



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

**MAPEAMENTO DA ASSINATURA DE Ni-Cu (Co-Au-PGE)
NA PROVÍNCIA TOCANTINS: O EXEMPLO DA
INTRUSÃO MÁFICA-ULTRAMÁFICA BARRA DO
GAMELEIRA**

Dissertação de Mestrado n° 216

Thiago Lima Mendes

Brasília – DF

2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

**MAPEAMENTO DA ASSINATURA DE Ni-Cu (Co-Au-PGE)
NA PROVÍNCIA TOCANTINS: O EXEMPLO DA
INTRUSÃO MÁFICA-ULTRAMÁFICA BARRA DO
GAMELEIRA**

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

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos

Brasília – DF

2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

**MAPEAMENTO DA ASSINATURA DE Ni-Cu (Co-Au-PGE)
NA PROVÍNCIA TOCANTINS: O EXEMPLO DA
INTRUSÃO MÁFICA-ULTRAMÁFICA BARRA DO
GAMELEIRA**

Banca Examinadora

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

Prof. Dra. Adalene Moreira
(Instituto de Geociências/ UnB)

Prof. Dr. Dionisio Uendro Carlos
(VALE S.A.)

Brasília – DF

2023

Ficha Catalográfica

Lm Lima Mendes, Thiago
 MAPEAMENTO DA ASSINATURA DE Ni-Cu (Co-Au-PGE) NA
 PROVÍNCIA TOCANTINS: O EXEMPLO DA INTRUSÃO MÁFICA
 ULTRAMÁFICA BARRA DO GAMELEIRA Dissertação / Thiago Lima
 Mendes; orientador Welitom Rodrigues Borges; co-orientador
 Marcelo Henrique Leão Santos. -- Brasília, 2023.
 206 p.

 Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
 Universidade de Brasília, 2023.

 1. prospecção mineral. 2. máfica. 3. ultramáfica. 4.
 geofísica. 5. geoquímica. I. Rodrigues Borges, Welitom ,
 orient. II. Henrique Leão Santos, Marcelo, co-orient. III.
 Título.

AGRADECIMENTOS

Será difícil abordar, nessa breve seção, todos que me auxiliaram durante essa caminhada de dois anos. Mas também é muito gratificante poder agradecer a todos que me auxiliaram de qualquer maneira possível nessa jornada desafiadora e recompensadora.

Agradeço muito à minha companheira, Maria Luisa, que durante esses dois anos foi minha grande parceria em todos os momentos. Foi minha revisora oficial de língua portuguesa, motivadora durante momentos difíceis e sempre, uma maravilhosa companhia. Sem sua ajuda teria sido imensamente mais chato e menos prazeroso.

Agradeço genuinamente aos meus orientadores pelo desenvolvimento dessa interessante pesquisa. Ao professor Marcelo Leão que foi um ótimo orientador, sempre muito crítico, pronto para dar uma “porrada”, mas também sempre disposto a elogiar todos os esforços direcionados, quando o assunto é chegar no melhor resultado. Ao professor Welitom, o qual eu já havia uma amizade por trabalhos realizados anteriormente, meu eterno agradecimento, como já lhe disse, ele é como um pai para mim.

Agradeço a minha mãe, Ana Beatriz, que sempre foi um exemplo na perseverança e resiliência, além de me ensinar que o caminho mais fácil, é o do conhecimento. Ao meu pai, Leandro, por ter me mostrado o valor da dedicação e a importância de se sacrificar em prol de algum objetivo para conseguir o que se quer. À minha avó, que sempre me incentivou de forma muito significativa a desenvolver minhas pesquisas e trabalhos. Aos meus irmãos, Giovanna e Guilherme, que servem como uma fonte de inspiração para que eu me torne um ser humano melhor e, seja um bom exemplo para eles.

Agradeço à todas as pessoas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, que de alguma forma auxiliaram nesses dois últimos anos. Foram tantos momentos, conversas e discussões, que hoje, eu consigo entender muito melhor as rochas máficas-ultramáficas, do que dois anos atrás. Ao meu grande amigo e irmão (de outra mãe), Luiz Tabosa, que também decidiu dedicar seus esforços para melhor compreender as rochas da Suíte Gameleira, a sua amizade foi uma base forte, pois ele sempre esteve presente e disposto a ajudar. Aos colegas Lucas (Boi) e Vagney, pelas significativas contribuições no desenvolvimento dessa pesquisa, vocês me ensinaram (e continuando ensinando) muito sobre geologia.

Agradeço à toda equipe responsável pelo Projeto Gameleira. Ao Fabricio Mendonça e ao Eduardo Martins por serem os grandes entusiastas e prospectores na Intrusão Barra do Gameleira. Ao professor Suita, por compartilhar seus valiosos

conhecimentos, sobre os misteriosos platinóides. Ao geólogo Cleber (Tutu) que mapeou com afinco, coletou amostras geoquímicas e foi um dos pesquisadores mais importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa, muito obrigado pelo seu grande esforço físico e intelectual. Ao geofísico Fábio (madruga) que auxiliou na aquisição dos dados geoeletricos. À toda a equipe de campo responsável pela aquisição, Nedvan, Dionei e Joveci (e outros) sem eles, essa pesquisa jamais passaria de um planejamento. Ao excepcional João Pacheco, que foi o líder de campo das aquisições geoeletricas e, foi um dos melhores professores de geofísica de campo que já tive. Se hoje sou um bom geofísico de campo, devo boa parte aos conhecimentos ensinados pelo Seu João. Ao colega Rafael e o auxiliar de campo Dionei, que me ajudaram no sucesso das aquisições magnéticas.

Agradeço a todos os meus amigos, que fazem com que essa vida seja levada mais descontraída, divertida, fácil e alegre. Mesmo que meus parentes de sangue estejam muito longe, meus amigos mostraram que formamos uma grande família (a.k.a. Aqui Atendemos Loucos!), e que posso contar em qualquer momento, por qualquer motivo. Meu sincero obrigado.

Finalizo meus agradecimentos direcionado à você, leitor. É muito gratificante saber que essa pesquisa está sendo lida por outros pesquisadores.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

“Minha vida é andar por esse país

Pra ver se um dia descanso feliz

Guardando as recordações das terras onde passei

Andando pelos sertões e dos amigos que lá deixei”

Luiz Gonzaga

RESUMO

A Suíte Gameleira é uma suíte composta por intrusões máfica-ultramáficas localizadas no sudeste do Tocantins, em que a Intrusão do Barra do Gameleira (IBG) é a mais significativa dentre elas. Com extensão de 8x9 quilômetros e formato arredondado, a formação se destaca entre as demais por seu potencial de mineralização. A região de estudo encontra-se inserida na Província Tocantins, na porção norte do Orógeno Brasília. Nessa região ocorrem terrenos paleoproterozoicos expostos, como o Terreno Almas-Conceição do Tocantins, que são representados principalmente por suítes TTG e sequências meta-vulcanossedimentares (Grupo Riachão do Ouro). De acordo com estudos geológicos e isotópicos, a IBG intruiu as rochas já representadas pela Suíte TTG e o Grupo Riachão do Ouro. Devido a diferença de composição química entre as rochas ultramáficas e as unidades adjacentes, há um forte contraste de propriedades físicas. O aumento de conteúdo de minerais máficos (maficidade) gera um aumento diretamente proporcional de intensidade de magnetização, e inversamente da radiometria de potássio (K), urânio (U) e tório (Th). A presença de mineralizações sulfetadas, caracterizadas pela assembléia pirrotita, pentlandita, magnetita, calcopirita, causa uma diminuição da resistividade e aumento da cargabilidade, enquanto as litologias estéreis possuem valores muito altos de resistividade e baixos de cargabilidade. Para caracterização da IBG toda, foram utilizados os dados aerogeofísicos do Projeto Tocantins (CPRM 2006) em que foram adquiridos dados magnéticos e radiométricos. Os resultados geofísicos foram integrados à prospecção geoquímica de sedimentos de corrente e concentrado de bateia, realizada pela CPRM, além de dados litogeoquímicos fornecidos pela Cooperbrito LTDA. Com base na correlação dos diferentes métodos com a geologia local, foram definidos três alvos de prospecção mineral: alvo norte, alvo leste e alvo sul. Tendo em vista as mineralizações de Ni-Cu(-Co-Au-PGE), foram realizadas aquisições terrestres de magnetometria, eletrorresistividade e polarização induzida no alvo sul. Os resultados geofísicos foram integrados a dados de geoquímica de solo e, foi elaborado um modelo prospectivo para esse alvo. Além disso, foram coletadas 7 amostras de rocha para realização de medições petrofísicas e descrição macroscópica. As medições petrofísicas foram de suscetibilidade magnética e gamaespectrometria. A partir da integração entre os diferentes métodos e dados, foi possível verificar a eficiência da geofísica no reconhecimento de intrusões máfica-ultramáficas semelhantes às da Suíte Gameleira, bem como da assinatura das possíveis mineralizações sulfetadas. Os dados medidos em laboratório tiveram coerência com os dados inferidos por meio da geofísica aérea, o que corrobora os resultados obtidos. Anomalias geoquímicas indicaram teores anômalos de Ni-Cu(-Co-Au-PGE), correlatos as anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade, o que torna o método da polarização induzida eficiente na identificação de anomalias sulfetadas.

Palavras-Chave: prospecção mineral, máfica, ultramáfica, geofísica, geoquímica.

MENDES, T. L.

ABSTRACT

The Gameleira Suite comprises mafic-ultramafic intrusions located in southeastern Tocantins, with the Barra do Gameleira Intrusion (IBG) being the most prominent among them. Covering an area of 8x10 square kilometers and exhibiting a rounded shape, this formation stands out due to its considerable mineralization potential. The study area is situated within the Tocantins Province, in the northern part of the Brasília Orogen. This region predominantly showcases exposed Paleoproterozoic terrains, such as the Almas-Conceição do Tocantins Terrane, characterized by TTG suites and meta-volcanosedimentary sequences known as the Riachão do Ouro Group. Geological and isotopic studies indicate that the IBG intruded the rocks represented by the TTG Suite and the Riachão do Ouro Group. The significant contrast in chemical composition between ultramafic rocks and the neighboring units results in pronounced differences in their physical properties. The increasing of mafic content is (maficity) directly correlates with higher magnetization intensity, while inversely affecting the radiometric response of potassium (K), uranium (U), and thorium (Th). The presence of sulfide mineralizations, characterized by the pyrrhotite, pentlandite, magnetite, chalcopyrite assembly leads to decreased resistivity and increased chargeability, whereas barren lithologies exhibit high resistivity values and low chargeability. To characterize the entire IBG, we utilized aerogeophysical data from the Tocantins Project (CPRM 2006), which included magnetic and radiometric measurements. These geophysical results were integrated with the geochemical prospecting of stream sediments and pan concentrates conducted by CPRM, along with the lithogeochemical data provided by Cooperbrito LTDA. By correlating the findings from various methods with the local geology, we defined three mineral prospecting targets: the North target, East target, and South target. In consideration of the Ni-Cu(-Co-Au-PGE) mineralizations, terrestrial magnetometry, electroresistivity, and induced polarization acquisitions were conducted on the southern target. The geophysical results were then combined with soil geochemical data, leading to the development of a prospective model for this target. Furthermore, seven rock samples for petrophysical measurements, and macroscopic description were collected. Petrophysical measurements included magnetic susceptibility and gamma spectrometry. Through the integration of different methods and data, this research demonstrated the efficacy of geophysics in recognizing mafic-ultramafic intrusions similar to those found in the Gameleira Suite, as well as identifying potential sulfide mineralizations. The laboratory measurements were consistent with the data inferred from aerial geophysics, thus reinforcing the obtained results. Geochemical anomalies indicated abnormal levels of Ni-Cu(-Co-Au-PGE), which correlated with anomalies of low resistivity and high chargeability, underscoring the effectiveness of the induced polarization method in identifying sulfide anomalies.

Keywords: mineral exploration, mafic, ultramafic, geophysics, geochemistry.

Sumário

CAPÍTULO 1	1
1.Introdução.....	1
1.1 Contextualização da pesquisa	1
1.2 Contexto Geológico	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO 2	7
2. Fundamentação Teórica.....	7
2.1 Equações de Maxwell	7
2.1.1 Relações Empíricas das Equações de Maxwell	9
2.2 Magnetometria	11
2.2.1 Efeito de Magnetização.....	13
2.2.2 Propriedades magnéticas das rochas	14
2.3 Gamaespectrometria.....	16
2.4 Métodos Elétricos	19
2.4.1 Condução elétrica nas rochas	19
2.4.2 Eletorresistividade	20
2.4.3 Polarização Induzida	23
2.4.4 Técnica de Aquisição e Arranjos	26
2.5 Prospecção Geoquímica.....	28
2.5.1 Princípios Básicos	29
2.5.2 Prospecção Geoquímica de Rocha (Litogeoquímica).....	32
2.5.3 Prospecção Geoquímica de Solo.....	33
2.5.4 Prospecção por Sedimentos Ativos de Drenagem	34
2.5.5 Prospecção por Concentrados de Bateia	35

2.6 Mapeamento Geológico	35
CAPÍTULO 3	37
3. Artigo “CORRELAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS, GEOQUÍMICOS E GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO DE NI-CU NA INTRUSÃO BARRA DO GAMELEIRA, TOCANTINS.	37
CAPÍTULO 4	83
4. Artigo “FOOTPRINT GEOFÍSICO E GEOQUÍMICO DO SISTEMA Ni-Cu- Co-PGE NA REGIÃO SUL DA INTRUSÃO BARRA DO GAMELEIRA, TOCANTINS.	83
CAPÍTULO 5	115
5. Discussões e Conclusões.....	115
CAPÍTULO 6	118
6. Referências Bibliográficas	118
ANEXOS	132

Lista de Figuras

Figura 1.1.1: Mapa dos processos minerários ativos em Ni-Cu-Co do Brasil (a), do Tocantins (b) e da região quem engloba a área de estudo (c).....	2
Figura 2.2.1: (a) Representação do campo geomagnético, simplificado por um dipolo magnético localizado no centro do planeta. (b) Ilustração esquemática do vetor de campo geomagnético e seus ângulos de inclinação e declinação (Adaptado de Dentith e Mudge, 2014).	12
Figura 2.2.2: Ilustrações esquemáticas do perfil da intensidade de magnetização, para um corpo magnético esférico, em diferentes latitudes. Em a) observa-se o resultado obtido nos polos (latitude igual a 90°) em b) observa-se o resultado obtido em médias latitudes (latitude variando próxima à 45°). (Retirado de Dentith e Mudge, 2014).	13
Figura 2.2.2.1: Tabela com as variações de suscetibilidade magnética, para diferentes rochas e minerais (Retirado de Dentith e Mudge, 2014).....	16
Figura 2.3.1: Gráfico da intensidade de contagem, em função da energia de radiação. (Retirado de Wilford e Minty, 1997).....	17
Figura 2.3.2: Tabela com faixas dos teores de K, U e Th nas principais rochas presentes na crosta terrestre e, nos solos residuais gerados a partir destas (Retirado de Dickson e Scott, 1997).....	19
Figura 2.4.2.1: Tabela com faixas de resistividade/condutividade das principais rochas e minerais encontrados na crosta terrestre.	23
Figura 2.4.3.1: a) Comparação entre a tensão constante quando há fluxo de corrente (V_c) e $V(t)$ voltagem residual medida no instante t ; b) e c) Integral de $V(t)$ ao longo do tempo (Adaptado de Telford et al., 1990).	25
Figura 2.4.4.1: Ilustração esquemática da técnica de aquisição do caminhamento elétrico, utilizando o arranjo eletródico dipolo-dipolo.	26

Figura 2.4.4.2: Ilustração esquemática dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo. 27

Figura 2.5.1.1: Ciclo geoquímico (Retirado de Rose et al., 1979)..... 30

Figura 2.5.1.2: Abundância média dos elementos geoquímicos na crosta. Em a) elementos de número atômico 1 a 48; b) elementos de número atômico 47 a 93 (Retirado de Fleischer, 1953). 31

Figura 2.5.1.3: Classificação da tabela periódica elaborada por Goldschmidt (Retirado de Winter, 2013). 32

Figura 3.1: Mapas do Contexto Geológico mostrando: a) Localização dos principais crátons e bacias do Brasil em relação à América do Sul; b) Mapa Geológico da Faixa Brasília com destaque a área de afloramentos do embasamento cristalino Paleoproterozóico (retângulo vermelho), os limites do Terreno Almas (linha preta tracejada fina dentro do retângulo vermelho) e os limites do Cráton São Francisco (linha tracejada preta a oeste) e limites do Paleocontinente do São Francisco após 1,8 Ga (linha azul tracejada); c) Mapa geológico do segmento norte da Faixa Brasília mostrando os domínios tectônicos definidos para a região em estudos anteriores e os nomes adotados neste trabalho (Martins-Ferreira et al., 2020 – Modificado de Fuck et al., 2014 e Cordeiro e de Oliveira, 2017). 42

Figura 3.2: Mapa Geológico regional com as principais unidades geológicas. Ao centro-sul, o retângulo vermelho contém a área de estudo, representada pela Intrusão Barra do Gameleira (Modificado de Correia Filho e Sá; Saboia et al., 2019)..... 43

Figura 3.3: a) Fotografia evidencia uma amostra de rocha (AM-GM-CU-01) com a direção (setas em vermelho) do registro das medidas de suscetibilidade magnética; b) Histograma de frequências dos valores de suscetibilidade medidos para a amostra AM-GM-CU-01. 51

Figura 3.4: Gráficos da radiação gama em função dos diferentes tempos de exposição, para a mesma amostra (AM-GR-67). Em a) os teores de radioelementos estão em cpm (contagem por minuto); em b) o teor de potássio está em porcentagem e os teores de urânio e tório em ppm. Em c) uma fotografia do padrão de amostras utilizado para medidas gamaespectrométricas. 52

Figura 3.5: Fluxograma de desenvolvimento dos produtos utilizados na elaboração do modelo prospectivo da Intrusão Barra do Gameleira (pontilhado azul de acordo com

Correia Filho e Sá, 1980). Em a) anomalia magnética reduzida ao equador; b) anomalia magnética; c) anomalia magnética reduzida ao polo; d) derivada da anomalia magnética na direção oeste-leste (Dx); e) derivada da anomalia magnética na direção norte-sul (Dy); f) derivada vertical (Dz da anomalia magnética; g) gradiente horizontal da anomalia magnética; h) gradiente total da anomalia magnética; i) derivada Tilt da anomalia magnética; j) domínios magnéticos extraídos do gradiente horizontal; k) lineamentos magnéticos extraídos da derivada Tilt..... 53

Figura 3.6: Fluxograma de desenvolvimento das inversões magnéticas em 3D. Em a) *mesh* (malha regular 3D) e pontos utilizados para inversão; em b) resultado da inversão MVI: modelo 3D de suscetibilidade magnética; em c) o mesmo modelo de b), em transparência, somado aos vetores obtidos durante inversão; em d) componente principal de indução magnética; em e) componente principal de remanência magnética; em f) fatias, seções e isosuperfícies extraídas do modelo de suscetibilidade 3D MVI; em g) resultado da inversão de suscetibilidade magnética e em h) fatias, slices e isosuperfícies extraídas do modelo de suscetibilidade 3D convencional. 54

Figura 3.7: Fluxo de desenvolvimento para elaboração dos produtos gamaespectrométricos. Em a) distribuição de potássio; b) distribuição de urânio; c) distribuição de tório; d) contagem total de radiação gama; e) potássio normalizado por tório; f) urânio normalizado por tório; g) mapa ternário RGB de tório, urânio e potássio; h) mapa ternário CMY de potássio, tório e urânio; i) potássio anômalo; j) urânio anômalo; k) DRAD; l) CRAD. 58

Figura 3.8: Correlações entre elementos de interesse. Em a) dados litogeoquímicos, em b) dados de sedimento de corrente (Ni-Cu-Co) e concentrado de bateia (Au-PGE)..... 59

Figura 3.9: Histogramas de distribuição de frequência de análises litogeoquímicas obtidas para os elementos (a) Ni, (b) Cu, (c) Co, (d) Pt, (e) Pd e (f) Au..... 60

Figura 3.10: Mapa Geológico da Intrusão Barra do Gameleira sobre relevo sombreado. 62

Figura 3.11: Mapa Geológico de semidetalhe da Porção Leste da Intrusão Barra do Gameleira, sobre relevo sombreado. 64

Figura 3.12: Propriedades geofísicas e geoquímicas das amostras coletadas na IBG. Em a) suscetibilidades magnéticas medidas em laboratório e recuperadas por meio da inversão além do LOI; em b) concentrações dos radioelementos medidos em laboratório e inferidos por meio da gamaespectrometria aérea; em c) teor de níquel e cobre obtido por meio de análise litogeoquímica. 65

Figura 3.13: Resultados prospectivos da Intrusão Barra do Gameleira, com a integração geofísica, o relevo sombreado e a distribuição de a) níquel; b) cobre; c) cobalto; d) ouro; e) platina; f) paládio. Por fim, em g) os alvos selecionados, sobrepostos à geologia da Intrusão Barra do Gameleira..... 69

Figura 3.14: Integração de resultados magnéticos no Alvo Sul da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalos de geoquímica; em b) Seção N-S da inversão de vetor magnético; em c) apenas isosuperfície recuperada da inversão..... 70

Figura 3.15: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Sul da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD..... 70

Figura 3.16: Integração de resultados magnéticos no Alvo Leste da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalos de geoquímica; em b) Seção S-N da inversão de vetor magnético; em c) apenas isosuperfície recuperada da inversão..... 71

Figura 3.17: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Leste da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD. 72

Figura 3.18: Integração de resultados magnéticos no Alvo Norte da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalos de geoquímica; em b) Seção SE-NW da inversão de vetor magnético; em c) somente isosuperfície recuperada da inversão. 73

Figura 3. 19: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Norte da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD. 73

Figura 4.1: Localização da área de estudo e arcabouço geológico regional simplificado (Modificado de CPRM, 2000)..... 88

Figura 4.2: Mapa de localização da malha de pontos adquiridos no alvo sul da Intrusão Barra do Gameleira..... 89

Figura 4.3: Fluxo de desenvolvimento das correções e reduções realizadas no dado bruto, para obtenção de resultados magnéticos. Em a) aquisição dos dados, b) elaboração da função de variação diurna e filtragem com base em valores de baixa qualidade do sinal, em c) realização da correção diurna, remoção do IGRF e aplicação de filtro passa-baixa, em d) interpolação do dado de magnetização corrigido e filtrado,

em e) resultados de filtros e realces do dado magnético e em e) preparação e resultados da inversão MVI. 92

Figura 4.4: Fluxo de desenvolvimento das correções e reduções realizadas no dado bruto, para obtenção dos resultados geoeletricos em 3D. Em a) fotografia da aquisição de dados em campo, em b) as etapas de filtragem antes de realizar a inversão dos dados (c) e em d) os processamentos para plotar os dados em 3D no *Oasis Montaj* (e)..... 95

Figura 4.5: Fluxo de desenvolvimento do método geoquímico. Em a) fotografias da coleta de duas amostras em mesma posição e ilustração de perfil vertical de solo que evidencia horizonte de coleta; b) correlação de Pearson entre os elementos de interesse; c) histogramas de frequência para os elementos de interesse e d) interpolações para os elementos de interesse. 97

Figura 4.6: Mapa geológico simplificado da área de estudo com as linhas de aquisição da geofísica e geoquímica..... 98

Figura 4.7: Resultados dos filtros e realces dos dados magnéticos. Em a) intensidade magnética anômala (TMI); b) gradiometria magnética medida; c) gradiente total (Amplitude do Sinal Analítico); d) derivada vertical calculada; e) gradiente horizontal; f) derivada Tilt; g) domínios magnéticos extraídos do gradiente horizontal e h) composição ternária das derivadas verticais..... 100

Figura 4.8: Informações geológicas do alvo sul. Em a) mapa geofísico do gradiente horizontal magnético, com anomalias geoquímicas e localização da linha de teste; em b) fotografia do afloramento rochoso onde foi coletada amostra litogeoquímica anômala em Ni-Cu; em c) fotografia de amostra de mão do afloramento. 101

Figura 4.9: Resultados da inversão da linha teste com espaçamento de 25 metros. a) Seção de resistividade, arranjo polo-dipolo; b) Seção de cargabilidade, arranjo polo-dipolo; c) Seção de resistividade, arranjo dipolo-dipolo; d) Seção de cargabilidade, arranjo dipolo-dipolo. 102

Figura 4.10: Resultados da inversão da linha teste com espaçamento de 50 metros. a) Seção de resistividade, arranjo polo-dipolo; b) Seção de cargabilidade, arranjo polo-dipolo; c) Seção de resistividade, arranjo dipolo-dipolo; d) Seção de cargabilidade, arranjo dipolo-dipolo. 102

Figura 4.11: Resultados da inversão da linha teste utilizando a inversão conjunta com ambos os arranjos (*mixed array*). a) Seção de resistividade e b) Seção de cargabilidade. 103

Figura 4.12: Visualização 3D de todas as seções de resistividade (a) e cargabilidade (b) adquiridas na área de estudo.....	103
Figura 4.13: Resultados prospectivos da geoquímica de solo. Mapa de distribuição do elemento de interesse, gerado por interpolação, e valores das amostras coletadas de: a) Níquel, b) Cobre, c) Cobalto, d) Ouro, e) Paládio e f) Platina. Em g) mapa litológico simplificado, com todas as amostragens anômalas em Ni-Cu-Co-Au-PGE.	105
Figura 4.14: Análise integrada dos diferentes dados na Linha 4. Em a) Perfil Geológico; b) Perfis de distribuição da concentração de Ni-Cu-Co; c) Perfis de intensidade anômala de magnetização (TMI) e gradiente horizontal da intensidade (GHT); d) Seção invertida de resistividade aparente, e) Seção invertida de cargabilidade aparente; f) Seção invertida de suscetibilidade magnética.	107
Figura 4.15: Mapa de análise integrada entre os métodos elétricos e magnéticos, em relação à presença de anomalias litogeoquímicas de solo em Ni-Cu-Co-PGE.	108
Figura 4.16: Sólidos das isosuperfícies de cargabilidade (a) e suscetibilidade magnética (b).	109

CAPÍTULO 1

1.Introdução

1.1 Contextualização da pesquisa

Devido ao intenso processo de desenvolvimento tecnológico que ocorre atualmente, a demanda por matéria-prima considerada essencial tem aumentado significativamente. Dentre os materiais, destacam-se os recursos minerais denominados minerais críticos. Esses minerais são essenciais para diversas indústrias de alta tecnologia, como eletrônica, energia renovável, veículos elétricos, telecomunicações e muitas outras.

O conceito de minerais críticos não é estático, ou seja, é definido de acordo com a disponibilidade física, centralização política da oferta, aumento de preços, ou dependência econômica (McLellan et al., 2016). Dessa forma, cada país tem sua própria classificação de minerais críticos, em função de suas particularidades. Porém, de forma geral alguns elementos se destacam concomitantemente em diferentes países, como o caso do lítio e elementos terras raras (ETR). Outros, se destacam pela importância global para atendimento de metas estabelecidas mundialmente (e.g. Acordo de Paris).

Para conseguir atender às metas do Acordo de Paris em relação a utilização de energias limpas, estima-se que ocorra um aumento de demanda total, nas próximas duas décadas, para mais de 40% de cobre e ETR, entre 60 e 70% para níquel e cobalto, e quase 90% para o lítio (IEA, 2011).

Portanto, o descobrimento de novas jazidas de minerais críticos é fundamental para o desenvolvimento tecnológico e financeiro de um país. Tendo em vista que não houve descobertas significativas nos últimos 50 anos, as pequenas jazidas, que não haviam sido exploradas até então, podem ser essenciais para o desenvolvimento na produção de minerais críticos.

Os depósitos minerais podem ter sua origem de diferentes maneiras, sendo a magmática extremamente comum e, associada a grandes províncias minerais, mundialmente conhecidas. Os depósitos magmáticos são diversos, dentre eles destacam-se aqueles relacionados à intrusões máfica-ultramáficas. Ocorrem no Brasil e no mundo exemplos de depósitos originados a partir

destas intrusões de composição mais básica, que apresentam excelentes produções de diversos minerais, sendo alguns deles críticos ao desenvolvimento tecnológico (Figura 1.1.1).

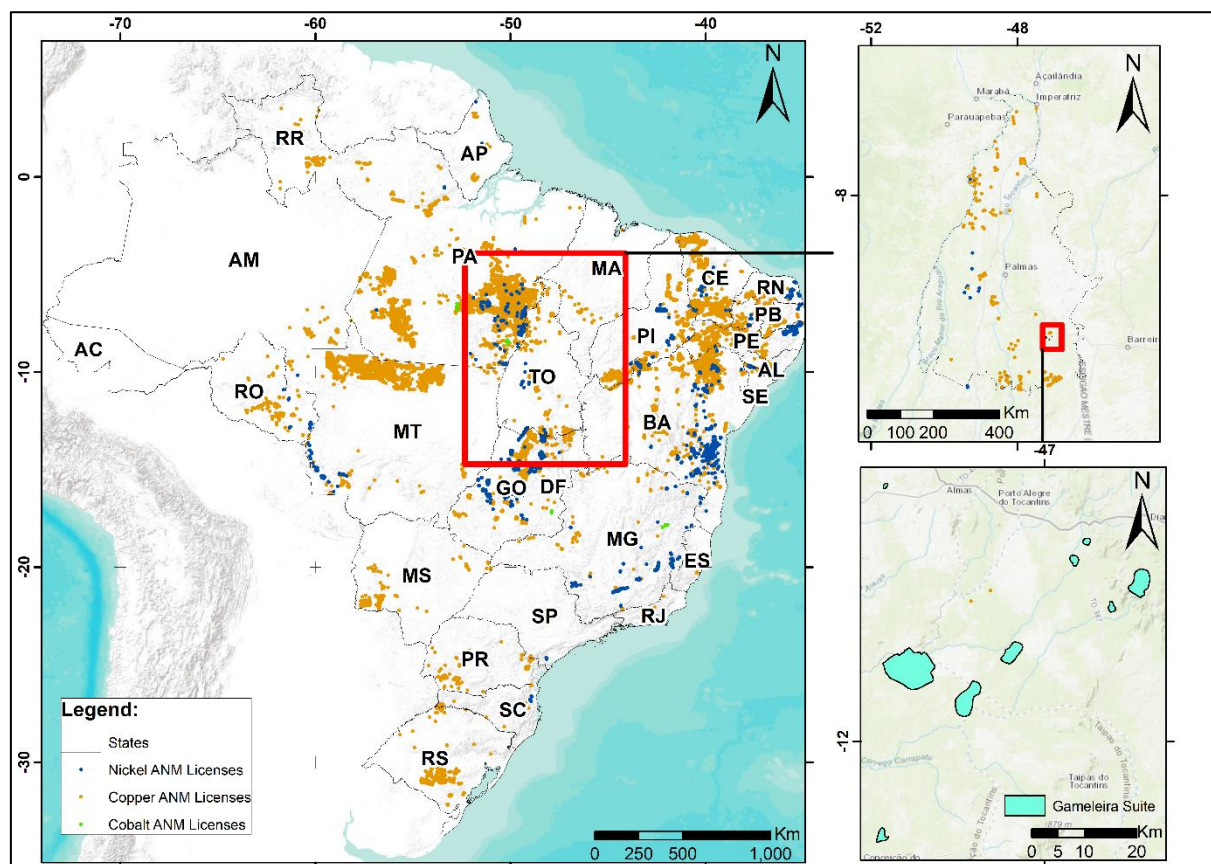


Figura 1.1.1: Mapa dos processos minerários ativos em Ni-Cu-Co do Brasil (a), do Tocantins (b) e da região quem engloba a área de estudo (c).

