), sericita xisto, sericita xisto com metamarga e clorita biotita xisto, as litologias predominantes em superfície. Em seguida, zonas silicificadas e rochas vulcânicas máficas, além da zona hidrotermal principal que coincide com o xisto carbonoso com sericita e biotita.

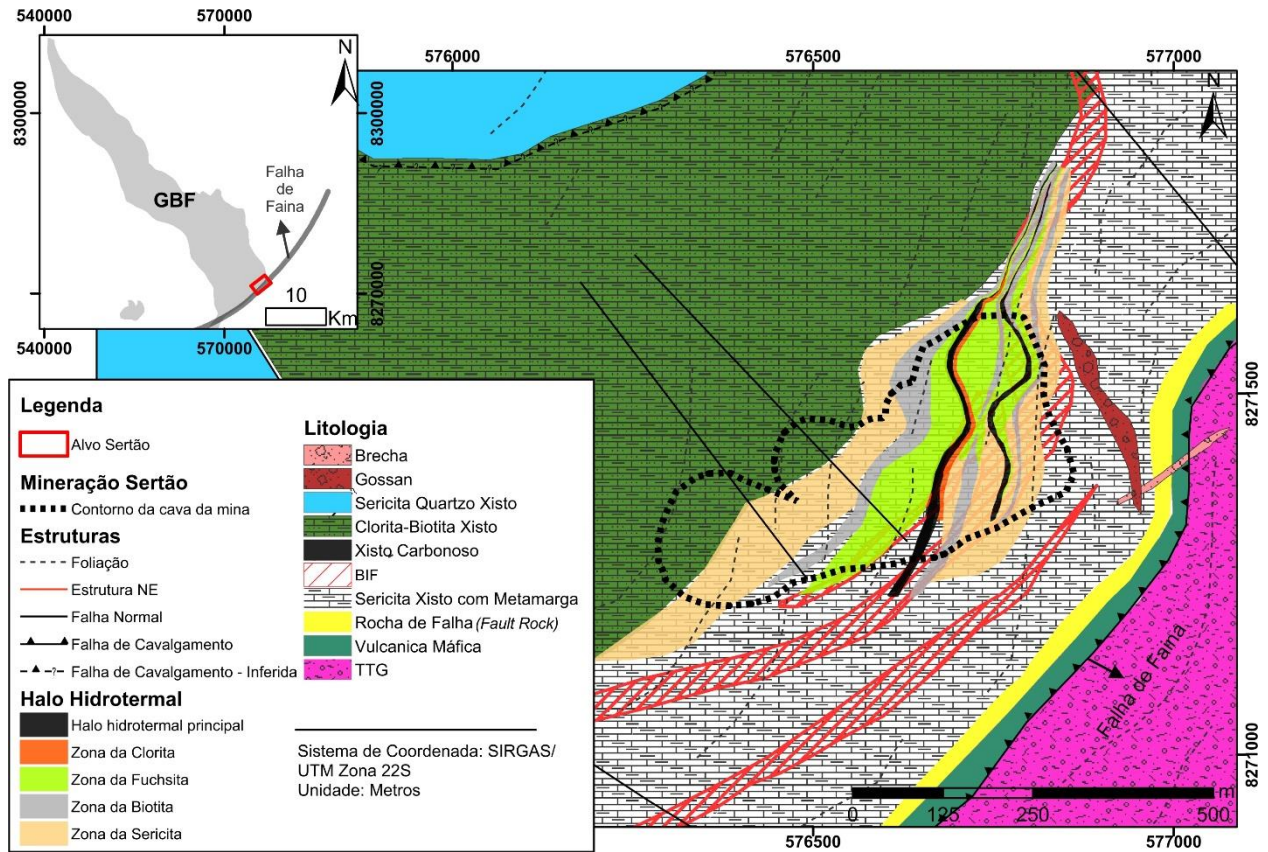


Figura 1.4 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de Orinoco, 2017).

O sericita xisto onde está alojado o corpo de minério (associação de sulfetos – arsenopirita, pirita e pirrotita), tem orientação NE-SW, mesma orientação aproximada da falha de Faina que marca o contato entre o *Greenstone* e o embasamento. A falha em questão, possui um mergulho entorno de 30°, para NW e o corpo de minério tem aproximadamente o mesmo mergulho, o que sugere um controle estrutural. Os estereogramas do *pit* indicam que a foliação no local do depósito mergulha para oeste e a lineação de estiramento é *downdip*, também para oeste. Os *oreshoots* modelados da antiga lavra da Sertão Mineração Ltda., estão na mesma direção da lineação *downdip*. A falha de empurrão que divide o *Greenstone* do embasamento próxima ao *pit* tem *strike* N-S, e cai para oeste (e não NE-SW como nas outras extensões do mapa), parecida com a foliação do depósito.

## 1.7 MÉTODOS DE TRABALHO

Neste trabalho apresentam-se resultados de ensaios de métodos: Eletromagnético Transiente, Magnetométrico, Radiométrico, Eletrorresistividade e Polarização induzida no domínio do tempo.

- **Eletromagnético Transiente**

O método Transiente Eletromagnético faz a medição da resposta eletromagnética do subsolo às variações rápidas de um campo magnético primário geradas num transmissor, por pulsos de corrente elétrica. O campo elétrico gera correntes de Foucault em subsuperfície que se dissipam à medida que a energia é transformada em calor (efeito Joule). Essas correntes originam um campo magnético secundário, do qual os tempos de atenuação estão diretamente relacionados com a resistividade subjacente (SANTOS, 2008).

Os campos Eletromagnéticos em meios homogêneos e isotrópicos (de condutividade elétrica ( $\sigma$ ) constante, de permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) uniforme e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) são regidos pelo conjunto das equações de Maxwell: Lei de Gauss (Equação 1.1), Lei de Faraday (Equação 1.2), Lei de Ampere-Maxwell (Equação 1.3), Lei de Gauss para o magnetismo (Equação 1.4).

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{Eq. 1.1})$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Eq. 1.3})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Eq. 1.4})$$

B é a indução magnética (Tesla), D é o deslocamento elétrico ou ( $C/m^2$ ), E é a intensidade de campo elétrico (V/m), H é a intensidade de campo magnético (A/m) e  $\rho$  é a densidade de carga elétrica ( $C/m^3$ ).

A permeabilidade e permissividade da Terra são assumidas constantes ( $\mu_r \approx 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$  e  $\epsilon_r \approx 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$ ).

A aproximação quase estacionária dos campos eletromagnéticos ( $\omega\epsilon \ll \sigma$ ), permite desprezar a corrente de deslocamento e os campos se propagam por difusão. A penetração de campos quase estacionários  $F$  em uma terra homogênea é definida pela equação de difusão (Equação 1.5).

$$\nabla^2 F = i\omega\mu\sigma F = k^2 F \quad (\text{Eq.1.5})$$

Como já descrito, um campo magnético variável é gerado por pulsos de corrente por meio de um transmissor (Figura 1.5), o campo magnético induzido produz um sistema de correntes que cresce verticalmente para baixo. A magnitude e a distribuição destas correntes são dependentes da resistividade em subsuperfície. O campo magnético secundário resultante induz uma voltagem na bobina receptora que decai em função do tempo. Este tempo está diretamente relacionado a distribuição da resistividade em profundidade. Em sedimentos mais resistivos, estas correntes decaem lentamente e penetram profundidades maiores enquanto que em sedimentos mais condutivos, as correntes são atenuadas rapidamente (MCNEILL, 1980).

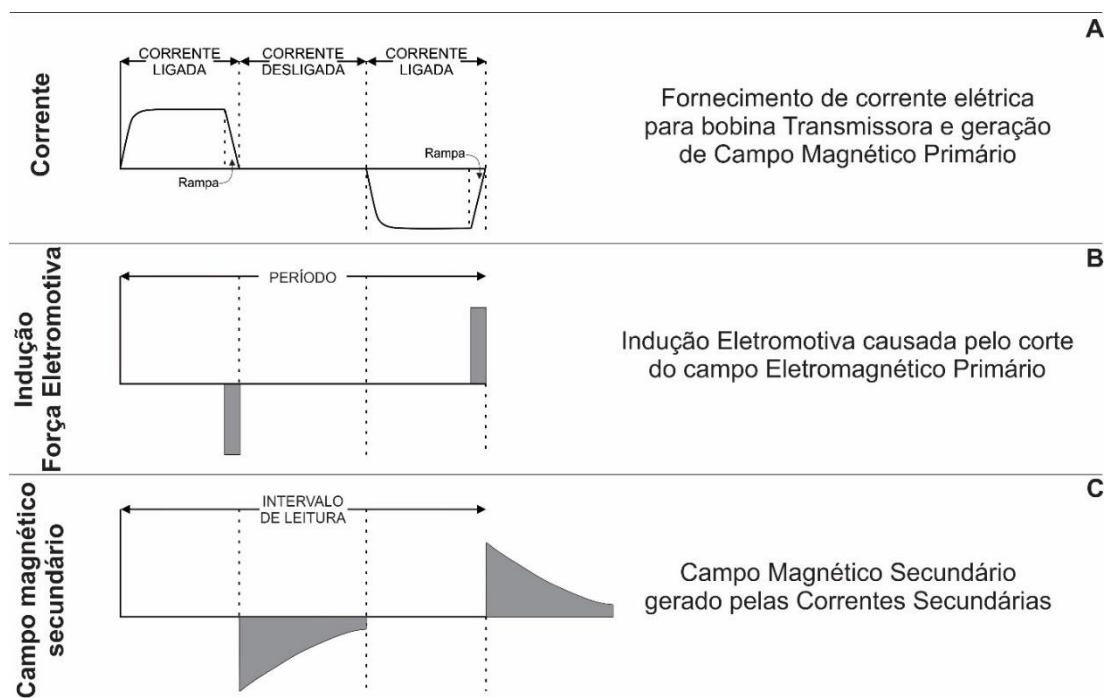


Figura 1.5 – Princípio físico do método eletromagnético transiente: Campo primário (A). Indução eletromotiva (B). Campo secundário (C). (modificado de MCNEILL, 1980)

Em subsuperfície 1-D, uma excitação impulsiva de magnitude  $h_0(t=0)$ , produz campos transientes (Equações 1.6 e 1.7).

$$e_x(z, t) = \frac{2h_0}{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\sigma\mu_0}{2t}} e^{-\left(\frac{\sigma\mu_0}{2t}\right)\left(\frac{z^2}{2}\right)} \quad (\text{Eq.1.6})$$

$$h_x(z, t) = h_0 \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\sigma\mu_0}{2t}} \frac{z}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{Eq.1.7})$$

Onde  $t$  é o tempo segundo o qual os campos decaem,  $\sigma$  é a condutividade (que se deseja estimar),  $z$  a profundidade de penetração,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo e  $\operatorname{erfc}$  é a função erro complementar (SPIES e FRISCHKNECHT, 1991).

O valor máximo do campo elétrico transiente está localizado na profundidade de difusão (Equação 1.8).

$$\delta_{TD} = \sqrt{\frac{2t}{\sigma\mu_0}} \quad (\text{Eq.1.8})$$

O comprimento de difusão representa a profundidade na qual o campo elétrico local alcança um máximo valor para um determinado tempo.

- **Magnetometria e Susceptibilidade Magnética**

Quando um material é colocado na presença de um campo magnético, o mesmo adquire uma magnetização na direção deste campo, na qual se anula quando o corpo é afastado da influência do campo magnético em questão, esta magnetização denomina-se magnetização induzida.

Simplificadamente, um material é formado por pequenos dipolos (no caso das rochas os dipolos são os minerais com características magnéticas), os quais se orientam na direção das linhas de força do campo indutor ou aplicado. Pode-se afirmar então que ocorreu uma polarização magnética – como resultado do alinhamento o material passa a se comportar como um dipolo.

Próximo a um ímã magnético, as linhas de campo magnético surgem como fluxo de linhas de um extremo a outro do ímã. A força é de atração caso os polos tenham sinais diferentes e repulsão caso tenham o mesmo sinal, tem-se a relação da força  $F$  entre dois polos magnéticos de intensidades  $p_1$  e  $p_2$ , separados por uma distância  $r$  (Equação 1.9).

$$F = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (\text{Eq. 1.9})$$

Onde  $\mu$  corresponde a permeabilidade magnética, constante de proporcionalidade magnética (LOWRIE, 2007).

O campo magnético (H) é definido como a intensidade associada a um polo magnético (p1), devido à presença no espaço de outro polo magnético estimado, onde: p1 é um polo magnético ilusório no espaço onde o sensor está situado. No instante em que um material qualquer é submetido ao efeito do campo H, ele adquire uma intensidade de magnetização ou imantação M, proporcional ao campo (Equação 1.10).

$$M = kH \quad (\text{Eq. 1.10})$$

O fator de proporcionalidade k é uma propriedade física do material, denominada de susceptibilidade magnética (LOWRIE, 2007).

A magnetização de um material por um campo externo (indutor) ocorre através do alinhamento dos momentos dos dipolos internos ao material. Estes momentos se alinham devido à existência de um campo magnético interno chamado campo molecular. Esse alinhamento provoca o aparecimento de um campo adicional que, somado ao campo externo H, produz um campo conhecido por indução magnética. O campo indução magnética B é relacionado ao campo magnético H (Equação 1.11, LUIZ & SILVA, 1995).

$$B = \mu H \quad (\text{Eq. 1.11})$$

Sendo  $\mu=(1+k)$  a permeabilidade magnética do meio (LOWRIE, 2007).

Os minerais que compõem a rocha, em sua maioria, têm uma Susceptibilidade Magnética baixa. A dispersão dos grãos magnéticos dentro da rocha, o tamanho e a forma afetam sua propriedade magnética, mesmo assim, pode-se classificar o comportamento magnético da rocha de acordo com seu conteúdo total de magnetita.

Os comprimentos de ondas de fontes magnetométricas estão associados à geometria e profundidade dos corpos causadores, corpos pequenos e rasos produzem anomalias com pequenos comprimentos de onda e, sob as mesmas condições, corpos grandes e profundos geram anomalias com grandes comprimentos de onda. O espectro de potência radial oferece a

possibilidade da melhor determinação das frequências de corte (altas e baixas) em função do filtro escolhido. Esta análise realiza-se no domínio da frequência.

A começar de uma malha é possível criar um espectro de potência radial, que, por sua vez, explicita a energia relativa ao número de onda e a sua direção, por meio de uma função bidimensional. O cálculo do espectro radial tem como resultado um gráfico que apresenta o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y (BONGIOLO, 2011).

A relação entre o espectro de energia de anomalias e a profundidade média dos corpos causadores foi apresentada por Spector e Grant (1970), representando o espectro de energia das anomalias segundo a Equação 1.12.

$$E(k) = 4\pi M^2 (e^{-2hk}) (1 - e^{-tk}) (S^2(k)) \quad (\text{Eq. 1.12})$$

Onde E(k) é a energia do sinal, M é o momento magnético ou unidade de volume (Magnetometria e gravimetria, respectivamente), h a profundidade estatística do topo das fontes, k é o número de onda radial, t corresponde à altura do corpo causador da fonte e o fator S(k) é o comprimento horizontal do corpo.

Ao comparar o fator de profundidade,  $e^{-2hk}$ , com o fator horizontal ( $S^2(k)$ ) e com o fator de extensão do corpo ( $1 - e^{-tk}$ ) Spector e Grant (1970) concluíram que o fator de profundidade do topo das fontes domina o espectro, principalmente em bandas de baixa frequência. Dessa maneira, o espectro de energia pode ser simplificado conforme as Equações 1.13 e 1.14.

$$E r \approx A e^{-2hk} \quad (\text{Eq. 1.13})$$

$$\ln E r \approx -2hk + A' \quad (\text{Eq. 1.14})$$

Onde, A e A' correspondem a coeficientes constantes, h é a profundidade média do topo do corpo fonte e k é o número de onda radial. A profundidade de um conjunto estatístico de fontes pode, ainda, ser calculada pela Equação 1.15 (BONGIOLO, 2011).

$$h = -\frac{s}{4\pi} \quad (\text{Eq. 1.15})$$

Onde h é a profundidade e s é a declividade do logaritmo do espectro de potência. A análise do espectro radial pode ser utilizada como estimativas na determinação de profundidade



de fontes, separando-as através de seu espectro em fontes rasas, profundas e intermediárias (BONGIOLO, 2011).

- **Radiométrico**

Muitos dos átomos pesados são instáveis e decaem espontaneamente. Os átomos radioativos se decompõem pelas emissões de partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ou raios gama ( $\gamma$ ). Uma partícula  $\alpha$  corresponde a um átomo de hélio ionizado, a  $\beta$  é um elétron que se origina a partir do núcleo onde um nêutron se divide em um próton e um elétron ( $\beta^-$ ) ou um próton se divide em um nêutron e um pósitron ( $\beta^+$ ), enquanto os raios  $\gamma$  são radiações eletromagnéticas que emanam do núcleo. O intervalo de energia dos raios  $\gamma$  geralmente é considerado como a partir de 0,1 MeV, aproximadamente. Os raios  $\gamma$  são eletricamente neutros e não possuem massa, eles não interagem com a matéria como as partículas  $\alpha$  ou  $\beta$  e, portanto, detêm uma maior variedade de penetração em materiais, tornando-os a principal forma de radiação detectada em pesquisas geofísicas (MILSOM, 1989).

Os raios  $\gamma$  possuem uma faixa de penetrabilidade de, aproximadamente, 30 cm em rocha e 60 cm em solo, mas são completamente interrompidos por, aproximadamente, 1,5 m de água. Portanto, a análise de raios  $\gamma$  apenas nos contam sobre uma camada fina próxima a superfície, porém suficiente para auxiliar no mapeamento geológico da área de interesse. No entanto, 100 m de ar só absorverão cerca de metade do fluxo de raios  $\gamma$ , de modo que a absorção atmosférica geralmente pode ser ignorada em levantamentos de solo (MILSOM, 1989).

Todas as rochas e os solos são radioativos em diversas intensidades, as principais fontes de raios gama são potássio (K), tório (Th) e urânio (U). O  $\gamma$  emitido a partir do decaimento de K é medido diretamente, enquanto Th e U são identificados pela emissão  $\gamma$  de um de seus respectivos produtos de decaimento, denominados isótopos filhos, assumindo que seja atingida a condição de equilíbrio radioativo secular, na qual as atividades de todos os membros da cadeia são iguais àquela do isótopo que encabeça a série e que o sistema não foi perturbado (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - A abundância dos principais radioisótopos.

| Séries            | Abundância  |
|-------------------|-------------|
| $^{238}\text{U}$  | 99,3% de U  |
| $^{232}\text{Th}$ | 100% de Th  |
| $^{40}\text{K}$   | 0,012% de K |

O espectro natural de raios gama (Figura 1.6) detém vários picos discretos para cada um dos isótopos filhos U e Th.  $^{214}\text{Bi}$  com uma energia de raio  $\gamma$ ,  $\gamma E = 1,76 \text{ MeV}$  e  $^{208}\text{Tl}$  com  $\gamma E = 2,61 \text{ MeV}$  são definidos para os elementos U e Th, respectivamente.

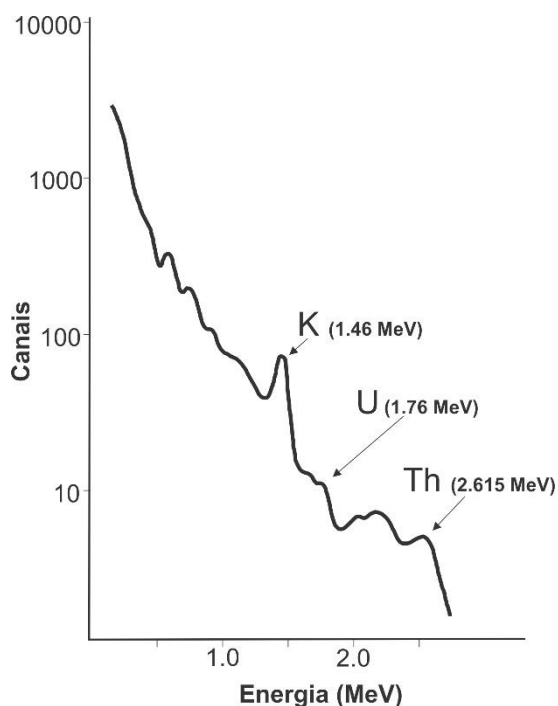


Figura 1.6 - Espectro de raios gama natural (MILSOM, 1989).

A física e montagem do espectrômetro inibe a discriminação ideal de picos dentro do espectro, de modo que as janelas de energia são usadas para melhor representar abundâncias (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 - Largura da janela de energia usada por um espectrômetro de raio  $\gamma$  típico (MILSOM, 1989).

| Elemento | Isótopo           | E (MeV) | Janela de energia (MeV) |
|----------|-------------------|---------|-------------------------|
| K        | $^{40}\text{K}$   | 1,46    | 1,36 - 1,56             |
| U        | $^{214}\text{Bi}$ | 1,76    | 1,66 - 1,86             |
| Th       | $^{208}\text{Tl}$ | 2,62    | 2,41 - 2,81             |
| TC       | -                 | -       | 0,41 - 2,81             |

U, Th e K estão presentes em quantidades variáveis em todas as rochas. A Tabela 1.3 apresenta as classes de rocha principais e a relação de concentração de K, U e Th.

Tabela 1.3 - Concentrações radioativas em rochas (adaptado TELFORD et al., 1990).

| Rocha       | K(%)      | U(ppm)    | Th(ppm)   |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Ácida       | 0,1 - 8   | 0,1 - 30  | 0,1 - 250 |
| Básica      | 0,02 - 3  | 0,01 - 6  | 0,03 - 15 |
| Ultrabásica | 0 - 1     | 0 - 1,6   | 0 - 8     |
| Sedimentar  | 0,01 - 10 | 0,1 - 80  | 0,2 - 350 |
| Metamórfica | 0,01 - 6  | 0,1 - 150 | 0,1 - 100 |
| Granito     | 3,5       | 15        | 4         |
| Basalto     | 0,9       | 2         | 0,6       |

- **Eletrorresistividade**

O método da Eletrorresistividade é fundamentado no estudo do potencial elétrico, tanto dos campos naturais quanto dos campos artificiais. Por meio de medições do potencial elétrico na superfície, determinam-se no subsolo a existência de corpos minerais e reconhecem-se estruturas geológicas (TELFORD *et al.*, 1990).

O método consiste basicamente em determinar a resistividade elétrica dos materiais, que apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica que é singular a cada litologia ou condições geológicas da área. A resistividade ( $\rho$ ) pode ser definida como a resistência elétrica ( $R$ ) de um cilindro de seção transversal ( $A$ ) e de comprimento ( $L$ ), dada pela Equação 1.16 (KEAREY *et al.*, 2002).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Eq. 1.16}$$

As técnicas de aquisição de dados geoeletricos classificam-se em três tipos principais: Sondagem Elétrica Vertical, Caminhamento Elétrico e Perfilagem Elétrica de Poço. Neste trabalho utilizou-se a técnica de investigação do caminhamento elétrico 2D. A técnica do caminhamento elétrico aplica-se principalmente em situações cujo objetivo é determinar discontinuidades laterais nos materiais geológicos, tais como: diques e *sills*, contatos geológicos, fraturas, falhas, plumas de contaminação e corpos mineralizados (KEAREY *et al.*, 2002).

A disposição geométrica de quatro eletrodos sobre a superfície do terreno é conhecida como arranjo eletródico. Por convenção, eletrodos A e B correspondem a eletrodos de corrente e M e N correspondem a eletrodos de potencial. A escolha do melhor arranjo para um

levantamento de campo depende do tipo de estrutura a ser mapeada, da sensibilidade dos equipamentos e do nível de ruído de fundo (*background*). Os principais arranjos eletródicos são o dipolo-dipolo, *Wenner*, polo-dipolo, *Schlumberger*, polo-polo e *Wenner-Schlumberger* (Figura 1.7).

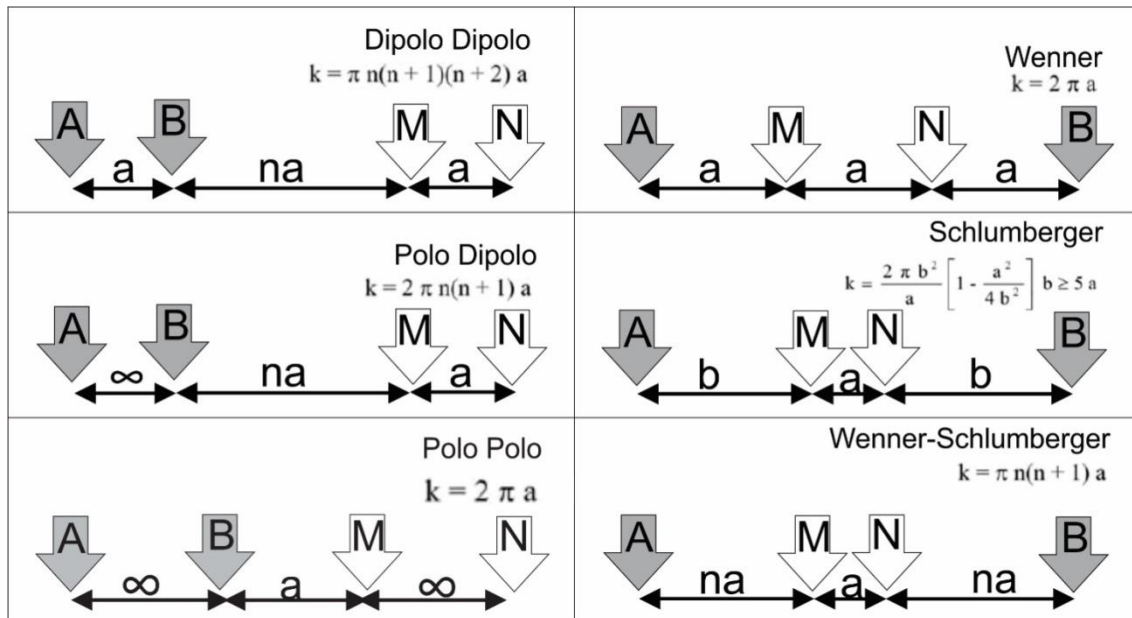


Figura 1.7– Configuração dos principais arranjos eletródicos, e seus respectivos fatores geométricos. A distância correspondente a  $\infty$  (infinito) geralmente é superior a 20 vezes a distância de ‘a’ (Modificado de LOKE, 2004).

Para a escolha ideal do arranjo e o espaçamento entre os eletrodos em investigações por meio dos métodos elétricos, analisam-se fatores como a profundidade e a geometria do alvo, a razão sinal/ruído, a resolução espacial (horizontal e vertical), e a praticidade em campo.

- **Polarização Induzida**

No método da Polarização Induzida induz-se uma corrente elétrica no subsolo em ciclos periódicos. Quando uma corrente elétrica circula no terreno, ocorre a concentração de carga em diversas partes do meio, que tem a propensão a retornar à sua posição original quando a circulação de corrente é interrompida. Por alguns segundos, uma determinada fração da voltagem inicial conserva-se no terreno enquanto as concentrações de cargas são dissipadas (*sobrevoltagem*). Este fenômeno é registrado nos domínios do tempo e da frequência. O Polarização Induzida assemelha-se à descarga de um capacitor (domínio do tempo) ou à variação de impedância de uma corrente alternada (domínio da frequência; SUMNER, 1976).

- **Domínio do Tempo:**

Quando uma corrente elétrica é aplicada no solo, após o seu desligamento, a voltagem não decai instantaneamente para zero. Na verdade, a tensão tem uma queda mais acentuada nos instantes iniciais após o desligamento da corrente, e depois, cai de forma gradual. O valor da tensão logo após a esta queda brusca, é simbolizado por  $V_P$ . Esse efeito também ocorre nos instantes iniciais logo depois de ligada a corrente, ou seja, a voltagem sobe gradualmente até se estabilizar em seu valor máximo  $V_{ON}$  (Figura 1.8). Essas situações ocorrem devido ao efeito de Polarização Induzida nas rochas. A medição do efeito de Polarização Induzida no domínio do tempo consiste em analisar o decaimento temporal da voltagem que é gerado após o desligamento dos pulsos de corrente injetados no solo. Uma maneira simples de medir o efeito de polarização é determinar a razão entre a voltagem primária  $V_{ON}$  e a voltagem observada  $V_P$  no instante após o desligamento da corrente elétrica. Esse parâmetro é denominado de Polarizabilidade Aparente  $P_a$  (Equação 1.17) (REYNOLDS, 1997).

$$P_a(\%) = \frac{V_p}{V_{ON}} 100 \quad \text{Eq. 1.17}$$

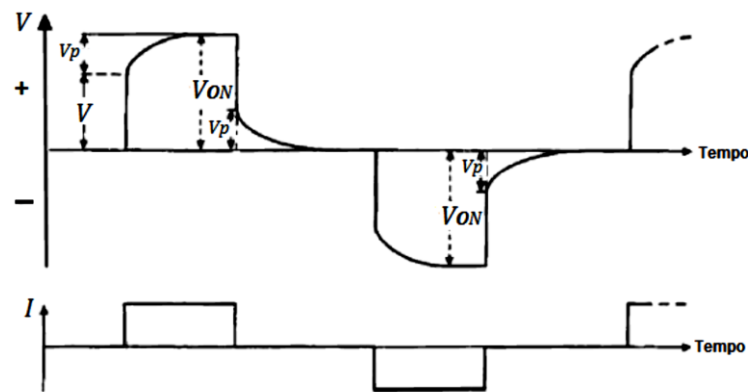


Figura 1.8– Efeito de Polarização Induzida com aplicação de um pulso de corrente com polaridade (REYNOLDS, 1997).

De acordo com Reynolds (1997), é extremamente difícil medir a tensão ( $V_P$ ) no exato momento em que a corrente é desligada. Assim, a medida do decaimento da tensão é feita após um discreto intervalo de tempo ( $Mdly$ ).

Outros parâmetros de medição são as cargabilidades parciais ( $M_i$ , Figura 1.9a) e a cargabilidade global ( $M_g$ , Figura 1.9b).  $M_i$  é a área sob a curva de decaimento durante um intervalo discreto de tempo ( $T_{M_i}$ ) normalizado pelo  $V_{ON}$  e  $T_{M_i}$  (Equação 1.18).

$$M_i = \frac{1}{T_{Mi}V_{ON}} \int_{T_{Mi}} V dt \quad \text{Eq. 1.18}$$

O valor de cargabilidade global ( $M_g$ ) é calculado com a Equação 1.19.

$$M_g = \frac{\sum_{i=1}^n M_i T_{Mi}}{\sum_{i=1}^n T_{Mi}} \quad \text{Eq. 1.19}$$

onde  $i$  é a posição com relação às enésimas janelas de tempo.

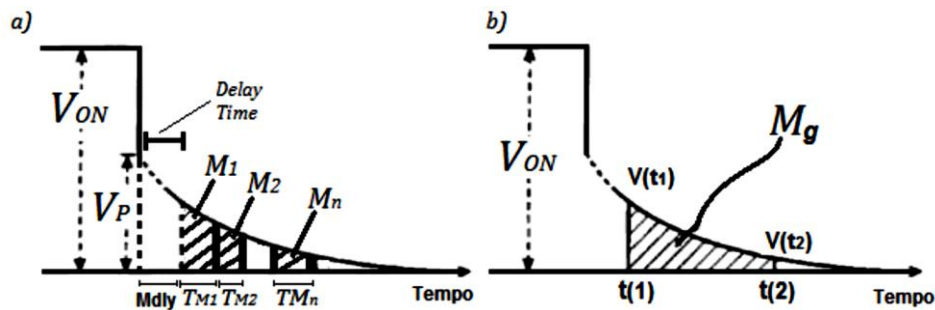


Figura 1.9– Curva de decaimento de potencial com a identificação das áreas onde registram-se as cargabilidades (a)  $M_i$  (parcial) e (b)  $M_g$  (global) (REYNOLDS, 1997).

- **Domínio da Frequência:**

No método Polarização Induzida no domínio da frequência ou método da frequência variável, as medidas de resistividade aparente são realizadas para (no mínimo) duas frequências distintas e menores que 10Hz, para eliminar efeitos de acoplamento indutivo (HALLOF, 1964). Ao usar uma frequência alta (pulso com intervalo de tempo curto) a voltagem transiente possui pouco tempo para aumentar, resultando numa voltagem ( $V_P$ ) baixa. Diferentemente, ao usar uma frequência baixa, a voltagem transiente possui um intervalo de tempo grande para aumentar, o que resulta numa voltagem ( $V_P$ ) alta. Ou seja, o estudo do efeito de Polarização Induzida no domínio da frequência parte do princípio da variação da resistividade aparente com a frequência. Essa variação acontece porque, para pequenos tempos de carga, situação que aumenta a frequência de medição, acarreta na diminuição do efeito de Polarização Induzida e, conseqüentemente, da resistividade aparente (Figura 1.10). Portanto, para baixas frequências, a resistividade aparente tem um valor maior do que para altas frequências.

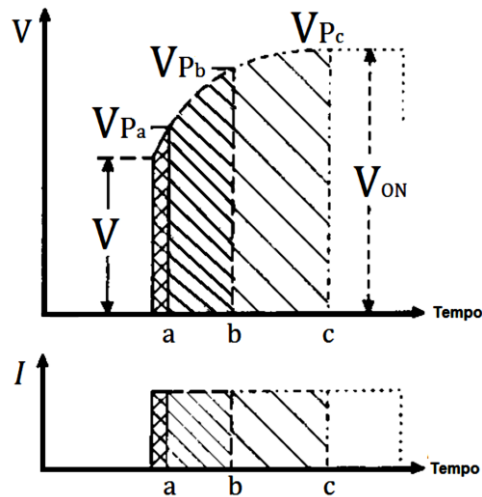


Figura 1.10– Representação esquemática do aumento do efeito de Polarização Induzida ( $V_{Pa}$  para  $V_{Pc}$ ) com o acréscimo do tempo de carga (REYNOLDS, 1997)

Para o método de Polarização Induzida no domínio da frequência há dois tipos de medições comumente realizadas, o efeito de frequência (Efeito de Frequência e Porcentagem de Efeito de Frequência) e o fator metal (FM). O Porcentagem de Efeito de Frequência é definido como a diferença normalizada entre a resistividade medida em duas frequências diferentes. É um parâmetro relacionado à cargabilidade. De acordo com Hallof (1964), geralmente o efeito frequência é calculado a partir da medida de resistividade aparente em duas ou mais frequências (Equação 1.20).

$$EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \quad \text{Eq. 1.20}$$

Onde  $\rho_{a0}$  e  $\rho_{a1}$  são as resistividades aparentes para a frequência menor e maior, respectivamente. Também é possível expressar o efeito frequência em porcentagem (Equação 1.21).

$$PFE = 100 \left( \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \right) \quad \text{Eq.1.21}$$

O Fator Metal também é utilizado no método Polarização Induzida no domínio da frequência. Normaliza-se o Porcentagem de Efeito de Frequência com relação às resistividades de frequências mais baixa, e com isso, remove em parte, a variação do efeito Polarização

Induzida com a resistividade da rocha hospedeira. Mostra-se um parâmetro mais diagnóstico na detecção de corpos de mineralização disseminada (Equação 1.22).

$$FM = EF \left( \frac{A}{\rho_{a0}} \right) = \frac{A(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a0}\rho_{a1}} \quad \text{Eq.1.22}$$

É comum representar a expressão do Fator Metal em termos da condutividade (Equação 1.23). Como a condutividade ( $\sigma$ ) é o inverso da resistividade.

$$FM = A \left( \frac{1}{\rho_{a0}} - \frac{1}{\rho_{a1}} \right) = A(\sigma_{a0} - \sigma_{a1}) \quad \text{Eq.1.23}$$

Em que A é uma constante dada por  $2\pi 10^5$ .

As equações de efeito de frequência e consequentemente de Fator Metal diferem de alguns autores em função principalmente das características físicas dos meios investigados (Tabela 1.4).

Tabela 1.4 – Variações nas definições de Efeito de Frequência e Fator Metal, e seus respectivos autores e ano de publicação.

| Parâmetro | ID | Equação  | Autores, Ano  |
|-----------|----|--|---|
| EF        | 1  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}}$   | Telford et. al (1990)<br>Sheriff (1991)<br>Rogers (1966)<br>Madden e Marshall (1959)<br>Halhof (1964) |
|           | 2  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a0}}$   | Brant et. al (1966)   |
|           | 3  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\sqrt{\rho_{a0}\rho_{a1}}}$   | Keller e Frischknecht (1966)  |
|           | 4  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \left[ \log \left( \frac{f_{a1}}{f_{a0}} \right) \right]^{-1}$ | Sumner (1979)   |
| FM        | 5  | $FM = \frac{A(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a0}\rho_{a1}}$   | Telford et. al (1990)<br>Brant et. Al (1966)<br>Madden e Marshall (1959)<br>Halhof (1983)             |
|           | 6  | $FM = \frac{10^5 FE}{\rho_{a0}}$   | Rogers (1966)   |
|           | 7  | $FM = \frac{2000 PFE}{\rho_a}$<br>* $\rho_a$ não especificado ( $\rho_{a0}$ ou $\rho_{a1}$ )                 | Sumner (1979)   |
|           | 8  | $FM = \frac{10^3 M (cargabilidade)}{\rho_{a0}}$  | Witherly e Vyselaar (1990)  |



Embora o tipo e o grau de mineralização não possam ser generalizados com os valores da resposta Polarização Induzida, Telford *et al.* (1990) apresenta valores médios de cargabilidade e de Fator Metal para alguns materiais geológicos (Tabela 1.5). Obviamente, devido à sobreposição considerável de valores, não é possível distinguir, apenas numericamente, entre rochas mineralizadas e vários tipos estéreis, como possíveis argilas (TELFORD *et al.*, 1990).

Tabela 1.5 – Cargabilidade típica de alguns materiais geológicos (modificada de TELFORD *et al.*, 1990).

|                     | <b>Material</b>                | <b>Cargabilidade<br/>(ms)</b> | <b>Fator Metal<br/>(mhos/cm)</b> |          |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------|
| Minerais            | <b>Pirita</b>                  | 13,4                          | 100 a 10000                      |          |
|                     | <b>Calcocita</b>               | 13,2                          |                                  |          |
|                     | <b>Cobre</b>                   | 12,3                          |                                  |          |
|                     | <b>Grafite</b>                 | 11,2                          |                                  |          |
|                     | <b>Calcopirita</b>             | 9,4                           |                                  |          |
|                     | <b>Bornita</b>                 | 6,3                           |                                  |          |
|                     | <b>Galena</b>                  | 3,7                           |                                  |          |
|                     | <b>Magnetita</b>               | 2,2                           |                                  | 3 a 3000 |
|                     | <b>Malaquita</b>               | 0,2                           |                                  |          |
|                     | <b>Hematita</b>                | 0                             |                                  |          |
| %Sulfetos           | <b>20% sulfetos</b>            | 2000 a 3000                   |                                  |          |
|                     | <b>8 a 20% sulfetos</b>        | 1000 a 2000                   |                                  |          |
|                     | <b>2 a 8% sulfetos</b>         | 500 a 1000                    |                                  |          |
| Rochas ígneas       | <b>Tufos vulcânicos</b>        | 300 a 800                     | 1 a 100                          |          |
|                     | <b>Vulcânicas básicas</b>      | 100 a 500                     | 1 a 80                           |          |
|                     | <b>Granito e granodiorito</b>  | 10 a 50                       | 0 a 60                           |          |
|                     | <b>Vulcânicas Ácidas</b>       | 8 a 20                        | 0 a 20                           |          |
| Rochas sedimentares | <b>Calcários e dolomitos</b>   | 10 a 20                       | 4 a 60                           |          |
|                     | <b>Arenitos</b>                | 3 a 12                        | 2 a 200                          |          |
|                     | <b>Argilitos</b>               | 3 a 10                        | 1 a 300                          |          |
| Rochas metamórficas | <b>Gnaisses pré-cambrianos</b> | 6 a 30                        | 10 a 100                         |          |
|                     | <b>Xistos</b>                  | 5 a 20                        | 10 a 60                          |          |
|                     | <b>Quartzitos</b>              | 5 a 12                        |                                  |          |
| Sedimentos          | <b>Cascalhos</b>               | 3 a 9                         |                                  |          |
|                     | <b>Aluviões</b>                | 1 a 4                         | 0 a 200                          |          |

## 1.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONGIOLO, A. B. S. (2011) Contribuição ao estudo da bacia do Amazonas e seu embasamento através da magnetometria e gravimetria. Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- BRANT, A. A., DOLAN, W. H., ELLIOT, C. L. (1966) *Coplanar and coaxial EM tests in Bathurst area, New Brunswick, Canada, 1956, in Mining Geophysics, v. I, Case Histories: Society of Exploration Geophysicists*, p. 130-141.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. (2004) Mapa Geológico do Estado de Goiás. Escala 1:500.000.
- DARDENNE, M. A., MELLO, S. M. G., MOERI, E. (1972) *Les stromatolithes du Groupe Bambuí, Brésil: classification et conditions du milieu de sédimentation*. Cong. Geol. Intern. Canadá, Abstract n° 8.
- DARDENNE, M. A., SCHOBENHAUS, C. (2001) Metalogênese do Brasil. Brasília, Editora Universidade de Brasília.
- FUCK, R. A. (1994) A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica da Província Tocantins. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 4, Brasília, Anais.
- HALLOF, P. G. (1964). *A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method*. *Geophysics*.
- HALLOF, P. G. (1983) *An Introduction to the Use of the Spectral Induced Polarization Method*. Markham, Ontario: Phoenix Geophysics Ltd.
- JOST, H., CARVALHO, M. J., RODRIGUES, V. G., MARTINS, R. (2014) Metalogênese dos *Greenstone Belts* de Goiás. In: Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras, CPRM, Belo Horizonte, 141-168.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. (2002) *An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd ed.*, 272p.
- KELLER, G. V., FRISCHKNECHT, F. C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, 523 p.
- LOKE, M. H. (2004) *Tutorial: 2D and 3D electrical imaging survey*.
- LOWRIE, W. (2007) *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press.
- LUIZ, J. G., SILVA, L. M. C. (1995) Geofísica de Prospecção. Belém, EDUFPA.
- MADDEN, T. R., MARSHALL, D. J. (1959) *Induced polarization, a study of its causes*. *Geophysics*, v. 24, p. 790-816.
- MCNEILL, J. D. (1980) *Applications of Transient Electromagnetic Techniques*. Geonics Technical Note TN-7.
- MILSOM, J. (1939) *Field Geophysics. The geological field guide series, 3rd ed.*
- OLIVEIRA, M. L. (2009) Economia Mineral do Brasil. DNPM.
- ORINOCO BRASIL MINERAÇÃO LTDA (2017) Relatório interno. Faina, 270p.
- PALACIM, L. (1976). Goiás. 1722-1822. 2 ed. Goiânia, Oriente.
- PIMENTEL M. M., YOST H., FUCK R.A. (2004) O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves

(eds). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Ed. Beca, São Paulo.

PINTO, M. S. (2000). Aspecto da história da mineração no Brasil colonial. In: LINS, F. et al. (orgs). Brasil 500 anos: a construção do Brasil e da América Latina pela mineração. Rio de Janeiro, CETEM/MCT.

POHL, J. E. 1837 (1951) Viagem no Interior do Brasil. 2 Vol. Rio de Janeiro, Instituto Nacional do Livro, Ministério da Educação.

RESENDE, M. G. et al. (1998) *The stratigraphy of the Goiás and Faina Greenstone Belts, Central Brazil: a new proposal*. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SP, v. 28, n. 1, p. 77-94.

REYNOLDS, J. M. (1997) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester John Wiley and Sons Ltd. 796p.

ROGERS, G. R. (1966) *An evaluation of the induced-polarization method in the search for disseminated sulfides*. In: *Mining geophysics, Vol. I: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists*, p. 350-356.

SANTOS, H. S. (2008) O método transiente eletromagnético: aplicação ao estudo da estrutura geológica da Bacia de Resende (RJ, Brasil). Dissertação de Mestrado em Geofísica, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 50p.

SHERIFF, R. E. (1991) *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics: Society of Exploration Geophysicists*, 3rd ed., 376 p.

SILVA, M. P. (2002) Comparação dos impactos Sócio-ambientais causados pelas Dinâmicas Mineratórias na Micro Bacia do Córrego Vermelho. Goiás. Monografia de Graduação, UEG/UUCC.

SILVA, M. P., ROCHA, C. (2008) Caracterização da Mineração Aurífera em Faina, Goiás, em um Contexto Ambiental Histórico e Atual. Ambiente & Sociedade. Campinas, v. XI, n. 2.

SPECTOR, A., GRANT, F. S. (1970) Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, p.293-302

SPIES, B. R., FRISCHKNECHT, F. C. (1991) *Time domain electromagnetic prospecting methods*. In: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Ed. by Nabighian M.N., Macnae J.C., Volume 2, Application, Parts A and B., Society of Exploration Geophysicists, pp: 427-519.

SUMNER, J. S. (1976). *Principles of Induced Polarisation for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

SUMNER, J. S. (1979) *The induced polarization exploration method*. In: *Geophysics and Geochemistry in the search for metallic ore*, P. J. Hood, Editor, Econ. Geol. Report 31, Geological Survey of Canada, pp 123-133.

TEIXEIRA, A. S. (1981) Geologia da região de Goiás-Faina. In: Simpósio de Geologia Centro-Oeste, Anais, Goiânia, p. 344-360.

TELFORD, W. M. et al. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 2ed.

VEARNCOMBE et al. (1986) *Greenstone belts: Their components and structure*. Lunar and Planetary Institute, Houston, p.214-220.

XAVIER, R. P. (1985) Principais domínios metalogenéticos do ouro: Representatividade no tempo geológico, sua distribuição espacial e importância econômica. Revista IG, São Paulo, v.6, n.1, p. 69-90.

WITHERLY, K. E., VYSELAAR, J. (1990) *A geophysical case history of the Poplar Lake Copper-Molybdenum deposit, Houston Area, British Columbia.*

## CAPÍTULO 2

### **Análise de parâmetros de aquisição de polarização induzida no domínio da frequência para caracterização de zona aurífera associada a sulfetos disseminados no *Greenstone Belt Faina*, Goiás.**

#### **RESUMO**

No *Greenstone Belt Faina* encontram-se mineralizações auríferas associadas às zonas de cisalhamento regionais de direção NE-SW. As pesquisas desenvolvidas na região pela empresa Orinoco Brasil Mineração Ltda. mostram que as mineralizações ocorrem ora associadas a sulfetos e óxidos magnéticos, ora a sulfetos não magnéticos. Este trabalho apresenta os resultados de aquisições 2D com diferentes parâmetros, realizadas com o método da polarização induzida no domínio da frequência em uma área com confirmação de mineralização aurífera sulfetada. No campo foram realizados testes de razão sinal-ruído em função de número de leituras por ponto, e de configuração de eletrodos (Dipolo-dipolo, *Wenner* e *Wenner-Schlumberger*) com períodos de injeção de corrente com 2 e 8 segundos, o que possibilitou o cálculo das resistividades, das Porcentagens de Frequência Efetiva e dos Fatores Metal indicados por diferentes bibliografias. A análise dos dados de campo indicou os parâmetros de aquisição de dados mais efetivos para se obter uma resposta geofísica de qualidade. Os resultados com os diferentes arranjos eletródicos indicam que, apesar de ter uma baixa razão sinal/ruído, o método Dipolo dipolo apresentou contraste lateral mais marcante em todos os parâmetros testados (resistividade, porcentagem do efeito de frequência e fator metal), além de possuir o menor tempo de aquisição, o que o torna mais viável, que justifica ser largamente utilizado em campanhas de eletrorresistividade e polarização induzida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Polarização induzida, *Greenstone Belt Faina*, Mineralização aurífera.

**ABSTRACT**

*In the Greenstone Belt Faina there are aerial minerals associated to regional shear zones NE-SW direction. In these shearings commonly occurs oxidized sulphides and iron oxides. Currently the mining company Orinoco Brasil Mineração operates in the exploration and prospecting of gold in Greenstone. Recent the Orinoco Brasil Mineração research developed in the region shows that mineralizations occur sometimes associated with sulfides and magnetic oxides, or with non-magnetic sulphides, which makes geophysical methods an essential tool in ore prospecting. This work presents the results of 2D acquisitions carried out with the frequency domain induced polarization method in an area with confirmation of sulfided gold mineralization. In the field, tests of signal-to-noise ratio were performed according to number of readings per point, and electrode configuration (Dipole dipole, Wenner and Wenner-Schlumberger) with current injection periods of 2 and 8 seconds. the calculation of resistivities, percentages of effective frequency and metal factors indicated by different bibliographies. Field data analysis indicated the most effective data acquisition parameters to obtain a quality geophysical response. The results with different electrode arrangements indicate that, despite having a low signal-to-noise ratio, the Dipole dipole method showed more marked lateral contrast in all the parameters tested (resistivity, percent frequency effect and metal factor), in addition, it has the shortest acquisition time, which makes it more feasible, and justifies being widely used in electrical resistivity and induced polarization campaigns.*

**KEYWORDS:** *Induced polarization, Greenstone Belt, Faina, Gold mineralization.*

## 2.1 INTRODUÇÃO

A geofísica oferece um grande potencial nas campanhas de pesquisa mineral, pois é uma ferramenta versátil na investigação da subsuperfície. Na prospecção mineral é indicada para a definição de novos alvos, para a delimitação espacial de zonas mineralizadas e fornece uma maior assertividade no posicionamento de corpos de minério. No Brasil, apesar de atualmente ter sua importância reconhecida, na prática, ainda existem barreiras culturais à maior aceitação da geofísica na área de exploração mineral, especialmente pelo insucesso em inúmeras áreas, causado principalmente pelas baixas amostragens espacial e temporal de dados, pelo uso de fontes de baixa potência, e pelas modelagens e interpretações ineficazes. Com a intenção de evitar interpretações incorretas, após a aplicação de geofísica na prospecção mineral em áreas de *greenfield*, diversos autores recomendam a utilização conjugada de diferentes métodos ou técnicas geofísicas (NETTLETON, 1954; ROY, 1962; FRAIHA e SILVA, 1994).

O método de polarização induzida (IP) é comumente aplicado na exploração mineral em fases avançadas da pesquisa, sobretudo na prospecção de zonas auríferas associadas a sulfetos disseminados. Os dados costumam orientar e anteceder as campanhas de sondagem (LANGORE *et al.*, 1989; KEAREY, 2002).

Collet (1990) reconhece o pesquisador Conrad *Schlumberger* como o primeiro a observar o fenômeno Polarização Induzida, fato ocorrido em uma pesquisa para prospecção de depósitos minerais, onde se notou que, seguida a interrupção da corrente injetada no solo, a diferença de potencial, medida em outro ponto da superfície, caía lentamente. Assim, a terra atuava como um capacitor, no qual havia sido polarizado pela aplicação de corrente e que, a partir do desligamento da fonte, se descarregava. Foi estabelecido um novo método geofísico de prospecção com a introdução de uma corrente contínua na terra, desligando-a e medindo-se o efeito da polarização. O método foi aplicado para localizar depósitos de minerais metálicos e na Segunda Guerra Mundial usado na busca de minas explosivas (COLLET, 1990).

Os registros de corrente no domínio do tempo passaram a ser executados também no domínio da frequência, onde o efeito Polarização Induzida é observado como variações da resistividade aparente em relação à frequência, o que levou ao conceito de “Percentual de Efeito de Frequência” introduzido por Wait (1959) e Madden e Marshall (1959) que estabeleceram a base do fenômeno Polarização Induzida com a introdução dos conceitos de polarização de eletrodos e de membrana, bem como do Fator Metal.

As medidas de Polarização Induzida são desenvolvidas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. O método Polarização Induzida no domínio do tempo é o mais

procurado pelo setor de exploração mineral, visto seu menor custo e tempo de desenvolvimento em campo (SUMNER, 1976; ZONGE e WYNN, 1975; SULTAN *et al.*, 2009). Contudo, alguns autores apresentam o método no domínio da frequência como uma alternativa ao método do Polarização Induzida no domínio do tempo na pesquisa mineral em função dos melhores resultados em áreas de geologia complexa (STUART e DENTITH, 2003).

Regionalmente o *Greenstone Belt* Faina está localizado no Maciço de Goiás - que engloba os terrenos granito *Greenstone* de Goiás, Crixás e Guarinos-Pilar de Goiás, formados no Arqueano, acrescidos de terrenos ortognáissicos de idade paleoproterozóica - que está inserido dentro da Faixa de Dobramentos Brasília, Província Tocantins.

Na região do *Greenstone Belt* Faina, existem mineralizações auríferas associadas a zonas de cisalhamento regional de direção NE-SW. As pesquisas desenvolvidas na região (ORINOCO, 2017) mostram que as mineralizações ocorrem ora associadas a sulfetos e óxidos magnéticos, ora a sulfetos não magnéticos, o que torna os métodos geofísicos uma ferramenta relevante na prospecção do minério.

Este trabalho mostra resultados de Polarização Induzida no domínio da frequência obtidos com diferentes arranjos eletródicos sobre estruturas geológicas conhecidas no *Greenstone Belt* Faina. O estudo foi feito em um prospecto mineral na extremidade sudeste do *Greenstone Belt*, denominado Alvo Sertão (Figura 2.1).



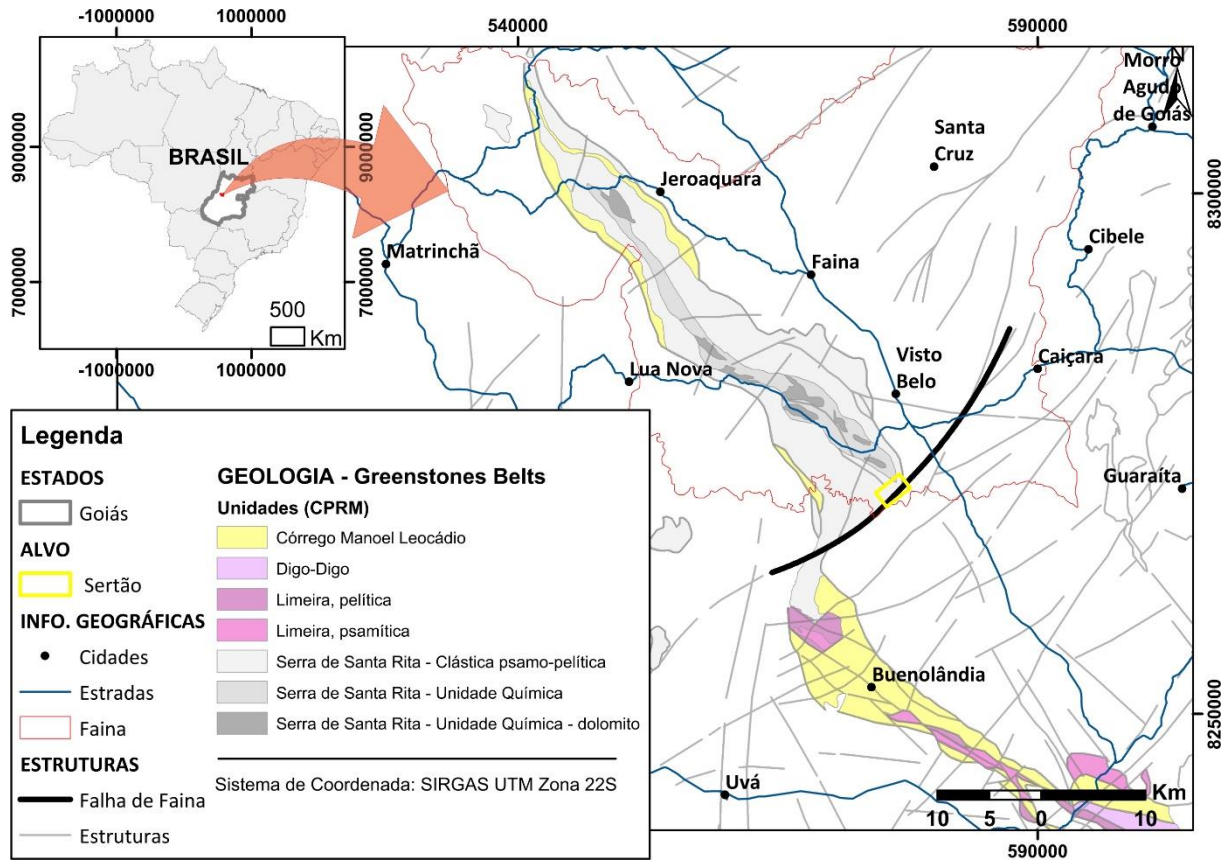


Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo com os limites dos *Greenstones Belts* de Faina e Goiás (Santa Rita), separados pela Falha de Faina.

## 2.2 GEOLOGIA LOCAL

Sob o mapa geológico de detalhe da área (Figura 2.2), observa-se uma tendência NE-SW das litologias, sendo a suíte Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito (TTG), sericita xisto, sericita xisto com metamarga e clorita biotita xisto, as litologias predominantes em superfície. Em seguida, zonas silicificadas e rochas vulcânicas máficas, além da zona hidrotermal principal que coincide com o xisto carbonoso com sericita e biotita.

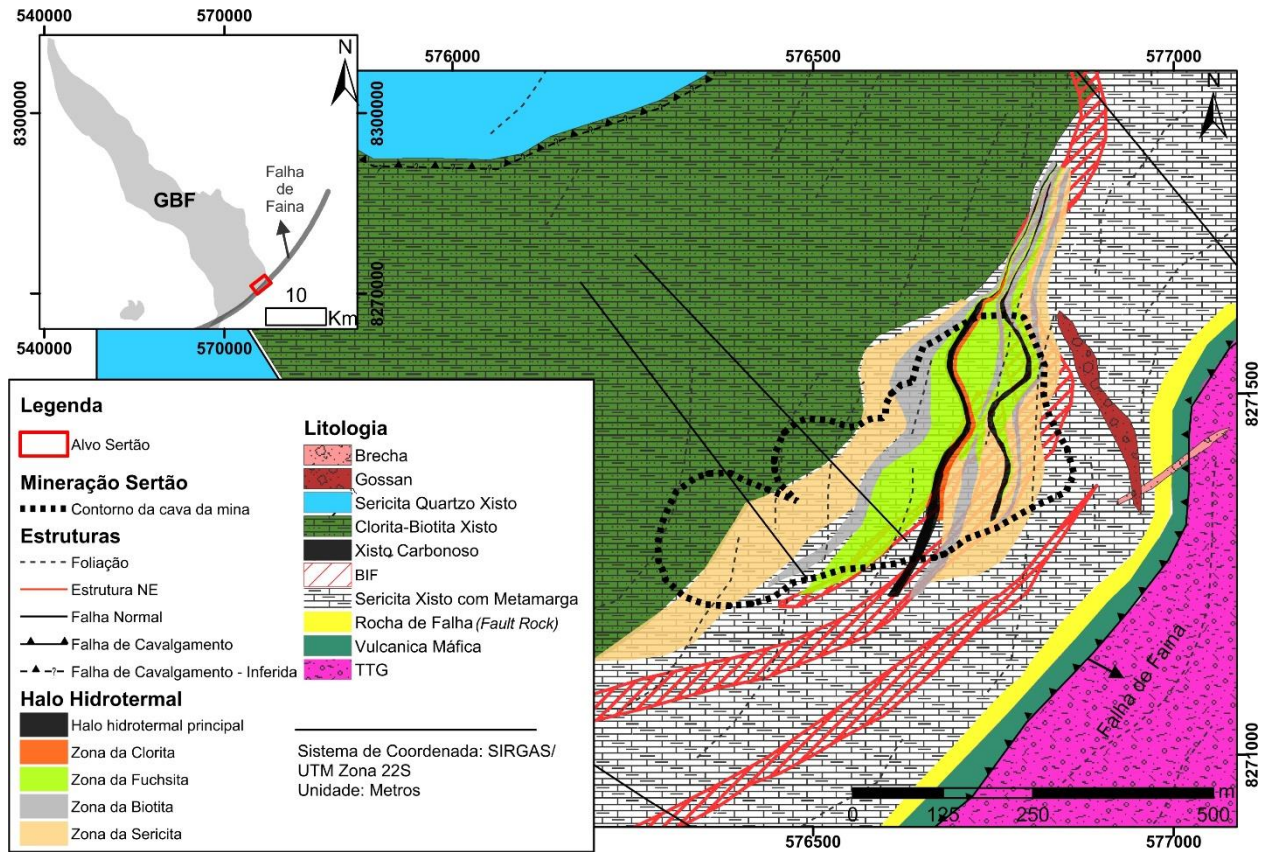


Figura 2.2 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de ORINOCO, 2017).