Dentre os depósitos conhecidos mundialmente, destacam-se: Bushveld (e.g. Willemse 1969; Barnes et al., 2010) na África do Sul; Jinchuan (e.g. Naldrett, 1999; Li et al., 2005; Mao et al., 2008) na China; Voisey Bay (e.g. Naldrett, 1997, 1999; Ripley e Li, 2011) e Sudbury (e.g. Naldrett 1997, 1999; Ames e Farrow, 2007) no Canadá; Noril'sk (e.g. Naldrett, 1997, 1999; Sluzhenikin et al., 2014) e Pechenga (e.g. Naldrett, 2004) na Rússia e os depósitos komatiíticos de Norseman-Wiluna (e.g. Naldrett, 1999) na Austrália.

No Brasil não ocorrem depósitos de classe mundial em rochas máfica-ultramáficas, contudo, existem complexos e províncias com significativas mineralizações que são exploradas. Destacam-se os: Complexos Máfico-Ultramáficos de Niquelândia (e.g. Baxe, 2007; Ferreira Filho et al., 2010; Barbosa 2012; Ratie, 2015), Cana Brava (e.g. Correia e Girardi, 1998; Carminatti et al., 2003; Ferreira Filho et al., 2010), Barro Alto (e.g. Carminatti, 2007; Ferreira Filho et al., 2010; Ratie, 2015) e Americano do Brasil (e.g. Silva, 2009; de Oliveira e

Rocha, 2011), as províncias minerais do Vale do Curaçá (e.g. Teixeira, 1997; Barreto, 2020) e Vale do Rio Jacurici (e.g. Lord et al., 2004; Rebouças, 2022); a Fazenda Mirabela (e.g. Abram, 1993; Barnes et al., 2011; Lazarin et al., 2011; Queiroz, 2012) e o Complexo Máfico Ultramáfico Luanga (Mansur e Ferreira Filho, 2016; Mansur et al., 2020).

Dentre as possíveis mineralizações para os complexos, destacam-se as que apresentam teores de ouro (Au), níquel (Ni), cobre (Cu), cobalto (Co), cromo (Cr) e elementos do grupo da platina (EGP). De forma geral os depósitos estão associados a alterações hidrotermais, que segundo Naldrett (1999), podem ser divididos em dois grandes grupos: ricos em sulfetos e abundantes em Ni e Cu, ou com menores conteúdos de sulfetos no qual os elementos do grupo da platina são o objeto de interesse econômico.

Outra divisão pode ser estabelecida em função do tipo de enriquecimento do minério a ser explorado. No Brasil, pelo alto índice pluviométrico anual, há um intenso processo de intemperismo e lixiviação, que permite a formação de depósitos de níquel laterítico, originados por meio do enriquecimento supergênico (e.g. Complexo Máfico-Ultramáfico Niquelândia). Os depósitos primários, cuja origem das mineralizações é magmática ou hidrotermal, tem como foco a exploração dos sulfetos metálicos, bem como dos eventos metamórficos que permitiram sua reconcentração em um local específico (e.g. Complexo Máfico-Ultramáfico de Americano do Brasil). E há também, locais que ocorrem as duas formas de concentração de metais (e.g. Fazenda Mirabela).

No sudeste do Tocantins, mais especificamente na região entre os municípios de Almas e Dianópolis, ocorrem intrusões máfica-ultramáficas, que se destacam em relação as rochas adjacentes, por apresentarem características geomorfológicas distintas. O mapeamento geológico regional da folha Dianópolis, em escala de 1:500 000, reconheceu 8 intrusões desse tipo, com tamanhos médios em torno de 10 km², os autores classificaram estas intrusões como pertencentes à Suíte Gameleira. Dentre elas, destaca-se uma intrusão com formato circular e tamanho aproximado de 72 km² que foi inicialmente denominada Complexo Máfico-Ultramáfico Barra do Gameleira (Correia Filho e Sá 1980).

Apesar do seu potencial para a exploração mineral, apenas uma pesquisa de viés prospectivo foi realizada na intrusão. A maioria dos estudos realizados na região tem como foco a prospecção de ouro associada às sequências metavulcanossedimentares. Em 2000, a CPRM publicou um estudo denominado “Geologia e resultados prospectivos da Área Barra do

Gameleira – Tocantins”, em que realizou mapeamento geológico, somada a análises de sedimento de corrente e concentrado de bateia, para fins prospectivos na intrusão. Em suma, os resultados foram satisfatórios, para os elementos paládio e ouro, por exemplo, foram coletadas amostras com resultados acima dos limites de detecção em todas as drenagens. Os elementos Ni-Cu-Cr também ocorrem de forma justaposta em várias drenagens e os autores sugerem que pesquisas de maior detalhe sejam feitas na intrusão, para melhor entendimento das possíveis mineralizações da intrusão.

Dessa maneira, essa pesquisa constitui um trabalho de continuidade em relação às pesquisas prospectivas pioneiras, idealizadas pela CPRM em 2000. Por meio da integração e correlação entre dados disponíveis em domínio público, com dados inéditos, essa pesquisa apresenta novos resultados prospectivos acerca da principal intrusão da Suíte Gameleira. Dados geofísicos, geoquímicos e geológicos foram integrados, com o objetivo de estudar com maior clareza, a origem da intrusão, o metamorfismo que atuou localmente/regionalmente e, principalmente, qual a relação dessas informações com a presença de mineralizações metálicas.

1.2 Contexto Geológico

Devido os capítulos 3 e 4 terem um detalhamento maior deste tópico, apenas um breve sumário e contextualização a respeito do conhecimento geológico regional da área de estudo será apresentado.

A área de estudo encontra-se na porção norte da Faixa Brasília, da Província Tocantins (Almeida, 1977), que é representada por conjuntos de rochas metassedimentares dobradas (e.g. Grupo Paranoá), arcos magmáticos (e.g. Arco Mara Rosa e Arco Arenópolis) e rochas associadas a formações de riftes devido a colisão de protocontinentes anteriores ao período neoproterozoico. A Faixa Brasília Norte foi subdividida em: Zona de Antepaís, Zona Externa, Zona Interna, Maciço de Goiás e Arco Mágmatco de Goiás (Fuck et al., 1994; Pimentel et al., 2000; Dardenne, 2000; Valeriano et al., 2008).

A Suíte Gameleira, está presente na Zona Externa, em que ocorrem terrenos paleoproterozoicos expostos, definidos como terrenos granito-greenstone por alguns autores (e.g. Cruz e Kuyumjian, 1998). Esses terrenos são interpretados como parte oeste do craton São Francisco (Dardenne, 2000; Martins-Ferreira et al., 2020, Saboia 2021) e são pertencentes ao Bloco Cavalcante-Natividade (Fuck et al., 2014). A área de estudo dessa pesquisa, encontra-se

no Terreno Almas-Conceição do Tocantins e, com o intuito de simplificar e unificar nomenclaturas, foi utilizado o termo “Terreno Almas” para essa pesquisa.

As rochas da Suíte Gameleira, são representadas por intrusões, por vezes alongadas na direção NNE-NE, e composta predominantemente por noritos, gabro-noritos e olivina gabro-noritos, que estão encaixadas tectonicamente ou intrudem com as demais unidades. A Intrusão Barra do Gameleira (IBG), consiste na mais significativa dentre elas, com formato arredondado, extensão aproximada de 8x9 km e apresenta estruturas de estratificação magmáticas preservadas, apesar de também possuir metamorfismo localmente em fácies anfibolito a granulito. Subordinadamente peridotitos, piroxenitos e serpentinitos foram mapeados na IBG.

1.3 Objetivos

O objetivo central dessa pesquisa é o mapeamento das assinaturas geofísicas, geoquímicas e geológicas, das mineralizações sulfetadas – pirrotita, pentlandita, calcopirita – na Intrusão Barra do Gameleira.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Elaborar modelo prospectivo de Ni-Cu (-Co-Au-PGE) para a Intrusão Barra do Gameleira
- Verificar quais métodos geofísicos apresentaram os melhores resultados na identificação de mineralizações conhecidas de Ni-Cu (-Co-Au-PGE) na IBG.
- Contribuir com o conhecimento prospectivo acerca das Intrusões Máficas-Ultramáficas pertencentes à Suíte Gameleira.
- Auxiliar no conhecimento prospectivo em rochas máficas-ultramáficas semelhantes as rochas da Suíte Gameleira.
- Reanalisar os dados aerogeofísicos com o intuito de elaborar novos produtos que correlacionem a geofísica às litologias com alto potencial de mineralização.
- Reanalisar os dados geoquímicos de sedimentos de corrente e concentrado de bateia, adquiridos pela CPRM, e verificar a correlação entre as zonas anômalas e as litologias fonte desses sedimentos anômalos;
- Analisar dados litogeoquímicos coletados pela Cooperbrito LTDA para fins de prospecção na IBG, e correlacioná-los com as anomalias de sedimentos de corrente (e concentrado de bateia) para identificação das fontes anômalas em Ni-Cu (Co-Au-PGE).

- Correlacionar os dados geofísicos e geoquímicos com as informações obtidas por meio do mapeamento geológico realizado na Intrusão Barra do Gameleira;
- Correlacionar os dados petrofísicos obtidos em laboratório, com os valores inferidos por meio da aerogeofísica;
- Definir alvos prospectivos na IBG;
- Aquisição de métodos geofísicos terrestres para caracterização do alvo sul (Rabo da Cascavel);
- Aquisição de dados geoquímicos de solo, na mesma malha da geofísica terrestre, para correlação de zonas com altas concentrações de Ni-Cu (-Co-Au-PGE) e anomalias geofísicas;
- Caracterização 3D do corpo mineralizado em função da integração de todas as informações obtidas anteriormente.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos.

O capítulo 1 introduz o tema por meio da contextualização da pesquisa e apresentação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O capítulo 2 contém a metodologia de todos os métodos utilizados nesta pesquisa. O capítulo foi subdividido em função de cada metodologia: magnética, radiométrica, elétrica, geoquímica e geológica.

O capítulo 3 apresenta o primeiro artigo elaborado durante a pesquisa, em que foram utilizados principalmente dados de domínio público para elaboração do modelo prospectivo da Intrusão Barra do Gameleira.

O capítulo 4 demonstra o segundo artigo elaborado durante a pesquisa, como um trabalho de continuidade do que foi feito no primeiro artigo. O capítulo contém o desenvolvimento das pesquisas geofísicas e geoquímicas realizadas em um alvo, determinado no primeiro artigo.

O capítulo 5 sintetiza todos os conhecimentos explorados e desenvolvidos durante a pesquisa, por meio das discussões e conclusões.

CAPÍTULO 2

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo será abordado o referencial teórico para os diferentes métodos utilizados nesta pesquisa. De forma simplificada, métodos geofísicos, geoquímicos e geológicos constituem objeto de interesse deste capítulo. Portanto, a geofísica está representada pela Magnetometria, Gamaespectrometria, Eletroresistividade e Polarização Induzida. As informações geoquímicas foram obtidas por meio do método analítico, e os métodos de mapeamento geológico foram utilizados para compreender a formação do IBG.

2.1 Equações de Maxwell

A primeira parte deste capítulo terá como foco a descrição das Equações de Maxwell, que definem o comportamento eletromagnético dos materiais. Essas equações desempenham um papel essencial na explicação dos fenômenos observados nos métodos elétricos e magnéticos.

Até a descoberta das equações de Maxwell, acreditou-se que os efeitos elétricos e magnéticos eram distintos e independentes. Ao final do século XIX, o cientista James Clerk Maxwell, ao adicionar alguns elementos, conseguiu relacionar as leis teóricas do magnetismo e da eletricidade, elaborando as Equações de Maxwell. Adiante, serão apresentadas as equações para campos macroscópicos, em que, $\mathbf{D}$ representa o deslocamento dielétrico (C/m^2), $\mathbf{H}$ o Campo Magnético (A/m), ρ_f a Densidade Volumétrica de Carga elétrica (C/m^3), $\mathbf{J}$ o vetor Densidade de Corrente Elétrica (A/m^2), $\mathbf{B}$ o vetor Indução Magnética (T ou W/m^2) e $\mathbf{E}$ o vetor Campo Elétrico (V/m). (Rijo, 1977):

$$\iint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot \hat{n} dS = \iiint_V \rho_f dV \quad \text{Lei de Coulomb (Equação 2.1.1)}$$

$$\int_{\partial S} \mathbf{H} \cdot \hat{t} dl - \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot \hat{n} dS = \iint_S \mathbf{J} \cdot \hat{n} dS \quad \text{Lei de Ampère (Equação 2.1.2)}$$

$$\iint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot \hat{n} dS = 0 \quad \text{Lei de Gauss (Equação 2.1.3)}$$

$$\int_{\partial S} \mathbf{E} \cdot \hat{t} dl + \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot \hat{n} dS = 0 \quad \text{Lei de Faraday (Equação 2.1.4)}$$

A partir da introdução do operador diferencial, pode-se obter os operadores rotacional e divergente. Seja uma função F qualquer, o divergente de F é representado pelo operador $\nabla \cdot F$, e o rotacional como $\nabla \times F$.

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \quad \frac{\partial}{\partial y}, \quad \frac{\partial}{\partial z} \right) = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x}, \quad \hat{j} \frac{\partial}{\partial y}, \quad \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{Equação 2.1.5})$$

Aplicando o divergente as equações 2.1.1 e 2.1.3, e o rotacional as equações 2.1.2 e 2.1.4, obtemos as equações de Maxwell em sua forma diferencial:

$$\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{D} dV = \iiint_V \rho_f dV \quad (\text{Equação 2.1.6})$$

$$\iint_S \nabla \times \mathbf{H} \cdot \hat{n} dS - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{D} \cdot \hat{n} dS = \iint_S \mathbf{J} \cdot \hat{n} dS \quad (\text{Equação 2.1.7})$$

$$\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{B} \cdot \hat{n} dV = 0 \quad (\text{Equação 2.1.8})$$

$$\iint_S \nabla \times \mathbf{E} \cdot \hat{n} dS + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot \hat{n} dS = 0 \quad (\text{Equação 2.1.9})$$

Por simetria, as integrais triplas das equações 2.1.6 e 2.1.8 podem ser canceladas, assim como as integrais de superfície das equações 2.1.7 e 2.1.9. Após essa simplificação, podemos transferir o termo correspondente ao deslocamento dielétrico ($\mathbf{D}$) para o outro lado da igualdade na equação 2.1.7, e transferir o termo contendo o vetor indução magnética para o outro lado da igualdade na equação 2.1.9. Dessa forma, chegamos às equações de Maxwell em sua forma mais amplamente reconhecida:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad (\text{Equação 2.1.10})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Equação 2.1.11})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Equação 2.1.12})$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Equação 2.1.13})$$

Destacam-se as equações 2.1.11 e 2.1.13, Leis de Ampère e Faraday-Newman-Lenz, respectivamente. Estas leis descrevem os efeitos eletromagnéticos observados em quaisquer aplicações da geofísica de exploração (Pinto, 2019).

A equação 2.1.11 expressa a relação entre campos magnéticos e fluxos de correntes elétricas. A lei afirma que os campos magnéticos são gerados por meio desse fluxo elétrico, que pode ser de dois tipos: ôhmico, ou faradaico, em que as cargas fluem livremente por um meio sem obstáculos ($\mathbf{J}$); ou por meio de correntes de deslocamento (dielétrico), causadas por desequilíbrios nas forças eletrostáticas que agem sobre as partículas, em que a propagação do fluxo ocorre indiretamente ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$).

A equação 2.1.13 representa a relação entre campos elétricos e campos de indução magnética, que variam no tempo. Em resumo, essa lei estabelece que um campo de indução magnética que varia ao longo do tempo resulta em um campo elétrico, sendo a reciprocidade um aspecto fundamental dessa relação.

2.1.1 Relações Empíricas das Equações de Maxwell

A geofísica mapeia os contrastes nas propriedades físicas dos materiais. É importante notar que as equações apresentadas anteriormente não demonstram a relação dos campos vetoriais com suas respectivas propriedades físicas. Para incorporar essas propriedades aos estudos, foram introduzidas relações empíricas, as quais serão exploradas em detalhes adiante.

1. Condutividade Elétrica (σ): a relação constitutiva que possui a condutividade elétrica como constante de proporcionalidade é a **Lei de Ohm** (equação 3.1.14). Ela relaciona a densidade de corrente elétrica ($\mathbf{J}$) à intensidade do campo elétrico ($\mathbf{E}$), sendo a condutividade a constante de proporcionalidade entre estes campos.

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (\text{Equação 2.1.14})$$

De acordo com Keller et al. (1988), a condutividade elétrica é a capacidade de um determinado material de conduzir correntes elétricas, e sua unidade de medida é S/m. Sumner (1976) complementa, que em meios isotrópicos com correntes contínuas, o inverso da condutividade é conhecido como resistividade (ρ) e sua unidade de medida é $\Omega.m$.

2. Permissividade Dielétrica (ϵ): constante que relaciona a intensidade do campo elétrico ($\mathbf{E}$) ao deslocamento dielétrico ($\mathbf{D}$) (eq 2.1.15).

$$\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E} \text{ (Equação 2.1.15)}$$

O deslocamento dielétrico é causado pela movimentação de elétrons e moléculas polares de suas posições de equilíbrio, para posições não-neutras como resposta a aplicação de um campo elétrico. As cargas se afastam até que a força Coulombiana entre elas se equilibrem com as do campo elétrico aplicado. O efeito é conhecido como polarização de dielétrica, no qual gera uma corrente, denominada corrente de deslocamento dielétrico ($\mathbf{D}$) (Telford et al., 1990). A unidade medida da permissividade dielétrica é F/m .

3. Permeabilidade Magnética (μ): a última das relações empíricas, associa a intensidade das induções magnéticas ($\mathbf{B}$) à dos campos magnéticos ($\mathbf{H}$) (equação 2.1.16).

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \text{ (Equação 2.1.16)}$$

A permeabilidade magnética é fundamental nos métodos magnéticos e desempenha um importante papel nos métodos eletromagnéticos de indução. Suas unidades são expressas em N/A^2 . Finalmente, as equações de Maxwell podem ser reescritas com base nas relações empíricas apresentadas.

$$\nabla \cdot (\epsilon \cdot \mathbf{E}) = \rho_f \text{ (Equação 2.1.17)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma \cdot \mathbf{E}) + \frac{\partial(\epsilon \cdot \mathbf{E})}{\partial t} \text{ (Equação 2.1.18)}$$

$$\nabla \cdot (\mu \cdot \mathbf{H}) = 0 \text{ (Equação 2.1.19)}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial(\mu \cdot \mathbf{H})}{\partial t} \text{ (Equação 2.1.20)}$$

2.2 Magnetometria

A magnetometria é um dos métodos mais antigos aplicados a geofísica, e tem como base a Lei de Ampère (equações 2.1.2, 2.1.7 e 2.1.11), que relaciona a geração de um campo magnético ($\mathbf{H}$) através dos fluxos de correntes elétricas: ôhmicas ($\mathbf{J}$) ou de deslocamento ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$).

O método possui uma longa história na exploração mineral. De acordo com Sharma (1987), os chineses foram os primeiros a utilizar as propriedades magnéticas direcionais de uma “lodestone” (rocha rica em magnetita), séculos antes de Cristo. Apesar do uso pioneiro ser muito antigo, o autor complementa que a ideia do sistema geodínamo – a Terra atuando como um grande imã – fora introduzido muitos anos depois.

O provável primeiro instrumento utilizado para prospecções magnéticas foi um compasso marinho adaptado pela Swedish Mine-compass em 1770. Em 1870, com a invenção do magnetômetro Thalén-Tiberg para usos prospectivos, o método se estabeleceu como uma ferramenta de prospecção (Sharma 1987).

Dentre os diversos métodos geofísicos, o magnético se destaca pela simplicidade e baixo custo de aquisição, além da ampla aplicabilidade, seja para localização de zonas mineralizadas, ou estruturas geológicas associadas à depósitos, na compreensão do arcabouço geotectônico regional e até mesmo na identificação de estruturas metálicas enterradas (Sharma 1987; Telford, 1990; Hinze et al., 2013; Dentith e Mudge, 2014).

De acordo com a Lei de Ampère, o campo geomagnético é criado devido às movimentações convectivas que ocorrem no núcleo externo da Terra, que geram fluxos de corrente elétrica (Hinze et al., 2013). O autor complementa que essas correntes contribuem em cerca de 98% ou mais do campo geomagnético, sendo o restante proveniente da interação com fluxos de plasma das explosões solares.

Dentith e Mudge (2014) simplificam que 90% do campo geomagnético pode ser representado como um campo gerado por um hipotético imã em formato de uma barra comprida no centro da Terra, cujas extremidades coincidem com os polos magnéticos deste imã. Um

importante detalhe a se observar é que os polos magnéticos e geográficos não coincidem. (Figura 2.2.1a).

Por consequência, o vetor de indução magnética terá sua intensidade, direção e sentido, definidos pela sua posição no globo, principalmente em função de sua latitude. Dessa maneira, são introduzidos os conceitos de inclinação e declinação magnética, os quais definem a direção do vetor campo geomagnético. A declinação magnética consiste no ângulo formado entre os nortes magnético e geográfico, enquanto a inclinação magnética é o ângulo entre o vetor do campo geomagnético e o norte magnético (Figura 2.2.1b)

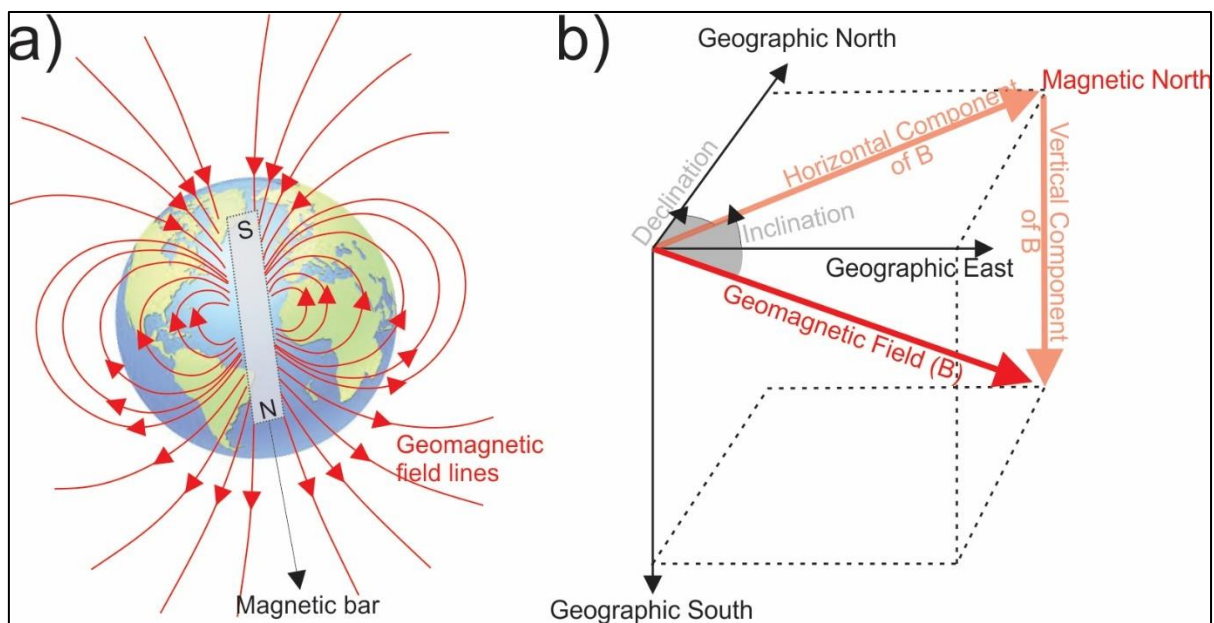


Figura 2.2.1: (a) Representação do campo geomagnético, simplificado por um dipolo magnético localizado no centro do planeta. (b) Ilustração esquemática do vetor de campo geomagnético e seus ângulos de inclinação e declinação (Adaptado de Dentith e Mudge, 2014).

Isto posto, é fundamental compreender a composição vetorial entre o vetor indução e campo magnético em diferentes latitudes, pois pode alterar a intensidade do vetor de indução. A Figura 2.2.2 ilustra como a intensidade de magnetização de uma fonte esférica varia em função de sua posição global.

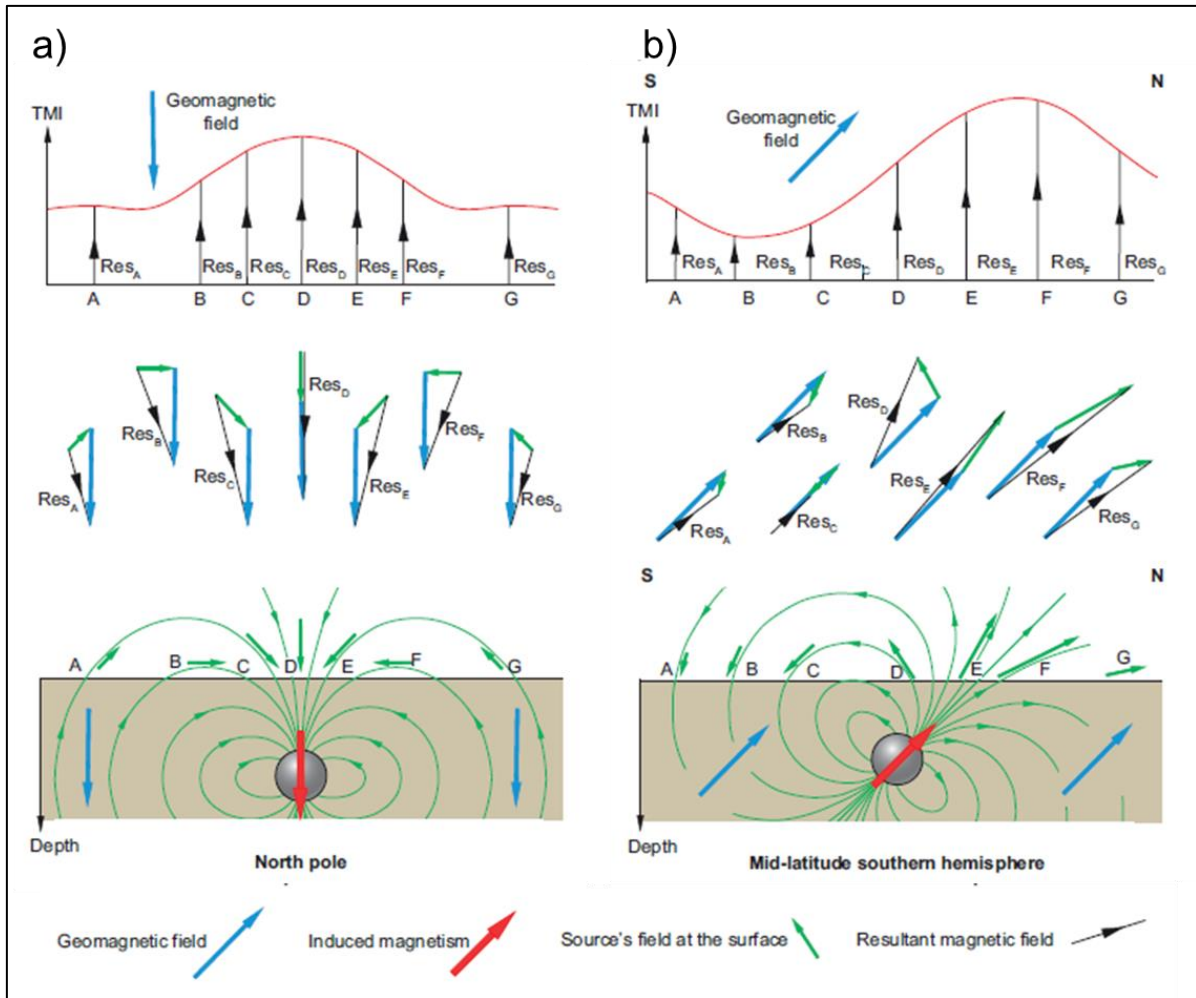


Figura 2.2.2: Ilustrações esquemáticas do perfil da intensidade de magnetização, para um corpo magnético esférico, em diferentes latitudes. Em a) observa-se o resultado obtido nos polos (latitude igual a 90°) em b) observa-se o resultado obtido em médias latitudes (latitude variando próxima à 45°). (Retirado de Dentith e Mudge, 2014).

Verifica-se que em médias latitudes a fonte apresenta um resultado dipolar, isto é, devido a soma dos vetores de indução magnética e do campo geomagnético, a fonte apresenta um polo positivo orientado para o Equador – ou seja, no hemisfério sul, o polo positivo aponta para o norte, enquanto no hemisfério norte, o polo positivo está direcionado para sul.

2.2.1 Efeito de Magnetização

Os diferentes materiais que estão submetidos ao campo geomagnético estão sujeitos a criar uma magnetização (Reeves, 2005), que terá como constante de proporcionalidade a suscetibilidade magnética. Ou seja, quanto maior a suscetibilidade de um determinado material, maior será sua magnetização na presença de um mesmo campo magnético.

$$\mathbf{M} = k \cdot \mathbf{H} \quad (\text{Equação 2.2.1})$$

Utilizando a equação 2.1.16 para substituir o campo magnético ($\mathbf{H}$) e considerando que o campo magnético da Terra possui baixa intensidade, pode-se considerar a permeabilidade magnética sendo a do vácuo (μ_0) e reescrever a equação 2.2.1 da seguinte forma:

$$\mathbf{M} = k \cdot \frac{\mu_0}{\mathbf{B}} \quad (\text{Equação 2.2.2})$$

Portanto, a suscetibilidade magnética define a intensidade de magnetização dos diferentes materiais e pode ser calculada pela equação 2.2.3

$$k = \mathbf{M} \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad (\text{Equação 2.2.3})$$

Além disso, a suscetibilidade magnética depende da permeabilidade magnética daquele material (equação 2.2.4)

$$k = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \quad (\text{Equação 2.2.4})$$

Pode-se considerar que a permeabilidade magnética é a propriedade análoga à condutividade elétrica (σ) e determina a facilidade que um material possua campo magnético em seu interior. Zhdanov e Keller (1994) afirmam que para a maioria dos minerais não magnéticos $\mu \approx \mu_0$, e a razão μ/μ_0 , também conhecida como permeabilidade relativa (μ_r) é aproximadamente igual a um.

Em síntese, é possível afirmar que a magnetometria é o método geofísico que estuda as variações de intensidade magnética em superfície, causadas pelo contraste de suscetibilidade magnética em subsuperfície. O método parte da premissa de que diferentes materiais, submetidos à um mesmo campo magnético, apresentam intensidades de magnetização diferentes.

2.2.2 Propriedades magnéticas das rochas

De acordo com suas características magnéticas, os materiais podem ser classificados em três classes magnéticas: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (Dentith e Mudge, 2014).

Os minerais diamagnéticos possuem uma suscetibilidade de baixa intensidade e negativa – o que gera magnetismo contrário ao campo induzido – na ordem de 10^{-5} SI. Exemplos comuns destes minerais são o quartzo, a calcita e os feldspatos, além de uma grande diversidade de argilas que apresentam comportamento diamagnético (Butler, 1992; Dentith e Mudge 2014).

Minerais paramagnéticos apresentam suscetibilidade fraca e positiva, contudo, de uma ordem maior que os diamagnéticos (em torno de 10^{-3} SI). Estes minerais são caracterizados principalmente pela presença de ferro, como olivina, piroxênios, anfibólios e alguns exemplares economicamente importantes como a pirita e calcopirita. (Hinze et al., 2013)

Em suma, os minerais ferromagnéticos são divididos em três classes: ferromagnético sensu lato, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. Os materiais ferromagnéticos são aqueles em que todos os spins estão alinhados em uma única direção, fazendo com que este possua alta suscetibilidade magnética (positiva), um exemplo são as ligas metálicas produzidas de forma sintética em laboratórios. Os minerais ferrimagnéticos são os correspondentes geológicos dos ferromagnéticos, uma vez que ocorrem no meio geológico de forma natural, minerais como a magnetita, pirrotita (monoclínica), maghemita e ilmenita são exemplares desta classe. Os minerais antiferromagnéticos são representados por uma baixa suscetibilidade positiva (similar aos paramagnéticos) e seu exemplo mais comum é a hematita (Butler, 1992; Hinze et al., 2013; Dentith e Mudge, 2014).

Para uma compreensão mais aprofundada e detalhada acerca do magnetismo das rochas, recomenda-se a bibliografia elaborada por Dunlop e Ozdemir (1997), em que os autores desenvolveram um livro dedicado ao entendimento do magnetismo das rochas em função dos diferentes contextos de formação das mesmas.

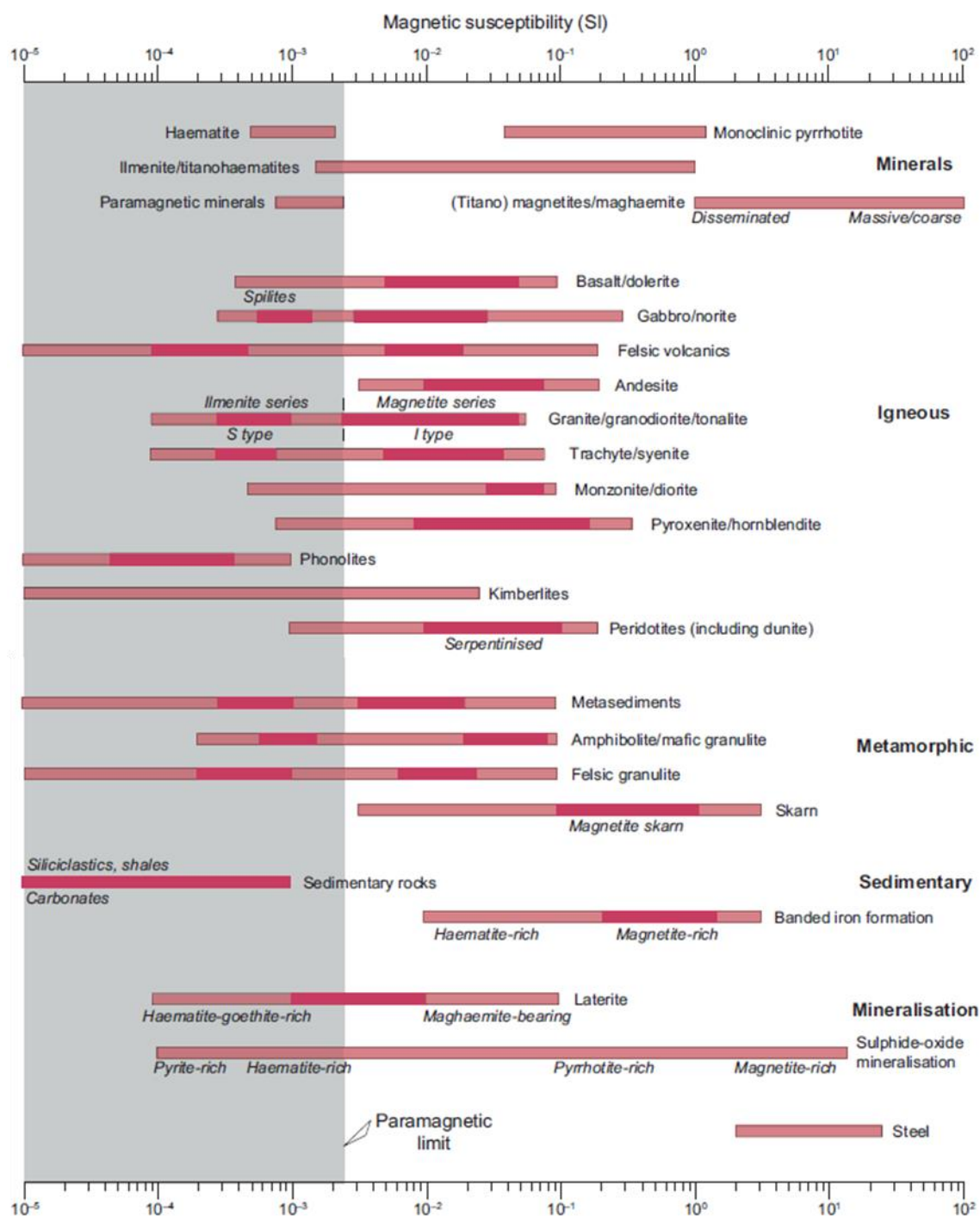


Figura 2.2.2.1: Tabela com as variações de suscetibilidade magnética, para diferentes rochas e minerais (Retirado de Dentith e Mudge, 2014).

2.3 Gamaespectrometria

O método gamaespectrométrico, também conhecido como radiométrico, consiste na medição das radiações que ocorrem naturalmente em forma de raios gama. O método

radiométrico é um método passivo, uma vez que mede uma fonte elétrica energética natural (Dentith e Mudge, 2014).

A descoberta da radioatividade foi em 1896, pelo cientista francês Antoine-Henri Becquerel. Ao realizar experimentos para estudar o fenômeno da fosforescência natural das substâncias, Becquerel utilizou amostras com urânio e observou que as emissões radioativas aconteciam de maneira espontânea. Posteriormente, os cientistas Pierre Curie e Marie Curie desenvolveram significativas descobertas acerca do fenômeno físico da radioatividade (Blaufox, 1996).

Os materiais radioativos, também chamados de radioisótopos, possuem uma instabilidade atômica e, em busca de equilíbrio e estabilidade, passam por transformações para se tornarem outros radioisótopos. Durante esse processo, há a emissão de energia na forma de radiação. Esta radiação pode ser de três naturezas distintas: alfa, beta e gama. Esta última, se destaca em relação as outras por duas principais características: maior profundidade de penetração e maior energia liberada durante decaimento (Dentith e Mudge, 2014).

Os materiais geológicos possuem isótopos radioativos que decaem e produzem raios gama na superfície terrestre (Wilford e Minty, 2007). De acordo com Minty (1997), os elementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th) possuem maior pico de energia durante o decaimento radioativo (Figura 2.3.1). É importante ressaltar que a maior parte da radiação gama na superfície terrestre é proveniente do decaimento desses três elementos: K, U e Th.

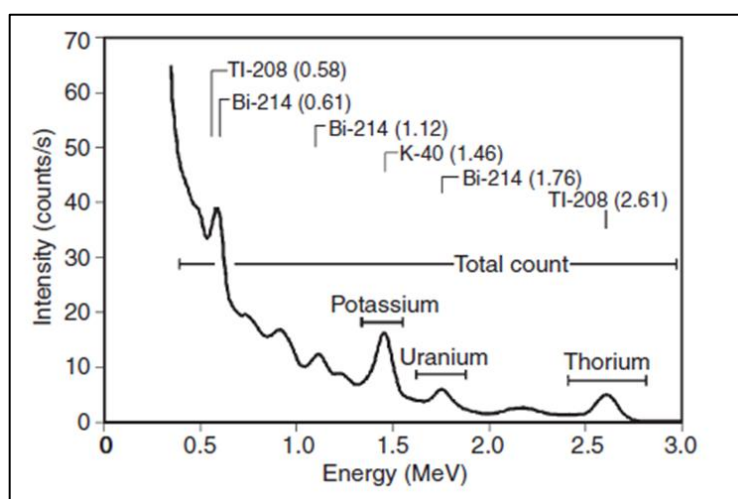


Figura 2.3.1: Gráfico da intensidade de contagem, em função da energia de radiação. (Retirado de Wilford e Minty, 1997).

Devido à natureza dos raios gama, a radiação emitida refere-se apenas aos materiais presentes até 30 centímetros de profundidade em relação a superfície. Por isso, os dados radiométricos, diferentemente dos dados magnéticos, apresentam variações mais significativas por conta das condições climáticas que o ambiente geológico está exposto (Gunn et al., 1997).

Dickson e Scott (1997) enfatizam que, embora a gamaespectrometria meça a variação da radiação gama dos elementos potássio, tório e urânio, essas variações estão diretamente correlacionadas às alterações geoquímicas desses radioelementos nos ambientes geológicos. Os autores afirmam que, em decorrência da grande variação do teor de radioelementos nessa pequena camada de 30 centímetros, o método possui eficácia no mapeamento de litologias, e complementam que as pequenas alterações dentro das unidades podem ser causadas por menores modificações litológicas, intemperismo ou eventos mineralizantes.

O potássio é o elemento mais comum na composição das rochas, apresentando valores médios de teor de 2.3% na crosta terrestre. Por outro lado, os elementos urânio e tório são menos abundantes na crosta terrestre, com uma distribuição média de 3 e 12 ppm, respectivamente. De maneira simplificada, observa-se uma tendência de aumento do teor de radioelementos das rochas básicas para as rochas ácidas (Wilford e Minty, 2007). A Figura 2.3.2 contém uma tabela com a variação do teor de radioelementos nos principais materiais geológicos.

<i>Rock type</i>	<i>Rock</i>			<i>Soil</i>		
	<i>K</i> %	<i>U</i> ppm	<i>Th</i> ppm	<i>K</i> %	<i>U</i> ppm	<i>Th</i> ppm
Intrusives						
granitoids	0.3–4.5 (2.4)	0.4–7.8 (3.3)	2.3–45 (16)	0.4–3.9 (2.1)	0.5–7.8 (2.7)	2–37 (13)
gneissic rock	2.4–3.8 (2.4)	2.1–3.6 (2.5)	18–55 (15)	0.7–1.9 (1.3)	1.6–3.8 (2.2)	6–19 (12)
pegmatite	2.6–5.5 (3.7)	0.3–1 (0.7)	0.3–9.6 (2)			
aplites	0.6–4 (2.4)	1–8 (3.3)	3–20 (7)			
quartz-feldspar porphyry	1–5 (2.9)	1.3–2.9 (1.7)	6–14 (13)			
intermediate intrusives	0.7–5.6 (2.7)	0.1–1.2 (0.8)	0.8–6.1 (2.4)	0.7–3.4 (1.6)	1.5–2.3 (1.9)	2.9–8.4 (5.6)
mafic intrusives	0.1–0.8 (0.4)	0.0–1.1 (0.3)	0.0–3.1 (1.2)			
Extrusives						
felsic volcanics	2.0–4.4 (3.7)	1.4–13 (2.4)	13–28 (17)	1.8–3.2 (2.4)	1.3–2.4 (2.1)	10–18 (13)
intermediate volcanics	1.8–4.1 (2.7)	0.9–5.6 (2.3)	1.5–15 (9)	1.0–2.7 (1.9)	1.2–3.6 (2.1)	4–17 (10)
low-K andesites	0.7–0.9 (0.8)	1.0–2.5 (1.6)	3–8 (5)	0.8–1.5 (1.1)	1.2–1.5 (1.3)	4–6 (5)
mafic volcanics	0.3–1.3 (0.9)	0.3–1.3 (0.7)	2.0–5.0 (3.0)	0.2–1.4 (0.7)	0.6–2.5 (1.6)	3.3–13 (7.9)
ultramafic volcanics	0.2–0.9 (0.4)	0.3–0.9 (0.6)	0.0–4.0 (1.2)	0.6	2.0	6
Sedimentary rocks						
Archaean shales	0.4–1.6 (0.9)	0.3–1.3 (0.9)	1–5 (2.7)	0.8	1.2	3
other shales	0.1–4.0 (2.6)	1.6–3.8 (2.6)	10–55 (19)	0.7–3.0 (1.5)	1.2–5 (2.3)	6–19 (13)
arenites	0.0–5.5 (1.8)	0.7–5.1 (2.3)	4–22 (12)	0.1–2.4 (1.3)	1.2–4.4 (2.1)	7–18 (11)
carbonates	0.0–0.5 (0.2)	0.4–2.9 (1.6)	0–2.9 (1.4)			

Figura 2.3.2: Tabela com faixas dos teores de K, U e Th nas principais rochas presentes na crosta terrestre e, nos solos residuais gerados a partir destas (Retirado de Dickson e Scott, 1997).

2.4 Métodos Elétricos

Os métodos elétricos estudam as variações de propriedades elétricas dos materiais, por meio da relação entre o fluxo de corrente em subsuperfície e o potencial elétrico medido em superfície. Incluem os métodos elétricos, o Potencial Espontâneo (SP do inglês *self-potential*), a Eletrorresistividade (ER), a Polarização Induzida (IP do inglês *induced polarisation*) e o Potencial Aplicado (AP do inglês *applied potential*) (Dentith e Mudge, 2014).

Para essa pesquisa, foram utilizados os métodos da Eletrorresistividade e IP, no qual são obtidos os parâmetros de resistividade e cargabilidade do meio, respectivamente.

2.4.1 Condução elétrica nas rochas

Devido os métodos elétricos partirem do princípio de que as variações nas propriedades elétricas alteram o fluxo de corrente em subsuperfície, compreender como ocorre a condução

elétrica nas rochas é fundamental. Existem três principais maneiras que os materiais conduzem corrente: iônica (ou eletrolítica), eletrônica e dielétrica.

A condução iônica é a mais comum nas rochas e consiste no movimento ordenado de íons em um eletrólito, causados pela aplicação de um campo elétrico externo. Normalmente, essa condução ocorre nas rochas através dos poros e entre os grãos minerais (Keller e Frischknecht, 1966; Ward e Fraser, 1967).

A condução eletrônica consiste na movimentação ordenada dos elétrons de valência entre os átomos, devido à aplicação de um campo elétrico externo. Comumente, essa condução acontece em materiais com estrutura homogênea e grande quantidade de elétrons livres (Ward e Fraser, 1967).

A condução dielétrica é causada pelas correntes de deslocamento dielétrico, devido à movimentação de partículas polares, em consequência de um campo elétrico aplicado. As cargas se distanciam até que as forças se equilibrem em relação a este campo elétrico aplicado (Keller, 1988). Esse efeito também é conhecido como polarização dielétrica (Telford et al., 1990).

Portanto, as variações composicionais das rochas, a concentração de íons presentes nos fluidos e o formato dos espaços intergranulares, serão os principais fatores que alterarão o fluxo de corrente elétrica nas rochas. Pinto (2019) sumariza alguns dos principais fatores que influenciam na condução elétrica dos materiais geológicos:

1. Permo-porosidade: morfologia do espaço entre grãos, como tamanho, formato e conectividade dos poros;
2. Volume de água presente nos poros;
3. Concentração de Sólidos Totais Dissolvidos na água (STD), devido a adição de íons na água;
4. Temperatura e estado físico da água nos poros;
5. Concentração e composição de coloides.

2.4.2 Eletorresistividade

A eletorresistividade é um método geofísico que estuda a variação de resistividade dos materiais a partir da injeção de correntes artificiais no solo e a medição da variação de potencial

em diferentes posições. As variações composicionais, a presença de fluidos, a concentração de íons e a morfologia dos poros alteram a resistividade do meio, e dessa forma o método correlaciona essas variações às resistividades dos materiais (Telford et al., 1990).

Os desenvolvimentos pioneiros se devem aos trabalhos elaborados pelos pesquisadores Conrad Schlumberger e Frank Wenner no início do século XX. Schlumberger teve importância no desenvolvimento do método Direct-Current Equipotential, conhecido atualmente como eletrorresistividade, enquanto Wenner introduziu o conceito de resistividade aparente (Ward, 1980).

Apesar dos primeiros estudos datarem do início de 1900, foi apenas na década de 1970 que o método começou a ser amplamente utilizado, principalmente devido ao desenvolvimento computacional para processar e analisar dados. Desde então, o método tem sido aplicado na procura de água subterrânea e no monitoramento de poluição de lençóis freáticos, em levantamentos de engenharia para localizar estruturas geológicas, em estudos arqueológicos e na exploração mineral (Reynolds, 2011).

Nos dias atuais, a eletrorresistividade se apresenta como um método eficiente e amplamente aplicável, no qual podem ser adquiridas informações 1D, 2D e 3D a baixos custos, e que possuem boa correlação com a estruturação em subsuperfície. Esse fato se deve ao intenso desenvolvimento das instrumentações para medição das diferenças de potencial, à invenção dos algoritmos de inversão, além de outros significativos avanços na área de geociências, principalmente no ramo de georreferenciamento e sistemas de informações geográficas (Pinto, 2019).

A obtenção da resistividade aparente dos materiais se inicia pela Lei de Ohm (em sua forma alterada na equação 2.4.2.1), que relaciona a diferença de potencial (ΔV) causada pela injeção de uma corrente elétrica (I) em um meio que apresenta uma resistência (R).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 2.4.2.1})$$

Contudo, a resistência elétrica é uma propriedade que depende da geometria do meio e define a capacidade de um material se opor à condução eletrônica. Já a resistividade elétrica representa a capacidade de um determinado material conduzir corrente, independentemente de sua forma geométrica. Um exemplo da diferença entre essas propriedades é o fio de cobre: um

exemplar de diâmetro igual a 3 milímetros apresentará maior resistência do que um de 6 milímetros, mas a resistividade do cobre que compõe os fios será a mesma.

Portanto, para estudar a capacidade dos materiais de se opor à condução eletrônica em subsuperfície, é necessário obter a resistividade aparente (ρ). Para isso, faz-se necessário calcular o fator geométrico (k), que será dependente da posição dos eletrodos que injetam corrente e dos que medem o potencial elétrico. Essa geometria entre os eletrodos é denominada arranjo elétrico, que será abordado ao fim desse subcapítulo.

Finalmente, a resistividade aparente (ρ) pode ser definida pela equação 2.4.2.2.

$$\rho = k \cdot R \quad (\text{Equação 2.4.2.2})$$

Por meio da resistividade aparente obtida e a ampla distribuição desta propriedade, o método pode correlacionar essas variações à presença de determinados materiais geológicos. Loke (2000), exemplifica que a resistividade do solo está relacionada com diversos parâmetros geológicos, tais como a composição mineral, conteúdo de fluido, porosidade, salinidade, temperatura, conteúdo de colóides e o grau de saturação de água na rocha.

Dentith e Mudge (2014) elaboraram uma tabela com a variação de resistividade observada nas principais formações rochosas e minerais (Figura 2.4.2.1)

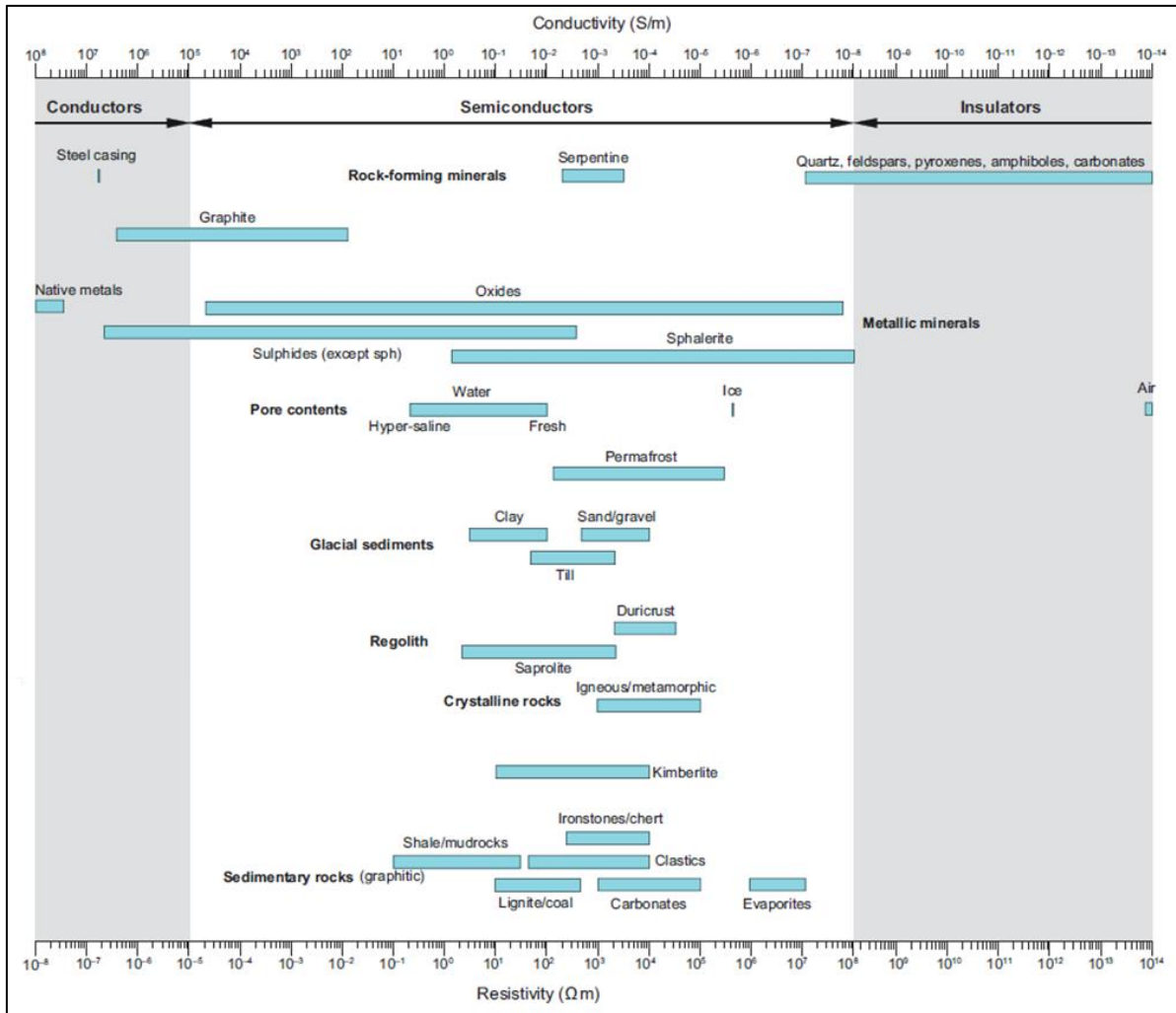


Figura 2.4.2.1: Tabela com faixas de resistividade/condutividade das principais rochas e minerais encontrados na crosta terrestre.

2.4.3 Polarização Induzida

A Polarização Induzida é um método geofísico que estuda a capacidade dos materiais de armazenar potencial elétrico, ou seja, de se comportarem como capacitores elétricos. O método tem como princípio a injeção de correntes artificiais através de dois eletrodos metálicos e a medição das diferenças de potencial em um par de eletrodos não metálicos (não polarizáveis) (Reynolds, 2011).

O primeiro pesquisador a observar o fenômeno da polarização induzida foi o cientista francês Conrad Schlumberger, na década de 1920 (Madden e Cantwell, 1967; Sumner, 1976; Olhoeft, 1984; Collet, 1990; Seigel et al., 2007). Schlumberger percebeu que ao interromper um fluxo de corrente elétrica, o potencial não era interrompido de forma abrupta e apresentava

um decaimento gradual na diferença de potencial. O assunto permaneceu sem avanços por um tempo, até a Segunda Guerra Mundial, quando a Marinha Americana utilizou o fenômeno para localizar minas submarinas (Collet, 1990; Seigel et al., 2007; Zhdanov et al., 2018).

A área de estudo ganhou significância apenas quando o estudioso David Bleil apresentou seus estudos nos quais correlacionava os decaimentos de potencial elétrico a zonas com presença de sulfetos metálicos, e denominou o efeito observado de Polarização Induzida. O pesquisador teve relevante importância no desenvolvimento do método, pois demonstrou seu potencial aplicado à localização de sulfetos metálicos, o que fez com que a indústria investisse significativamente e o tornasse um método consolidado na área de prospecção mineral (Madden e Cantwell, 1967; Collet, 1990).

Para compreender o fenômeno da polarização induzida, é necessário entender quais são os tipos de polarização que podem ocorrer nos materiais. De acordo com Revil e Florsch (2010) e Kemma et al. (2012), atualmente são identificados cinco tipos de polarização: polarização de eletrodo, polarização de membrana, polarização da camada difusa, polarização da camada de Stern e polarização de Maxwell-Wagner. Devido à polarização de membrana e à polarização de eletrodo serem as mais comuns e significativas para os levantamentos de IP, as demais não serão descritas a seguir.

A polarização de membrana ocorre devido à constrição de um canal do poro e à presença de argilas ou filamentos fibrosos, que se comportam como uma rede de cargas negativas. Já a polarização de eletrodo ocorre pela separação das cargas causadas pela presença de metais em soluções iônicas (Marshall e Madden, 1959; Sumner, 1976; Olhoeft, 1985; Ward, 1988; Lima e Sharma, 1992; Revil et al., 2014).

Atualmente, existem quatro sistemas de medidas de polarização induzida (Reynolds, 2011):

1. Domínio do tempo ou pulso transiente: são realizadas medidas do potencial elétrico após a interrupção da corrente, em função do tempo;
2. Domínio da frequência: são feitas medidas de resistividade aparente em duas ou mais frequências, com diferença menor do que 10 Hz (Patella e Schiavonne, 1977);
3. Domínio da fase: estuda o atraso de fase entre a corrente aplicada e a voltagem medida nos eletrodos potenciais.

4. IP espectral: realiza medidas de fase e amplitude com taxas de amostragem no intervalo de 10^{-3} a 4×10^3 Hz.

Nessa pesquisa, foi utilizado o sistema de Polarização Induzida no domínio do tempo. A aquisição dos dados é realizada por meio de leituras consecutivas da voltagem após a interrupção abrupta da corrente. Com os dados de voltagem em função do tempo, é possível plotar uma curva de decaimento e calcular a área abaixo da curva, que representa a cargabilidade (Figura 3).

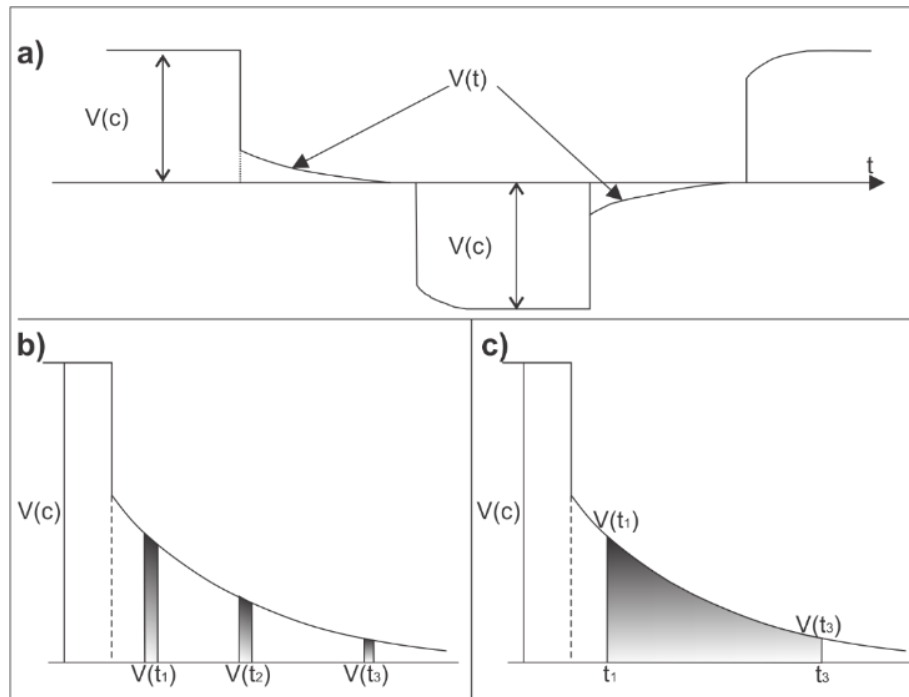


Figura 2.4.3.1: a) Comparação entre a tensão constante quando há fluxo de corrente (V_c) e $V(t)$ voltagem residual medida no instante t ; b) e c) Integral de $V(t)$ ao longo do tempo (Adaptado de Telford et al., 1990).