O sericita xisto onde está alojado o corpo de minério (associação de sulfetos – arsenopirita, pirita e pirrotita), tem orientação NE-SW, mesma orientação aproximada da falha de Faina que marca o contato entre o *Greenstone* e o embasamento. A falha em questão, possui um mergulho entorno de 30°, para NW e o corpo de minério tem aproximadamente o mesmo mergulho, o que sugere um controle estrutural. Os estereogramas do *pit* indicam que a foliação no local do depósito mergulha para oeste e a lineação de estiramento é *downdip*, também para oeste. Os *oreshoots* modelados da antiga lavra da Sertão Mineração Ltda., estão na mesma direção da lineação *downdip*. A falha de empurrão que divide o *Greenstone* do embasamento próxima ao *pit* tem *strike* N-S, e cai para oeste (e não NE-SW como nas outras extensões do mapa), parecida com a foliação do depósito.

### 2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado nesse trabalho foi de Polarização Induzida no Domínio da Frequência.

O método Eletroresistividade consiste basicamente em determinar a resistividade elétrica dos materiais, que apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica que é singular a cada litologia ou condições geológicas da área. No método Polarização Induzida no domínio da frequência ou método da frequência variável, as medidas de resistividade aparente são realizadas para (no mínimo) duas frequências distintas e menores que 10 Hz, para eliminar efeitos de acoplamento indutivo (HALLOF, 1964).

Ao usar uma frequência alta (pulso com intervalo de tempo curto) a voltagem transiente possui pouco tempo para aumentar, resultando numa voltagem ( $V_P$ ) baixa, ao usar uma frequência baixa, a voltagem transiente possui um intervalo de tempo grande para aumentar, o que resulta numa voltagem ( $V_P$ ) alta. Ou seja, o estudo do efeito de Polarização Induzida no domínio da frequência parte do princípio da variação da resistividade aparente com a frequência. Essa variação acontece porque, para pequenos tempos de carga, situação que aumenta a frequência de medição, acarreta na diminuição do efeito de Polarização Induzida e, conseqüentemente, da resistividade aparente. Portanto, para baixas frequências, a resistividade aparente tem um valor maior do que para altas frequências.

Para o método de Polarização Induzida no domínio da frequência há dois tipos de medições comumente realizadas, o Efeito de Frequência, Porcentagem de Efeito de Frequência e o Fator Metal, essas equações diferem de alguns autores em função principalmente das características físicas dos meios investigados (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Variações nas definições de Efeito de Frequência e Fator Metal, e seus respectivos autores e ano de publicação.

| Parâmetro | ID | Equação  | Autores, Ano   |
|-----------|----|--|--|
| EF        | 1  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}}$   | Telford et. al (1990)<br>Sheriff (1991)<br>Rogers (1966)<br>Madden e Marshall (1959)<br>Halof (1964) |
|           | 2  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a0}}$   | Brant et. al (1966)  |
|           | 3  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\sqrt{\rho_{a0}\rho_{a1}}}$   | Keller e Frischknecht (1966)   |
|           | 4  | $EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \left[ \log \left( \frac{f_{a1}}{f_{a0}} \right) \right]^{-1}$ | Sumner (1979)  |
| FM        | 5  | $FM = \frac{A(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a0}\rho_{a1}}$   | Telford et. al (1990)<br>Brant et. Al (1966)<br>Madden e Marshall (1959)<br>Halof (1983)             |
|           | 6  | $FM = \frac{10^5 FE}{\rho_{a0}}$   | Rogers (1966)  |
|           | 7  | $FM = \frac{2000 PFE}{\rho_a^*}$<br>* $\rho_a$ não especificado ( $\rho_{a0}$ ou $\rho_{a1}$ )               | Sumner (1979)  |
|           | 8  | $FM = \frac{10^3 M (cargabilidade)}{\rho_{a0}}$  | Witherly e Vyselaar (1990)   |

Na aquisição de dados usou-se o equipamento *Syscal Pro* (IRIS Instruments) acoplado a cabos multieletródicos com 72 conectores de aço carbono (Figura 2.3). No protocolo automático de aquisição de dados, foi programado ciclos de injeção de corrente com tensão de saída de 400V, espaçamento entre os eletrodos (dipolos) de 10 metros e dez níveis de investigação.

Figura 2.3 – Fotografias evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento *SYSCAL PRO* em campo.

Em função da programação da coleta de dados de resistividade aparente em duas frequências distintas (0,5Hz e 0,125Hz), para o cálculo de Porcentagem de Efeito de Frequência

e de Fator Metal, optou-se pela realização de testes de razão sinal/ruído com o empilhamento de registros (*stacks*) de 1, 3 e 5 ciclos, e pulsos com períodos de 2 segundos. Estes testes objetivam também maximizar o tempo em campo. A linha de testes de *stacks* foi posicionada em um local com descrição detalhada da estruturação geológica de superfície e proximidade com um alvo mineralizado (Figura 2.4).

Após a realização dos testes de *stacks* optou-se pela realização de uma seção usando os arranjos eletródicos Dipolo dipolo, *Wenner* e *Wenner-Schlumberger*. Os registros ocorreram na parte mais a oeste da área (Figura 2.4), com informações geológicas de superfície, de poços e com informações de teores do minério, no tempo igual a 2 e 8 segundos, ou frequências de 0,5Hz e 0,125Hz (para os cálculos da porcentagem de efeito de frequência e o fator metal), com 10 níveis de investigação.

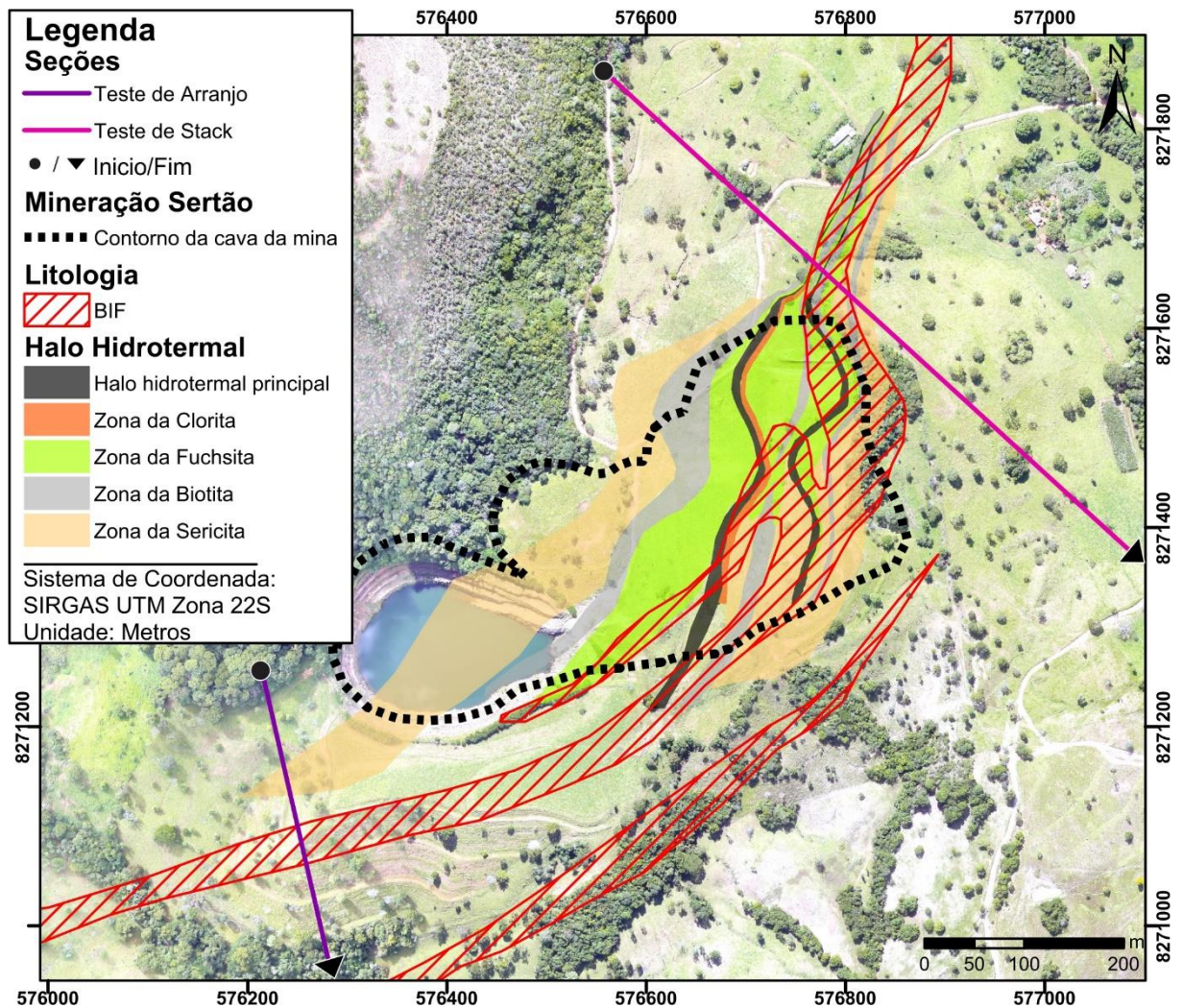


Figura 2.4– Imagem aérea de veículo aéreo não tripulado (VANT) da área de pesquisa com a localização da linha de teste de *Stack* e o contexto geológico sobreposto.

## 2.4 ANÁLISE DE DADOS

Nos testes de empilhamento de registros foi usado o arranjo Dipolo dipolo, uma vez que este arranjo é amplamente usado em campanhas geofísicas acadêmicas e corporativas de zonas mineralizadas, e possui a maior resolução entre os arranjos de eletrodos. No trabalho partiu-se da suposição de que se o experimento fosse efetivo, o mesmo funcionaria para qualquer arranjo de eletrodos, visto a menor razão sinal/ruído do arranjo Dipolo dipolo.

Após separar os dados por níveis de investigação e comparar o resultado para cada *stack* testado, os dados foram analisados a partir da média, mediana e moda do desvio padrão (DP), coeficiente de variação de Pearson (CV), que corresponde a uma medida de dispersão relativa, e diferenças das resistividades observadas ( $\Delta$ ) em cada nível (Tabela 2.2). Nos dados notam-se registros muito diferentes no mesmo ponto de amostragem, de modo que a média dos valores observados não é a análise estatística ideal para verificação dos dados, sendo assim, optou-se pela observação da mediana.

Tabela 2.2 – Análise estatística dos dados para o teste de *stack*. Média e mediana para o Desvio Padrão (DP), e Coeficiente de variação de Pearson (CV) dos dados de cada nível de investigação.

| Nível | DP    |         |      | CV     |         |       | DIF (5-3) |         | DIF (5-1) |         | DIF (3-1) |         |
|-------|-------|---------|------|--------|---------|-------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|       | média | mediana | moda | média  | mediana | moda  | média     | mediana | média     | mediana | média     | mediana |
| Todos | 19,48 | 2,83    | 0,1  | 7,40%  | 0,97%   | 0,06% | 18,99     | 2,18    | 32,01     | 5,29    | 38,04     | 4,34    |
| 1     | 2,51  | 0,92    | 0,1  | 0,17%  | 0,10%   | 0,06% | 3,78      | 0,74    | 5,82      | 2,20    | 2,23      | 1,22    |
| 2     | 1,63  | 0,47    | 0,1  | 0,17%  | 0,10%   | 0,04% | 1,81      | 0,36    | 3,66      | 1,09    | 2,18      | 0,41    |
| 3     | 4,89  | 1,03    | 0,3  | 0,78%  | 0,28%   | 0,29% | 5,42      | 0,66    | 7,85      | 1,73    | 9,65      | 1,60    |
| 4     | 9,70  | 1,69    | 0,3  | 1,75%  | 0,73%   | 0,37% | 10,83     | 1,67    | 13,46     | 2,18    | 21,74     | 2,96    |
| 5     | 8,70  | 1,25    | 0,6  | 2,03%  | 0,56%   | 0,27% | 14,59     | 1,09    | 7,08      | 2,50    | 17,52     | 1,50    |
| 6     | 7,42  | 2,30    | 1,0  | 4,56%  | 1,22%   | 1,69% | 9,22      | 2,05    | 11,35     | 4,98    | 13,60     | 3,55    |
| 7     | 21,36 | 5,39    | 1,3  | 6,78%  | 2,86%   | 1,23% | 32,31     | 4,25    | 19,99     | 9,18    | 44,37     | 8,37    |
| 8     | 23,96 | 12,52   | 14,5 | 11,86% | 4,80%   | 4,77% | 29,23     | 4,74    | 33,95     | 13,48   | 44,99     | 18,52   |
| 9     | 45,26 | 15,97   | 12,8 | 21,64% | 9,95%   | 6,96% | 38,75     | 11,61   | 79,18     | 32,43   | 87,92     | 31,12   |
| 10    | 78,02 | 43,00   | -    | 27,96% | 19,83%  | -     | 50,59     | 23,35   | 153,29    | 87,09   | 153,24    | 82,71   |

Na análise estatística notam-se que os valores das medianas de DP, CV e DIF aumentam com o aumento da profundidade de investigação (Tabela 2.2). Além disso, ao observar os valores das medianas para as diferenças dos valores de resistividades obtidos nos *stacks* de 5 e 3 (DIF 5-3), *stack* de 5 e 1 (DIF 5-1) e *stack* de 3 e 1 (DIF 3-1), respectivamente, nota-se um aumento de DP, CV e DIF com a diminuição dos *stacks*, o que configura uma relação inversamente proporcional.

A relação diretamente proporcional entre o ruído e a profundidade de investigação ou nível de investigação, também pode ser vista na Figura 2.5, em que são apresentados 10 gráficos para cada nível de investigação e os dados obtidos para cada leitura com *stacks* diferentes.

Os dados mostram um crescimento exponencial do desvio padrão, do coeficiente de variação de Pearson e das diferenças de resistividade aparente com os *stacks* distintos (Figuras 2.6 e 2.7). Isto indica que com o aumento dos níveis de investigação, esses valores crescerão exponencialmente juntamente com inconfiabilidade dos dados. Nestes gráficos notam-se similaridade nos valores dos expoentes das equações, igual a  $0.4168x$ ,  $0.4373x$  e  $0.5120x$ , para *stacks* 5 e 3, 5 e 1 e 3 e 1, e ainda uma proporção inversa entre o número de *stack* (5, 3, 1) e o valor do número no expoente associado a  $x$ . Porém não é possível determinar o tipo de relação entre eles (linear, exponencial ou outro) devido ao baixo número de valores de *stack* testados. Nos gráficos, quanto menor o valor no número multiplicado a  $x$  no expoente, mais a curva do gráfico se aproxima do eixo  $x$  (número de níveis igual a zero). Como a diferença entre os fatores multiplicados por  $x$  no expoente das equações é pequena (a maior diferença é igual a 0.0952) não é possível notar grande variação, porém ela existe, e a partir da análise dos dados coletados, quanto maior a quantidade de *stacks* maior seria o número de níveis confiáveis.

Assim realizou-se uma simulação para os gráficos exponenciais, com o objetivo de detecção de um valor aproximado do multiplicador do expoente  $x$  que englobasse 34 níveis de profundidade ou chegasse perto disso. Obteve-se um valor aproximado de 0.3 (Figura 2.8), em seguida, os valores dos multiplicadores dos expoentes das equações foram dispostos em dois gráficos: linear e exponencial. O gráfico exponencial foi descartado, devido ao valor inaplicável de *stack* (*stack* igual a 1600), e o gráfico linear indicou um valor de 14 a 15 *stacks* (Figura 2.9).

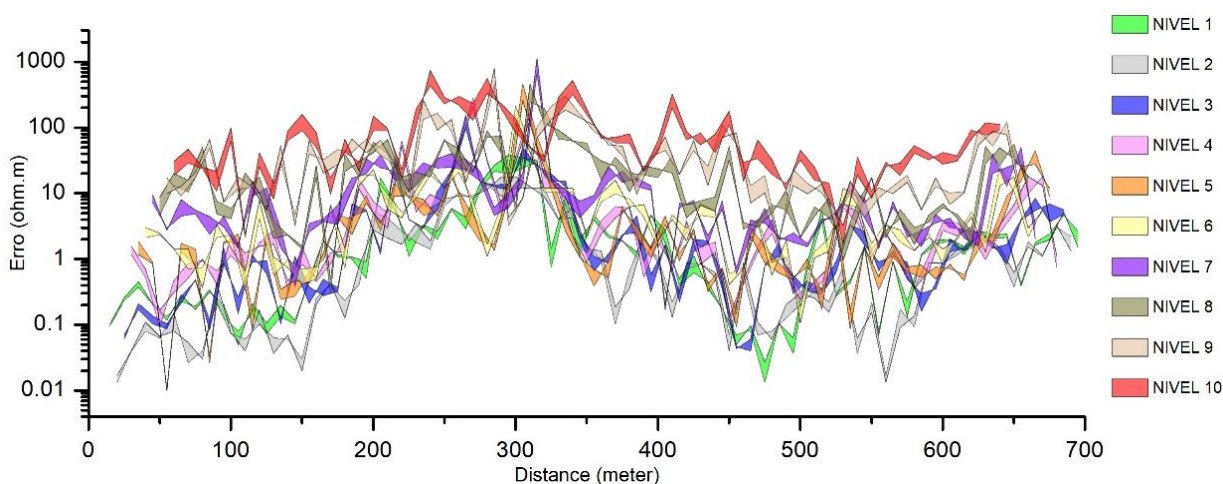


Figura 2.5 – Distribuição dos erros de resistividades aparentes registradas com diferentes *stacks* para os dez níveis de profundidade investigados. Notam-se que uma maior variância dos registros a partir do nível 8.

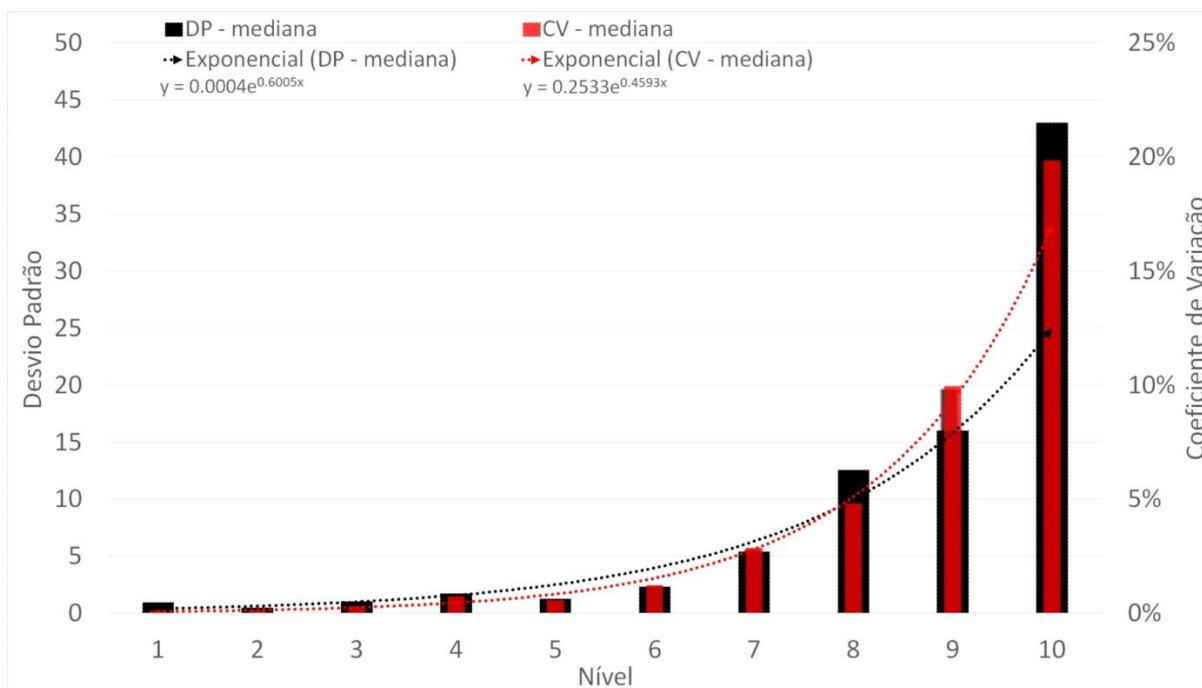


Figura 2.6– Gráfico da mediana do desvio padrão e do coeficiente de variação de Pearson.

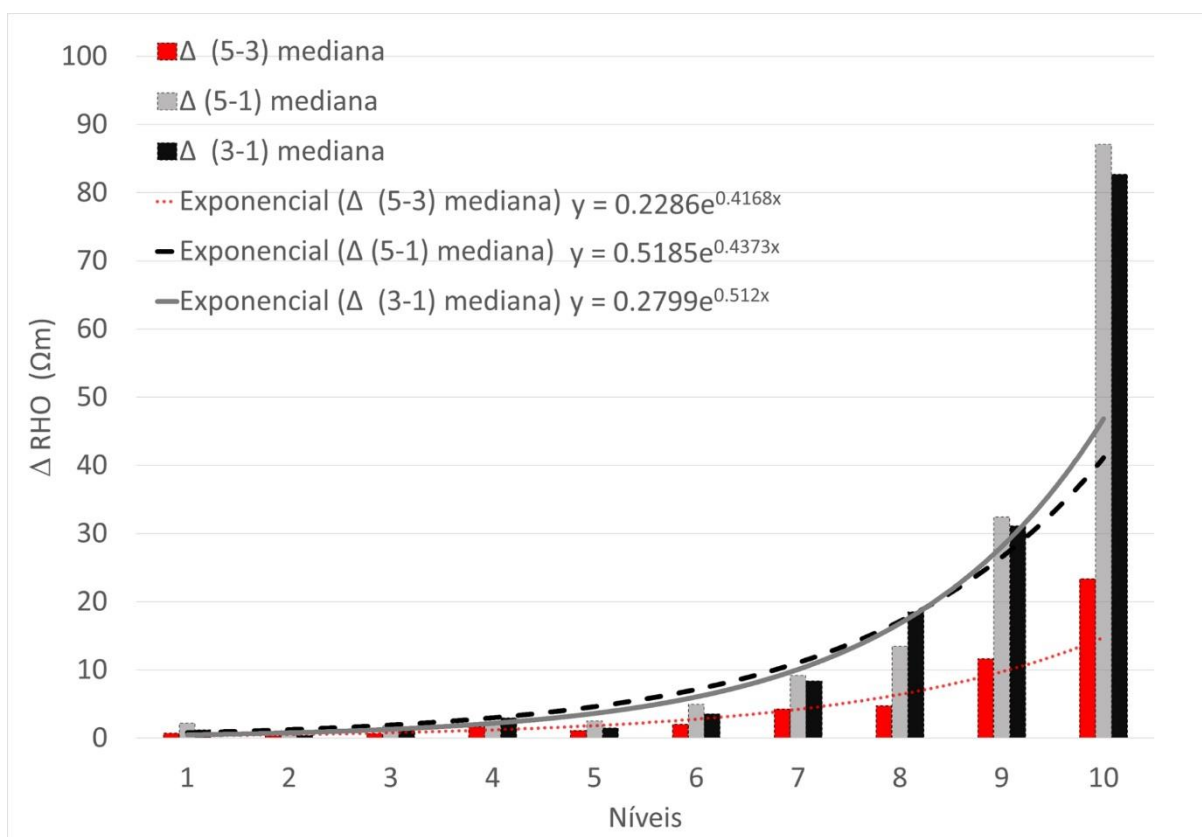


Figura 2.7– Gráfico das diferenças das resistividades com *stacks* diferentes por nível de investigação.



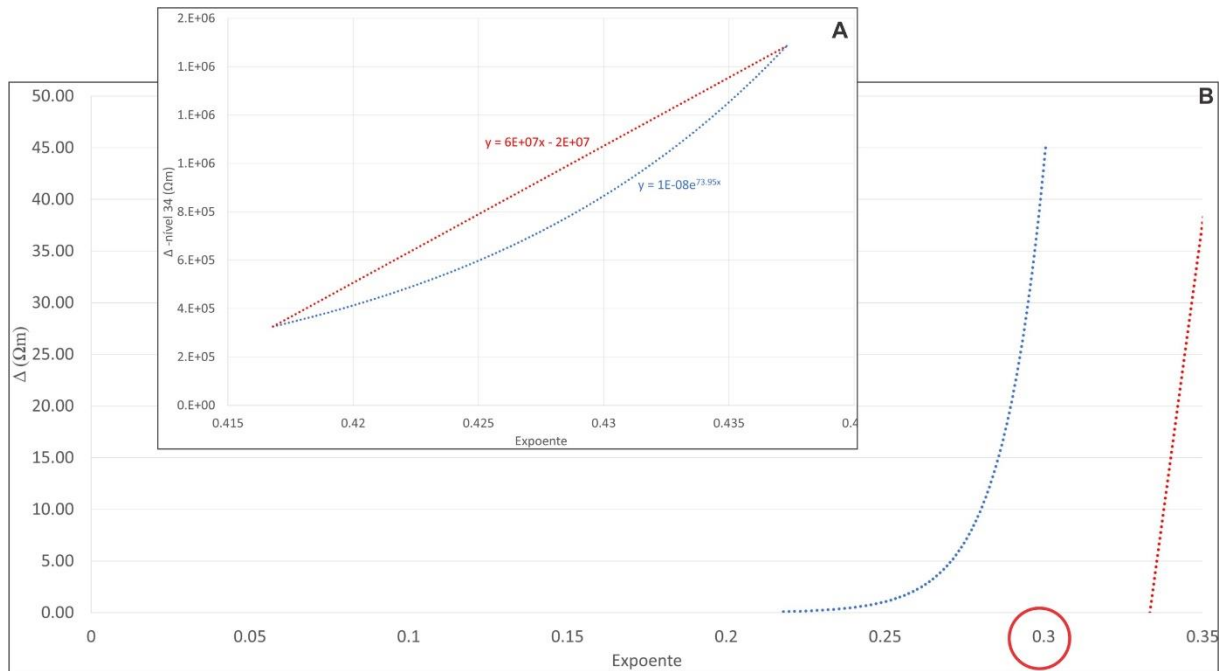


Figura 2.8– Simulação de gráfico exponencial que atenda ao número de níveis desejado, para a definição do multiplicador do expoente (aproximadamente 0.3)

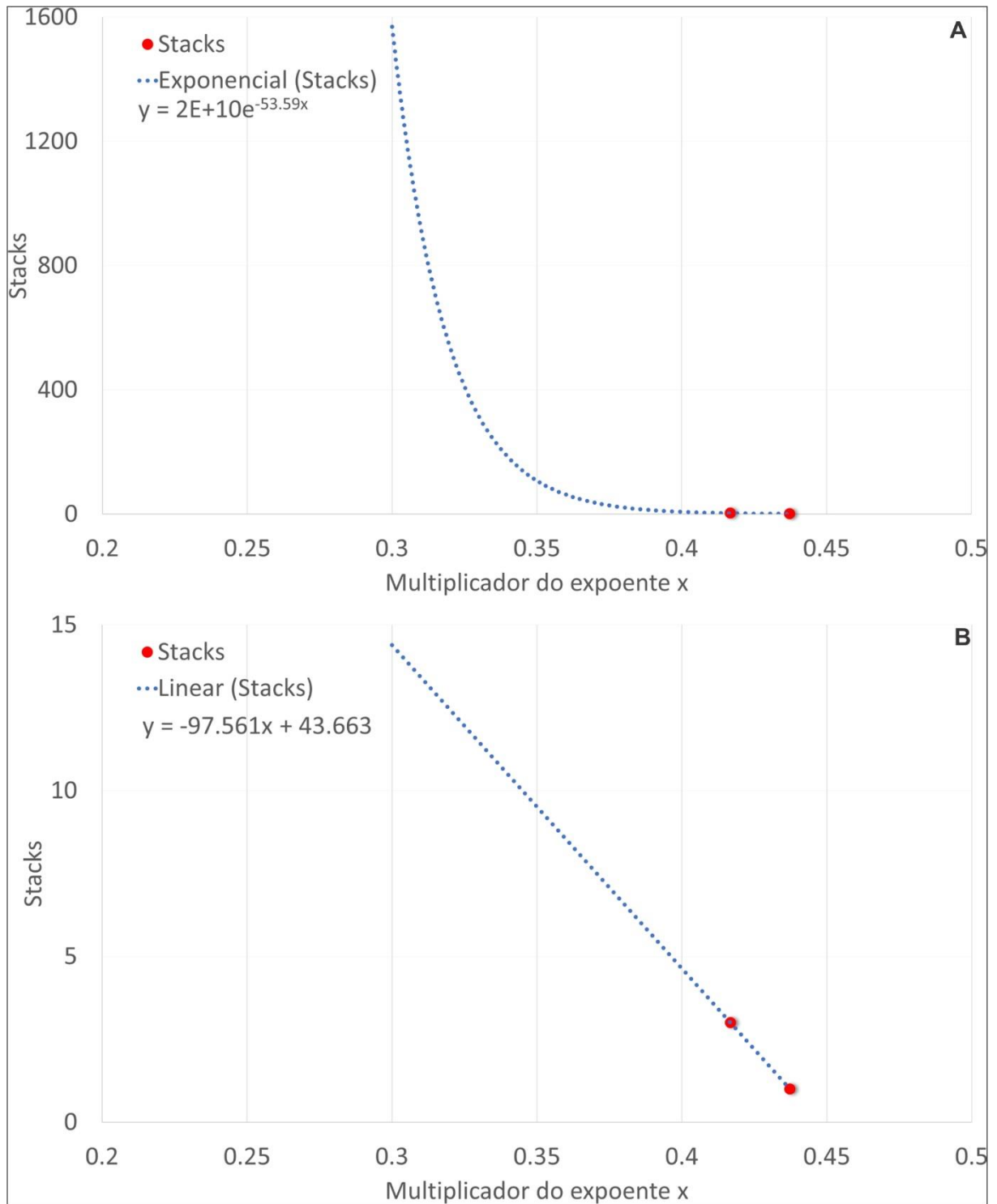


Figura 2.9 - Gráficos *Stacks versus* Multiplicador do expoente x, para a definição do número de *stack* (entre 14 e 15 *stacks* para o gráfico linear).

A análise conjunta dos valores de resistividade de contato ( $R_s$ -Check), Coeficiente de variação de Pearson, Desvio Padrão e das diferenças dos valores de *stack* (DIF 5-3, DIF 5-1 DIF 3-1, respectivamente) sugere uma relação proporcional entre o ruído e os níveis de investigação (Figura 2.10). Onde existem valores maiores de resistividade de contato, a

diagonal de leitura correspondente possui maior índice de ruído. A análise também possibilita a observação de uma anomalia de CV, DP e  $\Delta$  à direita das seções, que não aparenta ter relação direta com o aumento de níveis ou com a variação da resistividade de contato, o que sugere contribuição de efeitos topográficos ou de variação geológica.

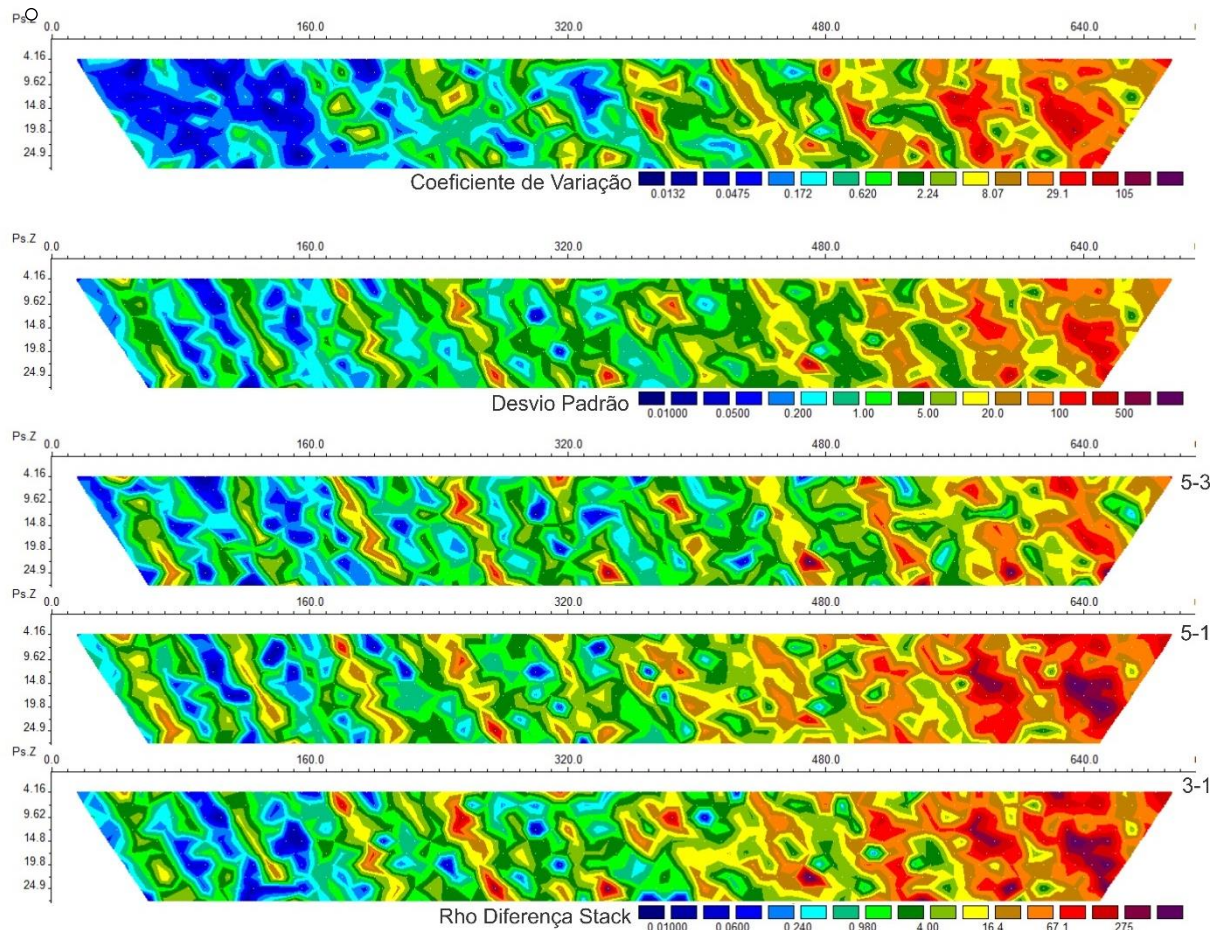


Figura 2.10 – Coeficiente de variação de Pearson, Desvio Padrão das diferenças dos valores de *stack* (DIF 5-3, DIF 5-1 DIF 3-1, respectivamente) plotados em seções.

A proporção do número de *stacks* versus número de níveis de investigação, não tem uma amplitude alta e o aumento significativo do número de *stacks* impossibilita uma campanha geofísica de médio/grande porte devido ao aumento do tempo de aquisição. Assim, visando otimizar a campanha, optou-se pelo número de *stack* igual a 1 para aplicação dos testes de arranjo.

Cada conjunto de dados obtidos com os arranjos eletródicos possui amostragem espacial distinta e número de pontos registrados diferentes, além disto, o tempo de registro de dados de cada arranjo é diferente (Tabela 2.3). No arranjo Dipolo dipolo obteve-se uma profundidade

máxima de investigação de 30 metros com 10 níveis, enquanto nos arranjos *Wenner* e *Wenner-Schlumberger* obteve-se 50 e 40m de profundidade de investigação, respectivamente.

Na Tabela 2.3 nota-se a diferença marcante na profundidade de investigação que pode ser até 66% maior (entre os arranjos *Wenner* e Dipolo dipolo), e no tempo de leitura que entre um arranjo e outro pode ter uma variação até três vezes maior. A relação de tempo de registro depende principalmente da rotina de aquisição inserida no eletrorresistivímetro e no número de canais que o equipamento registra por ciclo de injeção de corrente.

Tabela 2.3 – Parâmetros de profundidade, número de pontos antes e após a filtragem, obtidos nos conjuntos de dados registrados com os arranjos Dipolo dipolo, *Wenner* e *Wenner-Schlumberger* com ciclos de corrente com períodos de 2 e 8 segundos.

| Arranjo elétrico    | Profundidade de<br>Investigação<br>Aproximada | Tempo<br>(2s) | Tempo<br>(8s) | Nº dados<br>Inicial | Nº dados<br>Final | %<br>Perdida |
|---------------------|---|---------------|---------------|---------------------|-------------------|--------------|
| DIPOLO-DIPOLO       | 30 m  | 26 min        | 57 min        | 645                 | 415               | 35%          |
| WENNER              | 50 m  | 74 min        | 239 min       | 555                 | 466               | 16%          |
| WENNER-SCHLUMBERGER | 40 m  | 80 min        | 264 min       | 600                 | 399               | 33%          |

## 2.5 MODELAGEM

As modelagens dos dados de resistividade elétrica, obtidos com distintos *stacks* e o período de injeção de corrente de 2 segundos, ocorreram no *software Res2dinv (Geotomo)*. Na modelagem inversa usou-se a rotina de inversão de suavização por mínimos quadrados (SASAKI, 1989). Não realizaram-se filtragens nos dados de campo com o objetivo de analisar todos os pontos registrados. Assim, foram feitas cinco iterações aos conjuntos de dados, com erros médios quadráticos (RMS) de aproximadamente 34%, 34% e 33% para os *stacks* de 1, 3 e 5, respectivamente.

Os resultados das inversões mostram uma similaridade nas três seções, independente do *stack* (Figura 2.11). É possível visualizar três pacotes principais, o primeiro pacote (I), de resistividade intermediária a baixa coincidente com o mapeamento de Clorita Biotita Xisto em superfície. O segundo pacote (II) coincidente com o pacote de Sericita Xisto e Formação Ferrífera Bandada (BIF), nesse pacote resistivo existem duas anomalias menores de baixo resistivo, anomalia II.a que coincide com a alteração hidrotermal em superfície e a anomalia II.b, que não tem nenhuma correlação em superfície, porém possui ângulo de mergulho coincidente com o contato *Greenstone Belt versus* embasamento, e com o mergulho esperado para as unidades litológicas. O terceiro pacote (III), com baixa resistividade, tem correlação em superfície com a rocha de falha, a vulcânica máfica que marca o contato entre o *Greenstone Belt* e o embasamento e a brecha mapeada na área.

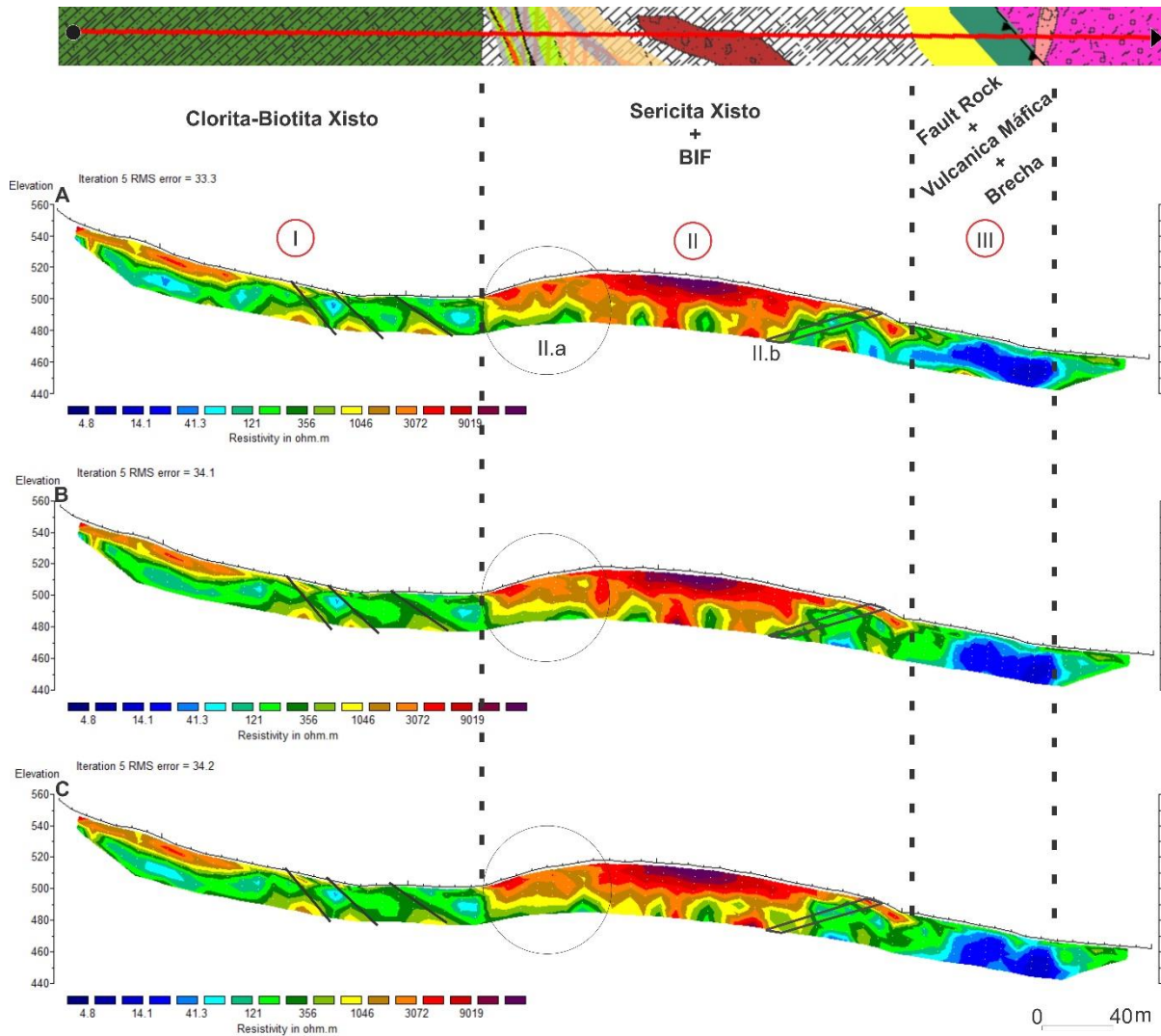


Figura 2.11 – Modelos de resistividade elétrica registrados em único local, com empilhamentos de registros distintos e respectiva distribuição de pontos. Modelos com *stack* de (A) 5 leituras, (B) 3 leituras, e (C) 1 leituras.

Os registros realizados com 1 *stack* e com os arranjos Dipolo dipolo, *Wenner* e *Wenner-Schlumberger* foram transferidos para o computador e filtrados com o programa *Prosys II*. Com estes dados calcularam-se os parâmetros de Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal para os arranjos testados, usando-se as equações apresentadas na Tabela 2.1, com exceção da equação ID 8, que necessita da informação de cargabilidade aparente que não foi registrada em campo. Nos dados de resistividade aplicou-se um filtro passa-alta de 0,001 (para excluir os valores nulos causados por falta de corrente elétrica ou registro de potencial causados por uma eventual desconexão do cabo com o eletrodo), e nos dados de Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal aplicou-se um filtro passa alta com valor igual a zero (para excluir valores negativos). Após a filtragem, exportaram-se os dados para o *software Res2Dinv* para a

aplicação da rotina de inversão. Na inversão usou-se também a suavização por mínimos quadrados sem a remoção de pontos espúrios ou aplicação de demais filtros (Figura 2.12).

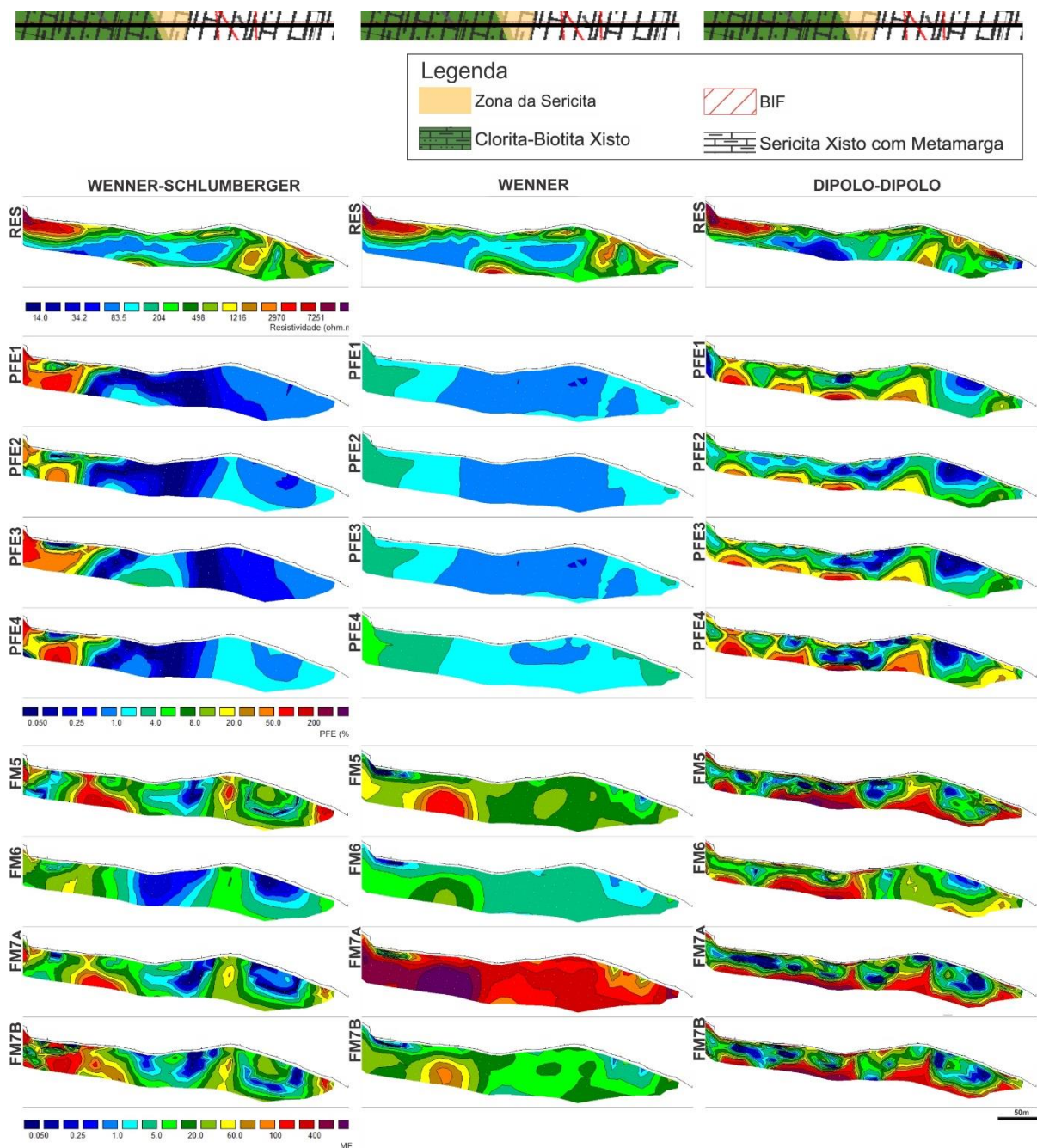


Figura 2.12 - Seções de resistividade (RES), porcentagem de frequência efetiva (PFE) e fator metal (FM) dos arranjos Dipolo-dipolo, Wenner e Wenner-Schlumberger, todas as seções com a mesma escala de cores (para cada parâmetro).

Tanto para as seções de Porcentagem de Efeito de Frequência, quanto para as seções de Fator Metal, dentro de um mesmo arranjo (Figura 2.12), notam-se poucas variâncias das anomalias. Como era esperado, os resultados obtidos com os diferentes arranjos mostram

sensibilidades para resolver anomalias distintas, sendo o Dipolo dipolo, mais indicado para detecção de feições mais verticalizadas.

As seções obtidas com o arranjo Dipolo dipolo apresentaram anomalias com melhor contraste lateral tanto para Porcentagem de Efeito de Frequência quanto para Fator Metal. Os arranjos *Wenner* e *Wenner-Schlumberger* não apresentaram nenhuma anomalia de Porcentagem de Efeito de Frequência significativa, enquanto no Fator Metal as anomalias existem, mas não são bem definidas.

O arranjo Dipolo dipolo foi o único arranjo que indicou anomalias de Porcentagem de Frequência Efetiva e Fator Metal coincidentes com a alteração hidrotermal (Zona da sericita) e o BIF mapeado em superfície. Assim optou-se pelo uso do arranjo Dipolo dipolo para o desenvolvimento de novas seções 2D para imagear os alvos mineralizados.



## 2.6 CORRELAÇÃO COM ÁREAS MINERALIZADAS

Na área realizaram-se 3 seções 2D, a fim de verificar a aplicabilidade do método de Polarização Induzida no Domínio da Frequência com o arranjo Dipolo dipolo e *stack* igual a 1 na definição da zona mineralizada. Registraram-se os valores de resistividade elétrica, com 34 níveis de profundidade, o que permitiu uma profundidade de investigação aproximada de 100m.

Fez-se o cálculo da Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal. As seções foram realizadas em áreas com informações geológicas e geoquímicas para a melhor correlação dos resultados (Figura 2.13). Baseado no mapa geológico estrutural e em dados de furo de sondagem, é possível aferir a anomalia correspondente à mineralização.

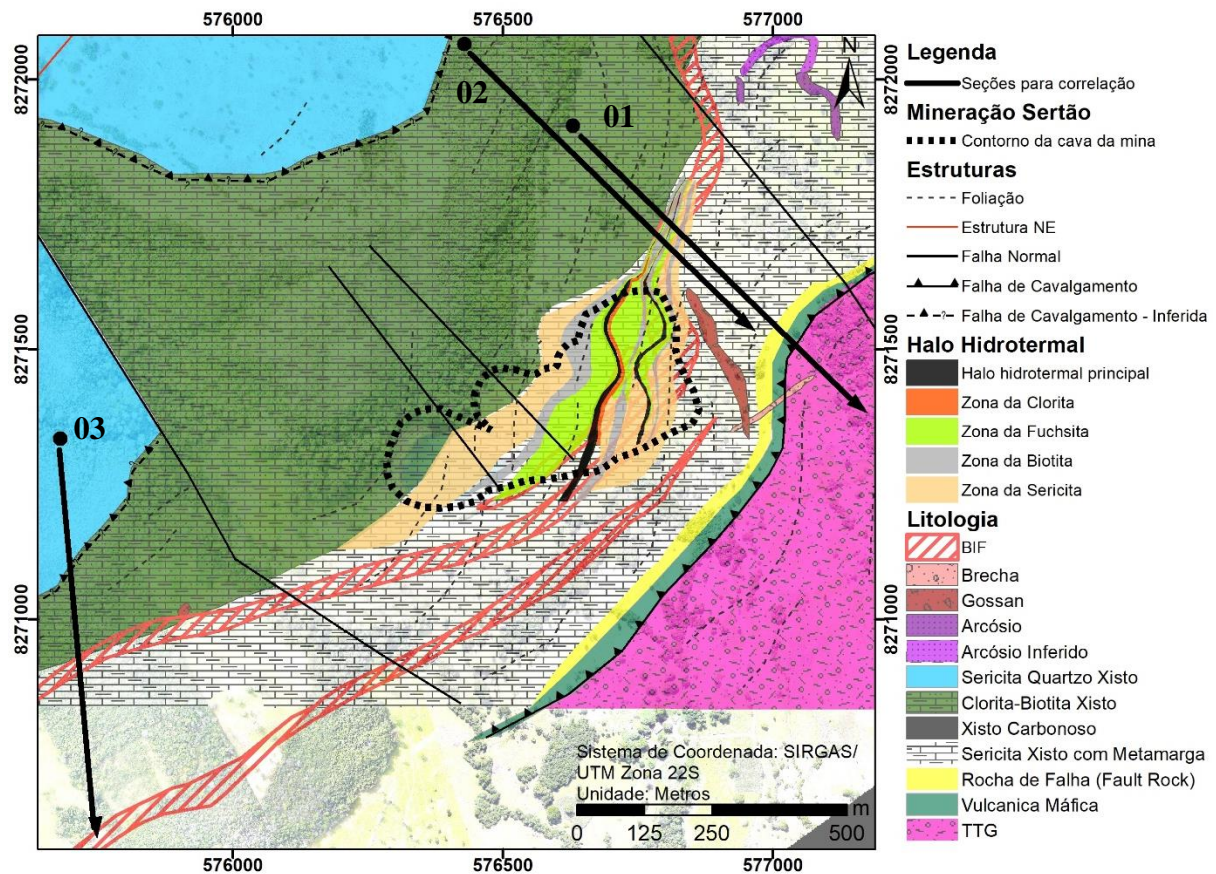


Figura 2.13 - Imagem aérea de VANT da área de pesquisa sobreposta ao mapa geológico com a localização das linhas 01, 02 e 03, de correlação geológica.

Na seção 01 (Figura 2.14) que fica localizada a aproximadamente 120 metros ao nordeste do ponto mais próximo da antiga cava da mina, observam-se anomalias de baixa resistividade, alta Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal próximo a superfície de onde foi mapeada a alteração hidrotermal possivelmente mineralizada.

As anomalias de Resistividade e Porcentagem de Efeito de Frequência detectadas como sendo referente à zona mineralizada, no segundo nível, são interrompidas no meio do que seria a tendência do mergulho dos níveis dos pacotes mineralizados. Contudo, a anomalia de Fator Metal é contínua e segue a tendência que é confirmada pela existência de furos antigos com geoquímica, com presença de teor de 4,99 ppm de ouro (no intervalo de 9 e 10 metros de profundidade) e 1,16 ppm de ouro (no intervalo de 108,5 e 109,5 metros de profundidade).

O “corte” na anomalia, possivelmente associado à zona de alteração hidrotermal mineralizada pode estar relacionado a alguma estrutura não mapeada em superfície, ou ainda a possibilidade de ruídos em profundidade afetarem o dado.

O contorno no primeiro nível da zona mineralizada tem anomalia de resistividade coincidente e com definição, com um mergulho aproximado de 30°, as anomalias de Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal existem, porém não têm uma resolução adequada, devido a eliminação de dados devido ruídos que em profundidade afetaram os dados.

Mais a sudeste da seção 01, ou à direita da mesma, próximo a borda, nota-se uma anomalia de baixa resistividade que coincide em superfície com o mapeamento de “*Fault Rock*”, e marca o contato entre o quartzito branco (baixa Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal) e a rocha vulcânica máfica (alto Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal).

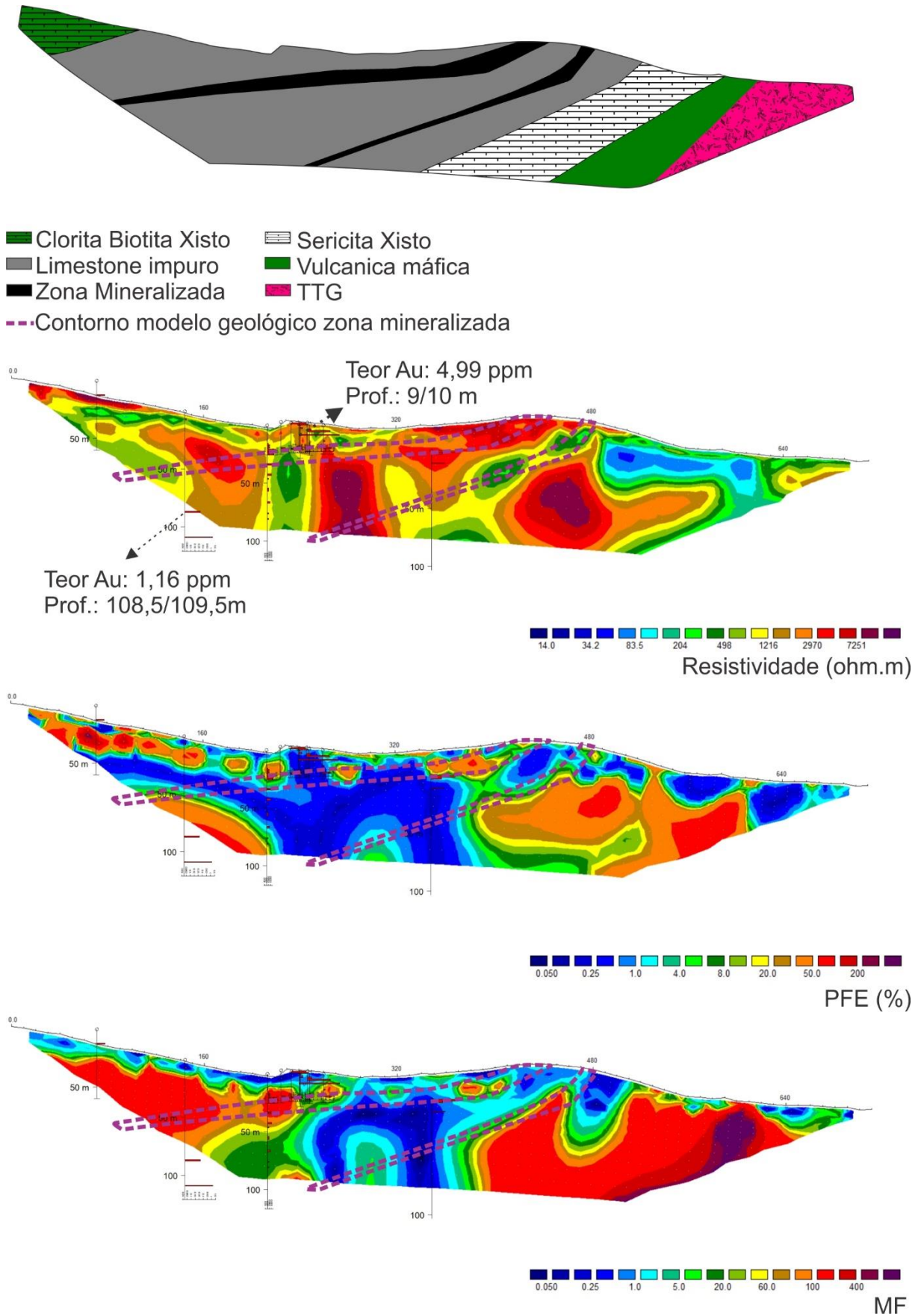


Figura 2.14 – Seções da Linha 01, ao nordeste da cava da antiga mina. Seção de RES, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

Na seção 02 (Figura 2.15), que fica localizada a aproximadamente 60 metros ao nordeste do ponto mais próximo da antiga cava da mina, observam-se duas anomalias principais associadas a dados de geoquímica com valores positivo para ouro.

A primeira anomalia detectada, Anomalia I, (baixa de Resistividade, alto Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal), localizada no noroeste geográfico, possui teores de ouro de 1,14 ppm a 10,04 ppm também é afetada por alguma estrutura que fica bem aparente em todas as seções (Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal). Não existe correlação em superfície com nenhuma zona mineralizada conhecida, contudo, são anomalias bem ressaltadas, coincidentes com teores positivos de ouro, que podem indicar um nível mineralizado ainda não investigado.

A segunda anomalia, no centro da seção, que corresponde à zona de alteração hidrotermal, tem o contorno da zona mineralizada coincidente. Possui anomalias de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal esperadas nos primeiros níveis (mais próximo a superfície), mas há um aumento de ruídos em profundidade. Esta região é atestada por testemunhos de sondagem e por dados de teores de 0,25 ppm a 4,99 ppm de ouro entre 9 e 109,5 metros de profundidade.

Existe ainda, anomalias de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal marcando o contato entre a Clorita Biotita Xisto e o Limestone, quantitativamente essas anomalias são similares as anomalias das zonas mineralizadas até então definidas.