A equação 2.4.3.1 demonstra o cálculo para obtenção da cargabilidade (M) no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 durante o decaimento da voltagem $V(T)$. Nesta equação, V_c representa a voltagem constante quando há fluxo de corrente.

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(T) dt \quad \text{Equação (2.4.3.1)}$$

Diversos estudos demonstram uma discrepância em relação a análise quantitativa de cargabilidade. Devido essa discordância, não foi inserida uma tabela com a variação dos valores de cargabilidade para as principais rochas e minerais presentes na crosta.

2.4.4 Técnica de Aquisição e Arranjos

Os métodos elétricos da eletrorresistividade e polarização induzida podem ser obtidos por meio de diferentes técnicas de aquisição, que podem ser classificadas de forma simplificada em 1D, 2D e 3D. A técnica de aquisição 1D é representada pela sondagem elétrica vertical (SEV), na qual apenas 4 eletrodos são utilizados para obter a variação de resistividade em função da profundidade em um único ponto. A técnica do caminhamento elétrico é utilizada para aquisição em duas dimensões, sendo empregados vários eletrodos ao longo de uma linha para obter as variações de resistividade em relação à distância e à profundidade. Por fim, as técnicas 3D envolvem a realização de leituras simultâneas em uma malha regular, abrangendo as três dimensões, não se limitando a uma única linha, permitindo a caracterização do fluxo de corrente elétrica de forma mais abrangente.

Nessa pesquisa, a aquisição de dados de eletrorresistividade e polarização induzida foi realizada por meio da técnica do caminhamento elétrico, que consiste na medição da resistividade ao longo de uma linha (Figura 2.4.4.1). Além disso, foram adquiridos dois diferentes arranjos eletródicos durante a pesquisa: polo-dipolo (PD) e dipolo-dipolo (DD) (Figura 2.4.4.2).

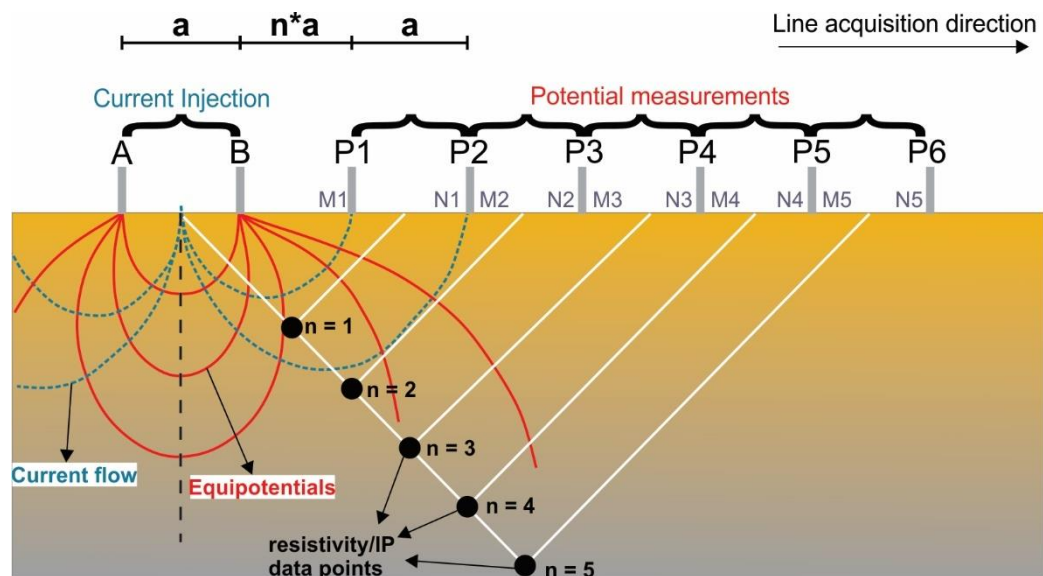


Figura 2.4.4.1: Ilustração esquemática da técnica de aquisição do caminhamento elétrico, utilizando o arranjo eletródico dipolo-dipolo.

Para o arranjo PD, os eletrodos de corrente A e B estão distantes a uma distância maior que o último nível investigado, multiplicado pelo espaçamento entre os eletrodos M e N. Dessa forma, considera-se a distância entre os eletrodos de corrente como uma distância "infinita" e o eletrodo A fica fixo ao longo de todo o levantamento. Os eletrodos M e N medem o potencial elétrico ao longo da linha, e a profundidade de investigação aumenta à medida que se distancia mais do eletrodo de corrente B.

Os quatro eletrodos no arranjo DD estão dispostos segundo o esquema da Figura 2.4.4.2, em que o primeiro par de eletrodos (A e B), sinalizados por I, injeta a corrente. O segundo par de eletrodos, sinalizados por ΔV , mede a diferença de potencial elétrico entre os dois pontos M e N. À medida que se avançam as leituras, os eletrodos M e N se distanciam a uma distância cujo valor dividido por "n" definirá o nível de investigação (profundidade).

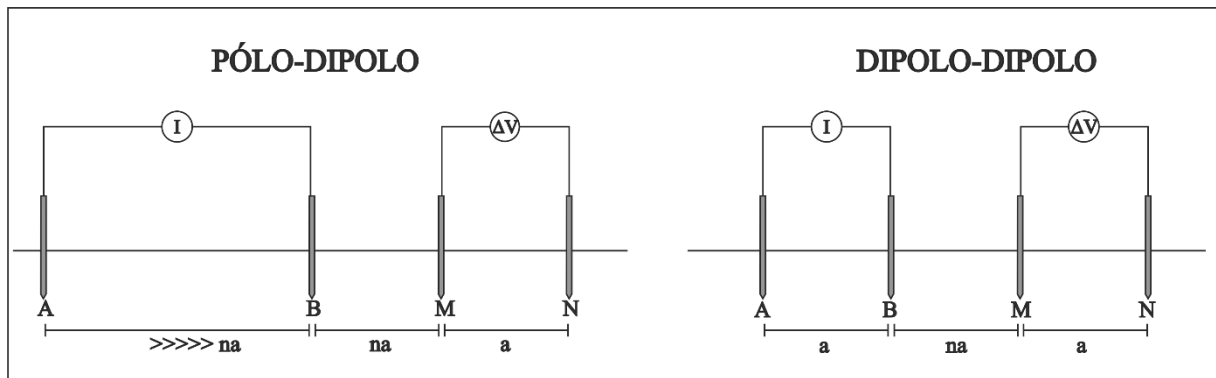


Figura 2.4.4.2: Ilustração esquemática dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo.

Existem diversos arranjos eletródicos que apresentam vantagens e desvantagens em relação ao seu uso, dependendo do objetivo da pesquisa. Os arranjos Wenner e Schlumberger, por exemplo, oferecem maior sensibilidade vertical, tornando-os mais adequados para estudar estruturas horizontais, como camadas geológicas. Por outro lado, os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo possuem maior sensibilidade lateral, tornando-os eficazes na identificação de estruturas verticais, como falhas, fraturas e cisalhamentos (Loke, 2004).

De maneira geral, os eletrodos de corrente são representados pelas letras A e B, enquanto os eletrodos de potencial são representados pelas letras M e N. Para obter o fator geométrico de cada arranjo (k), utiliza-se a equação 2.4.4.1, na qual AM, AN, BM e BN representam os diferentes segmentos entre os eletrodos de corrente e potencial.

$$k = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} \right) - \left(\frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} \right) + \left(\frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (\text{Equação 2.4.4.1})$$

Segundo Loke (2004), o arranjo DD é o mais amplamente utilizado em levantamentos de resistividade devido ao baixo acoplamento eletromagnético entre os circuitos de potencial e de corrente. Por outro lado, o arranjo PD apresenta menor acoplamento eletromagnético em comparação ao DD e possui a vantagem de um sinal mais forte. O autor também destaca que ambos os arranjos são mais sensíveis a variações horizontais do que verticais, o que os torna adequados para o mapeamento de estruturas verticais.

2.5 Prospecção Geoquímica

As diferentes técnicas de prospecção geoquímica têm como premissa que a composição dos materiais na crosta terrestre, próxima a uma jazida mineral, será diferente quando comparada a materiais semelhantes, porém localizados em locais onde não há presença de mineralizações (Govett, 1983).

O desenvolvimento da base teórica acerca da migração, dispersão e concentração dos elementos químicos, se deve aos cientistas W.J. Verndaski, A.E. Fersman e V.M. Goldschmidt. Esses pesquisadores elaboraram o embasamento em relação às particularidades da distribuição dos elementos químicos em diferentes materiais, como rochas, solos e vegetação, além de considerar a influência dos fatores geomorfológicos e climáticos (Koljonen, 1992; Licht, 1998).

Os primeiros registros da observação e interpretação das propriedades químicas dos materiais para a procura de depósitos minerais ocorreram no século XV por Georg Bauer e Giovanni de Castro. Bauer correlacionou a presença de elementos químicos na água das drenagens com sabores diferentes na água, enquanto Giovanni de Castro percebeu a relação entre uma espécie vegetal e a presença de mineralizações de alunita na Síria, descobrindo assim uma nova jazida de alunita na Itália com base nessa observação (Boyle, 1979).

De acordo com Rose et al. (1979), há milênios os garimpeiros têm utilizado as manchas de ferro e cobre nas rochas, que são resultantes da oxidação de sulfetos, e a dispersão subsequente dessas manchas como indicadores geoquímicos. Boyle (1979) complementa que o garimpo de ouro e outros metais/minerais pesados também é considerado uma aplicação antiga e eficaz da prospecção geoquímica.

Somente em 1908, a geoquímica passou a ser reconhecida como uma área isolada da ciência, graças à publicação do livro "*Data of Geochemistry*" por Clarke. Nessa obra, o autor

realizou uma extensa revisão dos resultados analíticos de rochas e minerais, até o momento presente de sua publicação (Licht, 1998).

A utilização da geoquímica de prospecção ganhou popularidade apenas na década de 1930, quando a antiga União Soviética realizou um extenso mapeamento geoquímico para localização de depósitos de estanho, o que resultou em descobertas bem-sucedidas de novas jazidas minerais (Licht, 1998).

A partir desse momento, o desenvolvimento da rapidez e acurácia das técnicas analíticas para detecção de elementos em concentrações mais baixas foi fundamental na popularização do método. Os avanços contínuos permitiram uma maior sensibilidade na análise de múltiplos elementos, possibilitando a detecção de efeitos sutis nas proximidades das mineralizações. Dessa maneira, o método se tornou um dos principais contribuintes em estudos de prospecção mineral, desde a escala regional à escala de depósito (Cohen e Bowell, 2014).

2.5.1 Princípios Básicos

De acordo com Hawkes (1957), a Terra constitui um sistema dinâmico no qual ocorre transporte e transformação de materiais devido à ação de diversos processos existentes. O autor complementa que a troca e a mobilidade dos elementos químicos em diferentes ambientes terrestres, pode ser facilmente visualizada por meio de um ciclo parcialmente fechado, denominado ciclo geoquímico (Figura 2.5.1.1)

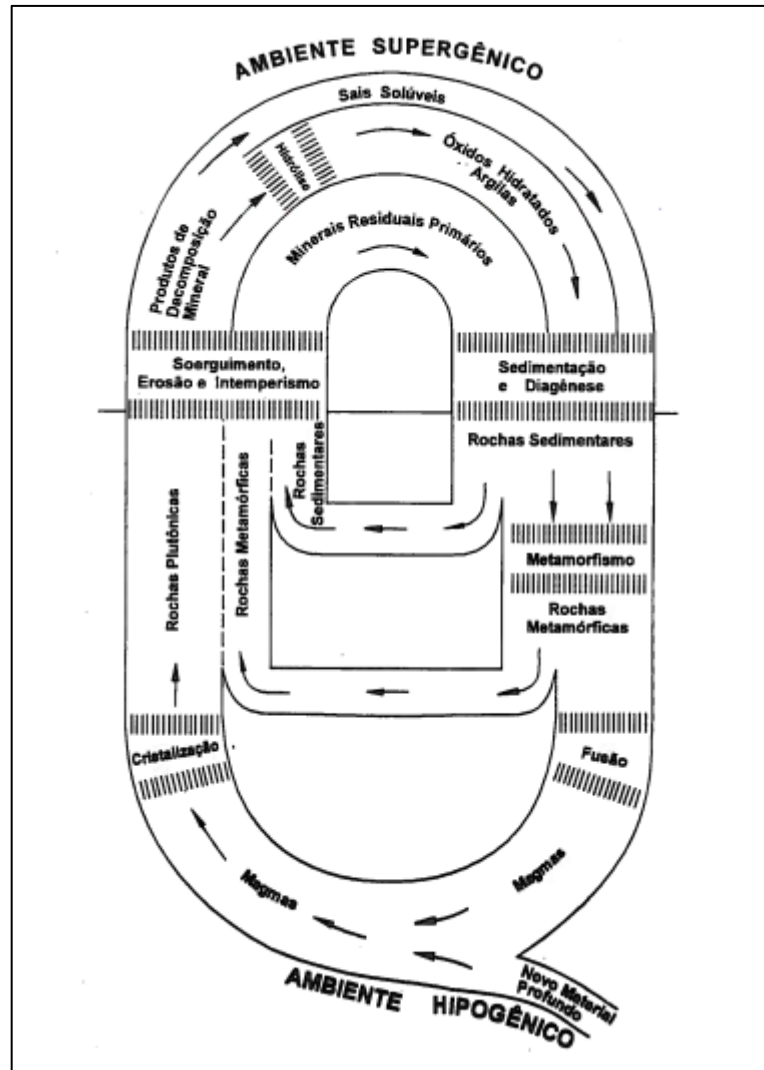


Figura 2.5.1.1: Ciclo geoquímico (Retirado de Rose et al., 1979).

Para poder analisar de forma quantitativa os teores geoquímicos, o geoquímico russo Fersman propôs a criação do termo Clarke, que define a abundância média dos elementos químicos na crosta terrestre (Figura 2.5.1.2). O nome foi dado em homenagem ao cientista estadunidense F.W. Clarke que iniciou as pesquisas para definição de teor médio. Posteriormente, o termo Clarke de Concentração foi introduzido, o qual se refere à concentração de um elemento químico em um depósito mineral específico ou até mesmo dentro de um mineral em particular (Fleischer, 1953).

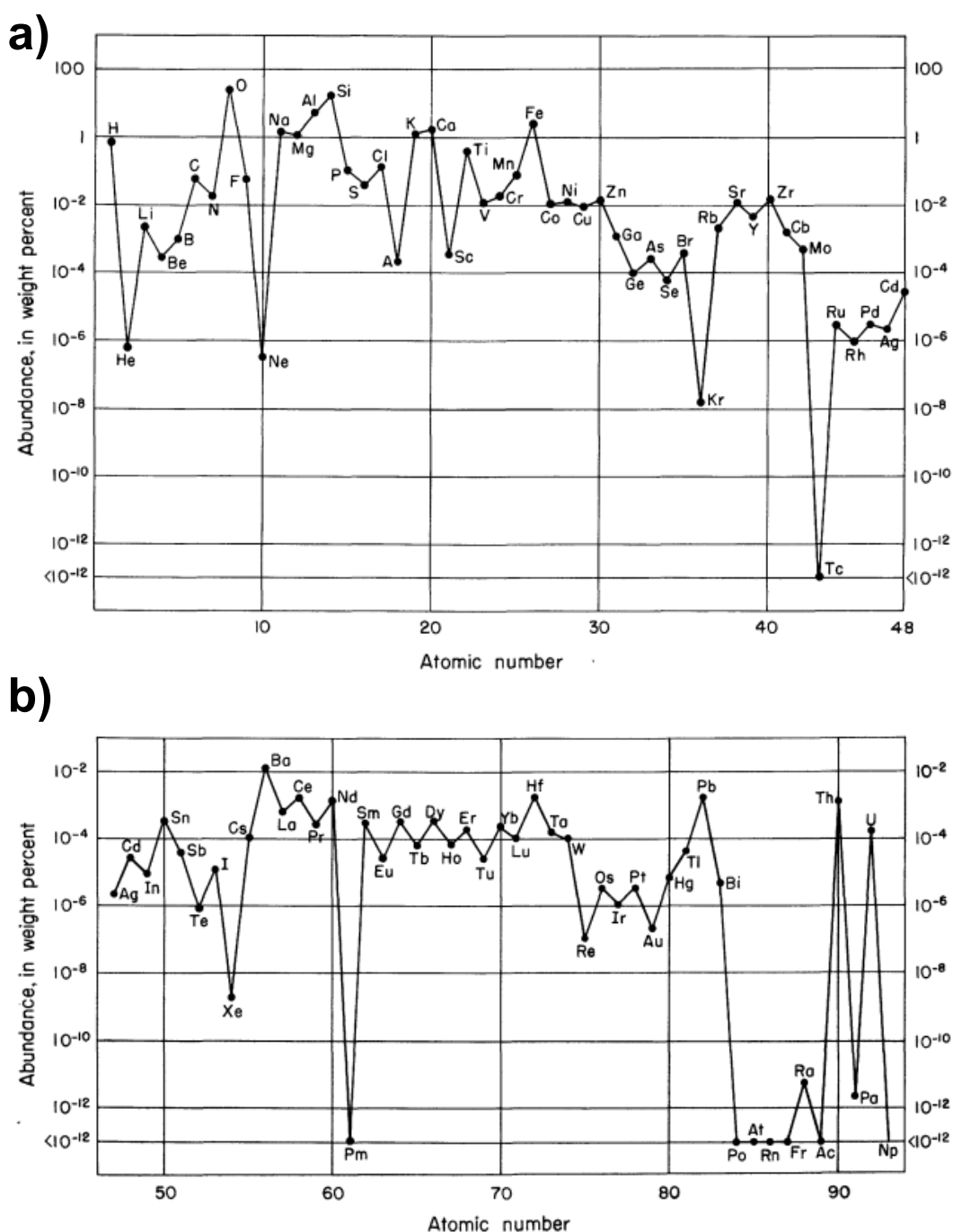


Figura 2.5.1.2: Abundância média dos elementos geoquímicos na crosta. Em a) elementos de número atômico 1 a 48; b) elementos de número atômico 47 a 93 (Retirado de Fleischer, 1953).

Os diferentes ambientes terrestres apresentam diversas condições de temperatura, pressão e presença de oxigênio livre, o que altera significativamente os comportamentos de migração e distribuição de partículas, devido às suas afinidades geoquímicas. Dessa maneira, Goldschmidt (1937), por meio de experimentações, constatou que determinados minerais apresentavam maior ou menor afinidade geoquímica, e os classificou de acordo com essa

afinidade. O autor categorizou os elementos em litófilos, calcófilos, siderófilos e atmófilos (conforme ilustrado na Figura 2.5.1.3).

GROUP

IA

Goldschmidt's Classification

VIIIA

1	H	IIA															III A	IV A	V A	VI A	VII A	He
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	—VIIIB—		IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar					
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	Ac																			

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Nu	Pu									

Lithophile

Siderophile

Chalcophile

Atmophile

Figura 2.5.1.3: Classificação da tabela periódica elaborada por Goldschmidt (Retirado de Winter, 2013).

Vale ressaltar que os elementos podem pertencer a mais de uma classe de acordo com as condições na qual ele está submetido, como o Cromo e o Manganês, que podem ser litófilos ou siderófilos (Goldschmidt, 1937).

Portanto, compreender a afinidade dos elementos é fundamental na geoquímica de prospecção, uma vez que elementos pertencentes à mesma classe podem formar associações geoquímicas que indicam possíveis mineralizações. Além da afinidade, a mobilidade desses elementos também desempenha um papel importante. Elementos com afinidade semelhante podem ter mobilidades químicas diferentes devido às condições de pressão, temperatura e presença de oxigênio. Dessa forma, elementos mais móveis em ambientes superficiais podem ser utilizados como indicadores de elementos com afinidade, mas com baixa mobilidade.

2.5.2 Prospecção Geoquímica de Rocha (Litogeoquímica)

A prospecção geoquímica de rocha, também conhecida como litogeoquímica, é um método muito utilizado na prospecção mineral. É comumente aplicada à estudos de maior detalhe, em corpos individuais e corpos ígneos “férteis”. Apresenta uma grande vantagem que

é a indicação direta das feições de dispersões profundas, que são pouco influenciadas por processos superficiais (Licht, 1998).

De acordo com Rose et al. (1979), outra grande vantagem da aplicação do método consiste no reconhecimento de corpos mineralizados não aflorantes. Segundo os autores, intrusões anômalas variam de quilômetros a dezenas de metros em diâmetro, e produzem halos de alteração, que também podem variar nessa ordem de grandeza. Dessa maneira, alguns halos podem ser maiores que as rochas aflorantes em superfície, indicando que o corpo está mineralizado em profundidade.

Pride et al. (1979) utilizaram a prospecção geoquímica com o intuito de identificar halos geoquímicos primários causados por eventos hidrotermais e sua correlação com mineralizações de molibdênio em profundidade. Os autores concluíram que os halos geoquímicos observados em superfície tinham correlação direta com as alterações hidrotermais ocorridas em subsuperfície e demonstraram que o molibdênio está concentrado em uma zona de alteração filítica-argilítica.

2.5.3 Prospecção Geoquímica de Solo

A prospecção geoquímica de solo consiste na técnica mais amplamente utilizada, devido sua alta eficácia em relação à presença de anomalias e a existência de mineralizações. Estudos mostram que independente das condições climáticas e do arcabouço geológico, locais com rochas mineralizadas apresentarão teores geoquímicos anômalos em seus solos residuais (Licht, 1998).

De acordo com Licht (1998) em casos de ocorrências minerais que não apresentam feições geoquímicas anômalas, três possíveis hipóteses podem explicar o fenômeno:

1. A amostra coletada não é produto residual da rocha hospedeira da mineralização;
2. Um horizonte inadequado de solo foi amostrado;
3. O método analítico, ou ataque químico utilizado não foi o apropriado.

Outro fator importante é a amostragem realizada para prospecção geoquímica de solo. Diferentemente da prospecção geoquímica, em que são coletadas amostras pontuais em afloramentos rochosos, as amostras de solo devem ser coletadas em forma de malha. Em algumas circunstâncias específicas, a utilização de malhas irregulares pode ser mais eficaz, mas de maneira geral, as amostras devem ser adquiridas em uma malha regular, com espaçamento constante entre as coletas, em linhas paralelas equiespaçadas.

Bruni e Delgado (1974) apresentam a utilização da prospecção geoquímica de solo nas rochas máficas-ultramáficas do Vale do Curaçá, com o intuito de identificar feições anômalas de cobre. Por meio da correlação com a presença de mineralizações conhecidas, os autores identificaram que o teor de fundo foi em torno de 40 ppm, enquanto os solos residuais apresentaram teores de 130 ppm de cobre.

2.5.4 Prospecção por Sedimentos Ativos de Drenagem

A prospecção em sedimentos ativos de drenagem é um método comumente aplicado em pesquisas de reconhecimento regional, devido aos baixos custos de aquisição. De acordo com Brim (1985), os sedimentos ativos de drenagem são materiais não consolidados, distribuídos ao longo dos vales das bacias hidrográficas, originados a partir dos processos de intemperismo e erosão nas rochas localizadas à montante dessa bacia hidrográfica.

Brim (1985) classifica os sedimentos de drenagem em dois tipos:

1. Sedimentos inativos: materiais não consolidados que não estão em transporte pelas correntes da drenagem. Podem ser sedimentos depositados as margens da drenagem durante períodos de chuva; materiais que desmoronaram das margens e se acumularam próximos a fonte; materiais com alta densidade que são capturados por estruturas naturais (trapas) no fundo das drenagens.
2. Sedimentos ativos: materiais não consolidados que estão em constante transporte dentro das drenagens.

Devido à grande variedade de fatores que influenciam na concentração de elementos nos sedimentos de drenagem, os padrões de amostragem têm importância fundamental na eficácia do método. Esse padrão deve ser estabelecido em função do objetivo do levantamento, bem como da área máxima da bacia hidrográfica que ainda reflete os eventos mineralizantes. Basicamente, quanto maior for a área da bacia, maior deve ser a zona mineralizada para que se possa detectar as anomalias (Licht, 1998).

É importante ressaltar que os sedimentos ativos de drenagem são constituídos por todas as rochas e materiais que foram desagregados devido aos processos de intemperismo e erosão. Dessa maneira, quanto maior a distância da coleta realizada em relação a zona mineralizada, menor será a concentração do elemento procurado, pois ao longo da drenagem os elementos são diluídos (Rose et al, (1979); Brim, 1985; Licht, 1998). De acordo com Hawkes (1976), na presença de zonas mineralizadas conhecidas e teores geoquímicos anômalos em sedimentos de drenagem, pode-se calcular o grau de significância das anomalias em relação à bacia hidrográfica.

2.5.5 Prospecção por Concentrados de Bateia

A prospecção geoquímica por concentrados de bateia se realiza de maneira semelhante aos sedimentos ativos de drenagem, em relação à localização da coleta ser realizada em drenagens. Contudo, a prospecção por concentrado de bateia se baseia nas propriedades gravimétricas dos materiais de minerais resistentes. Também conhecidos como minerais pesados, esses materiais possuem densidade maior que $2,7 \text{ g/cm}^3$ (densidade do quartzo) e são pouco ou nada influenciados por processos de intemperismo e erosão (Licht, 1998).

Por conta de sua resistência química e mecânica, esses minerais tendem a se acumular em solos residuais, como colúvios e aluviões. Uns indicam variações litológicas, outros são metais preciosos, alguns são indicadores da gradação metamórfica regional e podem ser um parâmetro a identificação de alterações hidrotermais (Overstreet e Marsh, 1981).

A preparação das amostras de concentrado deve ser realizada em campo, com uma bateia (preferencialmente de alumínio) e as amostras tendo volume constante entre 10 a 20 litros. Posteriormente, o processo de concentração é refinado em laboratório por meio de equipamentos mais sofisticados como mesas vibratórias, separadores eletromagnéticos e baterias de líquidos de densidade crescentes (Licht, 1998).

Hallestein et al., (1983) observaram que em ambientes de intemperismo majoritariamente físico, como a Groenlândia, o método é um dos mais eficazes. Guiges e Devismes (1969) demonstraram a utilização do método na descoberta de diversos tipos de ocorrências e jazidas minerais no maciço Armoricano, na França.

2.6 Mapeamento Geológico

O mapeamento geológico pode ser utilizado em diferentes escalas de estudo, desde o reconhecimento das grandes unidades geológicas regionais, até a caracterização detalhada da distribuição de minérios sulfetados em uma mina subterrânea, por exemplo. Portanto, em função do objetivo do mapeamento geológico, diferentes técnicas, ferramentas e materiais devem ser utilizados (Barnes e Lisle, 2013). Em resumo, não há um guia específico para realização de um mapeamento geológico, seja regional ou local. Isso porque cada área de estudo tem suas particularidades, que são resultado do objeto de estudo: a evolução geológica.

Contudo, algumas ferramentas, procedimentos e padrões são necessários independente da escala de estudo. Os materiais indispensáveis ao mapeamento geológico são: bússola Clark ou Brumpton, martelo, lupa, caderneta, lápis (ou caneta), GPS, câmera fotográfica, imã e solução aquosa de ácido clorídrico.

De maneira geral, o mapeamento é realizado por meio de perfis longitudinais em que os afloramentos, *in situ* ou não, são considerados pontos de amostragem. Para a caracterização do ponto as amostras são coletadas com o martelo para descrição macroscópica com a lupa; medidas estruturais são inferidas por meio da bússola; adquire-se as coordenadas geográficas do ponto com um GPS; em caso de rochas que possuem óxidos de ferro, utiliza-se o ímã para diferenciar os minerais magnéticos; em caso de rochas carbonáticas, aplica-se o ácido diluído para constatação da presença de carbonato; por fim são feitas fotografias do ponto e todas as informações são descritas na caderneta.

Nessa pesquisa foram desenvolvidos três mapas geológicos, em diferentes escalas, com base na utilização de dados geofísicos, geoquímicos e de mapeamento geológico:

1. Mapeamento geológico na escala de **1:50 000** – Intrusão Barra do Gameleira;
2. Mapeamento geológico na escala de **1:25 000** – Extensão das rochas ultramáficas da porção leste da Intrusão Barra do Gameleira;
3. Mapeamento geológico na escala de **1:12 500** – Alvo Sul (“Rabo da Cascavel”) da Intrusão Barra do Gameleira

CAPÍTULO 3

3. Artigo “CORRELAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS, GEOQUÍMICOS E GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO DE NI-CU NA INTRUSÃO BARRA DO GAMELEIRA, TOCANTINS.

Resumo:

A correlação entre diferentes métodos de prospecção é a chave para obtenção de resultados significativos na busca de depósitos minerais. A utilização destes métodos em programas de prospecção é amplamente aplicada em diferentes contextos geológicos. Essa pesquisa teve como objetivo a elaboração de um modelo prospectivo de Ni-Cu-Co-Au-PGE em uma intrusão máfica-ultramáfica, denominada Intrusão Barra do Gameleira (IBG). Para isso, foram utilizados dados de domínio público – dados aerogeofísicos e geoquímicos de sedimentos de corrente e concentrado de bateia – novos resultados inéditos – amostragens litogeoquímicas e mapeamento geológico de semi-detalle. Valores na ordem de 3000 e até 5000 ppm foram obtidos em análises litogeoquímicas de cobre e níquel, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar três alvos prospectivos com base nas anomalias geofísicas e geoquímicas encontradas. Os resultados magnéticos demonstraram uma forte correlação entre a intensidade de magnetização e teores anômalos na geoquímica. Os dados radiométricos foram utilizados por meio da correlação negativa da concentração dos radioelementos com as anomalias geoquímicas, principalmente do elemento potássio, que apresentou teores iguais a zero em medidas petrofísicas. Além disso, os realces de potássio anômalo e urânio anômalo apresentaram uma boa correlação com a presença de rochas ultramáficas. Por fim, o mapeamento geológico indica que as mineralizações estão associadas às litologias ultramáficas.