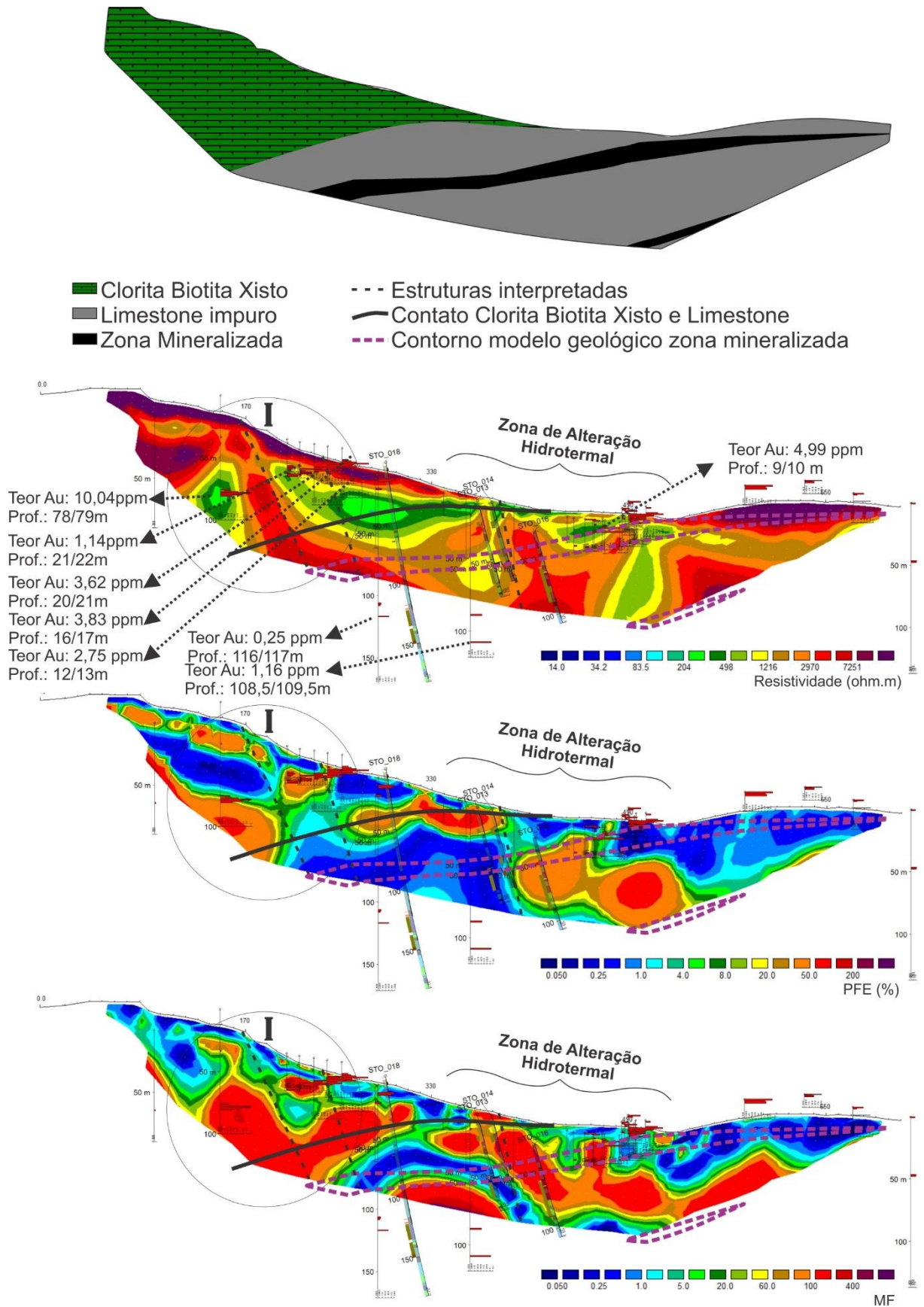


Figura 2.15 – Seções da Linha 02, ao nordeste da cava da antiga mina. RES, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

No perfil 03 (Figura 2.16), os níveis da zona mineralizada contornada são coincidentes com as anomalias, o primeiro nível pode ser projetado para um dado de testemunho de sondagem com teor de 1,48 ppm de ouro, sendo que numa projeção maior, a mesma interceptaria um dado de testemunho de sondagem de 129,6 ppm de ouro.

Ainda na seção 03, o segundo nível também é coincidente com o contorno da zona mineralizada, porém ele apresenta uma anomalia grande em relação ao contorno, devido ao aumento de ruído com a profundidade os dados perdem a geometria coincidente com o corpo. A anomalia apresenta baixo de Resistividade, alto Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal .

Nota-se em todas as seções, que as anomalias tendem a perder a resolução com a profundidade, isso ocorre devido a relação proporcional entre o ruído e os níveis de investigação.

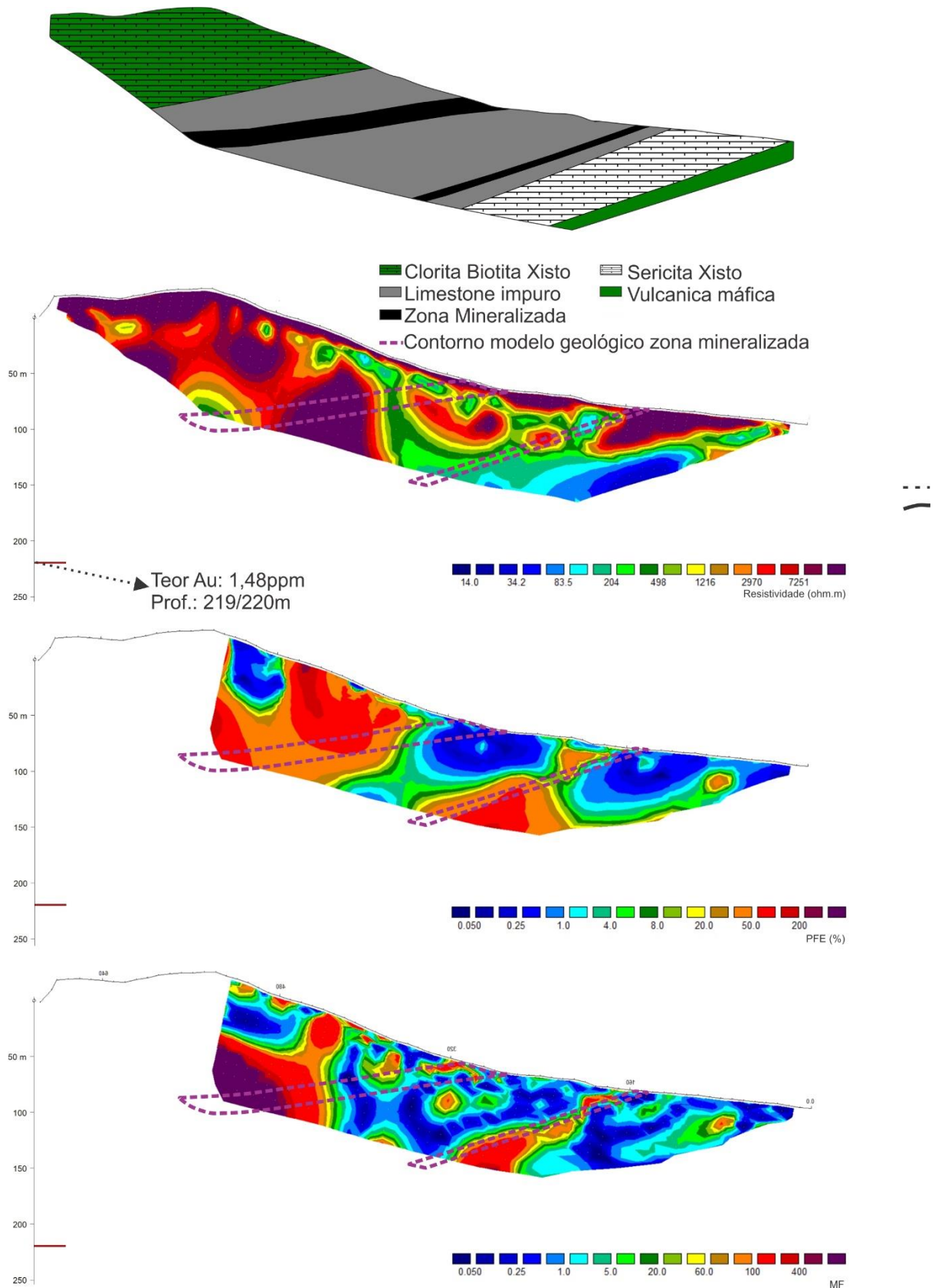


Figura 2.16 – Seções da Linha 03, ao sudoeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

## 2.7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com os testes de *stack* mostram similaridade independentemente do número de ciclos de injeção de corrente (1, 3 ou 5), e de valores de erros médios quadráticos (RMS) igualmente similares, de 34%, 34% e 33%. Com os testes de *stack* notou-se um aumento da variância dos registros com a diminuição dos *stacks*, configurando uma relação inversamente proporcional entre o número de *stacks* e o ruído.

A proporção do número de *stacks* versus número de níveis de investigação tem uma amplitude alta e o aumento significativo do número de *stacks* impossibilita uma campanha geofísica de médio/grande porte, devido ao aumento do tempo de aquisição. Assim, deve-se calcular o tempo de aquisição com diferentes *stacks* para o levantamento de uma seção, e tentar utilizar um valor de *stack* dentro das possibilidades para otimizar a campanha de forma a torná-la viável. Além disso, recomenda-se dar atenção para os valores de resistência de contato, não permitindo que superem 10  $\Omega$ /m.

Nas seções de Resistividade, em todos os arranjos testados notam-se as anomalias de baixa resistividade com geometrias semelhantes. As seções obtidas com o arranjo Dipolo dipolo apresentaram anomalias com melhor contraste lateral tanto para Porcentagem de Efeito de Frequência quanto para Fator Metal. Os arranjos *Wenner* e *Wenner-Schlumberger* não apresentaram nenhuma anomalia de Porcentagem de Efeito de Frequência significativa, enquanto no Fator Metal as anomalias existem, mas não são bem definidas para o arranjo *Wenner*, e são bem definidas no arranjo *Wenner-Schlumberger*.

Apesar de ter uma baixa razão sinal/ruído, o método Dipolo dipolo apresentou contraste lateral mais marcante em todos os parâmetros testados (Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal), além disso, possui o menor tempo de aquisição (três vezes menor que os outros arranjos testados), o que o torna mais viável, e justifica ser largamente utilizado em campanhas de Eletrorresistividade e Polarização Induzida.

Para a área do *Greenstone Belt* de Faina os resultados obtidos com o método elétrico tiveram ótima correlação com as estruturas geológicas de cisalhamento e com a zona hidrotermal mineralizada, o que torna o método uma excelente ferramenta para prospecção mineral para a região.

Sugere-se um número maior de testes de *stack*, para confirmar as curvas de análises feitas apenas com a variação de 3 *stacks*. O uso do arranjo Polo dipolo ou Polo polo podem aumentar a profundidade de investigação do levantamento e ter uma maior razão sinal/ruído, possibilitando uma resposta mais positiva na área.



## 2.8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Orinoco Gold pelo auxílio em todas as etapas de campo e pelo fornecimento de informações de poços e geoquímicas.

## 2.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANT, A. A., DOLAN, W. H., ELLIOT, C. L. (1966) *Coplanar and coaxial EM tests in Bathurst area, New Brunswick, Canada, 1956, in Mining Geophysics, v. I, Case Histories: Society of Exploration Geophysicists*, p. 130-141.

COLLETT, L. S. (1990) *History of the Induced-Polarization Method. In: Induced Polarization: Applications and Case Histories, Chapter 1 SEG's.*

FRAIHA, S. G. C., SILVA, J. B. C. (1994) *Factor analysis of ambiguity in geophysics. Geophysics, July 01, Vol.59, 1083-1091.*

HALLOF, P. G. (1964). *A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. Geophysics.*

HALLOF, P. G. (1983) *An Introduction to the Use of the Spectral Induced Polarization Method. Markham, Ontario: Phoenix Geophysics Ltd.*

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. (2002) *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed., 272p.

KELLER, G. V., FRISCHKNECHT, F. C. (1966) *Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, 523 p.*

LANGORE, L., ALIKA J. P., GJOVREKU, D. (1989) *Achievements in copper sulfide exploration in Albania with IP and EM methods. Geophysical Prospecting, v. 37.*

MADDEN, T. R., MARSHALL, D. J. (1959) *Induced polarization, a study of its causes. Geophysics, v. 24, p. 790-816.*

NETTLETON, L. L. (1954) *Regionals, Residuals and Structures. Geophysics, 19, 1-22.*

ORINOCO BRASIL MINERAÇÃO LTDA (2017) Relatório interno. Faina, 270p.

ROGERS, G. R. (1966) *An evaluation of the induced-polarization method in the search for disseminated sulfides. In: Mining geophysics, Vol. I: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, p. 350-356.*

ROY, A. (1962) *Ambiguity in geophysical interpretation. Geophysics, 27(1):10-99.*

SASAKI, Y. (1989) *Two Dimensional Joint Inversion of Magnetotelluric and Dipole-Dipole Resistivity Data. Geophysics, Vol. 54.*

SHERIFF, R. E. (1991) *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics: Society of Exploration Geophysicists, 3rd ed., 376 p.*

STUART, R., DENTITH, M. (2003) *Sediment-hosted stratiform copper deposits in the Adelaide Geosyncline, South Australia: geophysical responses of mineralisation and the mineralised environment. ASEG Extended Abstracts 2003: pp. 169-195.*

SULTAN S. A., MANSOUR S. A., SANTOS F. M., HELALY, A. S. (2009) *Geophysical exploration for gold and associated minerals, case study: Wadi El Beida area, South Eastern Desert, Egypt. Journal of Geophysics and Engineering, v. 6, n. 4, p. 345- 356.*

SUMNER, J. S. (1976). *Principles of Induced Polarisation for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

SUMNER, J. S. (1979) *The induced polarization exploration method*. In: *Geophysics and Geochemistry in the search for metallic ore*, P. J. Hood, Editor, *Econ. Geol. Report 31*, Geological Survey of Canada, pp 123-133.

TELFORD, W. M. et al. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 2ed.

WAIT, J. R. (1959) *Diurnal change of ionospheric heights deduced from phase velocity measurements at VLF*, *Proc. IRE*, 47, 998.

WITHERLY, K. E., VYSELAAR, J. (1990) *A geophysical case history of the Poplar Lake Copper-Molybdenum deposit, Houston Area, British Columbia*.

ZONGE, K. L., WYNN, J. C. (1975) *Recent advances and applications in complex resistivity measurements*. In: *Short course in induced polarization and complex resistivity, January 9-10, Proceedings and papers: University of Arizona, Laboratory of Geophysics, Department of Geoscience*, 46.

## CAPÍTULO 3

### **Processamento e integração de dados geofísicos em área *brownfield*, na determinação de continuidade de mineralização de ouro, *Greenstone Belt Faina-GO***

#### **RESUMO**

A área de estudo localiza-se em Faina-GO, sob um *Greenstone Belt*, denominado *Greenstone Belt Faina*. No final dos anos 90, diversos projetos geofísicos contíguos e sobrepostos foram realizados no Alvo Sertão, dentre os levantamentos geofísicos realizados estão os métodos: magnetométrico, radiométrico, transiente eletromagnético e susceptibilidade magnética. Esse trabalho realizou o reprocessamento e integração desses dados, além da aplicação do método polarização induzida no domínio da frequência, ainda não testado na área, objetiva-se atestar a importância da utilização de métodos geofísicos na exploração mineral e verificar a potencialidade do método da polarização induzida no domínio da frequência, na identificação de zonas mineralizadas no contexto geológico em questão. O alvo Sertão está basicamente hospedado no contato entre xistos carbonosos e calcários numa pilha de sedimentos químicos que inclui lentes de Formações Ferríferas Bandadas, alteração incluindo sulfetos (10-15%) na zona proximal e sericita/biotita na zona distal. O pacote de alteração total pode chegar a dezenas de metros de espessura, já a alteração proximal apresenta até 10 metros de espessura. A reanálise e integração dos dados geofísicos existentes antecederam a campanha de polarização induzida no domínio da frequência e foi fundamental na definição da área do levantamento, disposição das linhas e parâmetros de aquisição. Todos os dados de geofísica fornecidos indicaram um corredor com sinal e geometria coincidente à área de mineralização anterior (área da antiga lavra) e a tendência segue para sudoeste. Essa informação foi validada pelas seções de resistividade, fator metal e porcentagem de frequência efetiva realizadas nesse projeto. Foram realizadas um total de 15 linhas de aquisição de resistividade, seguidos do processamento, inversão, integração dos dados e, por fim, realizada a modelagem direta do pacote potencialmente mineralizado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mineralização aurífera, Magnetometria, Radiometria, Eletromagnético Transiente, Susceptibilidade magnética, Polarização Induzida, *Greenstone Belt Faina*.

**ABSTRACT**

The study area is located in Faina-GO, under a Greenstone Belt, called Greenstone Belt Faina. At the end of the 1990s, several contiguous and overlapping geophysical projects were carried out at the Sertão Range, among which the geophysical surveys were: magnetometric, radiometric, transient electromagnetics and magnetic susceptibility. This work proposed the reprocessing and integration of these data, besides the application of induced polarization method (frequency domain), not yet tested in the area, to attest the importance of geophysics in mineral exploration, and to verify the potentiality of the polarization method induced in the identification of mineralized zones in the Sertão target geological context. As the Sertão target is basically hosted in the contact between carbonaceous and limestone shales, in a chemical sediment *stack* that includes BIF lenses, alteration includes sulphides (10-15%) in the proximal and sericite / biotite areas, the total alteration pack can reach to tens of meters of thickness, already the proximal alteration presents about 10 meters of thickness. The reanalysis and integration of the old data preceded the induced polarization (frequency domain) campaign and was fundamental in the definition of the survey area, lines layout and acquisition parameters. All geophysical data provided indicated a corridor with sign and geometry coincident to the area of previous mineralization (area of the old mining), the *trend* follows to the southwest that should be verified later. This information was validated by the sections of electroresistivity, metal factor and percentage frequency effect performed in this project. A total of 15 lines of resistivity acquisition were performed, followed by processing, inversion, data integration and direct modeling of the potentially mineralized package.

**KEYWORDS:** Gold Mineralization, Magnetometry, Radiometry, Electromagnetic Transient, Magnetic susceptibility, Induced Polarization, *Greenstone Belt Faina*.

### 3.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a busca por metais preciosos ocorreu a partir do Governo Geral implantado pela Coroa Portuguesa em 1549. O primeiro registro de ouro data de 1560, enquanto a primeira jazida de ouro está datada em 1590, localizada em Paranaguá-PR. Aos poucos, áreas no interior do território brasileiro, principalmente a região central, foram desbravadas pelos Bandeirantes. A partir da proliferação de novas descobertas, formou-se a mina de Santa Rita, no município de Faina-GO, a qual se tornou um dos primeiros núcleos auríferos de Goiás, passando por três períodos diferentes de mineração (PALACIM, 1976; PINTO, 2000; SILVA, 2002; SILVA e ROCHA, 2008): 1 – século XVII e XIX: ação desbravadora, feito dos Bandeirantes; 2 – século XX: garimpos; e 3 – século XXI: exploração industrial (mineradoras).

Na região de Faina, as mineralizações ocorrem em rochas que compõem o *Greenstone Belt* Faina (GBF), (RESENDE *et al.*, 1998). Genericamente define-se um *Greenstone Belt* como “(...) corpo longo e estreito, de idade Arqueana composto por sequências vulcanossedimentares em fácies de xisto verde” (VEARNCOMBE, 1986). Apesar dos afloramentos de terrenos arqueanos contemplarem relativamente uma pequena fração do planeta, até 1985 contribuíram com aproximadamente metade da produção mundial de ouro, da qual, 20% são provenientes de sequências vulcanossedimentares do tipo *Greenstone Belt*, tornando-os extremamente interessantes no ponto de vista econômico (XAVIER, 1985).

No fim dos anos 90, diversos projetos geofísicos contíguos e sobrepostos foram realizados pela Mineração Jenipapo SA (MJSA) no Alvo Sertão, já explotado pela Sertão Brasil Mineração que, em quatro anos, produziu 268.883 onças de ouro, em volume oxidado, o que o tornou uma das minas a céu aberto com um dos menores custos operacionais do mundo.

Em detrimento disto, optou-se por desenvolver o estudo neste prospecto mineral na extremidade sudeste do *Greenstone Belt* Faina, denominado Alvo Sertão. Neste alvo, o minério ocorre ao longo de uma zona de cisalhamento intensamente hidrotermalizada, com sulfetação, carbonatação e sericitização, que afetam camadas de formações ferríferas bandadas (BIFs) intercaladas com a sequência vulcânica ultramáfica (DARDENNE e SCHOBENHAUS, 2001).

Dentre os levantamentos geofísicos trabalhados estão: o método magnetométrico, radiométricos, transiente eletromagnéticos, susceptibilidade magnética, eletroresistividade, polarização induzida no domínio da frequência.

Os dados apresentados, pertencem à Orinoco Brasil Mineração Ltda e todos, com exceção do método de Polarização Induzida, já foram trabalhados pela MJSA e foram

responsáveis pela descoberta de alguns alvos na época. Propõe-se aplicar novas técnicas de processamento, filtragens e integração de dados, sugerir novos alvos, ou continuidades mineralizadas no entorno da antiga Sertão.

O município de Faina insere-se na mesorregião do Noroeste Goiano e na microrregião do Rio Vermelho juntamente com os municípios de Araguapaz, Aruanã, Goiás, Itapirapuã, Jussara, Matrinchã e Santa Fé de Goiás. A zona urbana de Faina localiza-se aproximadamente a 200 km de Goiânia, enquanto a área de estudo situa-se a, aproximadamente, 20km à sudeste do *Greenstone Belt* Faina (Figura 3.1).

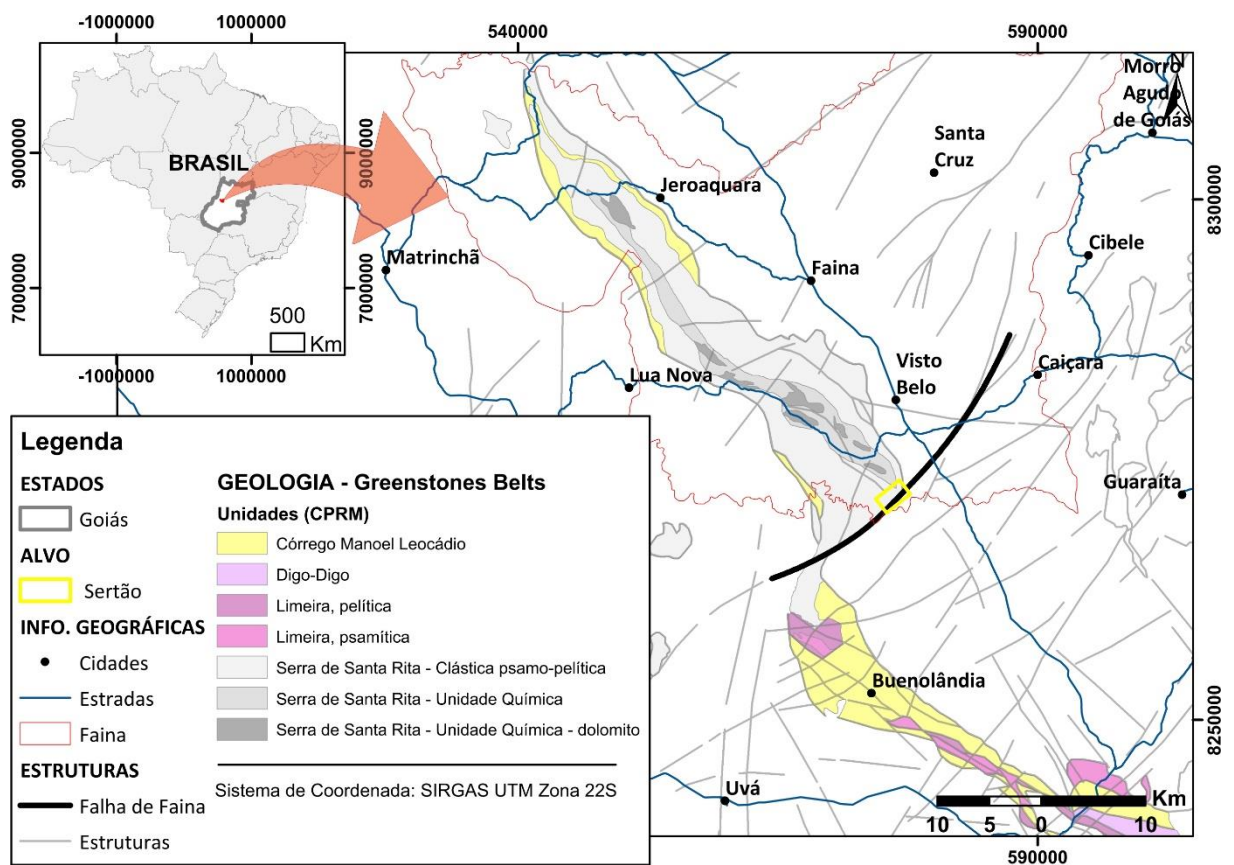


Figura 3.1– Mapa de localização da área de estudo com os limites dos *Greenstone Belts* de Faina e Goiás (Santa Rita).

### 3.2 GEOLOGIA

Regionalmente o *Greenstone Belt* Faina está localizado no Maciço de Goiás - que engloba os terrenos granito *Greenstone* de Goiás, Crixás e Guarinos-Pilar de Goiás, formados no Arqueano, acrescidos de terrenos ortognáissicos de idade paleoproterozóica - que está inserido dentro da Faixa de Dobramentos Brasília, Província Tocantins.

Na região do *Greenstone Belt* Faina, existem mineralizações auríferas associadas a zonas de cisalhamento regional de direção NE-SW. As pesquisas desenvolvidas na região (ORINOCO, 2017) mostram que as mineralizações ocorrem ora associadas a sulfetos e óxidos magnéticos, ora a sulfetos não magnéticos,

Sob o mapa geológico de detalhe da área (Figura 3.2), observa-se uma tendência NE-SW das litologias, sendo a suíte Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito (TTG), sericita xisto, sericita xisto com metamarga e clorita biotita xisto, as litologias predominantes em superfície. Em seguida, zonas silicificadas e rochas vulcânicas máficas, além da zona hidrotermal principal que coincide com o xisto carbonoso com sericita e biotita.

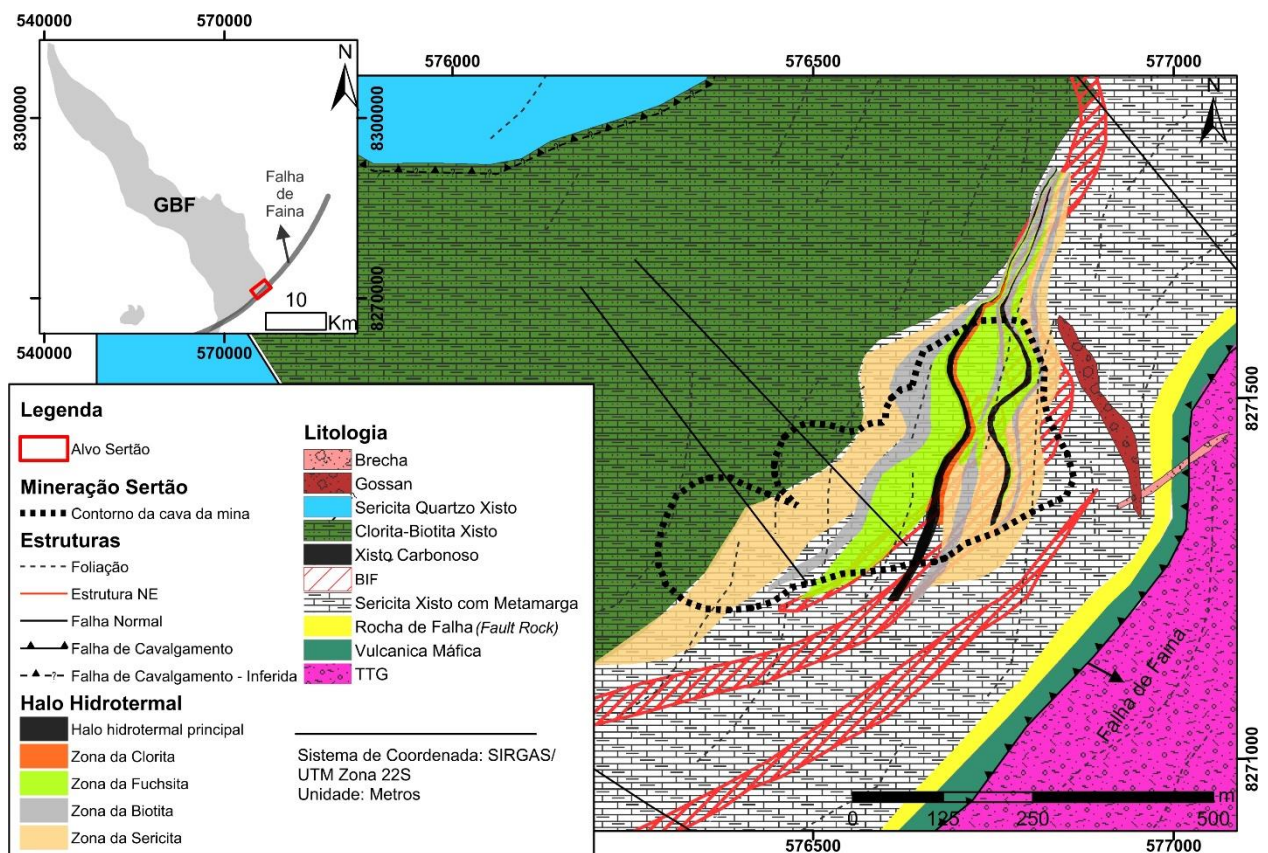


Figura 3.2 – Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral (modificado de ORINOCO, 2017).

O sericita xisto onde está alojado o corpo de minério (associação de sulfetos – arsenopirita, pirita e pirrotita), tem orientação NE-SW, mesma orientação aproximada da falha de Faina que marca o contato entre o *Greenstone* e o embasamento. A falha em questão, possui um mergulho entorno de 30°, para NW e o corpo de minério tem aproximadamente o mesmo mergulho, o que sugere um controle estrutural. Os estereogramas do *pit* indicam que a foliação no local do depósito mergulha para oeste e a lineação de estiramento é *downdip*, também para oeste. Os *oreshoots* modelados da antiga lavra da Sertão Mineração Ltda., estão na mesma direção da lineação *downdip*. A falha de empurrão que divide o *Greenstone* do embasamento próxima ao *pit* tem *strike* N-S, e cai para oeste (e não NE-SW como nas outras extensões do mapa), parecida com a foliação do depósito.

### 3.3 BASE DE DADOS

Para os dados geofísicos coletados entre 1996 e 1998 pela MJS A e adquiridos pela Orinoco Brasil Mineração, a malha que correspondeu ao levantamento teve como limites aproximados as seguintes coordenadas UTM: 576000E - 8270900N, 577000E - 8270900N, 576000E - 8272400N e 577000E - 8272400N (SIRGA S 2000), contudo serão apresentados neste trabalho um recorte desse perímetro correspondente a área de direito minerário da Orinoco Brasil Mineração que cobre a antiga lavra da Sertão Mineração Ltda. (Figura 3.3 A, B, C, D, E, F, G).

Na época optou-se pela abertura de linhas em duas direções NS e EW no entorno do Alvo Sertão, que foi justificado pelas características estruturais definidas pelos caminhamentos geológicos anteriormente realizados. O objetivo do direcionamento das linhas transversais foi cortar as diferentes unidades do *Greenstone Belt* e as estruturas interpretadas como de maior importância, no melhor ângulo possível (dentro das opções de direcionamento de linhas transversais NS e EW).

As linhas transversais tiveram espaçamento de 200m fora da região de interesse e de 100m onde tinha sido delimitada a porção mineralizada a ouro em rocha e em solo regional. Com a finalidade de melhor entender a geologia e as anomalias de ouro em solo definidas, foram abertas posteriormente linhas transversais espaçadas de 50m. Como observado na Figura 3.3 cada método teve sua peculiaridade na cobertura dessas linhas, não existindo um padrão de cobertura para todos os métodos. A malha foi realizada com teodolito.