Palavras-chave: prospecção; máfica; ultramáfica; aerogeofísica; geoquímica

Abstract:

The correlation between various prospecting methodologies plays a pivotal role in achieving substantial outcomes in the pursuit of mineral deposits. The utilization of these methodologies within prospecting programs is widely implemented across diverse geological settings. The objective of this research was to develop a prospective model for Ni-Cu-Co-Au-PGE (Nickel-Copper-Cobalt-Gold-Platinum Group Elements) within a mafic-ultramafic intrusion known as the Barra do Gameleira Intrusion (IBG). To accomplish this, publicly available data were employed, including aerogeophysical and geochemical data obtained from stream sediments and pan concentrate. Additionally, newly obtained, and unpublished results from lithogeochemical sampling and semi-detailed geological mapping were utilized. Based on the findings, three potential targets were identified based on geophysical and geochemical anomalies. The magnetic results demonstrated a robust correlation between magnetization intensity and anomalous elemental contents in geochemistry. Radiometric data were employed to observe the inverse correlation between the concentration of radioelements and geochemical anomalies, particularly with respect to potassium, which exhibited null values in petrophysical measurements. Furthermore, both anomalous potassium and anomalous uranium enhancements exhibited a strong correlation with the presence of ultramafic rocks. Finally, the geological mapping confirmed that mineralization occurrences are associated with lithologies composed of ultramafic rocks.

Keywords: mineral exploration; mafic; ultramafic; airborne geophysics; geochemistry

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade moderna demanda atualmente um grande volume de minerais críticos para a indústria eletrônica. Dentre os minerais base destacam-se aqueles com presença de níquel, cobre e elementos do grupo da platina (EGP). Os principais depósitos de níquel ocorrem associados a complexos magmáticos de composição máfica-ultramáfica. Dentre as possíveis mineralizações nestes complexos, destacam-se aquelas com potencial para cromo, sulfetos de níquel e cobre, EGP além de óxidos de ferro, titânio e vanádio (Santos, 2017).

De acordo com Naldrett (et al., 1999), os depósitos magmáticos de Ni-Cu-PGE são divididos em dois grupos: ricos em níquel (Ni) e cobre (Cu), ou abundantes em elementos do grupo da platina (EGP). Enquanto o primeiro grupo possui depósitos em diferentes contextos geológicos, como associações vulcânicas, cumulos na base das intrusões e condutos que carregam fluidos da base, e até mesmo por impactos meteoríticos extraterrestres, o segundo grupo consiste apenas em depósitos de classe mundial em intrusões acamadadas extremamente extensas, com idades que variam do Arqueano ao Paleoproterozoico.

Embora o magma que dê origem aos sulfetos ricos em Ni-Cu ocorra em diferentes contextos geológicos, em sua grande maioria estão correlatos a intrusões de regimes tectônicos extensivos – riftes ou margens continentais – como é o caso dos exemplos mundiais de Noril'sk e Pechenga, na Rússia, Jinchuan na China e Voysey's Bay no Canadá (Naldrett, 2004). Entretanto, também existe este tipo de depósito em regimes orogênicos compressivos, como é o caso do complexo máfico-ultramáfico acamadado de Americano do Brasil (Silva, 2009) e da intrusão Rona, na Noruega (Tucker et al., 1990).

Os depósitos associados aos complexos máfico-ultramáficos podem ser de dois tipos: sulfetados e supergênicos. No Brasil, devido ao intenso processo de intemperismo, significativos depósitos de níquel-cobalto laterítico são amplamente estudados e explorados, como o caso dos complexos máfico-ultramáficos de Niquelândia e Barro Alto. Segundo Fonseca (2016), as reservas de níquel e cobalto para o Complexo Niquelândia são da ordem de 60 milhões de toneladas com teores de 1.38% e 0.04%, respectivamente. Já os depósitos do tipo sulfetados são menos comuns e apresentam menores teores, contudo, podem ter associações cupríferas e de EGP.

Em Fortaleza de Minas – MG, a mineração Serra da Fortaleza explorou minério de níquel sulfetado, com ocorrência de cobre e cobalto. De acordo com Silva (2009) as reservas geológicas totalizavam 5.1 milhões de toneladas de minério do tipo Ni-Cu-Co. Outros exemplos significativos de depósitos polimetálicos em rochas ultramáficas são o caso do depósito Santa

Marta em Americano do Brasil – GO e a mina de Santa Rita Itagibá – BA (Castro et al., 2022). Ressalta-se que a mina de Santa Rita, apresenta teores de polimetais e também de EGP que são explorados pela Mirabela Mineração, enquanto o depósito de Santa Marta as mineralizações significativas são de associações entre níquel, cobre e cobalto.

Ferreira Filho et al. (2002) apresentaram resultados pioneiros em relação a potencialidade dos complexos máficos-ultramáficos no Tocantins e concluíram que estes constituem grandes complexos no Brasil (em extensão), e os definem como um potencial alvo para exploração de elementos do grupo da platina (EGP). Contudo, as pesquisas de Ferreira Filho et al. (2002) não contemplam as pequenas intrusões que ocorrem no sudeste do estado.

Essas intrusões máficas-ultramáficas são pertencentes a Suíte Intrusiva Gameleira (Saboia, 2021). Apesar da existência de estudos prospectivos na região, a grande maioria tem como foco a exploração de ouro orogênico associado às formações do tipo *greenstone belt* (e.g. Kuyumjan et al., 2012).

As intrusões supracitadas são definidas com diferentes nomes na bibliografia e, este trabalho optou por utilizar a nomenclatura adotada por Saboia (2021), que denomina como Suíte Intrusiva Gameleira. Dentre as diversas intrusões, destaca-se a Intrusão Barra do Gameleira, pois a mesma apresenta a maior área entre as demais (72 km²), geometria circular e aspectos geomorfológicos distintos. Considerada como a intrusão mais significativa, os autores desta pesquisa optaram por denominar esta intrusão como Intrusão Barra do Gameleira (IBG) e a mesma constitui objeto de estudo desta pesquisa, por ser a intrusão que apresenta maior potencial de mineralização.

Portanto, essa pesquisa consiste na caracterização das assinaturas geofísicas e geoquímicas de mineralizações sulfetadas – pirrotita, pentlandita, calcopirita - na Intrusão Barra do Gameleira. Por meio dos resultados obtidos foi possível elaborar um modelo prospectivo para exploração de metais base e elementos do grupo da platina.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo encontra-se na região sudeste do estado do Tocantins, na Suíte Intrusiva Gameleira – corpo máfico ultramáfico intrudido em rochas paleoproterozoicas do embasamento (Correia Filho e Sá, 1980; CPRM, 2000; Saboia, 2021).

As rochas presentes na área de estudo estão inseridas no contexto da Província Tocantins (Almeida et al., 1981), que está localizada entre os crátons Amazônico e São Francisco a oeste e leste, respectivamente, e limitada pelas Bacias do Paraná e Parnaíba a sul e norte,

respectivamente. A província foi formada por um sistema orogênico (Brasiliano-Pan-Africano) de idade neoproterozóica, em que a gênese ocorreu por meio da convergência e colisão de três blocos continentais: Amazônico a oeste, São Francisco a leste e Paranapanema a sul, este último recoberto por sedimentos fanerozóicos da Bacia do Paraná (Mantovani e Brito Neves, 2005; Hasui et al., 2012; Fuck et al., 2014).

Três faixas de dobramentos neoproterozóicas são identificadas como principais constituintes da Província Tocantins: Faixas Araguaia e Paraguai, que se estendem pelas bordas leste e sudeste do Cráton Amazônico, respectivamente, e a Faixa Brasília, situada no limite oeste do Cráton São Francisco (Fuck et al., 2014).

A Faixa Brasília estende-se por mais de 1000 quilômetros em direção norte-sul e foi dividida por Fuck et al., 2016 em três segmentos: norte, com direção NE e vergência na direção leste para o Cráton São Francisco; central, caracterizado pela sintaxe dos Pireneus (Araújo Filho, 2000) na qual as estruturas começam a se apresentar na direção NW-SE e a vergência principal é para ESSE, e o segmento sul, também com vergência para leste.

Araújo Filho (2000) classifica a faixa como uma evolução diacrônica, e a subdivide em duas porções: segmento norte com direção NE-SW e segmento sul com direção NW-SE, separadas pelo Sintaxe dos Pireneus, que possui superposição das estruturas e define a separação do segmento norte do sul.

Ocorrem na porção norte da Faixa Brasília, domínios paleoproterozoicos expostos que são definidos como terrenos formados da parte oeste do Cráton São Francisco (Dardenne, 2000; Martins-Ferreira et al., 2020, Saboia 2021). Estes terrenos são constituintes do Bloco Cavalcante-Natividade (BCN), e são subdivididos em: Domínio Cavalcante – Arraias (DCA) e Domínio Almas – Conceição do Tocantins (DACT) (Fuck et al., 2014).

Martins-Ferreira et al. (2020) realizaram um compilado das nomenclaturas criadas para o DACT, definidas no início das pesquisas científicas no domínio: Terreno Almas-Dianópolis (Costa, 1985; Cuadros et al., 2017a), Domínio Almas – Conceição do Tocantins (Padilha, 1984; Cruz et al., 2003; Fuck et al., 2014, Sousa et al., 2016; Cordeiro e de Oliveira, 2017) e Terreno Granito-Greenstone Tocantins (Cruz e Kuyumjian, 1998).

Martins-Ferreira et al. (2020) adotam o nome de Terreno Almas – Conceição do Tocantins, ou de forma mais simplificada, como Terreno Almas. Os autores escolheram esta nomenclatura devido a região ser limitada por falhas, além de possuir estratigrafia, estruturas e história geológica distintas dos terrenos adjacentes. Dessa forma, este trabalho utilizará a

nomenclatura de Terreno Almas para a área de estudo. A Figura 3.1 ilustra o arcabouço geológico da área de estudo desde uma escala continental a local.

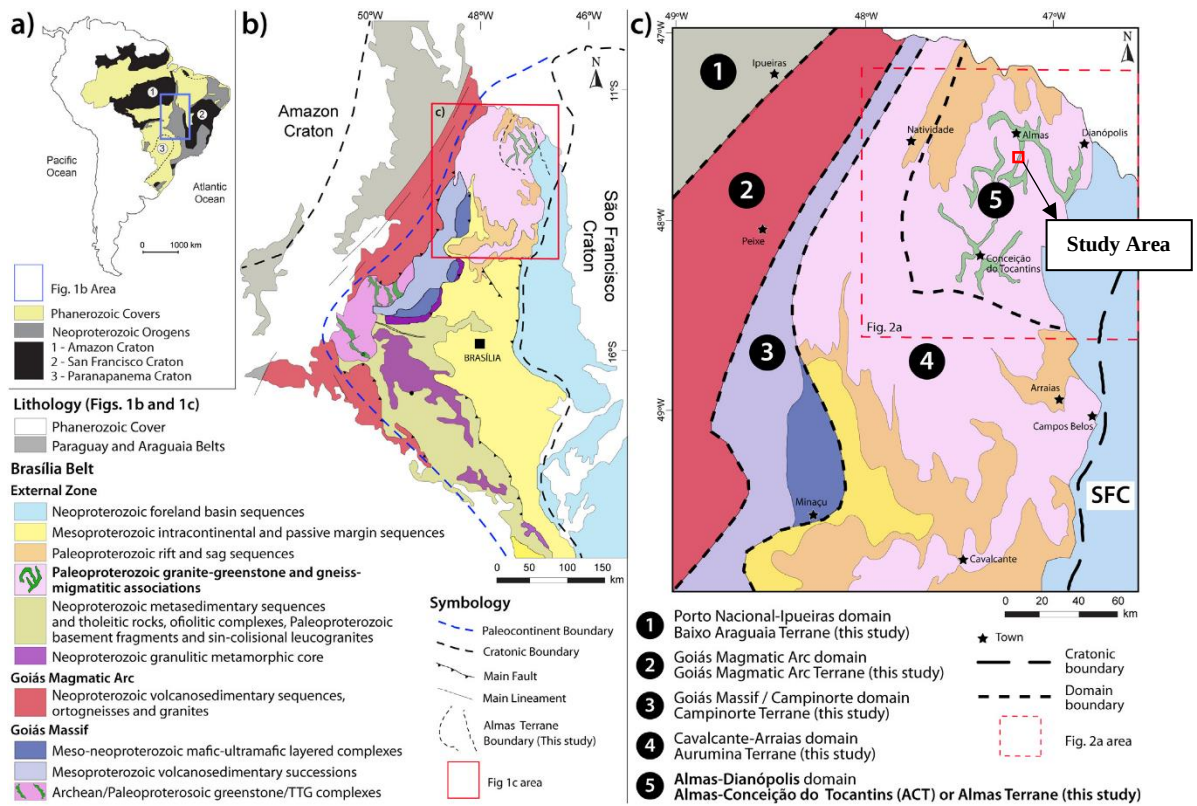


Figura 3.1: Mapas do Contexto Geológico mostrando: a) Localização dos principais crátons e bacias do Brasil em relação à América do Sul; b) Mapa Geológico da Faixa Brasília com destaque a área de afloramentos do embasamento cristalino Paleoproterozóico (retângulo vermelho), os limites do Terreno Almas (linha preta tracejada fina dentro do retângulo vermelho) e os limites do Cráton São Francisco (linha tracejada preta a oeste) e limites do Paleocôntinente do São Francisco após 1,8 Ga (linha azul tracejada); c) Mapa geológico do segmento norte da Faixa Brasília mostrando os domínios tectônicos definidos para a região em estudos anteriores e os nomes adotados neste trabalho (Martins-Ferreira et al., 2020 – Modificado de Fuck et al., 2014 e Cordeiro e de Oliveira, 2017).

2.1 Intrusão Barra do Gameleira

A Intrusão Barra do Gameleira (IBG) é também conhecida como Maciço Básico-Ultrabásico Barra do Gameleira (Correia Filho e Sá, 1980), ou por Complexo Máfico-Ultramáfico Barra do Gameleira (CPRM, 2000). A IBG corresponde a intrusão mais significativa pertencente à Suíte Intrusiva Gameleira (Saboia, 2021) (Figura 3.2).

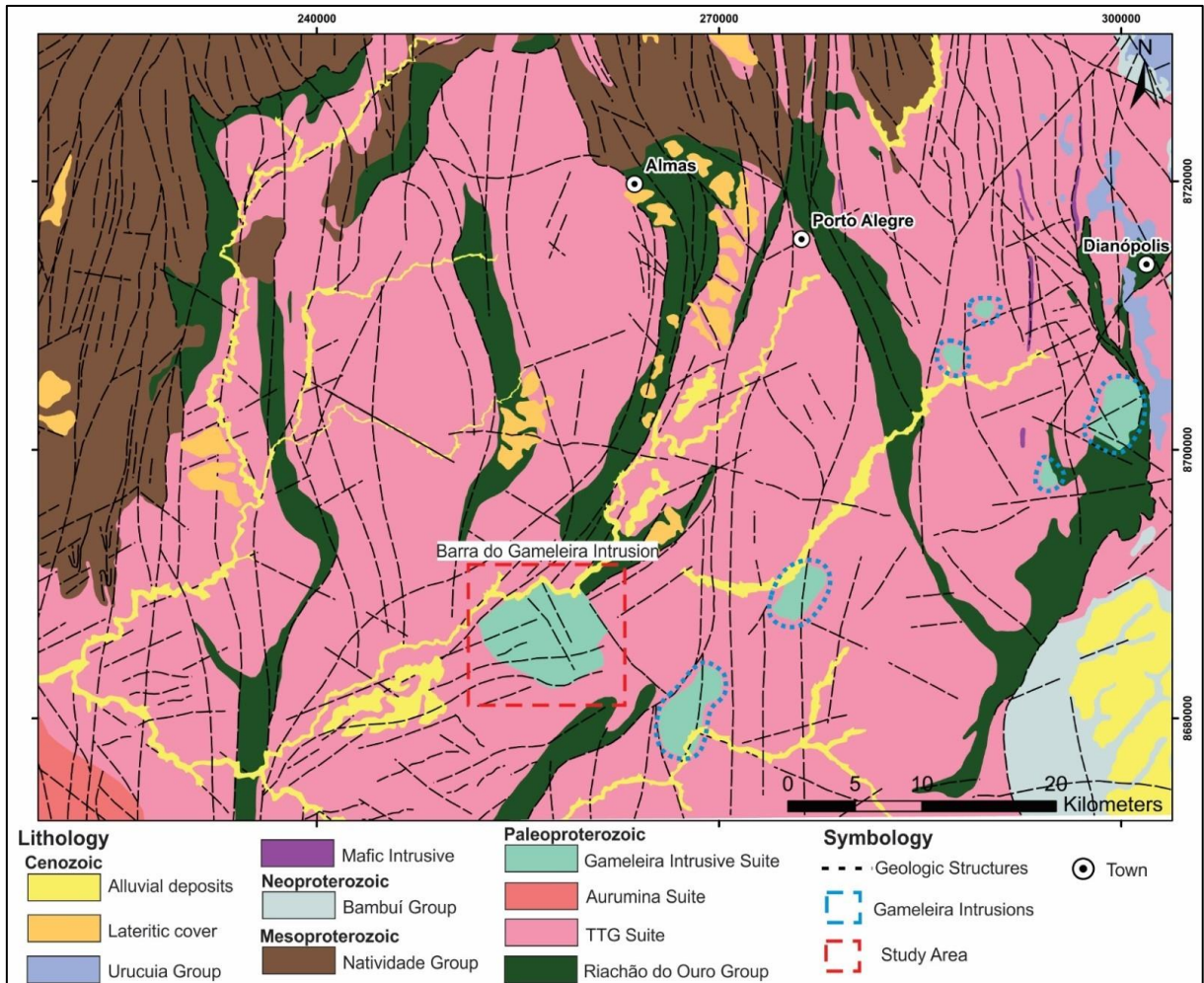


Figura 3.2: Mapa Geológico regional com as principais unidades geológicas. Ao centro-sul, o retângulo vermelho contém a área de estudo, representada pela Intrusão Barra do Gameleira (Modificado de Correia Filho e Sá; Saboia et al., 2019).

Costa et al. (1976) realizaram as pesquisas pioneiras nas intrusões básicas-ultrabásicas Barra do Gameleira (IBG) e Marta-Tamboril, porém classificaram-nas como pertencentes ao Complexo Metamórfico-Migmatítico (TTG Suite).

Correia Filho e Sá (1980) foram os primeiros a reconhecer a intrusão como um complexo básico-ultrabásico. A BG possui formato arredondado, com extensão de cerca de 8 (N-S) por 6,5 (E-W) quilômetros, e está encaixada nos migmatitos da Suíte TTG por meio de contatos normais e tectônicos. Os autores subdividem a intrusão em duas unidades com base em estudos petrogenéticos: Unidade Gabro-Peridotítica Marginal e Unidade Gabro-Granulítica Central. De forma resumida, os autores definem o complexo como uma intrusão acamadada, com deformação localizada em fácies granulito/anfibolito, e deformação dúctil associada. Além disso, há evidências de substituição mineral por retro metamorfismo para fácies xisto-verde.

CPRM (2000) não utiliza esta classificação das unidades, e adota como critério apenas a descrição das principais associações de litotipos. De forma simplificada, os autores caracterizam o complexo em rochas máficas e ultramáficas subordinadas. As rochas máficas são representadas por gabros, leucogabros, troctolitos, olivina-gabronoritos, olivina-gabros e noritos. Possuem aspecto isotrópico, granulação média a fina e textura adcúmulus, subordinadamente coronítica (Correia e Sá, 1980; CPRM, 2000). As composições ultramáficas são predominantes nas regiões norte e sul do complexo, e representadas por dunitos, piroxenitos feldspáticos, peridotitos serpentinizados e peridotitos. Nas rochas ultramáficas da IBG notam-se acamamentos magmáticos métricos a milimétricos, formados pela alternância de composições peridotíticas, piroxeníticas e gabróicas, que possuem contatos bruscos entre si (Costa et al., 1976; Correia e Sá, 1980; CPRM, 2000).

Saboia (2021) realizou datações de rochas do Terreno Almas e obteve resultados para a Suíte Intrusiva Barra do Gameleira de 2.3 G.a. As amostras foram coletadas nas bordas leste e nordeste do corpo, e a análise realizada por meio de zircões com o método de datação *Laser Ablation - Multi-Collector – Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer* (LA-MC-ICP-MS).

2.1.1 Unidade Gabro-Peridotítica Marginal

Representada pelas bordas leste e oeste da intrusão, a unidade é constituída por leucogabros anortosíticos até dunito-peridotíticos (com alto grau de serpentinização e uralitização). Devido um intenso retrometamorfismo que ocorre na área, há transformação das rochas em massas de uralita e saussurita, por isso, os autores dividiram a unidade em rochas gabróicas e rochas ultramáficas (Correia Filho e Sá, 1980).

As rochas gabróicas são representadas por: gabros (ofíticos e sub-ofíticos), metagabros, hornblenda gabros, microgabros, leucogabros, hiperitos e troctolitos coroníticos. Já as rochas ultramáficas, são classificadas como dunitos, peridotitos (serpentinizados, cloritizados e tremolitizados), além de piroxenitos (Correia Filho e Sá, 1980; CPRM, 2000).

2.1.2 Unidade Gabro-Granulítica Central

A unidade descrita por Correia Filho e Sá (1980) está presente na porção central da intrusão, e sua formação foi interpretada por meio de rochas antigas do manto trazidas para níveis mais rasos da crosta durante a intrusão do maciço. Por ser representada por gabros granulíticos, com alternância entre bandas máficas e félsicas, os autores concluíram que a cristalização ocorreu em condições de alta pressão e temperatura. CPRM (2000) descreve estruturas e texturas deformacionais metamórficas, que são representadas por bandas

centimétricas a milimétricas de níveis de piroxênio e plagioclásio, com textura granoblástica e paragênese em fácies granulito.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho possui como foco a integração de dados geofísicos, geoquímicos e geológicos para a elaboração de um modelo prospectivo de Ni-Cu-Co-PGE na Intrusão Barra do Gameleira.

O conjunto de dados aerogeofísicos (magnéticos e radiométricos) foram obtidos no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e consiste no Projeto Aerogeofísico Tocantins (CPRM, 2006). As informações geológicas e geoquímicas foram compiladas do projeto “Geologia e resultados prospectivos da Área Barra do Gameleira, Tocantins” (CPRM, 2000). Por fim, os dados de geoquímica de rocha e de mapeamento geológico de semidetalhe foram fornecidos pela empresa Cooperbrita LTDA, para fins prospectivos na área de estudo.

3.1 AEROGEOFÍSICA

Os dados aerogeofísicos foram coletados pela CPRM durante o período de 26 de julho de 2005 a 02 de janeiro de 2006. Ao final do projeto, foram adquiridos 164.003 quilômetros lineares de dados magnéticos e radiométricos, recobrindo uma área total de 75.872,4 km².

As linhas de voo foram realizadas na direção norte-sul, enquanto as linhas de controle na direção leste-oeste, com espaçamento de 500 e 10.000 metros, respectivamente. A altura média de voo foi de 100 metros e velocidade média de 270 km/h. Para os dados magnéticos o intervalo de leituras foi de 0,1 segundos, enquanto para as medições radiométricas de 1,0 segundo, o que constitui taxas de amostragem de 10 e 1 Hz, respectivamente.

Todas as etapas de processamento, tanto para os dados magnéticos quanto radiométricos, foram realizadas pela CPRM durante aquisição. Portanto, esta pesquisa considera que os dados contidos no banco de dados disponível, passaram por todos os processos de correções – variação diurna, nivelamento, micronivelamento, remoção do IGRF para a magnetometria e, remoção do *background* da aeronave/cósmico/radônio, correção de efeito Compton, correção altimétrica, conversão em teores para a gamaespectrometria – de forma criteriosa. Isto posto, não foi considerado objeto de estudo a etapa de processamento destes dados aéreos. Devida sua longa extensão o projeto foi dividido em duas subáreas, e o local de estudo desta pesquisa encontra-se na subárea 2, mais precisamente na porção centro-norte da subárea 2.

3.1.1 Magnetometria

O método magnético consiste em um dos mais antigos da geofísica, e é amplamente utilizado para estudar a subsuperfície terrestre. Devido a extensa variação de propriedades magnéticas na subsuperfície terrestre, somada ao baixo custo de aquisição e fácil instrumentação do método, o mesmo se destaca entre os demais métodos geofísicos de exploração (Telford, 1990; Hinze et al., 2013).

Para entender o comportamento magnético dos materiais, é preciso compreender de forma clara o fenômeno do magnetismo. Basicamente, o magnetismo é gerado com o movimento de cargas elétricas, mais precisamente por um momento de dipolo causado por spins e orbitais eletrônicos em um átomo. Os primeiros pesquisadores a estudarem magnetismo e eletricidade foram Orsted e Ampère no início do século XIX e, posteriormente, Maxwell formulou a base matemática que correlaciona a eletricidade e magnetismo (Hinze et al., 2013).

Devido as rochas máficas-ultramáficas apresentarem um alto teor de ferro, as principais ocorrências minerais são de paramagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. Além disso, autores como Dentith e Mudge (2014) afirmam que o aumento de maficidade implica no aumento de suscetibilidade magnética.

Portanto o método magnético foi utilizado nesta pesquisa com o intuito de melhor caracterizar a Intrusão Barra do Gameleira, que é uma suíte máfica-ultramáfica, com base no teor e distribuição de minerais magnéticos e suas correlações com as mineralizações polimetálicas presentes.

3.1.2 Gamaespectrometria

A gamaespectrometria, também conhecida como radiometria, é um método que se baseia no decaimento radioativo de isótopos instáveis para isótopos mais estáveis, resultando na emissão de radiação ionizante, especificamente raios gama (Wilford e Minty, 2007). Os elementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th) são responsáveis pela maior parte da radiação gama na superfície terrestre devido ao seu decaimento radioativo Minty (1997).

A radiação emitida pelos raios gama está relacionada apenas aos materiais presentes até 30 centímetros de profundidade em relação à superfície. Esses dados radiométricos apresentam variações significativas devido às condições climáticas às quais o ambiente geológico está exposto (Gunn et al., 1997).

O potássio é o elemento mais comum na composição das rochas e possui valores de teor médio de 2.3% na crosta terrestre. Diferentemente, os elementos urânio e tório são menos presentes na crosta terrestre e têm uma distribuição média na crosta de 3 e 12 ppm,

respectivamente. De forma simplificada, há uma tendência no aumento de concentração dos radioelementos das rochas básicas para ácidas (Wilford e Minty, 2007).

Portanto, as rochas máficas-ultramáficas apresentam baixas concentrações dos três rádioelementos, e o método da gamaespectrometria foi utilizado no reconhecimento destas rochas, bem como de possíveis eventos mineralizantes que alteraram a composição dos radioelementos nas rochas.

3.2 PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA

Dentre os métodos prospectivos utilizados durante uma campanha de exploração mineral, a geoquímica possui um papel significativo, por meio da prospecção geoquímica. O método parte do princípio que a ocorrência de teores anômalos está relacionada a presença de depósitos minerais, os quais possuem um contraste significativo de concentrações com os materiais adjacentes (Licht, 1998).

Dessa maneira, os dados geoquímicos foram utilizados de forma significativa para elaboração do modelo prospectivo, uma vez que a presença de teores anômalos está intrinsecamente relacionada à presença de depósitos minerais.

Os dados geoquímicos utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio de três tipos de técnicas de amostragem: em rocha (litogeoquímica), em sedimentos de corrente (sedimentos ativos de drenagem) e em concentrado de bateia.

3.2.1 Geoquímica de Rocha - Litogeoquímica

O levantamento litogeoquímico é uma ferramenta útil durante o reconhecimento regional para definir zonas potenciais, províncias geoquímicas e rochas favoráveis à presença de mineralizações – rochas hospedeiras (Haldar, 2018).

Para esta pesquisa, 111 amostras de rochas máfica-ultramáficas provenientes da Intrusão Barra do Gameleira foram analisadas. Os dados foram cedidos pela companhia COOPERBRITA LTDA para elaboração desta pesquisa. Foram amostrados elementos maiores, menores e metais preciosos.

A determinação dos elementos presentes nas amostras foi realizada por meio de quatro referências analíticas:

- Determinação de ouro, platina e paládio por *Fire Assay* – ICP – fusão de 30 gramas
- Determinação por Digestão Multiácida (20 mililitros) – 0.25 grama de amostra – ICP OES.

- LOI (*Loss on Ignition*) – perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°C.
- Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF.

Para elaboração do modelo prospectivo, a litogeoquímica consiste um dos principais vetores exploratórios, uma vez que os teores anômalos estão diretamente relacionados a presença de mineralizações nas proximidades das medidas.

3.2.2 Geoquímica de Sedimento de Corrente

De acordo com Licht (1998), sedimentos de corrente são materiais não-consolidados depositados ao longo dos vales do sistema de drenagem e gerado pelos processos constantes de intemperismo e erosão que atuam nos materiais geológicos localizados na bacia de drenagem. Portanto, esse sedimento representa a interação dos materiais geológicos presentes a montante da bacia.

Os dados geoquímicos de sedimento de corrente foram compilados do projeto “GEOLOGIA E RESULTADOS PROSPECTIVOS DA ÁREA BARRA DO GAMELEIRA – TOCANTINS”, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2000.

De acordo com CPRM (2000), as amostras de sedimento de corrente foram coletadas com cerca de 0.5 litros, e peneiradas no local de amostragem a uma dimensão inferior a 1 mm. Posteriormente foram secadas, peneiradas, pulverizadas, quarteadas para análise química dos elementos: cobre, zinco, cobalto, níquel, cromo e ouro. As amostras foram digeridas por ácido nítrico a quente (Cu, Zn, Co, Ni), ácido fosfórico (Cr), ácido bromídrico e bromo (Au). Por fim, a dosagem dos elementos foi obtida por espectrometria de absorção atômica, com limites inferiores de detecção de 1 ppm para Cu, Ni, Co, Zn; 5 ppm para Cr e 0.02 ppm para Au.

Por fim, a geoquímica de sedimento de corrente foi utilizada com o intuito de correlacionar as anomalias de geoquímica de rocha, pois as medidas em rocha são realizadas *in situ*, ou seja, representam os materiais presentes no local onde a amostra foi coletada.

3.2.3 Geoquímica de Concentrado de Bateia

A amostragem por meio do concentrado de bateia é uma das técnicas mais empregadas, e utiliza as propriedades gravimétricas de minerais pesados – aqueles que possuem densidade maior que quartzo e feldspato. Devido estes minerais serem mais resistentes aos processos de intemperismo e erosão, se acumulam como produtos residuais da rocha fonte e podem ser encontrados em solos residuais, aluviões e colúvios. Alguns destes minerais são altamente valiosos – como ouro, platina e paládio – outros indicam o grau de metamorfismo regional ou até mesmo a presença de atividades hidrotermais (Overstreet e Marsh, 1981; Licht, 1998).