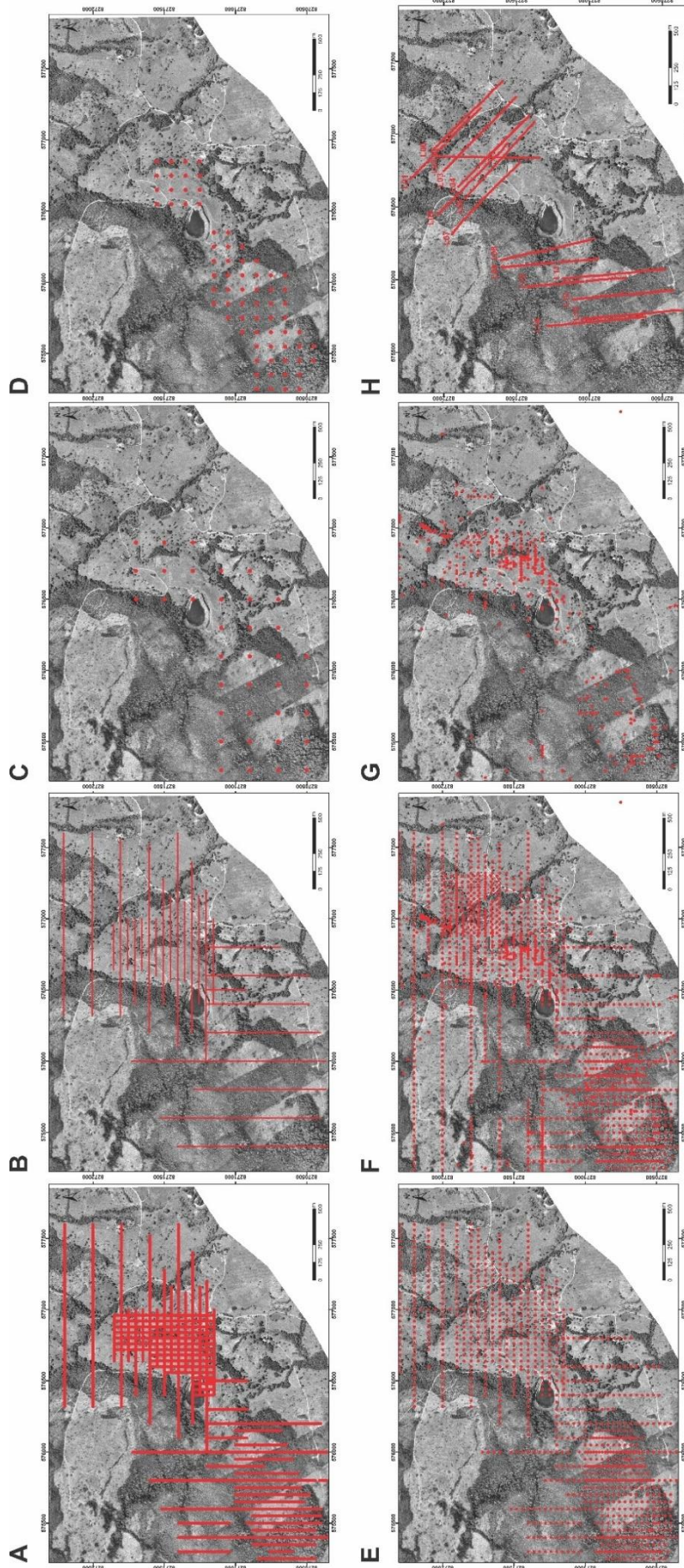


Figura 3.3 – Malhas de geofísica e geoquímica sobrepostas a imagem aérea de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), respectivamente: magnetometria (A), radiometria (B), Transiente Eletromagnético 200 (C), Transiente Eletromagnético 100 (D), susceptibilidade magnética do solo (E), geoquímica do solo (F) e da rocha (G) e polarização induzida no domínio da frequência (H).

A malha de aquisição de Polarização Induzida no domínio da frequência (Figura 3.3 H), adquirida em 2016, foi disposta de forma a interceptar perpendicularmente a litologia (Figura 3.4) em superfície a fim de verificar anomalias geofísicas similares às anomalias encontradas na área da antiga mina, que configuram um “corredor” NE-SW. Apenas a linha L02 com direção N-S não se enquadra na proposta inicial, ela foi alocada perpendicular aos possíveis *ore shoots* que têm direção aproximada E-W. As linhas L00, L01, L03, L04, L05, L06, L07 têm azimute igual a 135° e as linhas L08 a L14 possuem azimute igual a 175°.

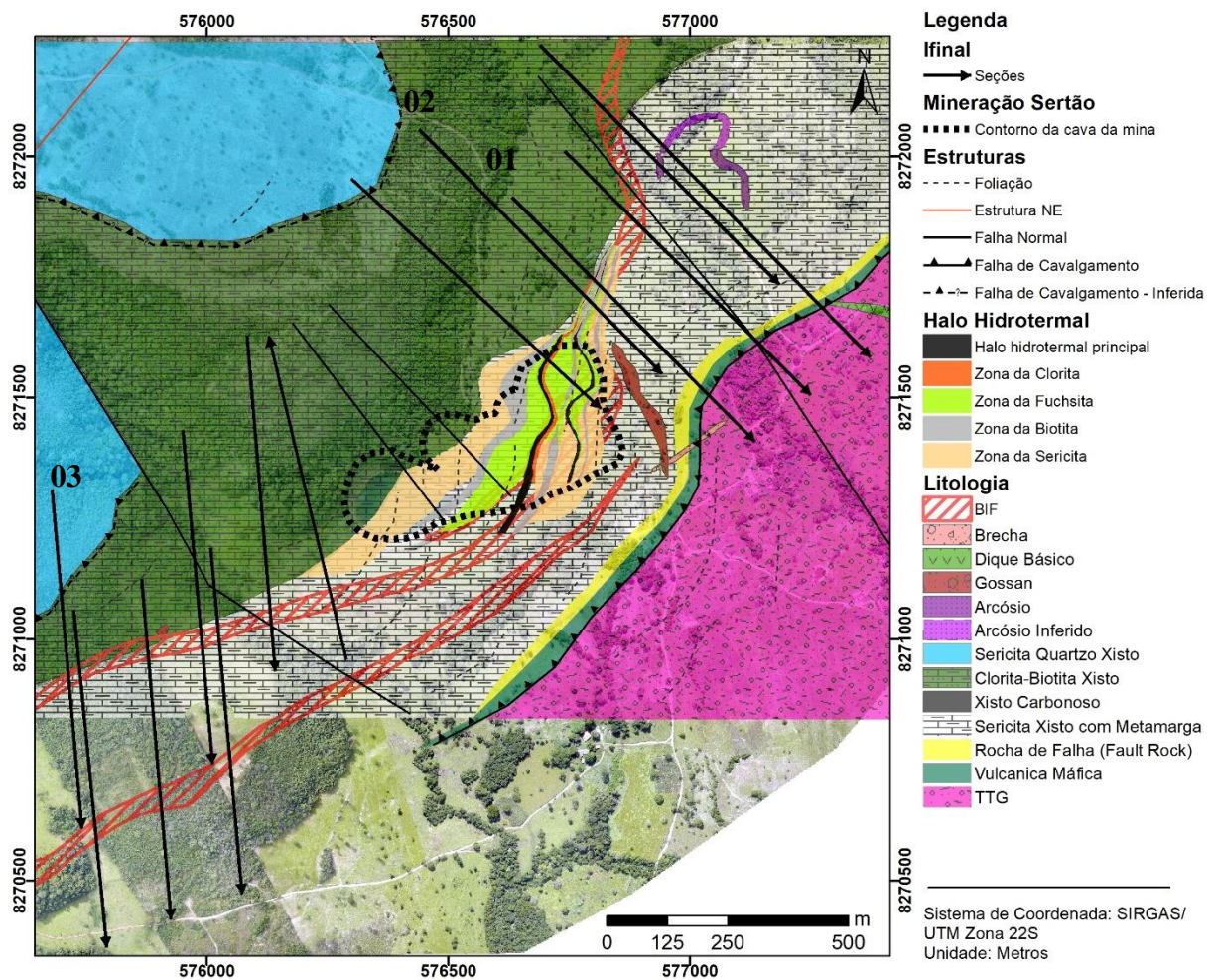


Figura 3.4 - Mapa geológico da área com a localização do contorno da antiga lavra de exploração mineral e seções de Polarização induzida no domínio do tempo e eletrorresistividade. Seções 01, 02, 03, apresentadas nesse trabalho (modificado de ORINOCO, 2017).

### 3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dados de métodos: Eletromagnético Transiente, Magnetométrico, Radiométrico, Eletrorresistividade e Polarização induzida no domínio do tempo.

- **Eletromagnético Transiente**

O método Eletromagnético Transiente faz a medição da resposta eletromagnética do subsolo às variações rápidas de um campo magnético primário geradas num transmissor, por pulsos de corrente elétrica. O campo elétrico gera correntes de Foucault em subsuperfície que se dissipam à medida que a energia é transformada em calor (efeito Joule). Essas correntes originam um campo magnético secundário, do qual os tempos de atenuação estão diretamente relacionados com a resistividade subjacente (SANTOS, 2008).

Foram feitos perfis SIROTEM de forma a cruzar o depósito. Os dados Transiente Eletromagnético foram coletados com um SIROTEM MKII usando um *Roving Vector Receiver* (RVR) MKI. Os perfis detalhados foram obtidos com uma configuração RVR dentro do *loop* e *slingram*, usando um transmissor de *loop* com 100 m e espaçamento a cada 25 m. A configuração *slingram* foi usada para maximizar o acoplamento entre os condutores verticais que podem não induzir um fluxo de corrente suficiente no RVR com a configuração RVR dentro do *loop*.

O reconhecimento Transiente Eletromagnético que cobriu as litologias prospectáveis, incluiu um *loop* de 100 e 200 m nas laterais do *loop* no RVR SIROTEM realizado dentro (ou no centro) do *loop*. Segundo relatório da Orinoco (2017), a configuração RVR no centro do *loop* foi usada e não a dos *loops* coincidentes, por terem sido observados efeitos superparamagnéticos. No total contabilizou-se 232 pontos de Transiente Eletromagnético com *loop* de 200m e de 208 estações para o Transiente Eletromagnético com *loop* de 100m.

- **Magnetometria e Susceptibilidade Magnética**

A Magnetometria é o método que mede a intensidade do campo magnético terrestre, que sofre influência das rochas em profundidade, aumentando ou diminuindo o campo, conforme a composição destas rochas e os contrastes de susceptibilidade magnética existente entre as mesmas.

Os dados da Magnetometria terrestre foram coletados a partir de um magnetômetro *Barringer* – Precessão de prótons – com um sensor localizado 3 m acima da superfície do terreno. Em toda a área coberta pelo levantamento, foram coletados dados nas 3518 estações

estabelecidas ao longo das linhas EW e NS, em estações espaçadas tanto de 5 em 5 metros como de 10 em 10 metros.

A análise, redução e filtragem dos dados de Magnetometria foram realizadas no *software* da *Geosoft, Oasis Montaj*. Foi utilizado o método de gridagem da mínima curvatura e a célula da malha foi usada com 50 metros (linhas com espaçamento de 200 m).

Enquanto a leitura de Susceptibilidade Magnética em solo foi realizada com o auxílio de susceptibilímetro da marca *Geometrics* e modelo KT5. Foram feitas coletas de dados em três pontos da estação e tomada a média de duas leituras em cada ponto, totalizando 3727 pontos, com o espaçamento entre as estações de 20 e de 40 metros. Foi utilizado o método de gridagem da mínima curvatura e a célula da malha foi usada com 50 m (linhas com espaçamento de 200 m).

- **Radiométrico**

Os dados de Radiometria terrestre foram coletados usando-se um *Exploration Disa 400*, cristal de iodeto de sódio (NaI) de 3 polegadas cúbicas; sensor na altura de 1 m, tempo de amostragem de 10 segundos e espaçamento das estações tanto de 5 em 5 metros como de 10 em 10 metros. As medições do urânio, potássio, tório e a contagem total foram realizadas num total de 2014 estações.

Usou-se o *software Geosoft Montaj* para colocar os dados na malha (gridar) e gerar cada produto da Radiometria – potássio (K), do urânio (U) e do tório (Th) – mapa ternário, razões entre K, Th e U e outros. Foi utilizado o método de gridagem da mínima curvatura e a célula da malha foi usada com 50 m (linhas com espaçamento de 200 m).

- **Eletrorresistividade e Polarização induzida**

O método da Eletrorresistividade consiste basicamente em determinar a resistividade elétrica dos materiais, que apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica que é singular a cada litologia ou condições geológicas da área. No método Polarização Induzida no domínio da frequência ou método da frequência variável, as medidas de resistividade aparente são realizadas para (no mínimo) duas frequências distintas e menores que 10Hz, para eliminar efeitos de acoplamento indutivo (HALLOF, 1964).

As configurações do arranjo, para os levantamentos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida no domínio da frequência, foram elaboradas no *Electre II*, da empresa *IRIS Instruments*. Foram definidos os seguintes parâmetros: tempo de leitura 2 e 8 segundos;

voltagem de 400V; arranjo Dipolo dipolo; espaçamento dos eletrodos de 10m; 34 níveis de investigação (profundidade estimada de 95 m); *stack* igual a 1.

A aquisição de dados foi realizada com equipamento *Syscal Electre Pro* da *IRIS Instruments* (Figura 3.5). Foram 720 metros de cabo com conectores (*switch cable*) – sendo um *switch cable* anfíbio com espaçamento máximo de 10 m e 36 pontos de conexão e seis *switch cables* com espaçamento máximo de 10 m e 6 pontos de conexão cada cabo; cinco switch box para a conexão dos cabos menores e 72 eletrodos de alumínio.



Figura 3.5 – Fotografias evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento *SYSCAL PRO* em campo.

A equipe foi composta de um geofísico e quatro ajudantes. Além do aparato geofísico, fez-se necessário: uma caminhonete 4x4 para a locomoção na área com topografia acidentada, galões de água, sal e detergente para auxiliar na diminuição da resistividade de contato do solo, rádios para comunicação durante a campanha. Todo o apoio logístico ficou a encargo da Orinoco Brasil Mineração Ltda.

Após o levantamento de campo, os dados são importados para o computador através do *Prosys II* e de lá exportados para o *Excel* para o cálculo dos parâmetros de Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal e de lá retornam para o *Prosys II* para filtragem dos parâmetros de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal. As modelagens dos dados de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal foram feitas no *software Res2dinv* (Geotomo). Na modelagem inversa usou-se a rotina de inversão de suavização por mínimos quadrados (SASAKI, 1989). e inversão robusta. As seções com as inversões prontas são inseridas no projeto do *Oasis Montaj*, para modelagem direta e integração dos dados. Toda a rotina deste trabalho é apresentada na Figura 3.6.

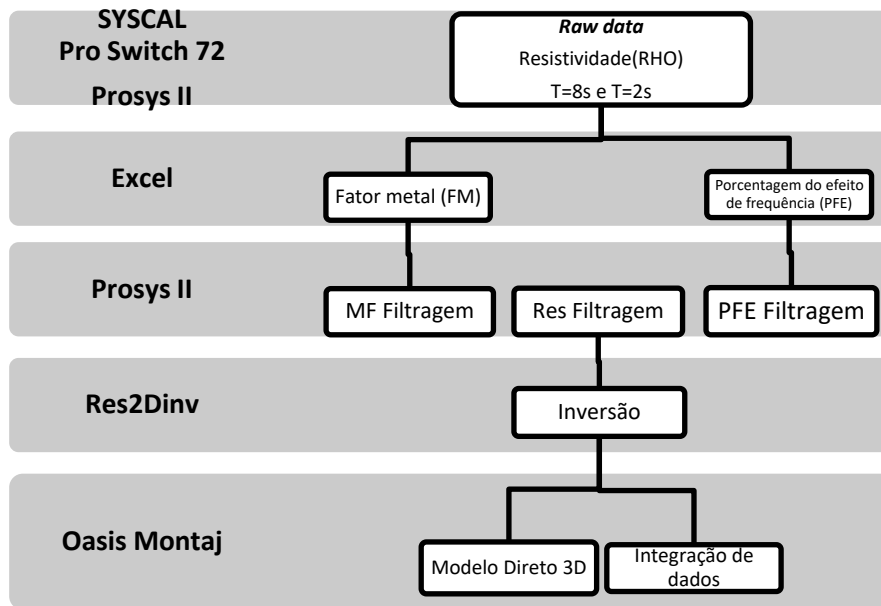


Figura 3.6 – Rotina de cálculo de parâmetros, filtragem, inversão, modelagem e integração de dados geoeletricos usada neste trabalho.

### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

- **Eletromagnético Transiente**

Já no primeiro canal dos mapas de anomalias eletromagnéticas com *loop* de 200 (Figura 3.7) e com o *loop* de 100 (Figura 3.8) é possível marcar o contato superficial entre o sul do *Greenstone Belt* Faina e o embasamento, contato marcado pela Falha Faina. Um corredor condutivo NE-SW, entre extremidades resistivas, onde possivelmente está localizado o *trend* da zona mineralizada.

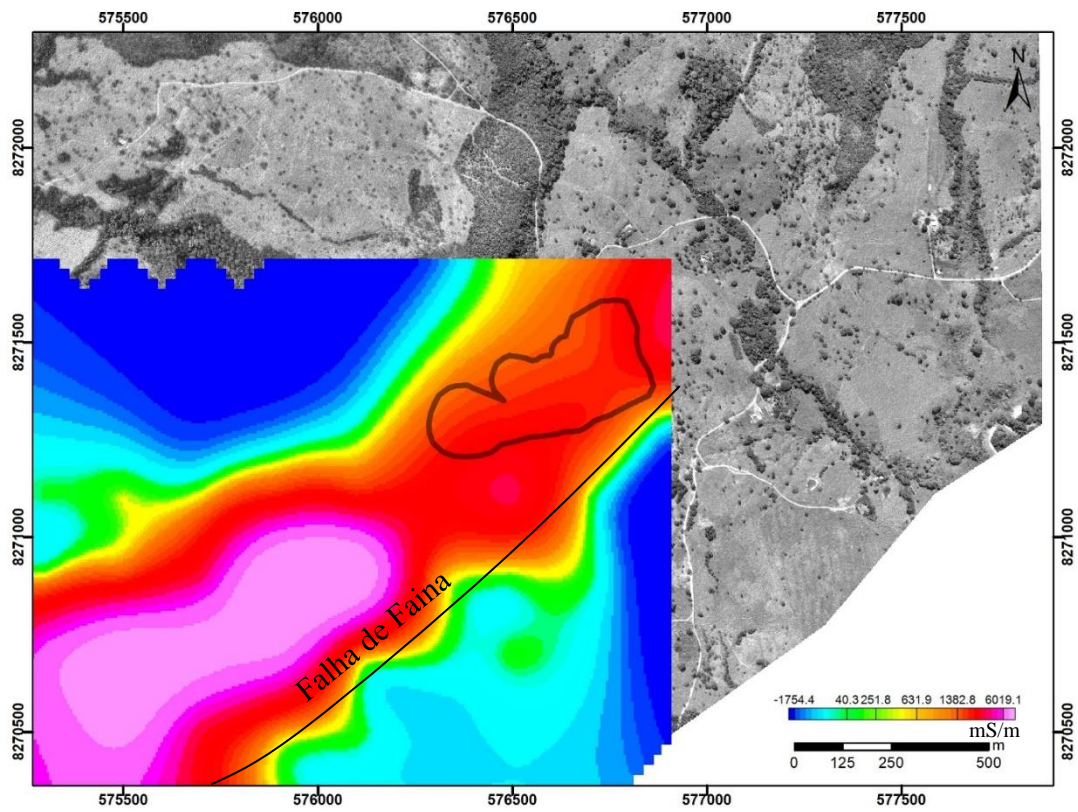


Figura 3.7– Resposta canal 1 Transiente Eletromagnético – loop de 200m.

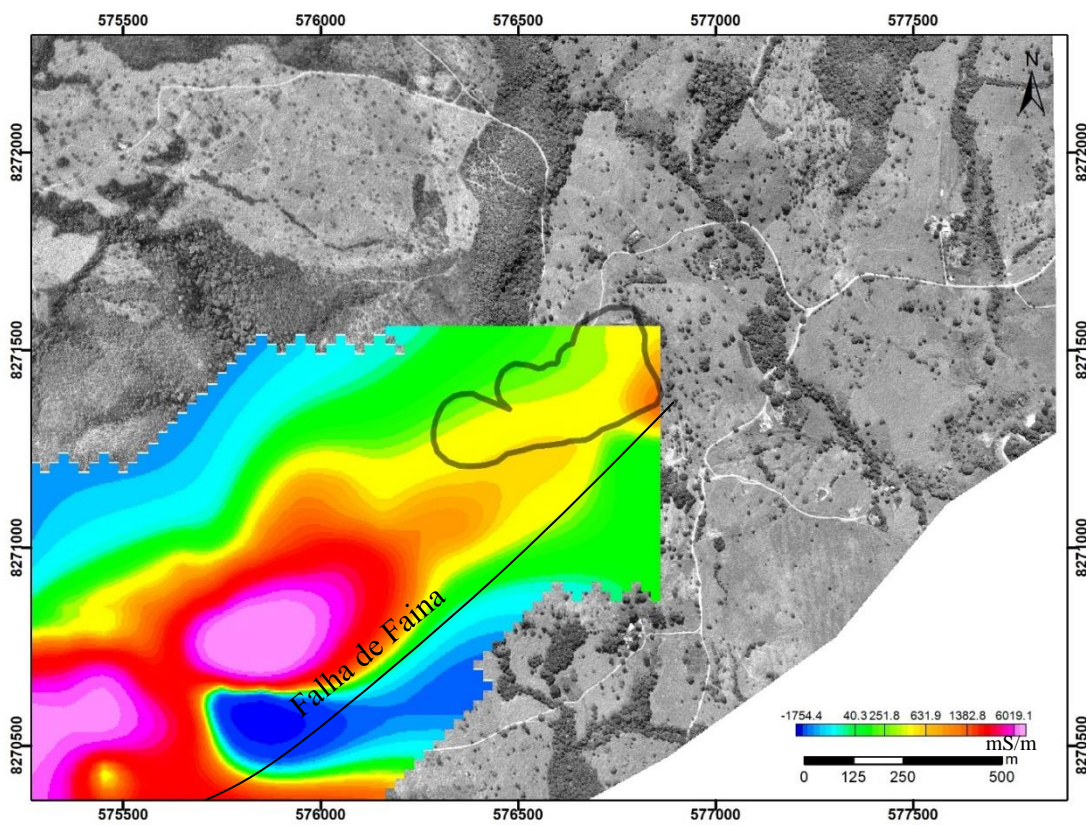


Figura 3.8 – Resposta canal 1 Transiente Eletromagnético - loop de 100m.

O estilo da mineralização garantiu um reconhecimento Transiente Eletromagnético posterior que atravessou as litologias com boas perspectivas. Com os canais dispostos em ambiente 3D é possível determinar a direção aproximada do mergulho dos pacotes condutivos, sendo ele aproximadamente NW.

Os parâmetros necessários para o cálculo da altura dos canais não foram encontrados, sob essas condições, não é possível calcular um mergulho aproximado das anomalias, contudo é possível observar a continuidade da anomalia condutiva em profundidade, a mesma anomalia que sobrepõe a área da antiga lavra em superfície.

Tanto para canais de Transiente Eletromagnético 100 (Figura 3.9) quanto para canais de Transiente Eletromagnético 200 (Figura 3.10) foram delineados o contato corredor mineralizado *versus* embasamento (marcado pela Falha de Faina), e ainda uma anomalia resistiva marcante para verificar seu deslocamento (asterisco) para NW em profundidade, possivelmente correlacionada com o embasamento.

Ainda nas Figuras 3.9 e 3.10, nos canais maiores e mais profundos, como o canal 10 e 16, observa-se o aumento do ruído.



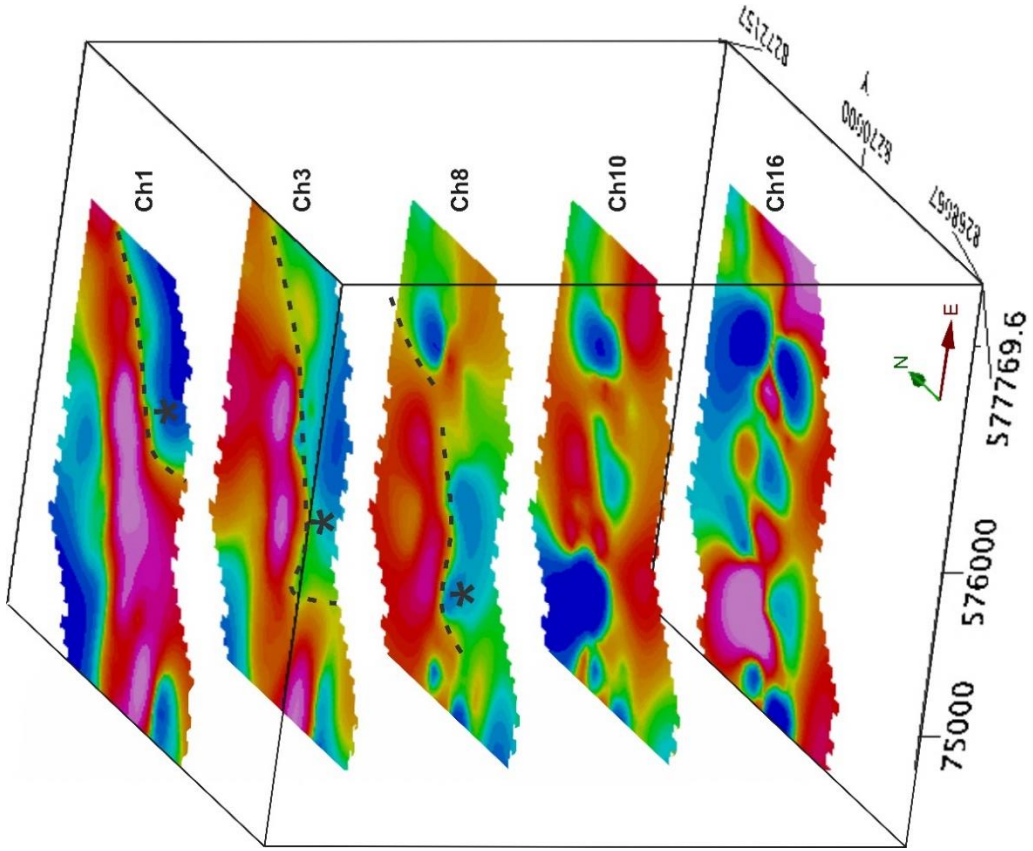


Figura 3.10 - Respostas dos canais 1,3,8,10 e 16 do Transiente Eletromagnético com um *loop* de 200m.

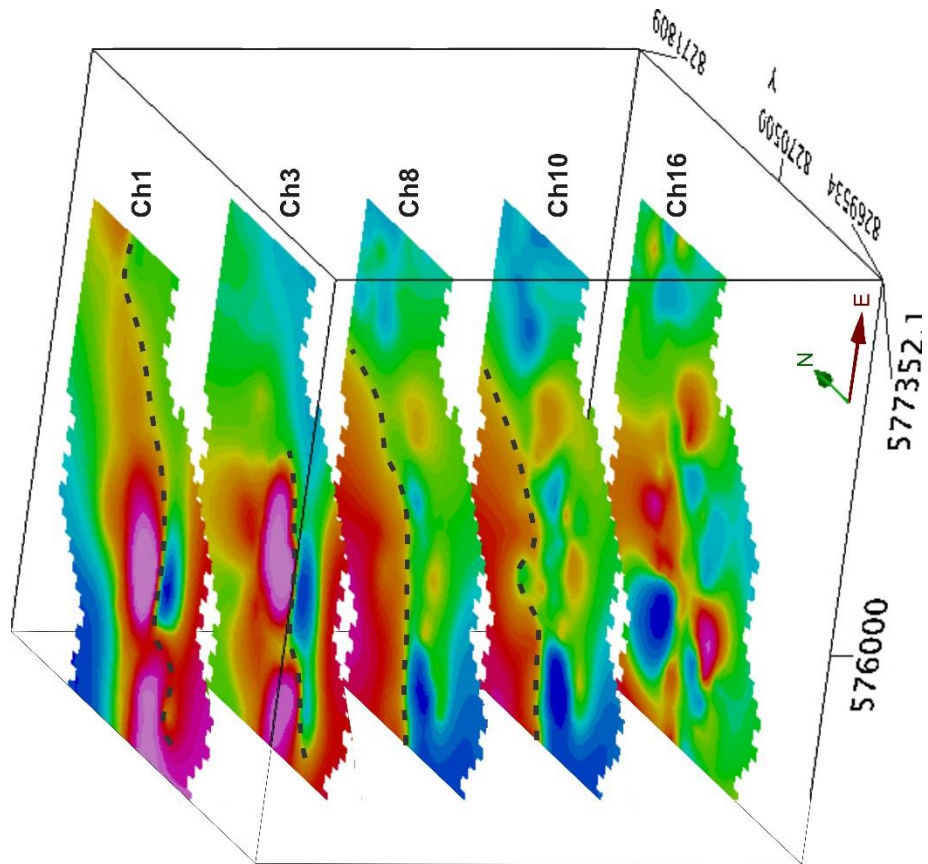


Figura 3.9 - Respostas dos canais 1,3,8,10 e 16 do Transiente Eletromagnético com um *loop* de 100m.

- **Magnetometria e Susceptibilidade Magnética**

Nos dados de Magnetometria (Amplitude do Sinal Analítico (ASA) - Figura 3.11), apesar de ter sido usado um sensor elevado a três metros do terreno, o levantamento foi realizado em mais de uma direção e amostragens diferentes nas áreas, há um ruído considerável nos dados magnéticos terrestres. Os dados com conteúdo de alta frequência provavelmente estão associados às fontes rasas próximas da superfície.

Os dados da Magnetometria terrestre foram usados para auxiliar o mapeamento das litologias e estruturas do depósito. Nele é possível destacar uma anomalia na direção SW, a uma distância de 500m do antigo alvo sertão (já explorado), de geometria e intensidade similar a antiga mina (contornada em preto).

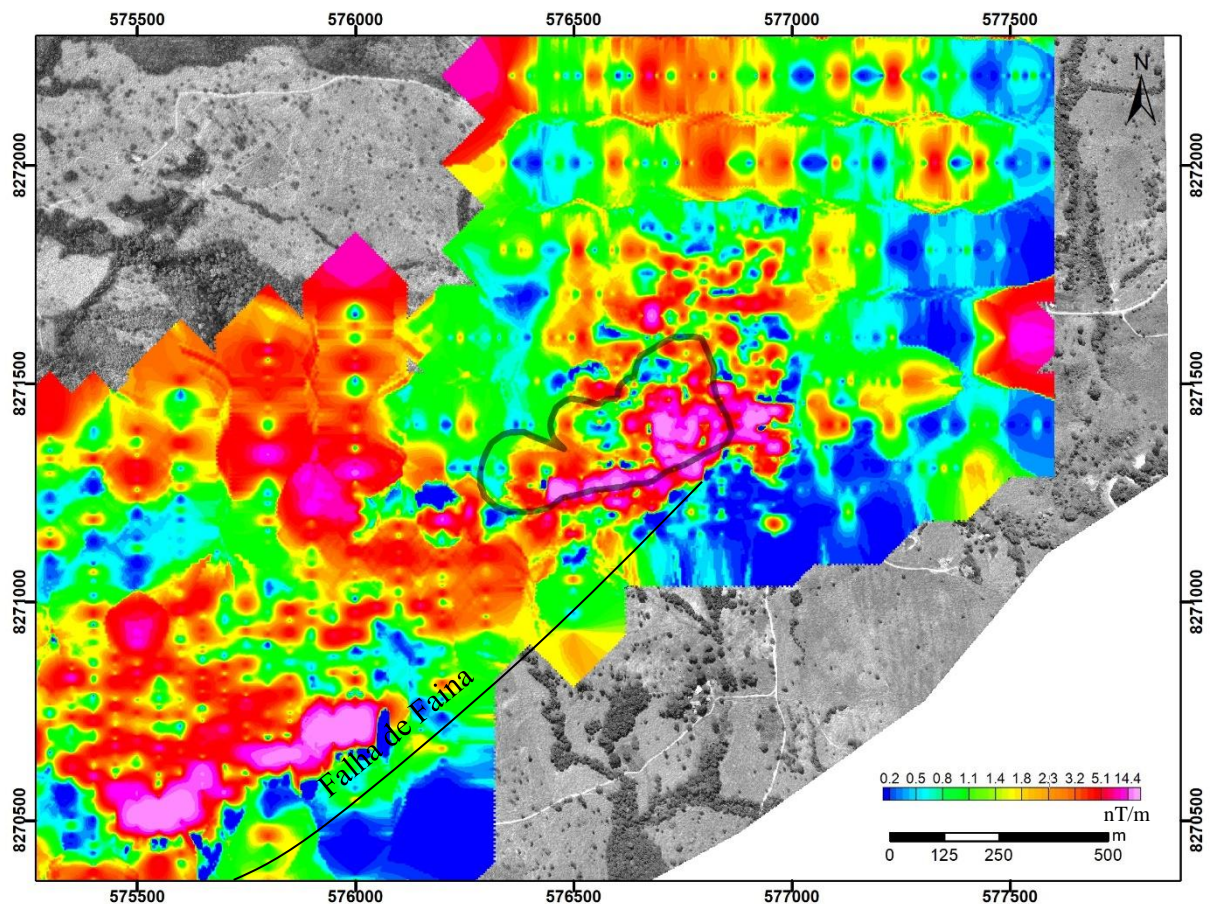


Figura 3.11 - Mapa de Amplitude do sinal analítico dos dados magnéticos.

O espectro de potência radial (Figura 3.12) permite uma melhor determinação de frequências de corte (altas e baixas) no domínio da frequência. Analisando a inclinação do gráfico do espectro de potência é possível indicar profundidades médias de topos rochosos em

subsuperfície, já que camadas de origens equivalentes em diferentes profundidades apresentam respostas distintas.

O espectro foi obtido a partir do campo magnético anômalo reduzido ao polo, os valores calculados para os intervalos de profundidades médias dos topos rochosos através do espectro de potência foram o intervalo de 1500 m e 500 m para fontes profundas, intervalo de 1000 e 500 para as fontes intermediárias e abaixo de 500 m para fontes rasas.

Os números de onda (eixo x do gráfico, ilustrado na figura 3.12) baixos representam o campo regional, ou seja, fontes profundas que, para este trabalho, estão entre  $0 \text{ km}^{-1}$  a  $1,0 \text{ km}^{-1}$ . Os números de ondas superiores representam anomalia intermediárias ( $1,0 \text{ km}^{-1}$  a  $5,0 \text{ km}^{-1}$ ), anomalias rasas ( $5,0 \text{ km}^{-1}$  a  $20,0 \text{ km}^{-1}$ ) e ruído (observado principalmente na faixa de anomalias rasas).

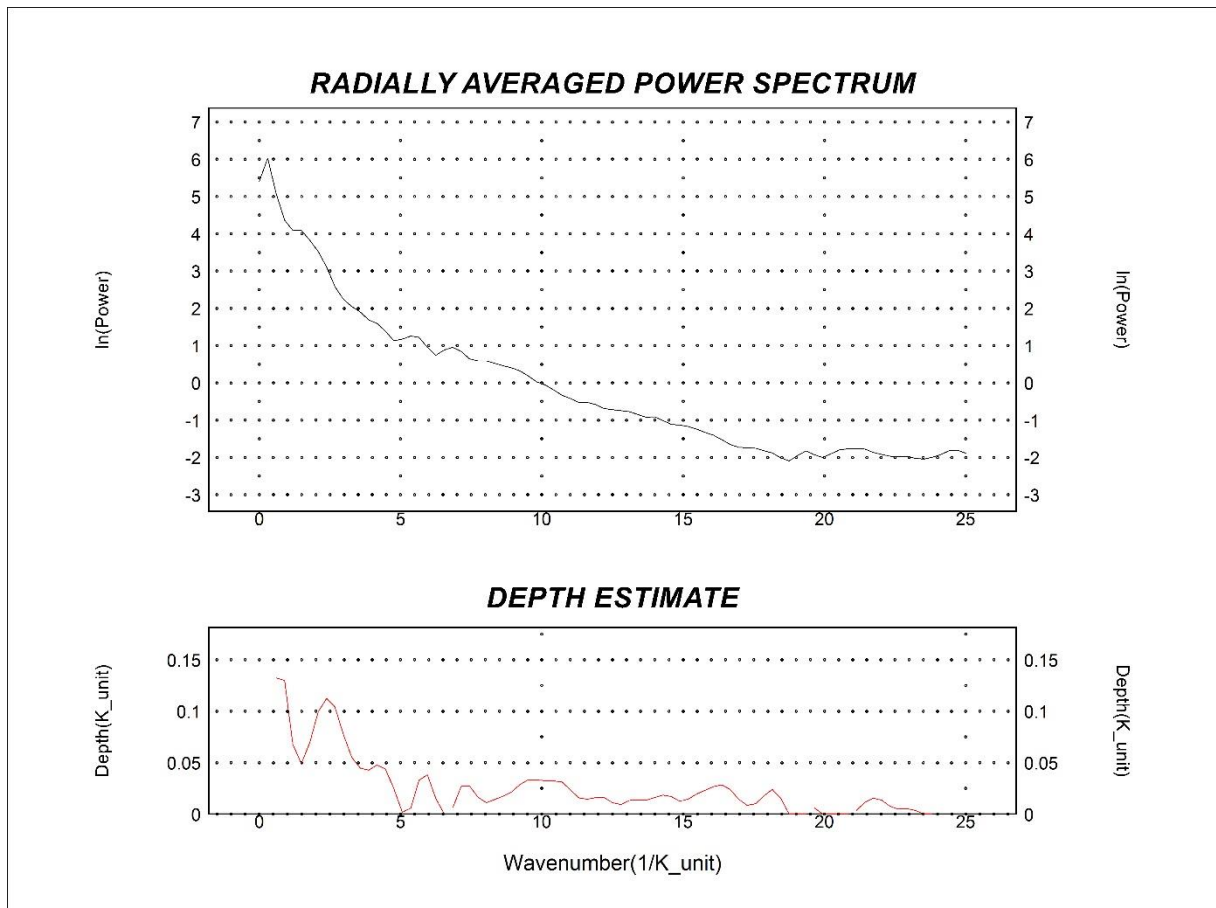


Figura 3.12 - Espectro de potência radial para os dados magnéticos e profundidade estimada.

A delimitação do intervalo no gráfico referente a cada tipo de fonte (rasa, intermediária e profunda) se dá através da análise do gráfico de espectro de potência radial e dos coeficientes

angulares das retas (linhas de tendência) para cada intervalo, onde a diminuição do coeficiente angular das retas implica em resultados de fontes cada vez mais rasas (Figura 3.13).

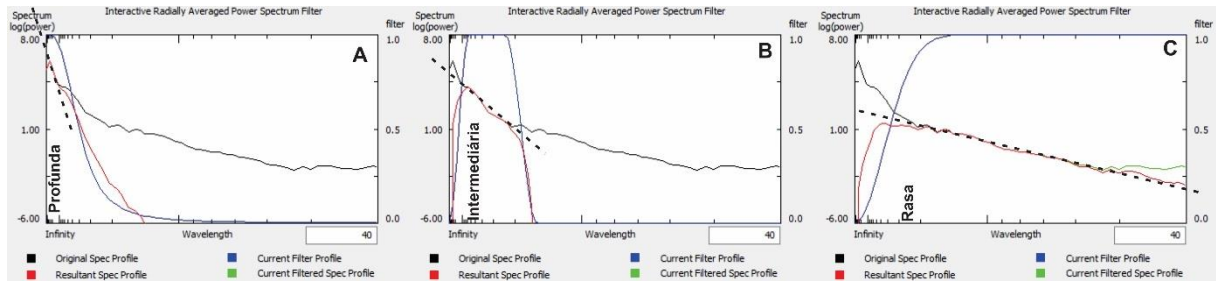


Figura 3.13 - Apresentação do formato de filtragem a partir do espectro de potência radial.

O resultado para as fontes profundas, intermediárias e rasas (Figura 3.14) indicam que ao contrário da anomalia da antiga mina que é bem definida no mapa de anomalias de alta frequência (rasas), a anomalia à SW continua marcante para os mapas de anomalia intermediária e profunda.

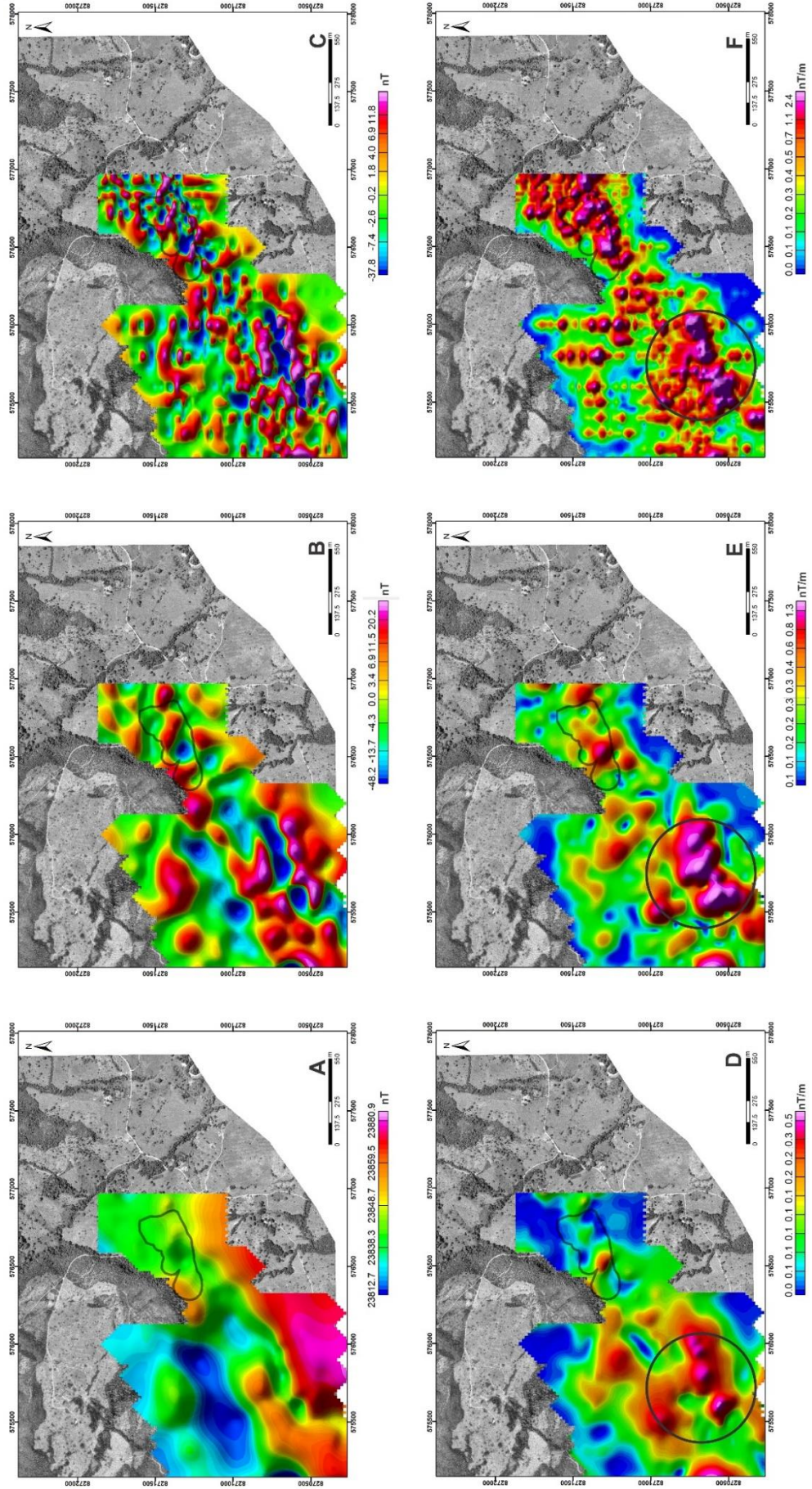


Figura 3.14 - Mapa de Amplitude do sinal analítico dos dados magnéticos. (A) Filtro TMI – anomalias profundas, (B) Filtro TMI – anomalias intermediárias, (C) Filtro TMI – anomalias rasas, (D) ASA (Filtro TMI – anomalias profundas), (E) ASA (Filtro TMI – anomalias intermediárias), (F) ASA (Filtro TMI – anomalias rasas).

No caso da Susceptibilidade Magnética (Figura 3.15), este tipo de levantamento apresenta problemas de interpretação em virtude da ocorrência de maguemita no solo. Este mineral gera fortes anomalias de Susceptibilidade Magnética de solo sem associação a fontes magnéticas "in situ", em subsuperfície. Porém, assim como o dado Eletromagnético Transiente, o contato embasamento (baixa Susceptibilidade Magnética) *versus* corredor mineralizado (alta Susceptibilidade Magnética) está bem marcado.

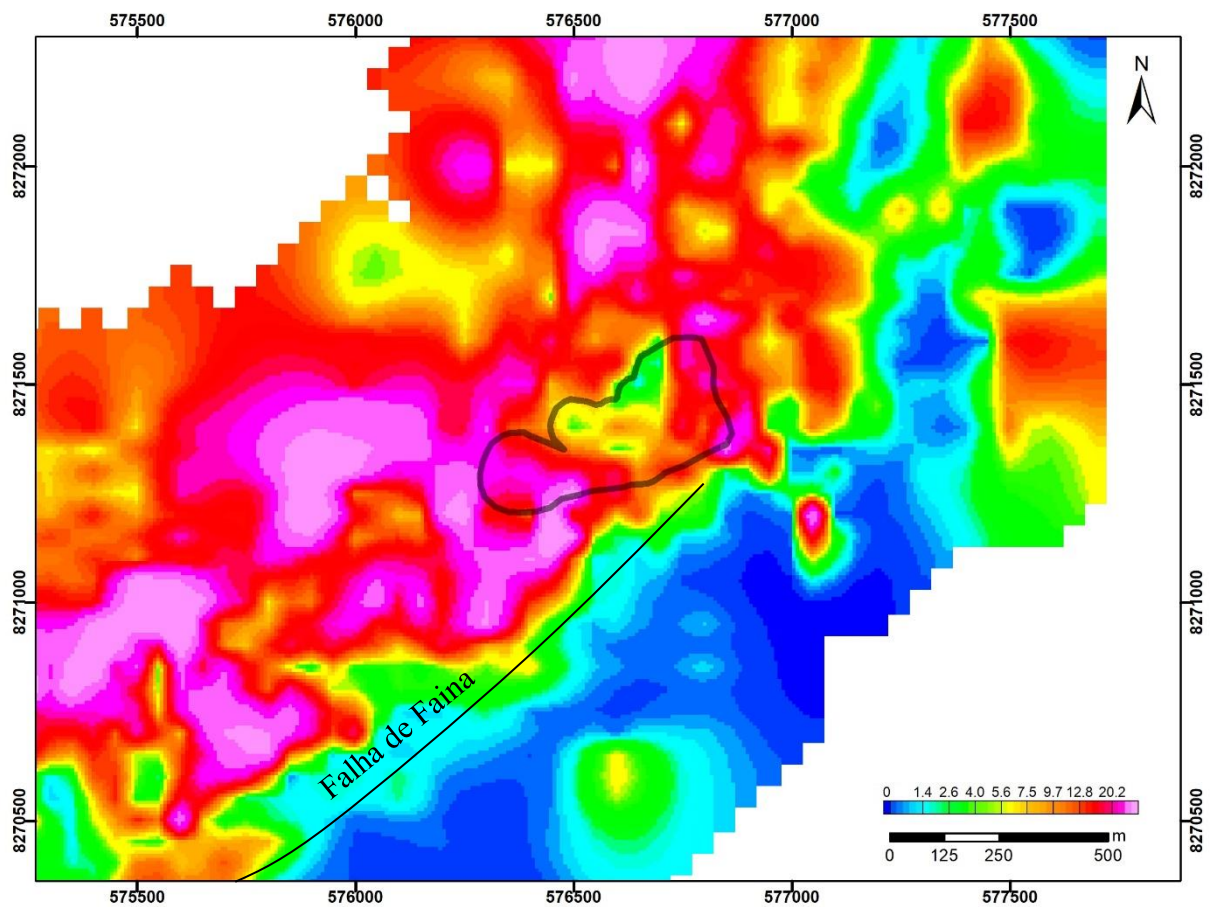


Figura 3.15 - Mapa de susceptibilidade magnética do solo.

- **Radiométricos**

Os dados de Radiometria (Figura 3.16) definem a expressão superficial do depósito. Há uma boa correlação entre o ouro no solo e um baixo de tório observado pelos dados radiométricos, no entanto, o depósito está num alto topográfico e pode ser que não sejam observadas anomalias semelhantes sob uma sequência de cobertura.

Nota-se um “baixo” de tório sobre a zona de alteração do Sertão – abrangendo as unidades da Formação Ferrífera Bandada. Tanto o granito/gnaissse ao sudeste como a zona de alteração ao oeste do Sertão, resultam em altas contagens de tório.

O resultado da contagem de potássio é baixo sobre o depósito Sertão, enquanto que a zona de alteração a oeste dá resultados altos. A contagem de urânio é baixa em quaisquer dos lados do depósito Sertão. Tanto o granito/gnaissse ao sudeste como a clorita/sericita quartzo xisto ao noroeste do Sertão dão uma alta contagem de urânio.

O resultado da contagem total é baixo sobre o depósito Sertão, enquanto a contagem na zona de alteração SW e no granito-gnaissse é alta.

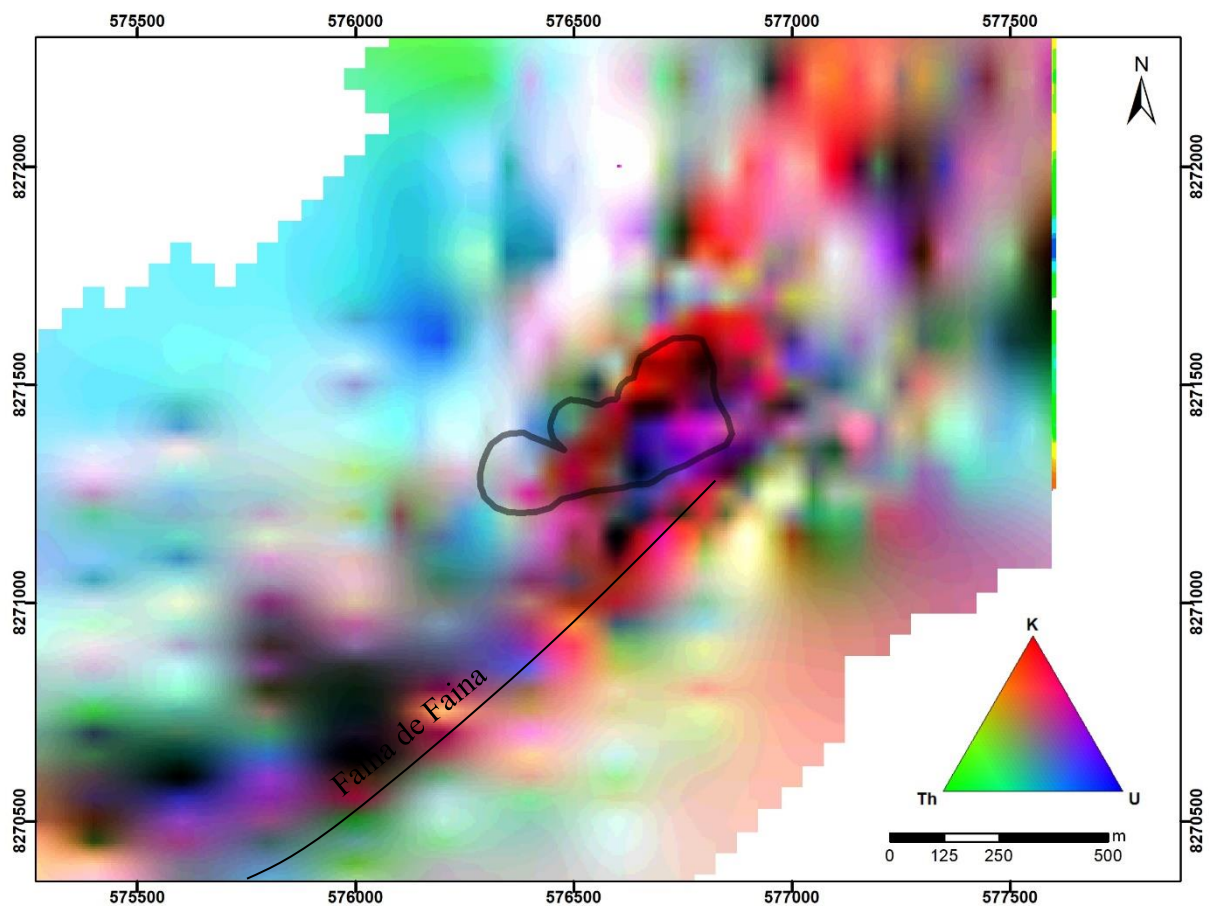


Figura 3.16 – Mapa RGB gamaespectrometria.

- **Eletrorresistividade e Polarização induzida**

Devido a quantidade de perfis e número de parâmetros (45 seções), de quinze linhas foram selecionados três perfis e suas respectivas seções de resistividade, Porcentagem de Efeito

de Frequência e Fator Metal. Baseado no mapa geológico estrutural, e em dados de furo de sondagem, é possível aferir a anomalia correspondente à mineralização.

Na seção 01 (Figura 3.17) que fica localizada a aproximadamente 120 metros ao nordeste do ponto mais próximo da antiga cava da mina, observam-se anomalias de baixa resistividade, alta Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal próximo a superfície de onde foi mapeada a alteração hidrotermal possivelmente mineralizada.

As anomalias de Resistividade e Porcentagem de Efeito de Frequência detectadas como sendo referente à zona mineralizada, no segundo nível, são interrompidas no meio do que seria a tendência do mergulho dos níveis dos pacotes mineralizados. Contudo, a anomalia de Fator Metal é contínua e segue a tendência que é confirmada pela existência de furos antigos com geoquímica, com presença de teor de 4,99 ppm de ouro (no intervalo de 9 e 10 metros de profundidade) e 1,16 ppm de ouro (no intervalo de 108,5 e 109,5 metros de profundidade).

O “corte” na anomalia, possivelmente associado à zona de alteração hidrotermal mineralizada pode estar relacionado a alguma estrutura não mapeada em superfície, ou ainda a possibilidade de ruídos em profundidade afetarem o dado.

O contorno no primeiro nível da zona mineralizada tem anomalia de resistividade coincidente e com definição, com um mergulho aproximado de 30°, as anomalias de Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal existem, porém não têm uma resolução adequada, devido a eliminação de dados devido ruídos que em profundidade afetaram os dados.

Mais a sudeste da seção 01, ou à direita da mesma, próximo a borda, nota-se uma anomalia de baixa resistividade que coincide em superfície com o mapeamento de “*Fault Rock*”, e marca o contato entre o quartzito branco (baixa Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal) e a rocha vulcânica máfica (alto Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal).



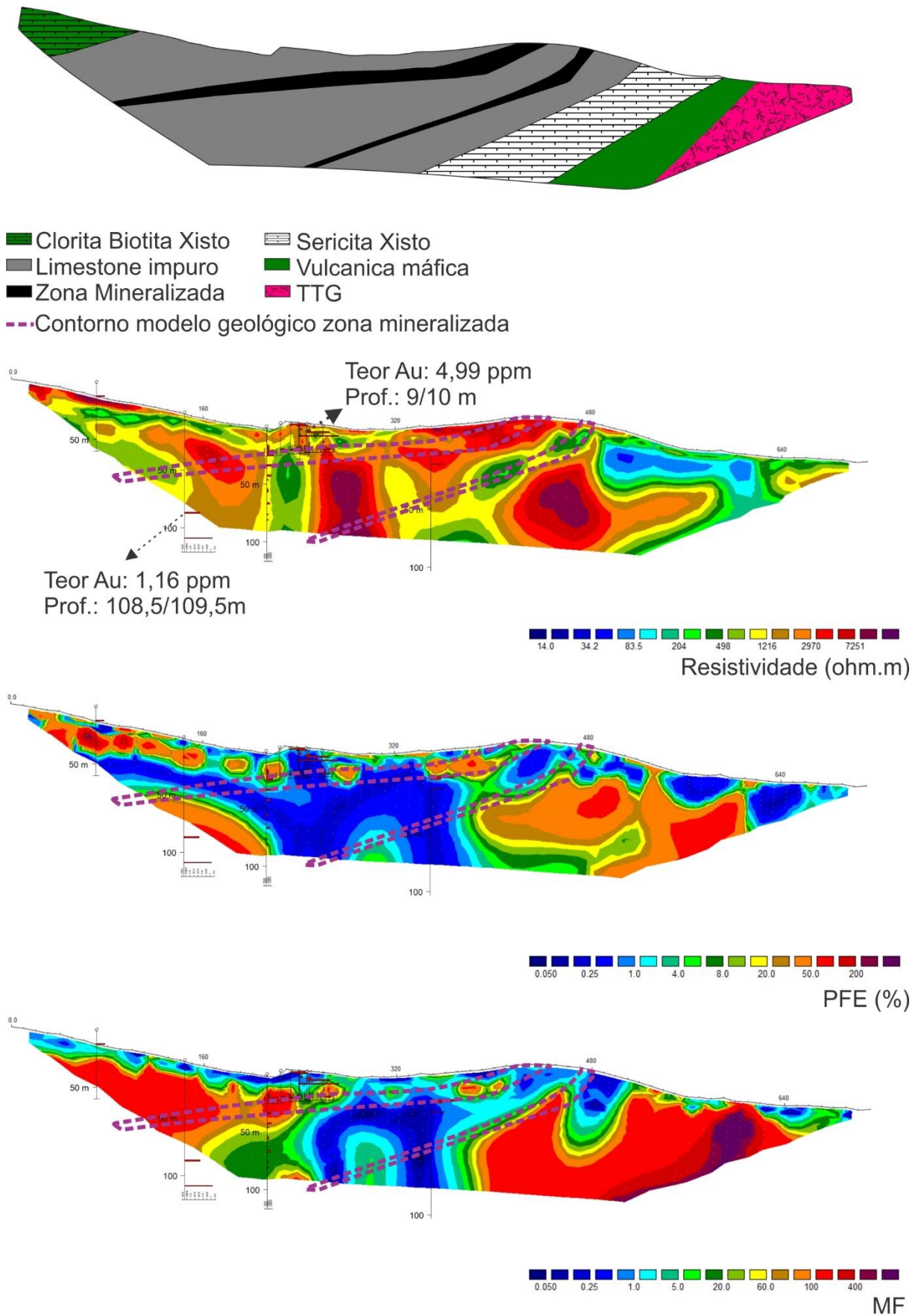


Figura 3.17 – Seções da Linha 01, ao nordeste da cava da antiga mina. Seção de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

Na seção 02 (Figura 3.18), que fica localizada a aproximadamente 60 metros ao nordeste do ponto mais próximo da antiga cava da mina, observam-se duas anomalias principais associadas a dados de geoquímica com valores positivo para ouro.

A primeira anomalia detectada, anomalia I, (baixa de Resistividade, alto Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal), localizada no noroeste geográfico, possui teores de ouro de 1,14 ppm a 10,04 ppm também é afetada por alguma estrutura que fica bem aparente em todas as seções (Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal). Não existe correlação em superfície com nenhuma zona mineralizada conhecida, contudo, são anomalias bem ressaltadas, coincidentes com teores positivos de ouro, que podem indicar um nível mineralizado ainda não investigado.

A segunda anomalia, no centro da seção, que corresponde à zona de alteração hidrotermal, tem o contorno da zona mineralizada coincidente. Possui anomalias de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal esperadas nos primeiros níveis (mais próximo a superfície), mas há um aumento considerável de ruídos em profundidade. Esta região é atestada por testemunhos de sondagem e por dados de teores de 0,25 ppm a 4,99 ppm de ouro entre 9 e 109,5 metros de profundidade.

Existe ainda, anomalias de Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal marcando o contato entre a Clorita Biotita Xisto e o Limestone, quantitativamente essas anomalias são similares as anomalias das zonas mineralizadas até então definidas.