Os dados geoquímicos de concentrado de bateia foram compilados do projeto “GEOLOGIA E RESULTADOS PROSPECTIVOS DA ÁREA BARRA DO GAMELEIRA – TOCANTINS”, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2000.

Segundo a CPRM (2000), as amostras foram coletadas com cerca de 15 litros, peneiradas no local de amostragem para uma dimensão inferior a 3 milímetros. Posteriormente, foi realizada a separação da fração pesada com bromofórmio e quarteamento das amostras. Por fim, as análises químicas foram obtidas a partir de pré-concentração com coletor de chumbo e determinação analítica por espectrometria de absorção atômica. Os elementos amostrados foram ouro, platina e paládio com limites inferiores de detecção de 1 ppb, 3 ppb e 1 ppb, respectivamente. Além disso, para as amostras com teores analíticos de platinóides acima de 100 ppb, foram realizadas análises mineralógicas e separação dos metais para dosagem semiquantitativa. Por fim, estes foram estudados por meio de microscopia eletrônica de varredura com EDS.

Semelhantemente à geoquímica de sedimento de corrente, a geoquímica de concentrado de bateia foi um importante resultado para localizar bacias de drenagens que possuem rochas fontes com altos teores de metais preciosos – materiais de interesse econômico – e correlacionar com a presença destes metais em anomalias de geoquímica de rocha.

3.3 MAPEAMENTO GEOLÓGICO

Dentre as etapas desenvolvidas durante uma pesquisa de exploração mineral, a de mapeamento geológico possui grande importância, pois, a partir de informações geológicas que se pode interpretar e correlacionar os dados geofísicos e geoquímicos. De forma simplificada, as variações litológicas que definem as mudanças nos resultados geofísicos e geoquímicos. Portanto, se faz necessária a integração dos dados para compreender de forma mais precisa os processos que determinam a presença de mineralizações ou não.

O mapeamento geológico foi realizado em campo, por meio da coleta de amostras, descrição de afloramentos e medições de estruturas geológicas. Posteriormente foram feitas as lâminas das amostras com maior potencial de mineralização e a petrografia destas lâminas.

3.3.1 Mapeamento geológico de semi-detalle

Devido à grande extensão da Intrusão Barra do Gameleira – cerca de 72 quilômetros quadrados – o mapeamento geológico focou nas porções com maior potencial de mineralização, de acordo com estudos já realizados anteriormente. Dessa forma, foram mapeados 19.60 quilômetros quadrados, em escala de 1:50,000 com ênfase na porção leste da intrusão. Além disso, foram medidas 94 estruturas como dobras, falhas, fraturas e zonas de cisalhamento.

Ao final do levantamento 6 amostras foram separadas para realização de petrografia e petrofísica. As amostras foram escolhidas em função da possibilidade de ocorrências de sulfetos e são todas classificadas como metaultramafitos – dunitos, peridotitos e piroxenitos serpentinizados em geral.

3.3.2 Petrografia

A petrografia foi realizada por meio das descrições macroscópica das rochas e microscópicas das lâminas. As lâminas foram descritas por meio de imagens obtidas em microscópios Leica e Zeiss (com luz transmitida e refletida), sob nicóis paralelos e cruzados com aumentos de 100x, 200x e 500x, no Laboratório de Petrografia e Minerografia do Departamento de Geologia, da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/EM/UFOP)

O objetivo principal foi de caracterizar e melhor compreender os processos de formação das rochas que possuem sulfetos de níquel (cobalto) e cobre.

3.4 PETROFÍSICA

A etapa final para elaboração do modelo prospectivo foi a realização de medidas petrofísicas para análise com os resultados já existentes da aerogeofísica. As amostras escolhidas para realização da petrografia foram as mesmas para realização da petrofísica. Ao todo, 6 diferentes rochas foram analisadas por meio de suas propriedades magnéticas e radiométricas.

3.4.1 Suscetibilidade magnética

O método da magnetometria está intrinsecamente relacionado as propriedades magnéticas dos materiais. Como dito anteriormente, os materiais podem ser classificados como: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. De forma simplificada, esses materiais podem ser caracterizados pelos valores de suscetibilidade magnética da rocha. Portanto, é possível identificar as rochas ultramáficas da Intrusão Barra do Gameleira, por meio das medidas de suscetibilidade magnéticas realizadas nas amostras coletadas.

Para obtenção dos valores de suscetibilidade magnética foi utilizado o equipamento *MPP Probe* da fabricante *GDD Instrumentation* e, com o intuito de diminuir os efeitos de anisotropia presentes nas amostras, foram realizadas 10 medidas por amostra, sendo 2 medidas em 5 diferentes direções, como ilustra a Figura 3.3a). É possível observar pela Figura 3.3b) que há uma forte anisotropia na amostra, com valores variando de 9.5 a 22.5 (10^{-3} SI), portanto esse critério de medição foi adotado para todas as amostras.

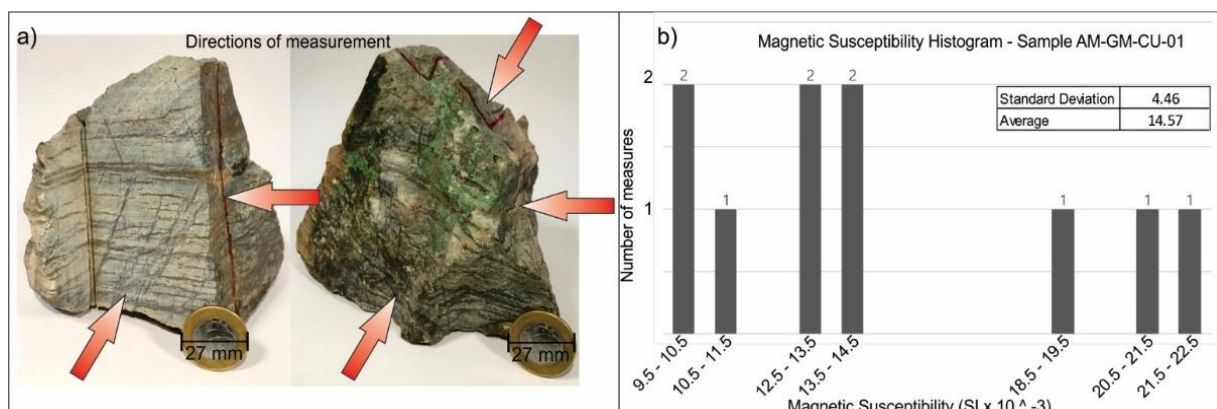


Figura 3.3: a) Fotografia evidencia uma amostra de rocha (AM-GM-CU-01) com a direção (setas em vermelho) do registro das medidas de suscetibilidade magnética; b) Histograma de frequências dos valores de suscetibilidade medidos para a amostra AM-GM-CU-01.

3.4.2 Gamaespectrometria

Para melhor compreender as distribuições dos radioelementos na Intrusão Barra do Gameleira em função das litologias, foram realizadas medidas gamaespectrométricas em laboratório. O intuito foi de identificar o padrão de assinatura radiométrico das rochas ultramáficas, principalmente em locais de ocorrências de sulfetos.

Para medição dos teores de potássio, urânio e tório foi utilizado o gamaespectrômetro RS-230 da fabricante Radiation Solutions, que realiza as medições por meio de um cristal de óxido de germanato de bismuto – este cristal apresenta precisão três vezes maior que um cristal de mesmo tamanho de iodeto de sódio dopado com tálio NaI(Tl).

As medidas foram realizadas em laboratório e, para isolar as radiações provindas do ambiente, foi utilizada uma caixa com paredes de chumbo. Além disso, a amostra com maior teor de minerais máfico-ultramáficos foi selecionada para verificar os valores medidos em função de diferentes tempos: 1, 3, 5, 10 e 30 minutos. Não houve variações significativas nos teores dos radioelementos em função do tempo de amostragem (Figura 3.4) e, dessa forma, foi escolhido o tempo de 5 minutos para leitura das amostras restantes. Foram calculadas as informações estatísticas da amostragem realizada que constam na Tabela 1.

Tabela 1: Informações estatísticas das medidas gamaespectrométricas para a amostra AM-GM-CU-67, com base nos diferentes tempos de exposição à radiação.

	Total [ppm]	Total [cpm]	K [%]	K [cpm]	U [ppm]	U [cpm]	Th [ppm]	Th [cpm]
Standard Deviation	1.96	7.60	0.00	2.51	0.08	1.44	0.21	1.73
Maximum	32.80	126.60	0.00	5.00	0.30	8.10	1.50	12.70
Minimum	27.80	107.30	0.00	0.00	0.10	5.30	1.00	9.10
Average	30.48	117.74	0.00	1.92	0.22	6.48	1.26	11.00

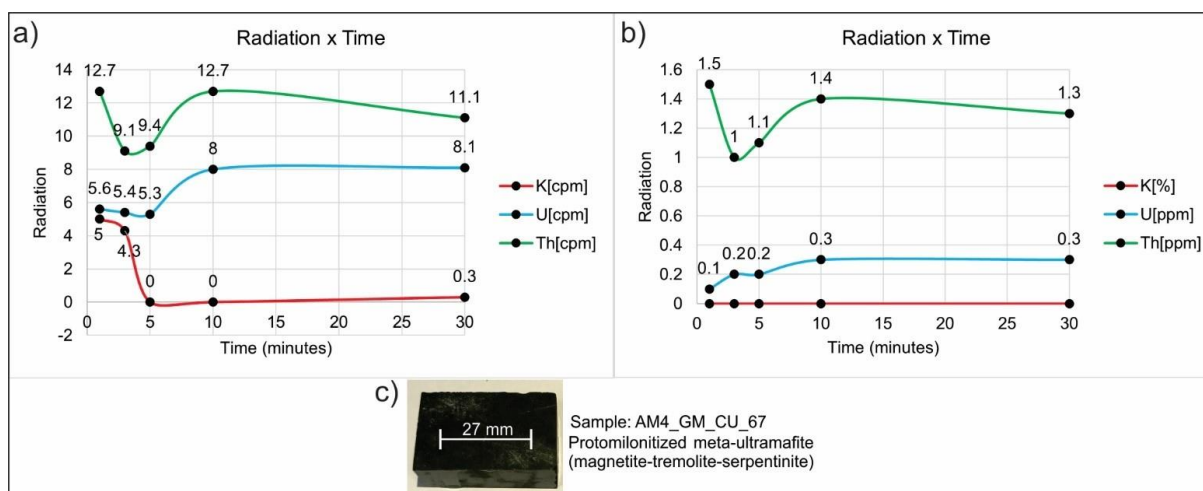


Figura 3.4: Gráficos da radiação gama em função dos diferentes tempos de exposição, para a mesma amostra (AM-GR-67). Em a) os teores de radioelementos estão em cpm (contagem por minuto); em b) o teor de potássio está em porcentagem e os teores de urânio e tório em ppm. Em c) uma fotografia do padrão de amostras utilizado para medidas gamaespectrométricas.

4. PROCESSAMENTO E MODELAGEM

Nesta seção serão explicadas as técnicas utilizadas para obtenção dos resultados. A seção foi subdividida em função dos tipos de informações disponíveis: aerogeofísica, geoquímica e geologia. Ao fim, constam os processos de integração entre os diferentes tipos de métodos aplicados.

4.1 Magnetometria

Os dados magnéticos foram interpolados no *software Oasis Montaj*, por meio do interpolador bi-direcional (*bi-directional gridding*), com células de 125 metros – um quarto do espaçamento entre linhas de voo – e o dado utilizado foi a intensidade do campo magnético após a remoção do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). O resultado desta interpolação é conhecido como intensidade magnética total (TMI) e é utilizado para calcular os demais filtros e realces (Figura 3.5). Além disso, foi realizada inversão 3D dos dados

magnéticos por meio do *software Oasis Montaj* com duas técnicas no menu *VOXI*: suscetibilidade e inversão de vetor magnético (MVI) (Figura 3.6). Para ambas as técnicas foi utilizada uma malha regular com tamanho de célula de 50x50x25 metros e os demais parâmetros de inversão utilizados foram o padrão do *Oasis Montaj*.

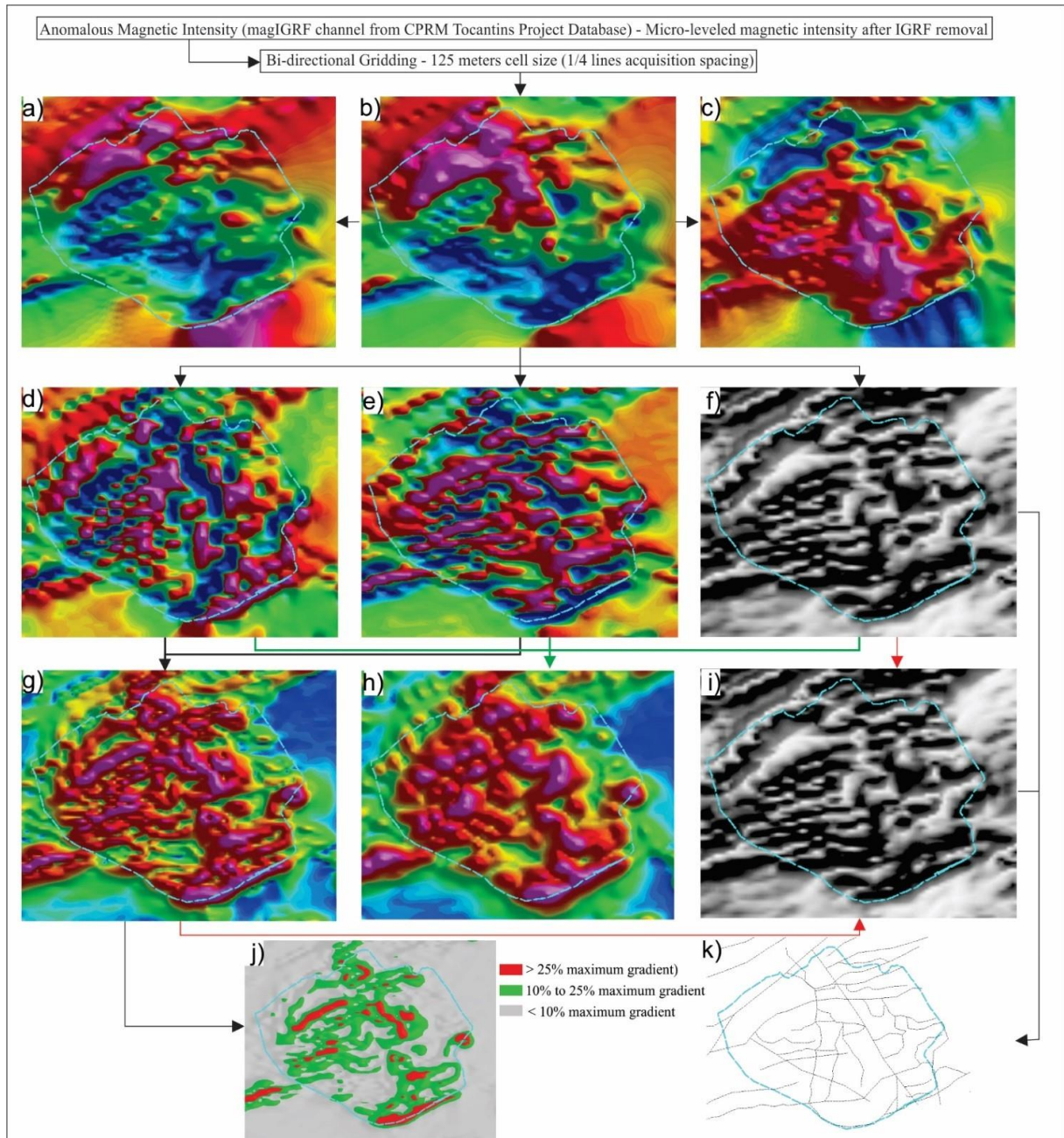


Figura 3.5: Fluxograma de desenvolvimento dos produtos utilizados na elaboração do modelo prospectivo da Intrusão Barra do Gameleira (pontilhado azul de acordo com Correia Filho e Sá, 1980). Em a) anomalia magnética reduzida ao equador; b) anomalia magnética; c) anomalia magnética reduzida ao polo; d) derivada da anomalia magnética na direção oeste-leste (D_x); e) derivada da anomalia magnética na direção norte-sul (D_y); f) derivada vertical (D_z) da anomalia

magnética; g) gradiente horizontal da anomalia magnética; h) gradiente total da anomalia magnética; i) derivada Tilt da anomalia magnética; j) domínios magnéticos extraídos do gradiente horizontal; k) lineamentos magnéticos extraídos da derivada Tilt.

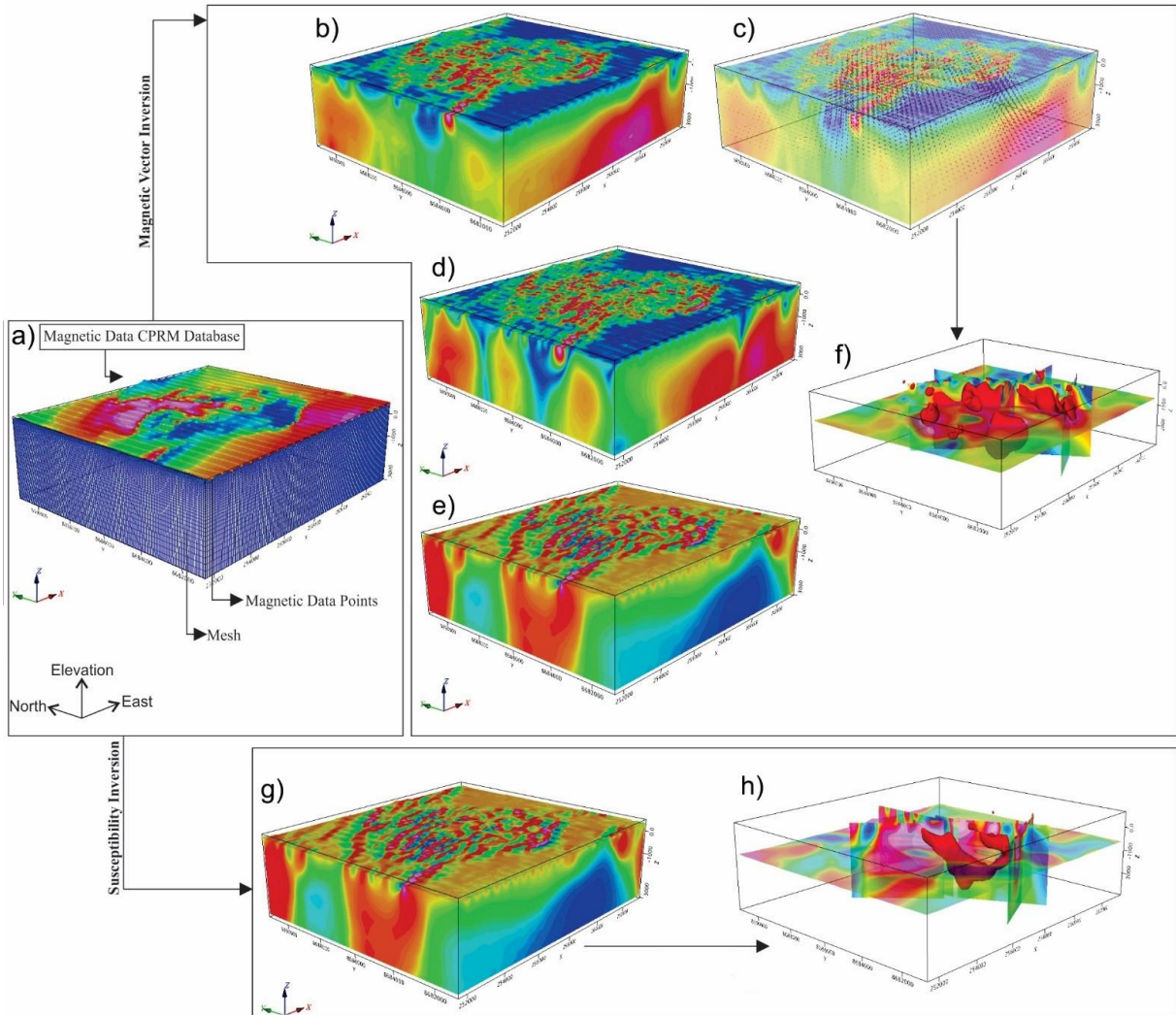


Figura 3.6: Fluxograma de desenvolvimento das inversões magnéticas em 3D. Em a) *mesh* (malha regular 3D) e pontos utilizados para inversão; em b) resultado da inversão MVI: modelo 3D de suscetibilidade magnética; em c) o mesmo modelo de b), em transparência, somado aos vetores obtidos durante inversão; em d) componente principal de indução magnética; em e) componente principal de remanência magnética; em f) fatias, seções e isosuperfícies extraídas do modelo de suscetibilidade 3D MVI; em g) resultado da inversão de suscetibilidade magnética e em h) fatias, slices e isosuperfícies extraídas do modelo de suscetibilidade 3D convencional.

Devido ao comportamento do campo geomagnético, as anomalias em médias latitudes – como é o caso da IBG – possuem um padrão dipolar, o que dificulta a interpretação dos dados magnéticos. Dito isso, utiliza-se o processo de redução ao polo (e.g. Baranov, 1957; Baranov e Naudy, 1964), ou redução ao equador, que transforma os dados para como se tivessem sido adquiridos no polo magnético/equador (Isles e Rankin, 2013). Paralelamente, o Brasil encontra-se no centro de uma anomalia de baixa intensidade magnética, também conhecida como Anomalia Magnética do Atlântico Sul (Chapman e Bartels, 1940). Esse fenômeno permite em alguns casos, que a magnetização remanente tenha maior intensidade que a magnetização induzida, fazendo com que o processo de redução ao polo (ou equador) gere um resultado que não condiz com a realidade física do meio (Nabighian et al., 2005).

Portanto, outros filtros foram utilizados para interpretação dos dados magnéticos. Os realces conhecidos como Amplitude do Sinal Analítico e Gradiente Horizontal Total por exemplo, são muito utilizados para detecção de bordas dos corpos magnéticos (Nabighian, 1972; 1974). Filtros como a derivada vertical (Nabighian, 1984) e a derivada Tilt (Miller e Singh, 1994) são empregados para inferir os lineamentos magnéticos.

Por fim, a inversão dos dados magnéticos consiste na obtenção de um modelo tridimensional de distribuição da suscetibilidade magnética. Vale ressaltar que os dados medidos consistem na intensidade de magnetização, que está diretamente relacionada a suscetibilidade magnética e, por isso essa etapa é denominada de inversão, pois fundamenta-se na inversão de um dado de intensidade magnética, para a distribuição tridimensional da propriedade que controla a intensidade magnética.

4.2 Gamaespectrometria

Os dados radiométricos foram interpolados no *software Oasis Montaj*, por meio do interpolador de mínima curvatura, com células de 125 metros – um quarto do espaçamento entre linhas de voo. Os dados utilizados são a contagem total de radiação ($\mu R/h$) e os teores de potássio (porcentagem), tório (ppm) e urânio (ppm).

Diferentemente dos dados magnéticos, que possuem um aumento da magnetização em rochas máficas, os dados radiométricos possuem um decréscimo de radiação em função do aumento de maficidade. Após etapa de processamento dos dados, realizada pela CPRM, alguns pontos apresentaram teores negativos de radioelementos. Contudo, não existem teores negativos e essa limitação está diretamente relacionada à presença de rochas ultramáficas, que apresentam concentrações muito baixas dos radioelementos (Figura 3.4). Com o intuito de não eliminar os dados negativos, uma vez que podem ser representantes das rochas ultramáficas, os

dados radiométricos foram normalizados para uma escala de 0.001 a 1.001, através da seguinte equação:

$$X_{normalized} = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} + 0.001 \quad (Equação 3.1)$$

Em que X é a variável que será normalizada. O valor de 0.001 adicionado ao final, tem como objetivo transformar o menor valor do conjunto de dados em 0.001, pois, na gamaespectrometria são elaborados produtos das razões entre os radioelementos e, a presença do valor 0 nas razões gera uma indeterminação matemática.

Com os valores normalizados são geradas malhas de interpolação para cada radioelemento e para a contagem total de radiação. Posteriormente, cria-se uma composição ternária dos radioelementos (K, U e Th). Com o intuito de ressaltar as rochas máficas-ultramáficas utilizou-se a composição ciano-magenta-amarelo (CMY) para os elementos potássio-urânio-tório, respectivamente.

Além disso, os dados também foram submetidos a outra normalização, com base na distribuição de tório (Saunders et al., 1987; 1993; 1994). A normalização foi inicialmente empregada no reconhecimento de áreas com acumulação de petróleo (Saunders et al., 1987) e no Brasil, Pires (1995) utilizou para identificação de áreas com atividades hidrotermais para prospecção de ouro.

De acordo com Saunders et al. (1987), levantamentos radiométricos são afetados por muitos fatores, como litologia, umidade do solo, presença/ausência de vegetação e geometria de contagem. Dessa forma, o autor utiliza a quantidade de tório como um controle litológico para definir o potássio e urânio ideais. A ideia parte da premissa de que qualquer fator que altere ou influencie a concentração de tório, também afetará as concentrações de urânio e potássio, de forma similar e preditiva.

Essa similaridade de comportamentos permite a utilização do tório para prever as concentrações de urânio e potássio, aproximadamente. O intuito é que após normalização, os novos valores não sejam relacionados a umidade do solo, presença/ausência de vegetação e geometria de contagem (Saunders et al., 1987). A técnica consiste na aplicação das seguintes equações:

$$K_i = \frac{\bar{K}_s}{eTh_s} * Th_s \quad (Equação 3.2)$$

$$U_i = \frac{\bar{U}_s}{e\bar{Th}_s} * Th_s \quad (\text{Equação 3.3})$$

em que as variáveis K_i e U_i são as concentrações ideal de potássio definida por tório e concentração ideal de urânio definida por tório, respectivamente. K_s , U_s e Th_s são os valores de potássio, urânio e tório medidos em cada ponto. Por fim, $\bar{K}_s$, $\bar{U}_s$ e $\bar{eTh}_s$ são as médias das malhas de interpolação dos elementos potássio, urânio e tório, respectivamente.

A normalização dos radioelementos pelo tório é obtida pelas equações:

$$KD\% = \frac{K_s - K_i}{K_i} \quad (\text{Equação 3.4})$$

$$UD\% = \frac{U_s - U_i}{U_i} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Saunders et al., (1987) explica que a concentração de $KD\%$ é um resultado do equilíbrio dinâmico entre processos de remoção por troca iônica e possível adição por fluxo de água em superfície e subsuperfície. Similarmente $UD\%$ também é resultado do equilíbrio entre processos de adição por redução química, influxo de águas subterrâneas e remoção por lixiviação ou complexação.

Por fim, Saunders et al. (1993) combinou a utilização do $KD\%$ e $UD\%$ para obtenção de um novo termo, denominado $DRAD$ (equação 3.6), que segundo o autor, possui valores positivos em locais favoráveis à presença de acumulações de petróleo

$$DRAD = (UD\% - KD\%) \quad (\text{Equação 3.6})$$

Pires (1995) conclui que o parâmetro $KD\%$ é eficaz na localização de acumulações anômalas de potássio, que muitas vezes estão correlatos a presença de eventos mineralizantes ou processos hidrotermais. O autor complementa que o urânio não apresenta resultados tão expressivos, porém, ainda há uma pequena correlação das zonas anômalas em $UD\%$ em locais favoráveis a presença de minérios. Dessa forma, foi criado um novo termo, denominado $CRAD$, que possui como foco, evidenciar ambas as áreas de concentrações anômalas de potássio.

$$CRAD = (UD\% + KD\%) \quad (\text{Equação 3.7})$$

Ao final, os dados normalizados pela equação 3.1 foram utilizados para elaborar razões de interesse, enquanto os dados normalizados de acordo com Saunders et al. (1987, 1993) foram utilizados como vetores prospectivos para identificação das litologias ultramáficas.

A Figura 3.7 contém o fluxo de desenvolvimento dos produtos gerados e obtidos a partir da distribuição dos radioelementos potássio, urânio e tório.

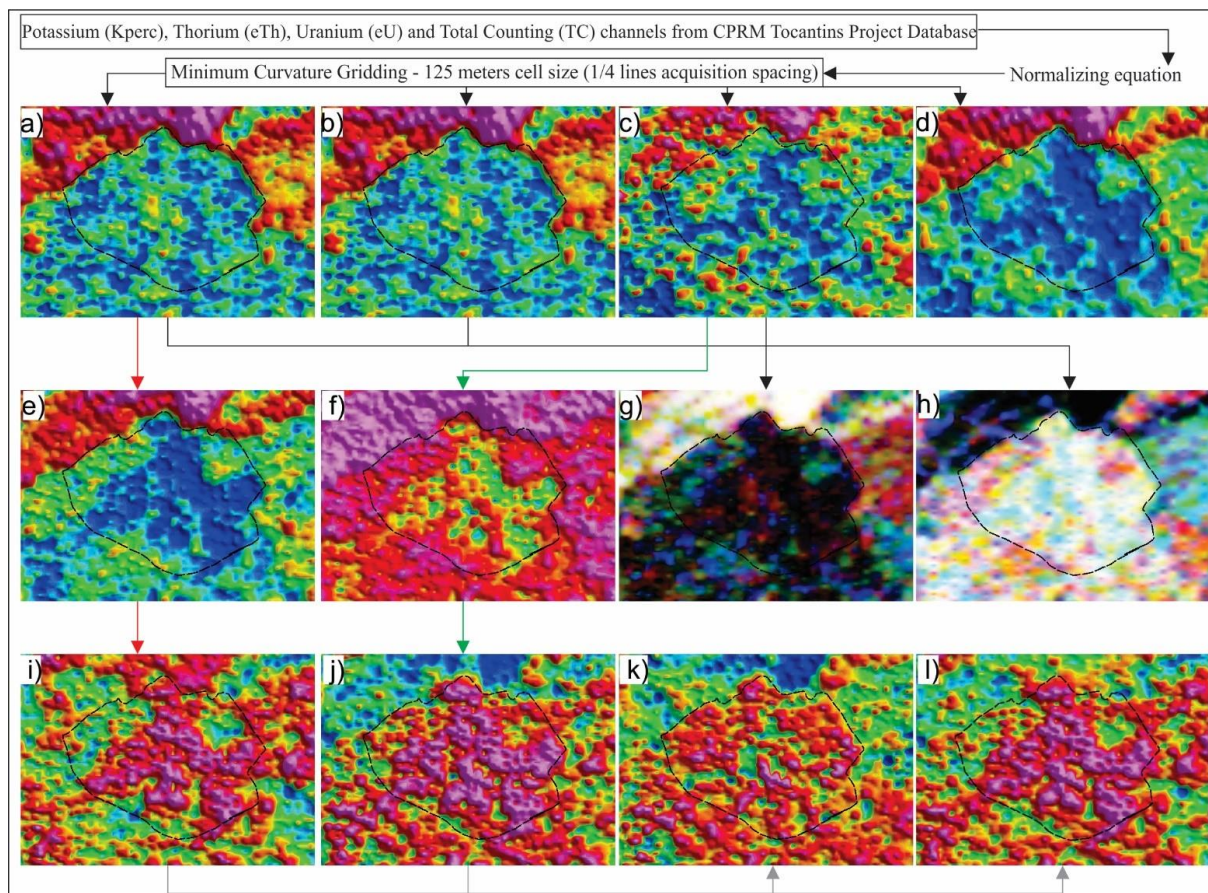


Figura 3.7: Fluxo de desenvolvimento para elaboração dos produtos gamaespectrométricos. Em a) distribuição de potássio; b) distribuição de urânio; c) distribuição de tório; d) contagem total de radiação gama; e) potássio normalizado por tório; f) urânio normalizado por tório; g) mapa ternário RGB de tório, urânio e potássio; h) mapa ternário CMY de potássio, tório e urânio; i) potássio anômalo; j) urânio anômalo; k) DRAD; l) CRAD.

4.3 Geoquímica

As diferentes técnicas de amostragens – rocha, sedimento de corrente e concentrado de bateia - foram analisadas por meio do mesmo procedimento. Primeiramente foram calculados os coeficientes de correlação Pearson (equação 3.8) para os diferentes elementos amostrados nas técnicas de amostragem.

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{(var(x) * var(y))}} \quad (Equação 3.8)$$

Em que r é o coeficiente de correlação, $cov(X,Y)$ é a covariância entre as variáveis X e Y , $var(x)$ e $var(y)$ são as variâncias destas mesmas variáveis. O coeficiente de correlação indica a dependência numérica entre as variáveis, sendo $r = 1$ correlação perfeita, $r = 0$ nenhuma correlação entre as variáveis e $r = -1$ correlação perfeita, porém, indiretamente proporcional entre as variáveis.

A partir dos resultados de correlação foi possível definir os elementos de interesse e que possuem dependência entre si, para realização de uma análise estatística. Os elementos escolhidos foram níquel, cobre, cobalto, cromo, ouro, platina e paládio. De acordo com a distribuição de cada elemento, em sua respectiva técnica de amostragem, foram definidos os valores anômalos, classificados em primeira e segunda ordem:

$$Anomalia_{1ordem} = mediana + (2 * desvio padrão) \quad (Equação 3.9)$$

$$Anomalia_{2ordem} = mediana + (1 * desvio padrão) \quad (Equação 3.10)$$

Pontos de amostragem com valores maiores ou iguais as anomalias de primeira ou segunda ordem, foram considerados vetores prospectivos para a identificação dos alvos exploratórios (Figura 3.9). A Figura 3.8 demonstra os histogramas com as indicações das anomalias de primeira e segunda ordem, além dos gráficos de correlação para os elementos de interesse da litogeoquímica.

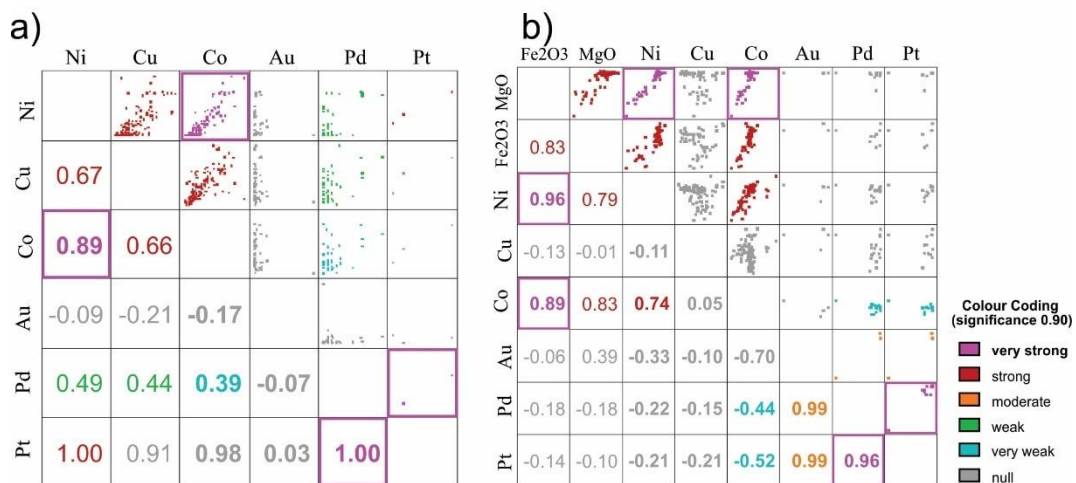


Figura 3.8: Correlações entre elementos de interesse. Em a) dados litogeoquímicos, em b) dados de sedimento de corrente (Ni-Cu-Co) e concentrado de bateia (Au-PGE).

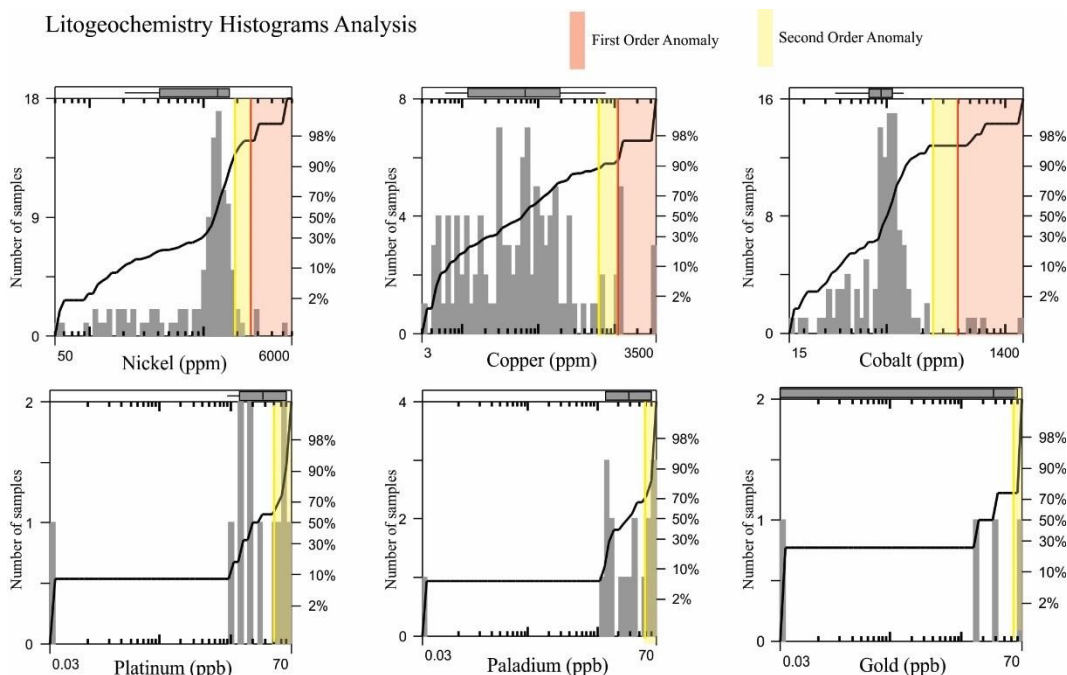


Figura 3.9: Histogramas de distribuição de frequência de análises litogeoquímicas obtidas para os elementos (a) Ni, (b) Cu, (c) Co, (d) Pt, (e) Pd e (f) Au.

4.6 Petrofísica

Os dados petrofísicos são poucos devido ao número limitado de amostras utilizado - 6 amostras de rochas (meta)ultramáficas. Dessa forma, foram adquiridos 10 pontos de suscetibilidade magnética e apenas uma leitura gama para cada amostra, exceto a amostra nº 67 que foi selecionada para validação dos resultados gamaespectrométricos e teve 5 leituras repetidas, com diferentes tempos de exposição à radiação.

Dessa forma, para os dados de suscetibilidade magnética foram calculados as médias e desvio padrão de cada amostra, enquanto para as informações radiométricas foram selecionadas apenas as leituras com tempo de exposição igual a 5 minutos.

4.7 Correlações geofísicas

Por fim, algumas integrações entre os diferentes tipos de dados foram realizadas, além de produtos novos gerados para essa pesquisa. Pires e Moraes (2006) desenvolveram o índice máfico (*IM*) como um produto da integração entre dados magnéticos e radiométricos. Vale ressaltar que os dados magnéticos utilizados para integração foram normalizados por meio da equação 3.1.

$$IM = \frac{AGT}{K \cdot eTh \cdot eU} \quad (\text{Equação 3.11})$$

De acordo com Pires e Moraes (2006), este produto evidencia os limites laterais de rochas máfica-ultramáficas, pois resalta os locais com alto gradientes magnéticos e baixas contagens dos radioelementos.

Com o objetivo de melhorar o *IM* proposto por Pires e Moraes, foi elaborado um novo índice máfico-ultramáfico (*IMUM*):

$$IMUM = \frac{GHT}{K^2 \cdot (eTh + eU)} \quad (Eq. 3.12)$$

Diferentemente do *IM*, o *IMUM* utiliza o gradiente horizontal total como indicador dos altos magnéticos e resalta os locais com menor presença de potássio, uma vez que as rochas máficas-ultramáficas apresentam teores de potássio extremamente baixos, ou quase nulos.

A Amplitude do Gradiente Total (ou Sinal Analítico) apresenta picos localizados nos contatos verticais, e quando o contato possui mergulho, esse pico é um pouco deslocado lateralmente (Dentith e Mudge, 2014). Diferentemente, o Gradiente Horizontal Total não leva em consideração a componente vertical, o que permite maior precisão na detecção destas bordas magnéticas laterais e, por isso foi escolhido para elaboração do índice máfico ultramáfico.

5. RESULTADOS

Como resultado desta pesquisa, foi elaborado um modelo prospectivo para a IBG, em que três alvos foram selecionados, com base nas informações consideradas vetores prospectivos. Estas zonas foram nomeadas como alvo nordeste, alvo leste e alvo sudeste (também conhecido como Rabo da Cascavel), e serão detalhadas individualmente nesta seção. Paralelamente, esta pesquisa também teve como foco, contribuir no mapeamento geológico do território brasileiro, por meio do detalhamento da IBG. Esse resultado constitui relevada importância para demais pesquisadores que têm como estudo as rochas ultramáficas da Suíte Gameleira, uma vez que a IBG representa a maior intrusão dentro da suíte e não havia sido estudada com tamanho detalhe até então (Figura 3.10).

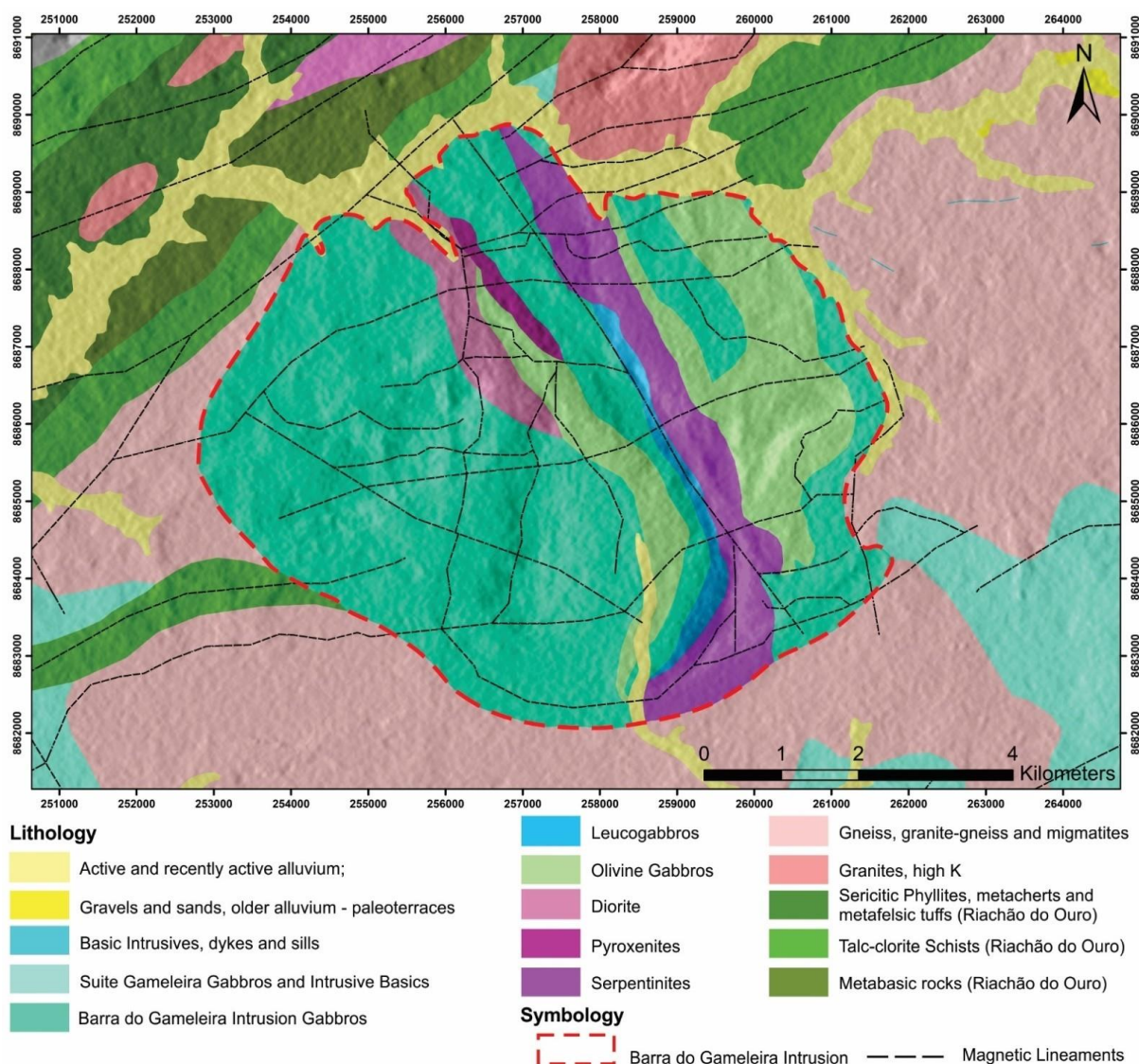


Figura 3.10: Mapa Geológico da Intrusão Barra do Gameleira sobre relevo sombreado.

As 7 amostras coletadas na IBG podem ser classificadas de acordo com IUGS como metaultramafitos, devido a enorme concentração de minerais ultramáficos. Apesar da enorme distância entre as amostras, de forma geral apresentam um padrão semelhante. A Figura 3.11, contém o mapa geológico de detalhe, das rochas ultramáficas da IBG, que serão descritas a seguir.

As amostras da porção sul (Rabo da Cascavel) - n° 1, 14 e 17 – possuem foliação proto-milonítica e granulação média a fina dos minerais visíveis macroscopicamente. Ocorre intensa segregação de caráter deformacional de grãos de magnetita e silicatos ao longo do plano principal de proto-milonitização. Faixas mais claras correspondem a serpentina e restos de tremolita, enquanto as faixas mais escuras são representadas pela magnetita. A foliação proto-milonítica é representada pela distribuição paralela de grãos de magnetita à foliação, além de

fraturas oblíquas a foliação. Possuem metamorfismo de médio grau (fácies anfibolito) e retrometamorfismo em fácies xisto verde na serpentinização.

A amostra nº 5 está isolada em relação as demais coletadas e apresenta um caráter mais isotrópico, quando comparada com as demais. Possui fraca foliação tectônica e granulação média a fina dos minerais visíveis. Diferentemente das rochas da porção sul, a amostra nº 5 não apresenta segregação de caráter metamórfico ao longo de qualquer plano principal de foliação (ou proto-milonitização), ocorrem apenas fraturas, de provável caráter distensivo, que são preenchidas por magnetita. Possui textura nematoblástica a decussada, média, inequigranular dominante e nematoblástica subordinada. Metamorfismo de médio grau com retrometamorfismo de fácies anfibolito e xisto verde.

Por fim, as amostras da região norte da IBG - nº 66 e 67 - também exibem caráter isotrópico, com foliação tectônica pouco expressiva e granulação média a fina dos minerais visíveis macroscopicamente. De forma semelhante a todas as rochas da IBG, também contém segregação de caráter deformacional, dos minerais de magnetita e silicatos serpentinizados, porém em zona de baixa ou menor intensidade deformacional em relação às amostras nº 1, 14 e 17.

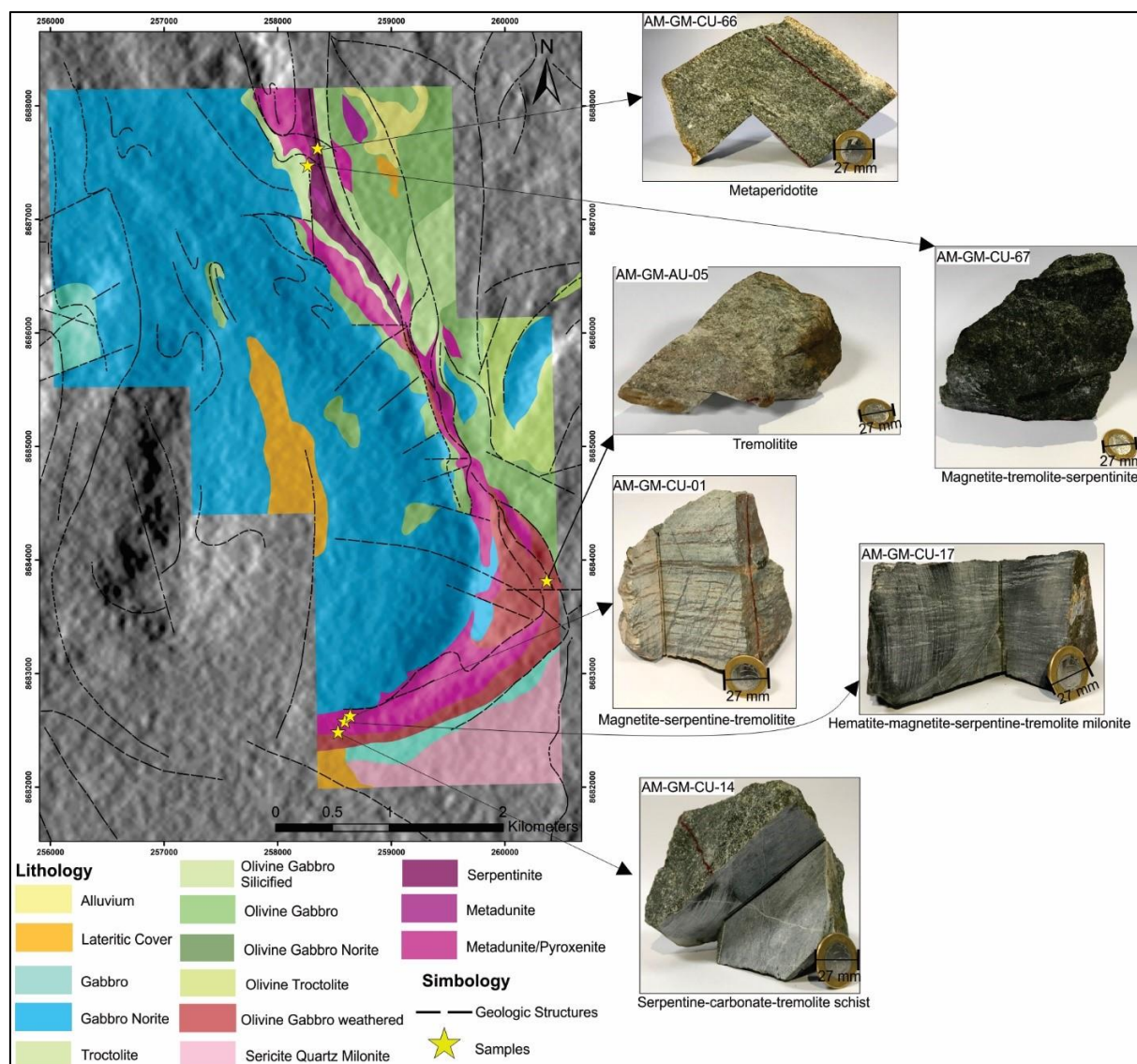


Figura 3.11: Mapa Geológico de semidetalhe da Porção Leste da Intrusão Barra do Gameleira, sobre relevo sombreado.

Com o intuito de melhor visualizar as propriedades físico-químicas das amostras coletadas na IBG, foram elaborados gráficos que comparam valores medidos em laboratório e inferidos da aerogeofísica, além dos teores de níquel e cobre, obtidos da geoquímica de rocha (Figura 3.12). Além disso, uma informação um tanto quanto peculiar também foi inserida no gráfico de dados magnéticos, o LOI – perda ao fogo (*Loss on Ignition*) – que consiste na quantidade de massa perdida devido ao aumento de temperatura, ou seja, está diretamente relacionada à presença de voláteis na amostra.

Ressalta-se que os resultados de geoquímica de sedimento de corrente e concentrado de bateia não foram utilizados pois, a natureza destas informações indica a presença dos elementos amostrados em locais a montante das drenagens que foram amostradas, diferentemente dos

dados litogeoquímicos, que indicam a distribuição anômala de um determinado elemento naquele local.

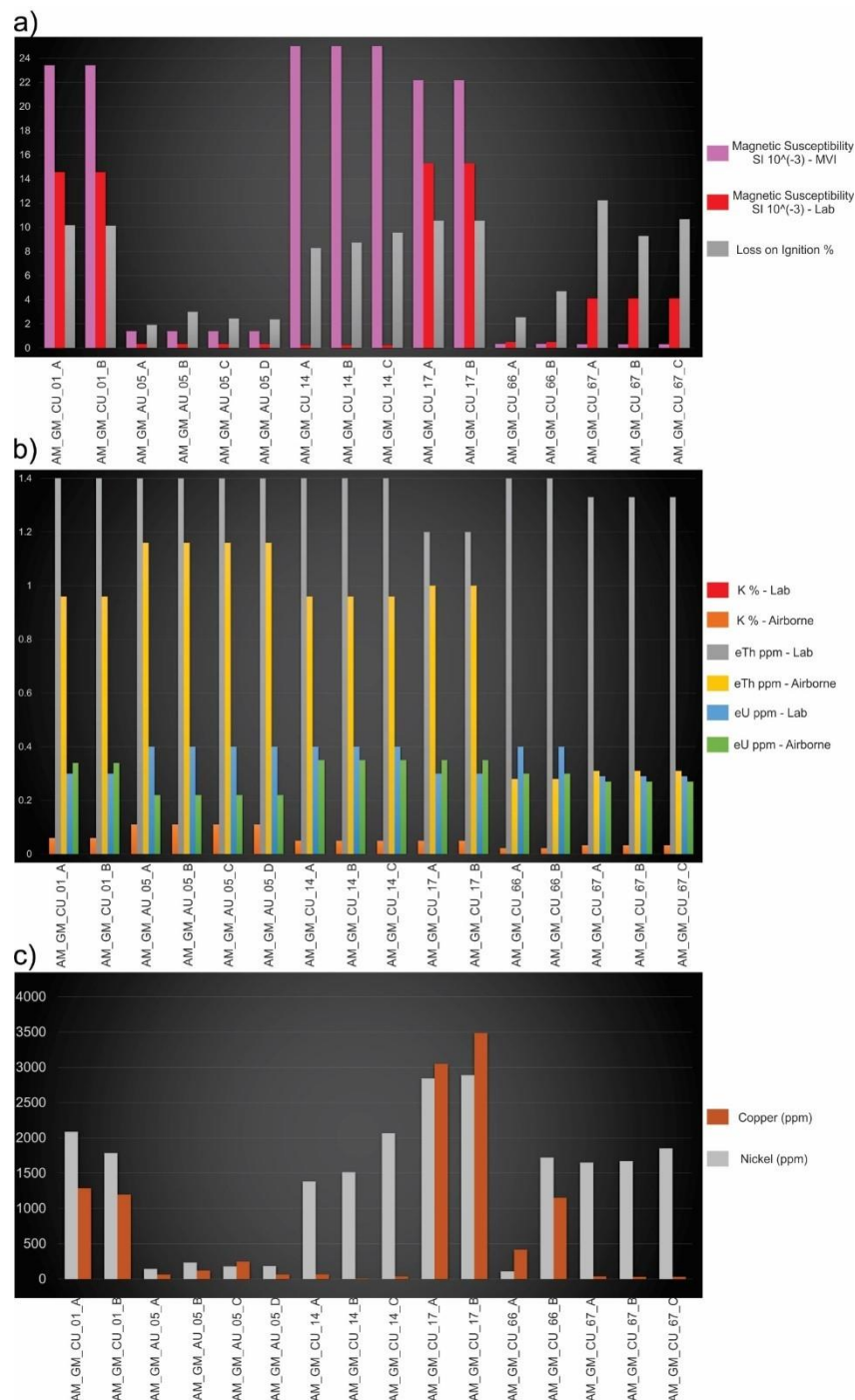


Figura 3.12: Propriedades geofísicas e geoquímicas das amostras coletadas na IBG. Em a) suscetibilidades magnéticas medidas em laboratório e recuperadas por meio da inversão além do LOI; em b) concentrações dos radioelementos medidos em laboratório e inferidos por meio da gamaespectrometria aérea; em c) teor de níquel e cobre obtido por meio de análise litogeoquímica.

A partir da Figura 3.12 é possível fazer uma série de interpretações acerca das rochas ultramáficas da IBG. Primeiro, é interessante observar que todas as amostras tiveram um teor de potássio (medido) igual a zero e, valores muito baixos para o tório e urânio. Outra importante observação é que os valores medidos em laboratório, são próximos dos valores inferidos da gamaespectrometria aérea. Deve-se ressaltar que estes valores foram inferidos do banco de dados gamaespectrométrico e não da interpolação gerada para cada radioelemento.

As amostras nº 1 e 17 possuem os maiores valores medidos em laboratório. Uma diferença notável, é da amostra nº14, em que os valores de suscetibilidade medidos em laboratório são discordantes em relação aos inferidos por meio da inversão MVI. Isso pode ocorrer devido a amostra coletada, estar alterada por processos intempéricos em que a magnetita se transforma em hematita. Ainda uma outra explicação para a limitação é a que a inversão realizada foi mais regional, cujo tamanho de célula foi de 50x50 metros horizontalmente, portanto, pequenas variações litológicas não serão observadas nos resultados magnéticos.

Pode-se observar também que as amostras que possuem os melhores teores de Ni-Cu são as amostras de número 1 e 17 e, coincidentemente têm os maiores valores LOI. Uma interpretação desta correlação é de que as rochas na porção sul da IBG foram sujeitas a processos de alteração hidrotermal ou, eventos tectônicos que enriqueceram a região em metais. Vale ressaltar, que ambas as interpretações consideram a entrada de água no sistema, visto que há intensa transformação das olivinas em magnetita e serpentina e, por isso, a intensidade de magnetização foi considerada um vetor prospectivo de grande relevância.

Devido às informações inferidas das amostras de mão, um novo produto foi elaborado: a dupla composição entre o CRAD e o IMUM. A escolha do CRAD se deu pela alta correlação à presença de rochas ultramáficas, enquanto do IMUM pela alta intensidade de magnetização e, baixa concentração de radioelementos medidos e inferidos em laboratório. Por fim, foram extraídas as anomalias de primeira e segunda ordem da composição dupla (equações 3.9 e 3.10), para integração com os dados geoquímicos (Figura 3.13).

Os dados geoquímicos possuem diferentes técnicas de aquisição e por isso, deve-se atentar a maneira de interpretação. Sedimentos de corrente e concentrado de batéias indicam fontes anômalas a montante da bacia hidrográfica, enquanto coletas de rochas *in situ* representam a localização desta fonte. Dessa maneira, para melhor compreender a localização e distribuição das anomalias geoquímicas, é necessário compreender como as drenagens estão fluindo no relevo local. Para isso, foi adicionado um modelo sombreado de relevo com exagero vertical.

As zonas anômalas em sedimentos de corrente tiveram suas fontes correlacionadas à presença de anomalias litogeoquímicas a montante da bacia hidrográfica. Além disso, pode-se observar que os pontos de alto teor estão correlatos aos altos valores da dupla composição, o que permite uma possível interpretação de que a mesma está diretamente relacionada à localização das fontes anômalas em Ni-Cu-Co-Au-PGE.

Deve-se ressaltar que na região nordeste da IBG há uma discordância entre os altos teores de elementos e a dupla composição. Isso ocorre por um intenso processo de laterização no local, que diminui a intensidade de magnetização por meio da transformação de magnetita em hematita e, ao mesmo tempo, permite um processo de enriquecimento supergênico. As anomalias litogeoquímicas coletadas em rochas ultramáficas a montante da zona laterítica, somadas a presença de altos valores da dupla composição nessas rochas, corroboram a hipótese de uma fonte anômala de Ni-Cu-Co na região norte da IBG.

De forma geral, os alvos foram selecionados em função da distribuição geoquímica local, das zonas anômalas da dupla composição entre CRAD e IMUM e, da presença de lineamentos magnéticos coincidentes com estruturas geológicas favoráveis a ocorrência de mineralizações

Para cada alvo foram elaborados modelos 3D do relevo local, somado a distribuição dos pontos anômalos em geoquímica e produtos geofísicos. O objetivo foi de melhor visualizar os resultados prospectivos, além de apresentar os resultados obtidos na inversão de vetor magnético (MVI) realizada para a IBG. Inversões locais de cada alvo também foram realizadas, contudo, quando os dados magnéticos são reduzidos a uma escala local, há perda de informação dos maiores comprimentos de onda, o que não permite a reconstrução das fontes magnéticas em altas profundidades.

5.1 Alvo Sul (Rabo da Cascavel)

O alvo sul possui um destaque em relação aos demais, pois apresenta teores anômalos de Ni-Cu-Co-Au-PGE em um raio de 100 metros aproximadamente. Outro detalhe interessante é que há um cisalhamento conhecido nessa área, que coincide com um lineamento magnético inferido e os teores geoquímicos anômalos.