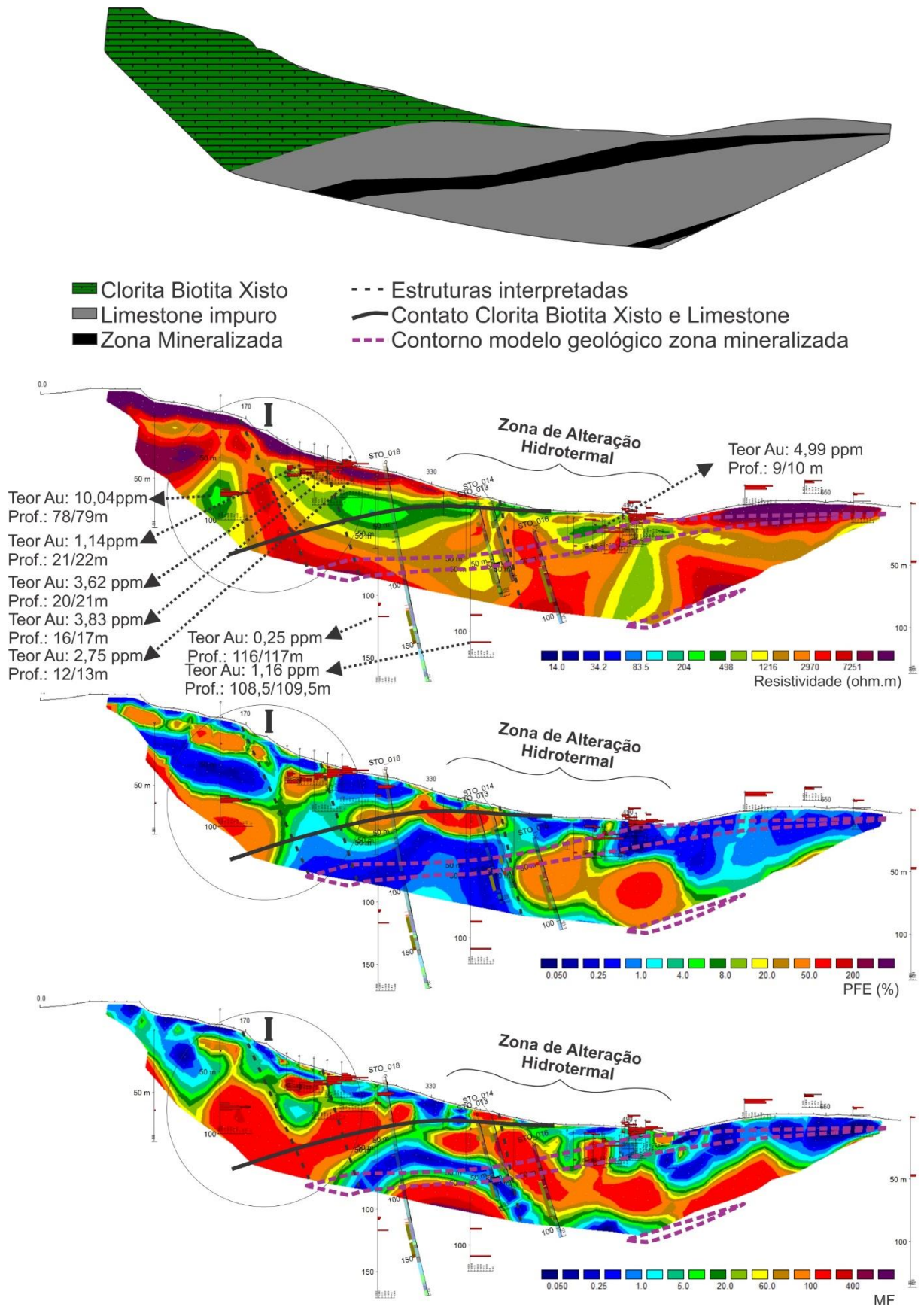


Figura 3.18 – Seções da Linha 02, ao nordeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

No perfil 03 (Figura 3.19), os níveis da zona mineralizada contornada são coincidentes com as anomalias, o primeiro nível pode ser projetado para um dado de testemunho de sondagem com teor de 1,48 ppm de ouro, sendo que numa projeção maior, a mesma interceptaria um dado de testemunho de sondagem de 129,6 ppm de ouro.

Ainda na seção 03, o segundo nível também é coincidente com o contorno da zona mineralizada, porém ele apresenta uma anomalia grande em relação ao contorno, devido ao aumento de ruído com a profundidade os dados perdem a geometria coincidente com o corpo. A anomalia apresenta baixo de Resistividade, alto Porcentagem de Efeito de Frequência e alto Fator Metal.

Nota-se em todas as seções, que as anomalias tendem a perder a resolução com a profundidade, isso ocorre devido a relação proporcional entre o ruído e os níveis de investigação.

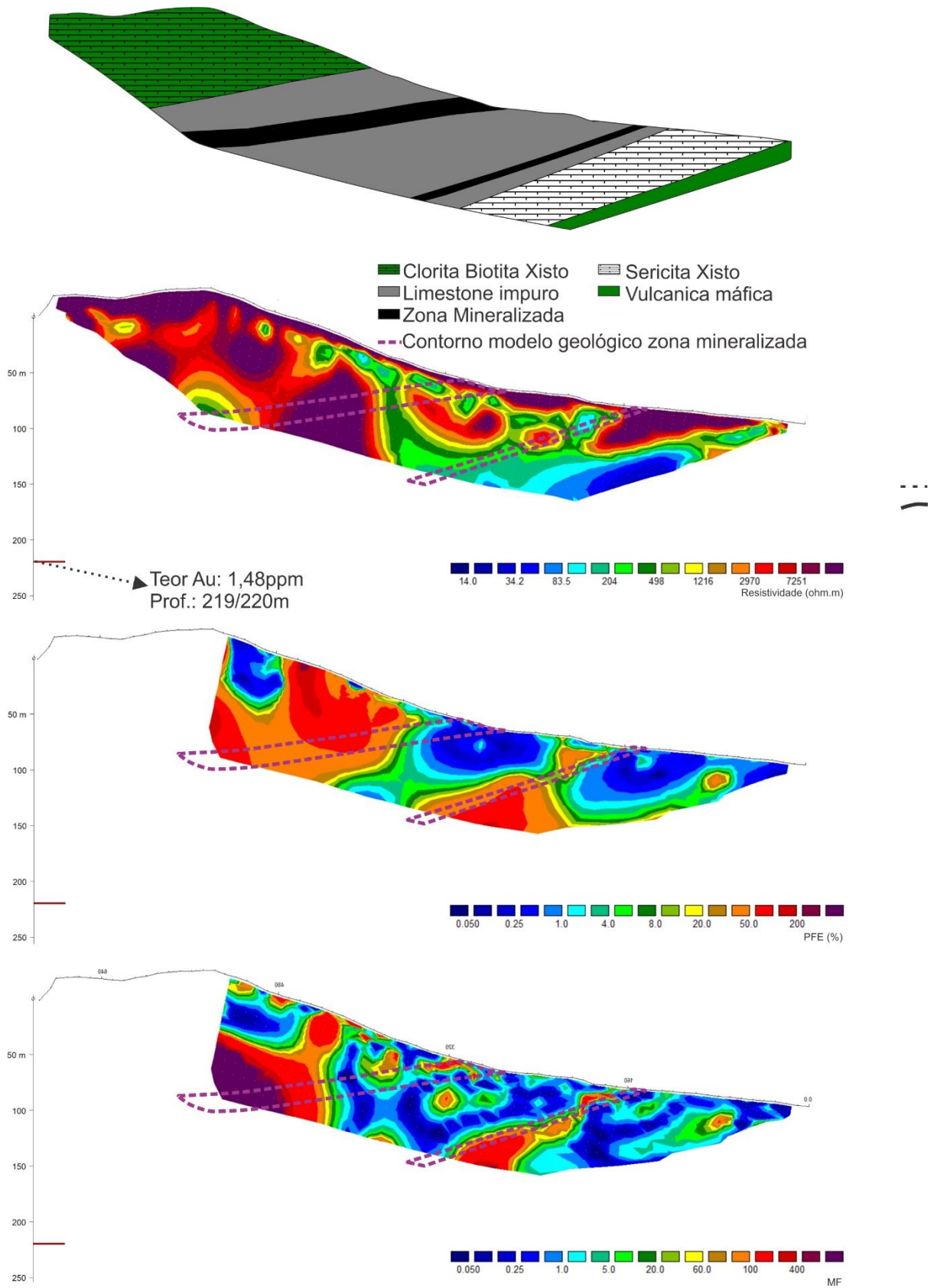


Figura 3.19 – Seções da Linha 03, ao sudoeste da cava da antiga mina. Resistividade, Porcentagem de Efeito de Frequência e Fator Metal respectivamente.

### 3.6 INTEGRAÇÃO

Como o alvo Sertão é basicamente hospedado no contato entre xistos carbonosos e calcários numa pilha de sedimentos químicos que inclui lentes de BIFs, e uma zona de alteração que inclui sulfetos (10-15%) na zona proximal e sericita/biotita. O pacote de alteração total pode chegar a dezenas de metros de espessura, já a alteração proximal apresenta cerca de 10 metros de espessura, este fato torna uma área de aplicação viável de Polarização Induzida, onde unidades carbonosas próximas da mineralização são mapeáveis com Polarização Induzida.

Inicialmente, nos métodos aplicados anteriormente as lentes de BIF foram as rochas do pacote a apresentar uma resposta mais consistente, e geraram anomalias magnéticas no levantamento terrestre (Figuras 3.20).

Contudo, todos os dados de geofísica (Magnetometria, Susceptibilidade Magnética, Transiente Eletromagnético e Radiometria) indicaram um corredor com sinal e geometria coincidente à área de mineralização anterior (área da antiga lavra), com uma tendência para sudoeste.

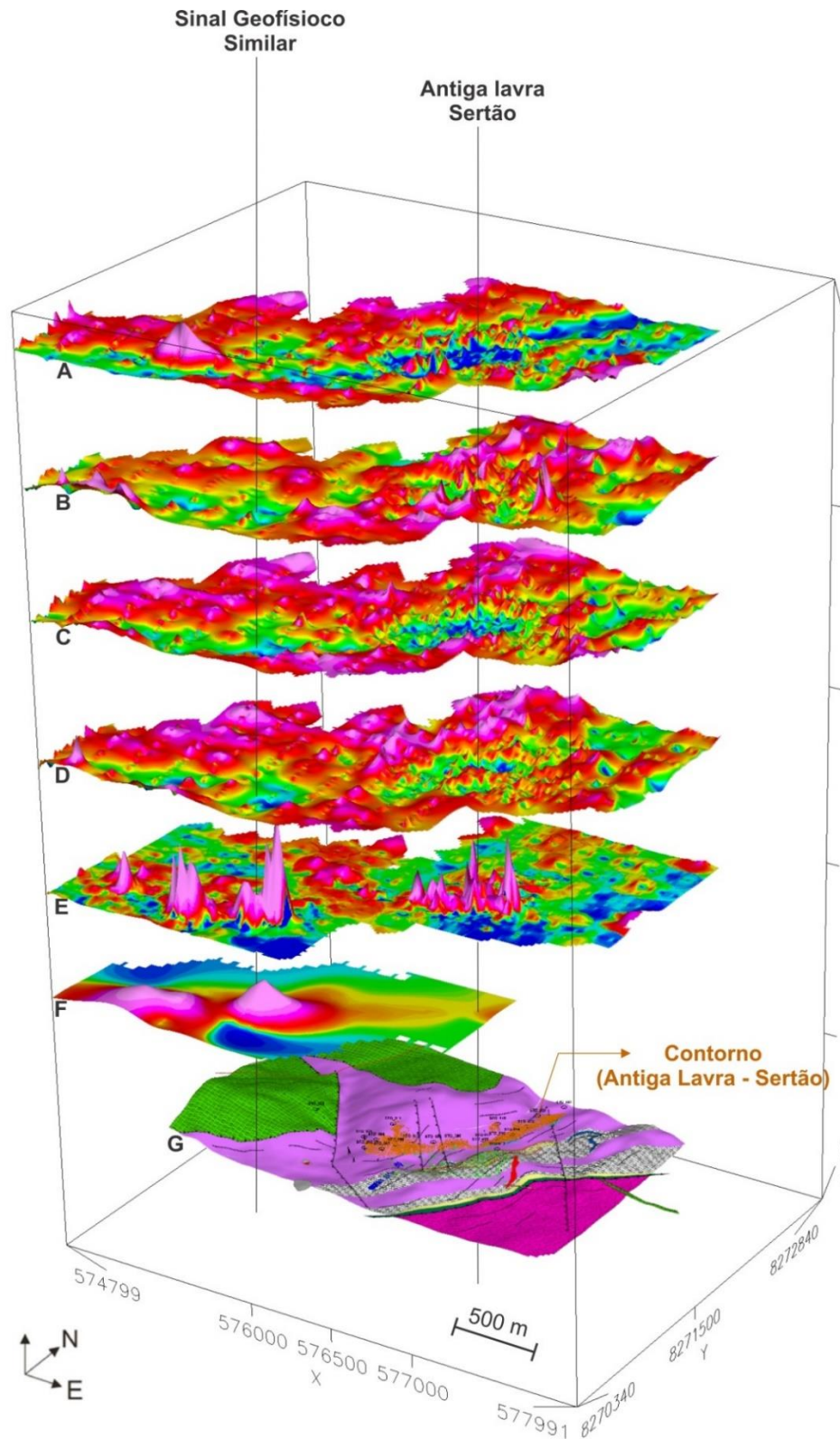


Figura 3.20 - Dados geofísicos da área integrados em plataforma 3D para análise qualitativa: (A) Mapa gamaespectrométrico, razão K/Th. (B) Mapa gamaespectrométrico de Potássio. (C) Mapa gamaespectrométrico de Tório. (D) Mapa gamaespectrométrico de Urânio. (E) Mapa magnetométrico com o filtro ASA (F) Mapa eletromagnético Transiente Eletromagnético 100 Hz. (G) Mapa geológico com topografia e o contorno da antiga mina.

Com as seções de Fator Metal dispostas em plataforma 3D e projetadas de baixo (Figuras 3.21), é possível verificar a continuidade dos sinais a Sudoeste. Nas áreas ao nordeste é possível notar um deslocamento para noroeste do sinal e em direção à superfície, marcado por uma falha normal (noroeste/sudeste).

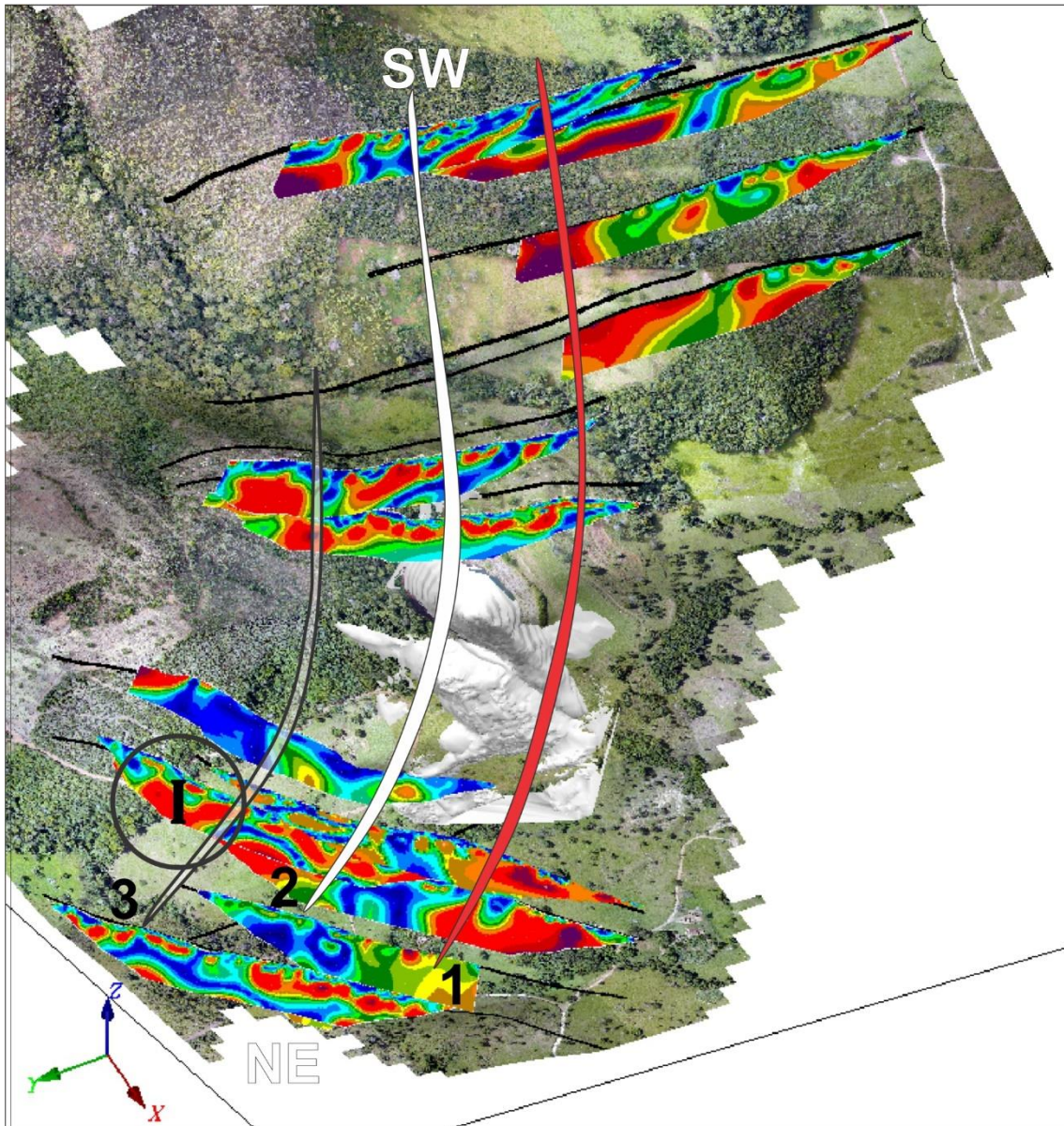


Figura 3.21 – Seções de Fator Metal dispostas em *software 3D (Oasis Montaj)*, é possível verificar 3 tendências principais de alto Fator Metal: (1) Primeiro nível zona mineralizada - conhecido, (2) Segundo nível zona mineralizada - conhecido, (3) anomalia coincidente com teor positivo de ouro na seção 02 (Anomalia I). Todos os níveis com tendência NE/SW.

As áreas ao sudoeste, ainda não possuem cobertura de mapeamento geológico de detalhe. No entanto, é possível aferir uma continuidade da mineralização ao projetar o halo hidrotermal principal (mais correlacionado a teores positivos de ouro) seguindo o *trend* das



rochas encaixantes, que coincide com as anomalias elétricas correlacionáveis ao halo hidrotermal mineralizado, além de se sobreporem a teores significativos de ouro (Figura 3.22)

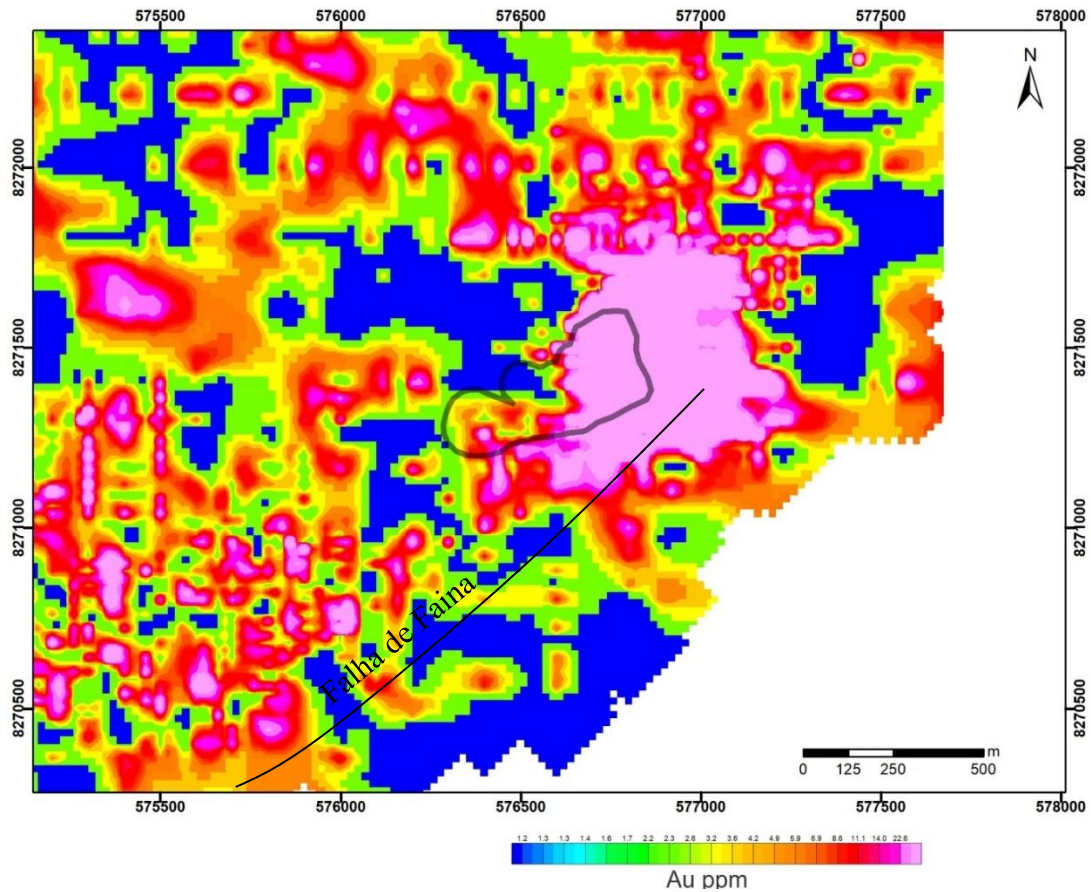


Figura 3.22 – Mapa de anomalia de solo (Orinoco, 2016)

A partir dos dados de Polarização Induzida no domínio da frequência e associando-os aos dados de furo de sondagem, geologia aflorante e topografia da cava da mina, foi feita uma superfície de alteração hidrotermal (para nordeste e sudoeste). Ao nordeste verifica-se o soerguimento da faixa anômala, nota-se que após a falha normal a anomalia de Fator Metal fica fraca, o que indica uma provável erosão da zona mineralizada.

A sudoeste, o sinal aparenta se estender até a última seção mergulhando para noroeste (Figura 3.23). Na modelagem, ao nordeste, verifica-se o soerguimento e/ou fechamento do halo hidrotermal, podendo haver continuação do halo hidrotermal ao norte, onde não houve cobertura dos dados.

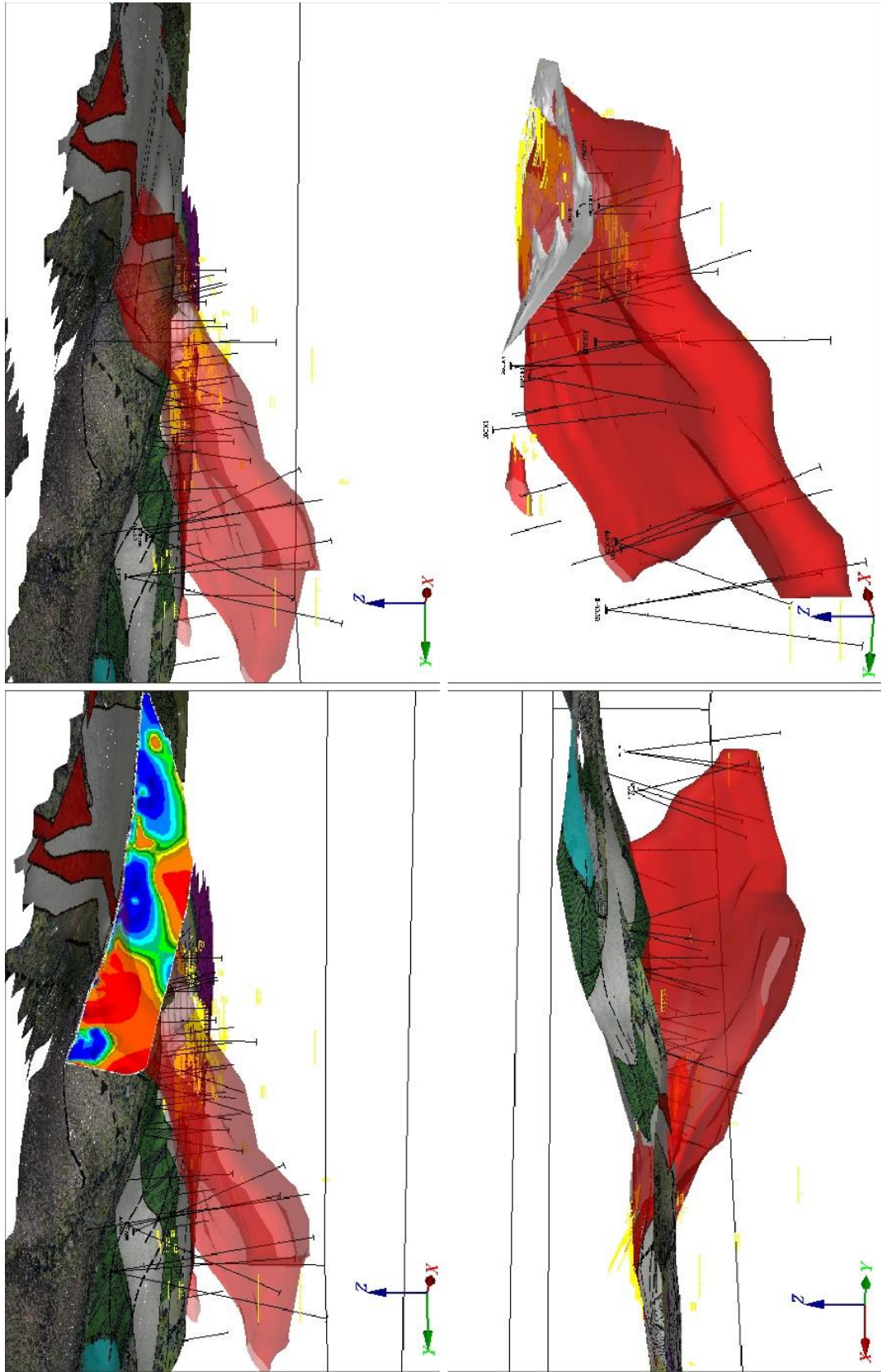


Figura 3.23 – Modelos de Fator Metal, que faz correspondência a alteração hidrotermal nordeste e sudoeste integrados (Superfície vermelha).

### 3.7 CONCLUSÕES

Os estudos dos dados geofísicos existentes e pertinentes ao Projeto no Alvo Sertão mostraram toda sua importância e auxílio ao mapeamento geológico e prospecção mineral.

As análises feitas fornecem uma série de elementos de reflexão para o entendimento da geologia e estruturas da área, além de ser determinante na identificação do possível corredor mineralizado.

Onde todos os dados de geofísica fornecidos (Magnetometria, Susceptibilidade Magnética, Transiente Eletromagnético e Radiometria) indicaram um corredor com sinal e geometria coincidente à área de mineralização anterior (área da antiga lavra), a tendência segue para sudoeste. Esse corredor é confirmado pela geoquímica de solo e rocha e pela geoquímica em testemunhos de sondagem. Os métodos geofísicos anteriores foram fundamentais para guiar o levantamento de Polarização Induzida.

No contexto geológico em questão, o método de Polarização Induzida no domínio da frequência foi eficaz na determinação do pacote de alteração hidrotermal. Contudo, em escala de detalhe não é possível detectar apenas o halo hidrotermal principal correspondente a mineralização.

O parâmetro Fator Metal teve uma resposta com a qualidade e definição superior à resposta da Porcentagem de Efeito de Frequência. No entanto, foi relevante utilizá-la no momento da integração de dados.

Aparentemente o ruído do arranjo Dipolo dipolo prejudicou a resolução dos dados, ainda assim, propiciou uma cobertura maior da área, quando o tempo de leitura dele é consideravelmente inferior ao dos outros arranjos testados.

Devido à limitação de profundidade de alcance do equipamento, foi importante e necessário projetar as anomalias (conforme a tendência das mesmas) para auxiliar na interpretação. Esta estratégia pode influenciar na confiabilidade do modelo, apesar das projeções em sua maioria coincidirem com faixas de teor positivo em furos de sondagem.

Mais de 90% dos dados dos furos de sondagem apresentados nas figuras são furos antigos (oriundo da antiga Sertão Mineração Ltda e entregues para a Orinoco Brasil Mineração), dessa maneira existem muitos furos incompletos ou sem informação litológica, tornando os dados geofísicos importantes para o entendimento da área.

### **3.8 AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à empresa Orinoco Gold pelo auxílio em todas as etapas de campo e pelo fornecimento de informações de poços e geoquímicas.

### 3.9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DARDENNE, M. A., SCHOBENHAUS, C. (2001). Metalogênese do Brasil. Brasília, Editora Universidade de Brasília.
- HALLOF, P. G. (1964). *A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. Geophysics.*
- ORINOCO BRASIL MINERAÇÃO LTDA (2017) Relatório interno. Faina, 270p.
- PALACIM, L. (1976). Goiás. 1722-1822. 2 ed. Goiânia, Oriente.
- PINTO, M. S. (2000). Aspecto da história da mineração no Brasil colonial. In: LINS, F. et al. (orgs). Brasil 500 anos: a construção do Brasil e da América Latina pela mineração. Rio de Janeiro, CETEM/MCT.
- RESENDE, M. G. et al. (1998). *The stratigraphy of the Goiás and Faina Greenstone Belts, Central Brazil: a new proposal.* Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SP, v. 28, n. 1, p. 77-94.
- SANTOS, H. S. (2008). O método transiente eletromagnético: aplicação ao estudo da estrutura geolétrica da Bacia de Resende (RJ, Brasil). Dissertação de Mestrado em Geofísica, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 50p.
- SASAKI, Y. (1989). *Two Dimensional Joint Inversion of Magnetotelluric and Dipole-Dipole Resistivity Data. Geophysics, Vol. 54.*
- SILVA, M. P. (2002). Comparação dos impactos Sócio-ambientais causados pelas Dinâmicas Mineratórias na Micro Bacia do Córrego Vermelho. Goiás. Monografia de Graduação, UEG/UUCC.
- SILVA, M. P., ROCHA, C. (2008). Caracterização da Mineração Aurífera em Faina, Goiás, em um Contexto Ambiental Histórico e Atual. Ambiente & Sociedade. Campinas, v. XI, n. 2.
- VEARNCOMBE et al. (1986). *Greenstone belts: Their components and structure. Lunar and Planetary Institute, Houston, p.214-220.*
- XAVIER, R. P. (1985). Principais domínios metalogenéticos do ouro: Representatividade no tempo geológico, sua distribuição espacial e importância econômica. Revista IG, São Paulo, v.6, n.1, p. 69-90.