O resultado da inversão MVI na região (Figura 3.14) é de extrema relevância e, por meio de sua correlação com os dados geoquímicos e geológicos, o mesmo foi considerado um importante indicador prospectivo na IBG. Primeiramente, pode-se observar que os vetores próximos ao Cisalhamento Cascavel se comportam de forma semelhante aos vetores em uma barra magnética, o que representa que o cisalhamento possui forte indução magnética.

Paralelamente, os teores anômalos coincidem com a isosuperfície magnética (0.015 SI) aflorante e, as rochas amostradas nesse local apresentam maiores valores de LOI, o que corrobora a correlação do alto teor de magnetita nessas rochas. Por fim, a isosuperfície sugere que há continuidade desta unidade magnética em profundidade.

Em suma, os resultados da inversão sugerem uma forte correlação entre a intensidade de magnetização e potencial de mineralização das rochas na IBG. Dito isso, na porção norte deste alvo há uma forte anomalia magnética que não possui teores de litogeoquímica associados, contudo, ocorrem relevantes concentrações em sedimentos de corrente, adjacentes à este corpo magnético.

De forma geral, os dados radiométricos reforçam as zonas de interesse indicadas pela magnetometria. Os produtos KD (Figura 3.15a) e UD (Figura 3.15b) possuem uma correlação moderada com a presença de anomalias geoquímicas e, assim como os resultados magnéticos, a litologia representada pelos serpentinitos é interpretada como uma região anômala na distribuição destes produtos. Outra correlação observada é que as zonas de alto CRAD são coincidentes à presença de lineamentos magnéticos, o que pode indicar que os eventos de enriquecimento mineral são de origem deformacional (Figura 3.15c).

5.2 Alvo Leste

O alvo leste é o que possui o menor tamanho e os teores mais elevados de ouro, com valor máximo de 34 ppm, obtido em concentrado de bateia. Contudo, a fonte anômala dessa concentração ocorre a montante das drenagens amostradas, provavelmente associada aos serpentinitos com alta intensidade de magnetização.

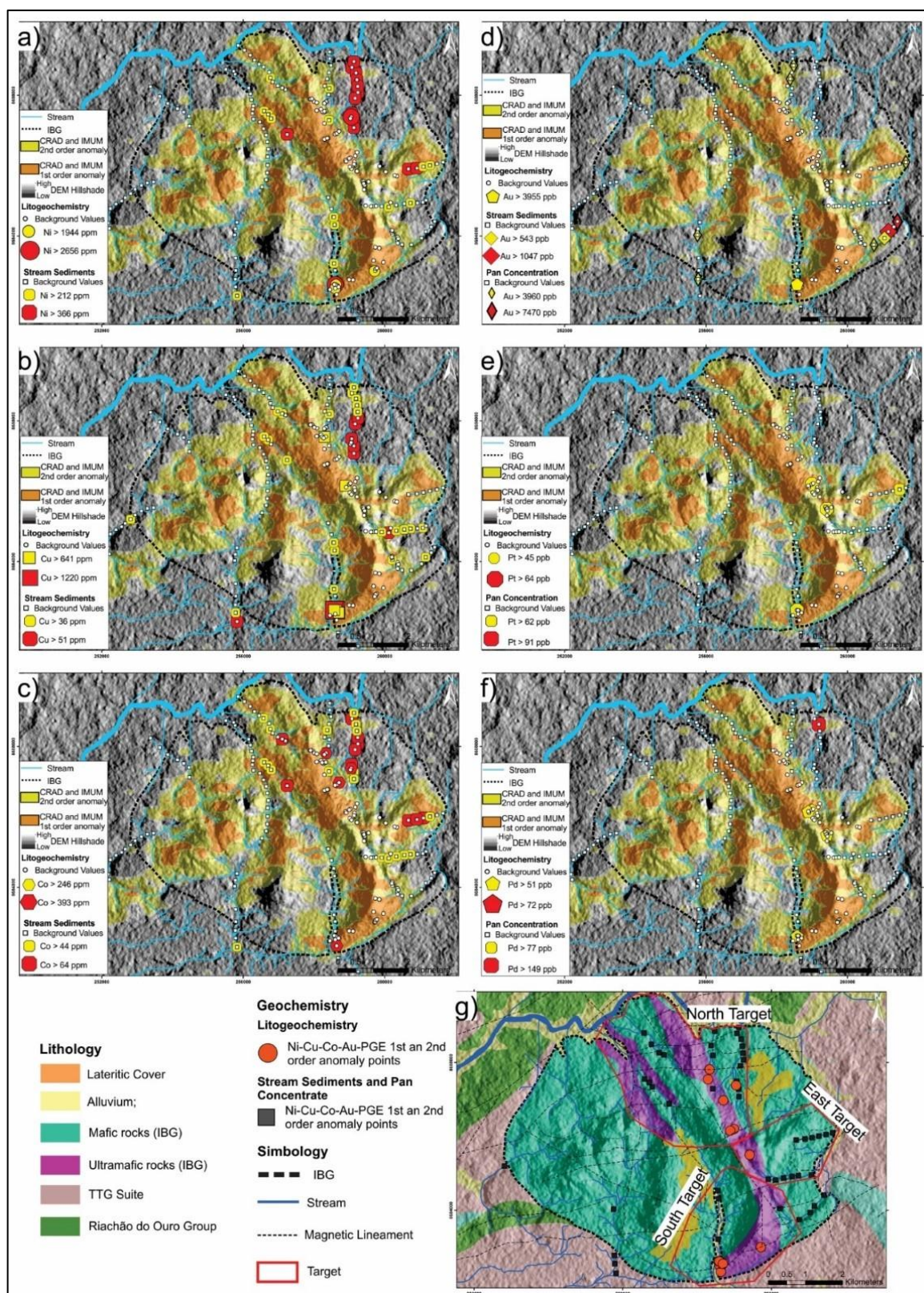


Figura 3.13: Resultados prospectivos da Intrusão Barra do Gameleira, com a integração geofísica, o relevo sombreado e a distribuição de a) níquel; b) cobre; c) cobalto; d) ouro; e) platina; f) paládio. Por fim, em g) os alvos selecionados, sobrepostos à geologia da Intrusão Barra do Gameleira.

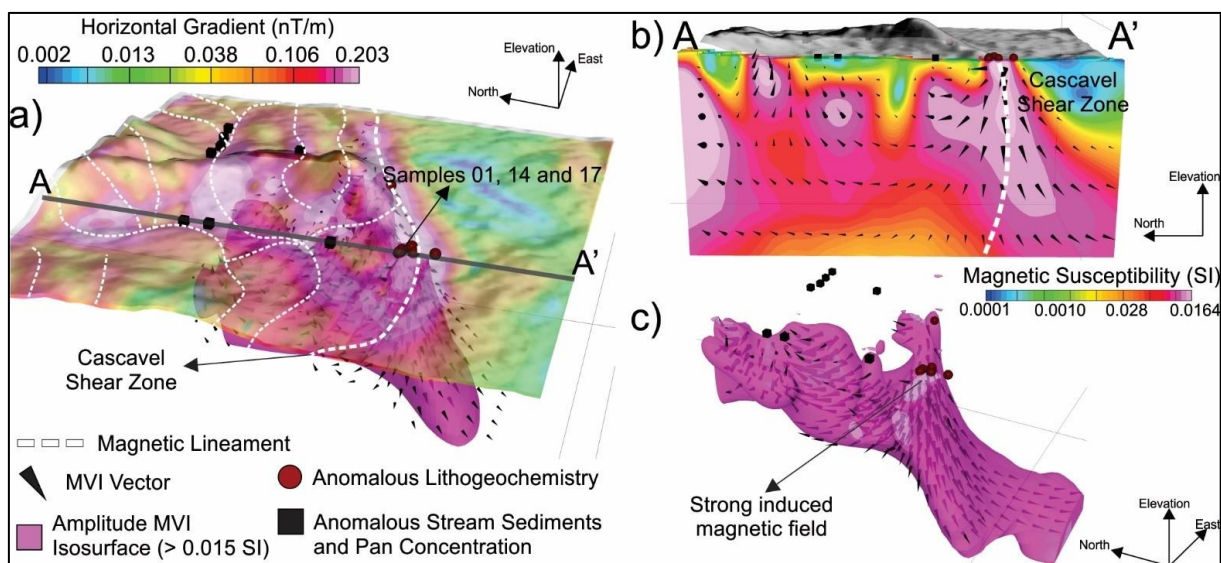


Figura 3.14: Integração de resultados magnéticos no Alvo Sul da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalos de geoquímica; em b) Seção N-S da inversão de vetor magnético; em c) apenas isosuperfície recuperada da inversão.

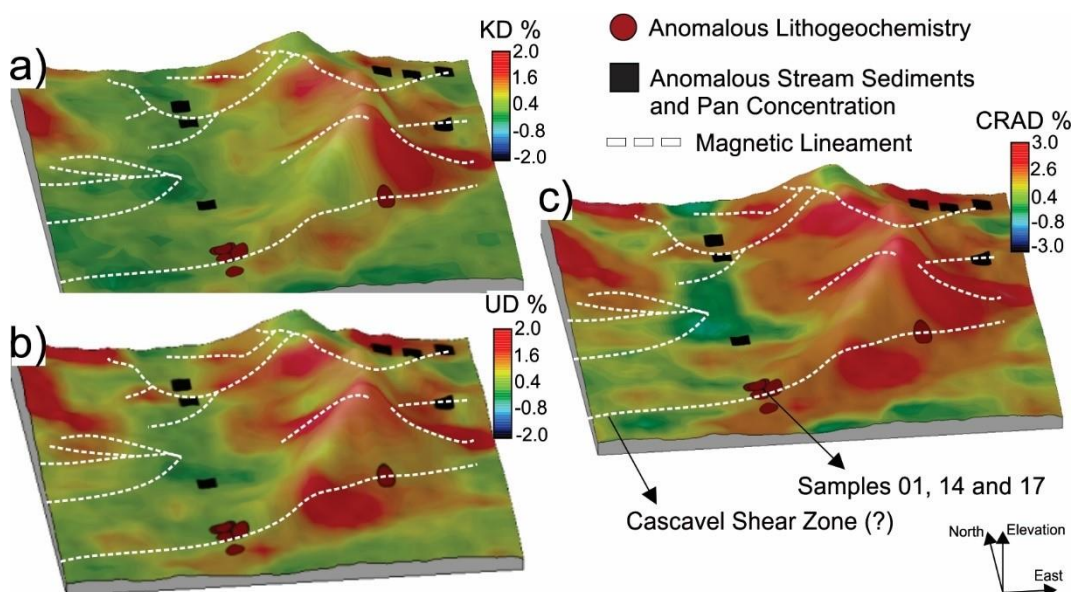


Figura 3.15: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Sul da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD.

De maneira concordante, a inversão MVI demonstra que há um corpo magnético extenso e profundo, coincidente a distribuição dos serpentinitos (Figura 3.16). Há também uma outra unidade magnética, mais a leste do alvo, de pequena extensão e profundidade, mas que aflora em superfície e coincide com a presença de anomalias litogeoquímicas.

Os modelos radiométricos no Alvo Leste possuem duas assinaturas distintas: a porção oeste e mais alta topograficamente, apresenta altas concentrações de KD e UD; a região leste e de relevo mais baixo é representada por baixos valores de KD e UD. Por consequência, as anomalias geoquímicas localizadas na zona leste não possuem correlação com os dados radiométricos. Uma possível interpretação é de que ocorra um processo de lixiviação dos materiais, na qual os elementos urânio e potássio são removidos (Figura 3.17).

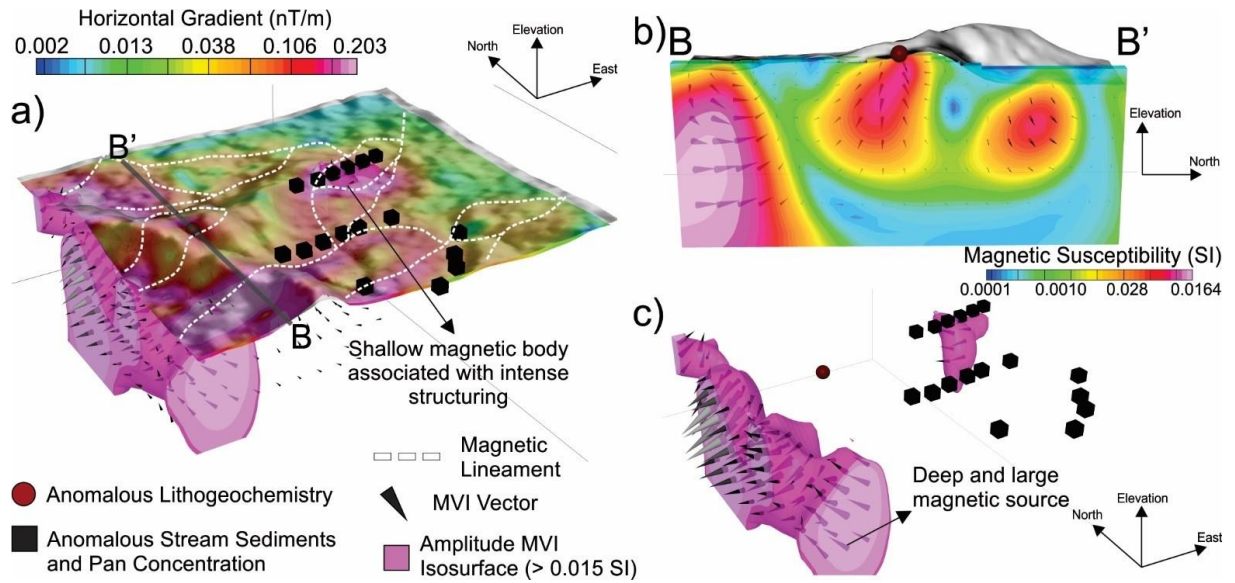


Figura 3.16: Integração de resultados magnéticos no Alvo Leste da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalos de geoquímica; em b) Seção S-N da inversão de vetor magnético; em c) apenas isosuperfície recuperada da inversão.

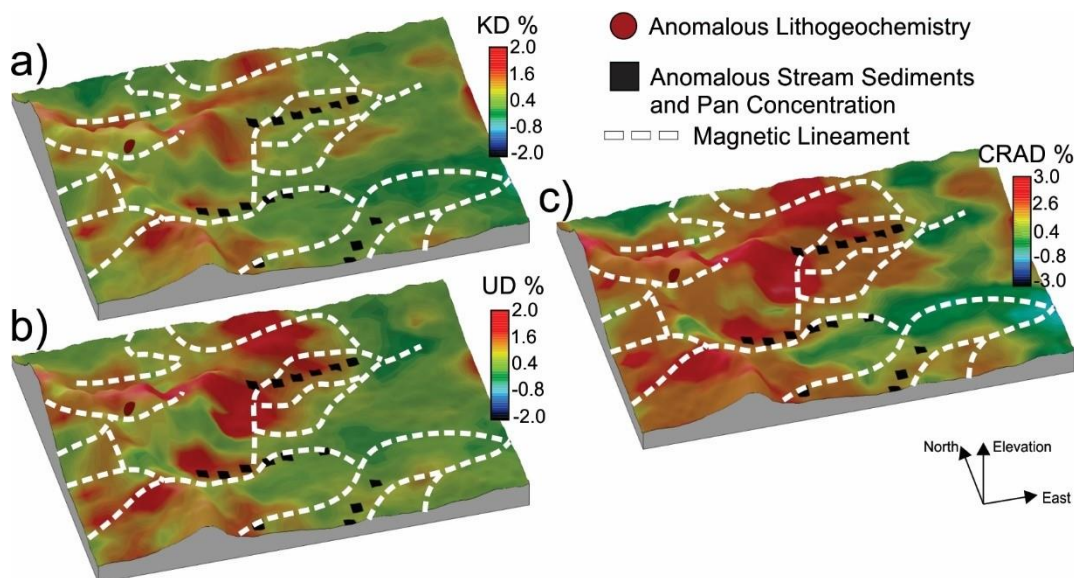


Figura 3.17: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Leste da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD.

5.3 Alvo Norte

O Alvo Norte é o prospecto de maior extensão e o que possui mais pontos geoquímicos anômalos. Além disso, é limitado a norte por uma sequência metavulcanossedimentar (Grupo Riachão do Ouro), o que permite uma maior afinidade à presença de enxofre e, por consequência, de sulfetos.

A partir da inversão MVI pode-se recuperar uma unidade magnética com valores de suscetibilidade que chegam até 0.18 SI e sua localização é coincidente às rochas ultramáficas da IBG. Além disso, o corpo magnético se estende até profundidade de 1000 metros abaixo do nível do mar (Figura 3.18). Apesar da forte intensidade de magnetização na região, não se observa comportamento vetorial semelhante ao Cisalhamento Cascavel em nenhum lugar do Alvo Norte.

Semelhante ao Alvo Leste, há a mesma distinção de resultados radiométricos no prospecto norte. Na região nordeste ocorrem intensas anomalias geoquímicas, tanto em sedimentos de corrente, quanto de rocha, mas que estão associadas a um enriquecimento supergênico e, por isso, não apresenta correlação com UD e KD (Figura 3.19).

Nas regiões mais altas topograficamente, ocorrem anomalias litogeoquímicas associadas as distribuições anômalas de UD e KD. Novamente, pode-se observar uma correlação entre os lineamentos magnéticos, zonas anômalas do CRAD, litogeoquímica e o sólido magnético referente as rochas ultramáficas.

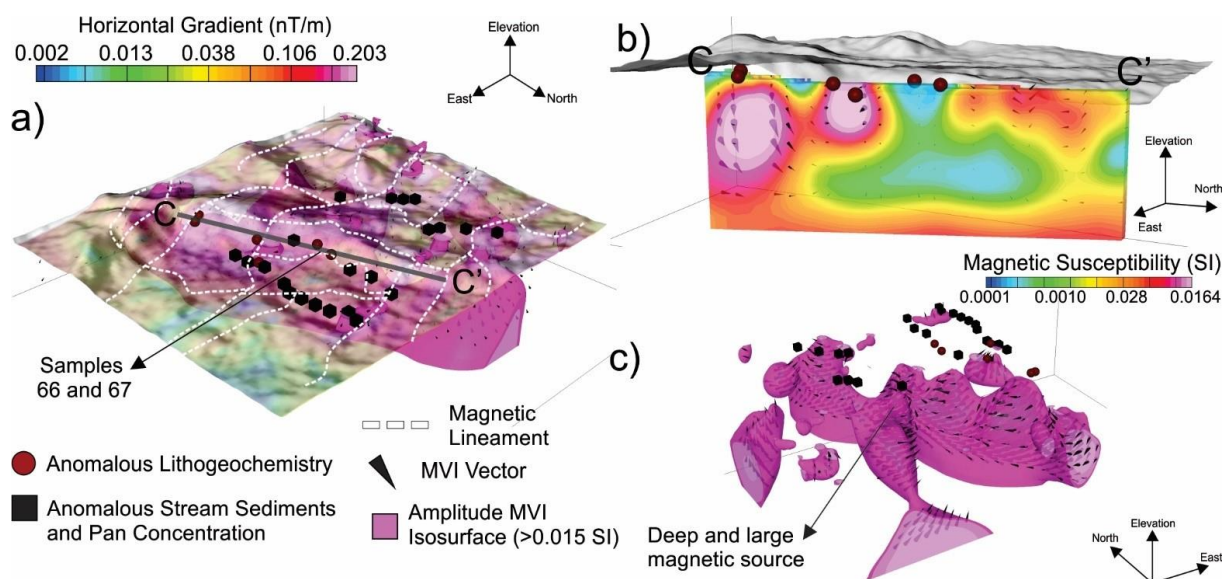


Figura 3.18: Integração de resultados magnéticos no Alvo Norte da IBG. Em a) isosuperfície da inversão de vetor magnético, sobreposta ao *grid* do gradiente horizontal e relevo sombreado, além dos pontos anômalo de geoquímica; em b) Seção SE-NW da inversão de vetor magnético; em c) somente isosuperfície recuperada da inversão.

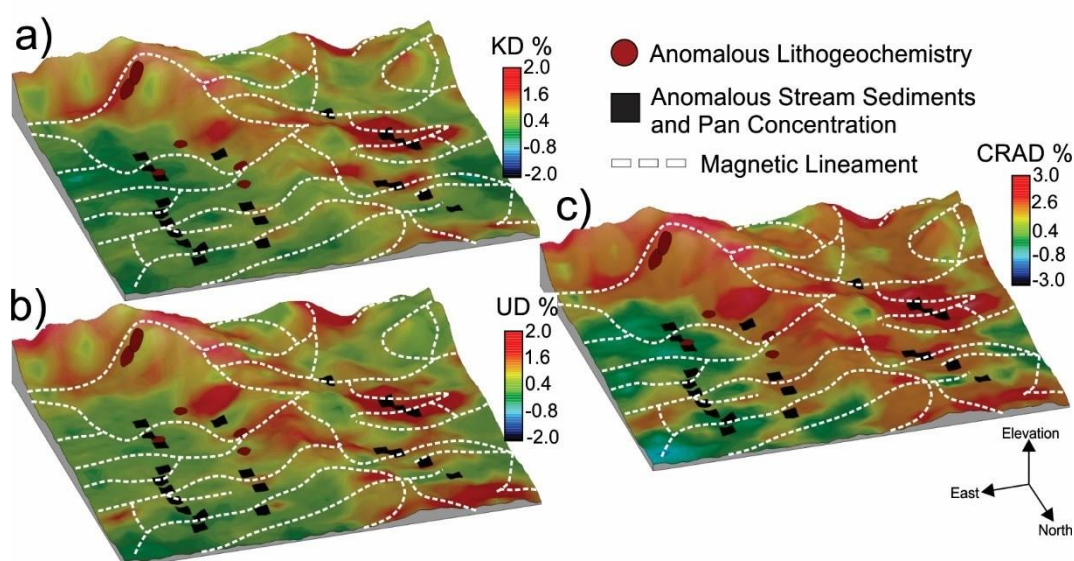


Figura 3.19: Integração de resultados radiométricos com as anomalias de geoquímica, no Alvo Norte da IBG. Em a) KD%, b) UD%, c) CRAD.

6. CONCLUSÕES

A partir da aplicação dos diferentes métodos, e suas correlações com as informações geológicas, foi possível identificar um padrão magnético, radiométrico, geoquímico e geológico

das mineralizações. Por meio dessa assinatura, três alvos prospectivos com alto potencial de mineralização foram selecionados.

Primeiramente, observou-se que as rochas ultramáficas são as que possuem as melhores concentrações geoquímicas de Ni-Cu. Portanto, este foi um dos principais indicativos à possibilidade de mineralizações sulfetadas. Além disso, o mapeamento geológico apresentou resultados inéditos com maior detalhe e caracterização das subdivisões das rochas máficas e ultramáficas da IBG, mesmo se comparado com o mapeamento mais recente elaborado por CPRM (2000). Por fim, a descrição macroscópica indicou que as associações de serpentina-magnetita-tremolita constituem litologias com maior potencial de mineralização.

As aquisições magnéticas demonstraram que todas as rochas pertencentes à IBG possuem alta intensidade de magnetização, principalmente quando comparadas as unidades mais félsicas adjacentes. Além disso, a partir do filtro de gradiente horizontal que foi possível reconhecer feições magnéticas anômalas e caracterizar as bordas do corpo de forma mais precisa do que mapeado anteriormente por Correia e Sá (1980) e CPRM (2000).

As inversões do vetor de magnetização apresentaram um resultado interessante fisicamente. De maneira geral, a intrusão apresenta fontes magnéticas extremamente profundas (maiores que 1000 metros de profundidade), com vetores normalmente alinhados em mesma direção para cada feição circular – interpretadas como pulsos magmáticos. Contudo, no alvo sul, os vetores apresentam comportamento dipolar, igual ao de uma barra magnética, em que a Zona de Cisalhamento Cascavel representa essa barra. As amostras de rocha coletadas nessa região são as que apresentaram maior percentagem de perda ao calor (LOI), o que corrobora a hipótese de que esse cisalhamento remobilizou fluidos com água, transformando as olivinas em serpentina, magnetita e sílica amorfa.

Por fim, as amostras litogeoquímicas com maiores teores de Ni-Cu foram coletadas em locais com alto gradiente magnético. Apenas na região nordeste da IBG ocorre uma amostra com teores de Ni acima de 5000 ppm, contudo, essa amostra é de uma laterita que teve enriquecimento de níquel por processos supergênicos, os quais não são objeto de estudo dessa pesquisa. Dessa maneira, a magnetometria se mostrou um método eficiente no mapeamento da intrusão, na caracterização dos lineamentos que podem remobilizar fluidos ricos em Ni-Cu e foi considerada um método geofísico eficaz em rochas máficas-ultramáficas.

Os resultados radiométricos convencionais não apresentaram resultados significativos para a correlação com vetores prospectivos da IBG. Contudo, com as normalizações de potássio e urânio pelo tório (Saunders et al., 1987; 1993; 1994) foi possível obter os produtos de potássio

anômalo (KD%) e urânio anômalo (UD%), que apresentaram uma forte correlação com a presença de rochas ultramáficas. Vale ressaltar que a normalização realizada anteriormente, para transformar os valores em variações de 0.0001 a 1.0001, foi fundamental na obtenção dos resultados radiométricos. Isso porque as rochas ultramáficas apresentam concentrações extremamente baixas dos radioelementos e o banco de dados disponibilizado pela CPRM consta muitos pontos com teores negativos, justamente sobrepostos a localização da IBG. Por meio da normalização, nenhum ponto foi excluído das análises e os resultados apresentaram maior coerência geológica.

A criação do realce CRAD se deu pelo diferente objetivo de investigação dessa pesquisa, em relação as elaboradas por Saunders et al. (1987, 1993, 1994). Por conta da correlação do KD% e do UD% com diferentes vetores prospectivos, foi utilizada a soma destes produtos ao invés da subtração. Apesar do resultado ter sido útil e inovador, sugere-se que análises mais refinadas em relação à significância entre os dois parâmetros sejam realizadas e um novo produto, com maior embasamento físico-químico, possa ser apresentado.

Em relação aos dados petrofísicos, estes foram essenciais para verificação dos valores medidos pela aerogeofísica, por meio da comparação direta. Para a radiometria, o tório foi o elemento que apresentou maior diferença nos valores aerogeofísicos e petrofísicos, contudo, esses valores são na ordem 0,4 ppm. Já nos resultados magnéticos, pelo fato da suscetibilidade magnética ser resultado de uma modelagem, a comparação entre os valores da inversão e da petrofísica foram semelhantes, mas com discrepâncias no valor absoluto.

A elaboração do filtro IMUM teve como objetivo dar continuidade e tentar refinar o IM elaborado por Pires e Moraes (2006). As alterações foram principalmente reconhecidas pela troca da utilização do gradiente total pelo horizontal e pela utilização do termo de potássio elevado ao quadrado. O novo filtro permitiu caracterizações mais detalhadas no interior da IBG, que não foram possíveis de observar no IM.

Os resultados litogeoquímicos indicaram que os alvos sul e norte são os mais promissores em relação à favorabilidade de mineralizações. Além disso, esses dados foram fundamentais na avaliação dos produtos geofísicos como vetores prospectivos, bem como da identificação das fontes anômalas medidas nos sedimentos de corrente e concentrados de bateia. Apesar de terem sido amostrados valores de até 34 ppm de ouro, não foram encontradas amostras litogeoquímicas que pudessem ser relacionadas como fonte. Diferentemente dos elementos Ni-Cu-Co-PGE que tiveram boa parte de suas anomalias correlacionadas nos diferentes métodos geofísicos e geoquímicos.

A dupla composição entre o CRAD e o IMUM foi um dos produtos mais relevantes na elaboração do modelo prospectivo. Foi observado que as regiões com teores anômalos de sedimentos de corrente, sempre apresentavam uma zona com altos valores da dupla composição, à montante da drenagem amostrada. Dessa maneira, o produto foi interpretado como um indicador direto das fontes de Ni-Cu-Co-Au-PGE.

Dentre os alvos selecionados, o alvo sul se destaca por apresentar amostras geoquímicas com teores acima de 3000 ppm, que estão sobrepostas a uma zona de cisalhamento mapeada. Acredita-se que essa estrutura tenha remobilizado fluidos e possa ter exercido um processo de concentração de elementos como Ni-Cu-Co.

O alvo norte, também apresenta anomalias significativas, e se distingue do ponto de vista geológico, pois faz contato com as rochas do grupo Riachão do Ouro. Essas rochas são representadas por sequências metavulcanossedimentares, que tem como constituintes o enxofre. Dessa maneira o alvo norte pode apresentar mineralizações significativas de sulfetos.

O alvo leste é o que apresenta menor potencial, quando comparado aos demais. Contudo, é nesse alvo que ocorre a amostra com 34 ppm de ouro, o que pode evidenciar eventos mineralizantes no local. As inversões magnéticas sugerem uma pequena câmara magmática local, que não é profunda.

Finalmente, pode-se concluir que a utilização de métodos isolados não é a garantia de sucesso em programas de prospecção mineral. Para se obter resultados confiáveis, deve-se utilizar a correlação entre diferentes métodos e, principalmente, analisá-los em função das propriedades físico-químicas do objeto de estudo.

Para validação dos resultados obtidos nessa pesquisa, devem ser realizados trabalhos de prospecção mais locais, por meio de métodos geofísicos terrestres, malhas de amostragem geoquímica de solo e principalmente furos de sondagem.

Espera-se que o resultado seja um guia na prospecção de Ni-Cu-Co em intrusões máfica-ultramáficas semelhantes a IBG e, que trabalhos de continuidade à prospecção dessa Suíte Intrusiva sejam motivados através dessa pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.

Araújo Filho, J. D. (2000). The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection between Brasiliano fold-thrust belts in Central Brazil and implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 144-148.

Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359-382.

Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1), 67-79.

Butler, R. F., & Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes* (Vol. 319). Boston: Blackwell Scientific Publications.

Castro, F. F. D., Góes, G. S., Peiter, C. C., Góes, G. S., Britto, F. G. A. D., Green, M. P. L., & Matriz e Miranda, F. S. D. (2022). Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira.

Chapman, S., & Bartels, J. (1940). *Geomagnetism*, vol. II: Analysis of the data, and physical theories. *Geomagnetism*.

CORREIA FILHO, F. D. C. L., & SÁ, A. M. D. (1980). *Projeto Natividade: Relatório Final*.

Costa, L. A. M., Nilson, A. A., Vale, C. R. O., Marchetto, C. L. M., Santos, E. L., Meneguesso, G., ... & Silva, W. G. (1976). *Projeto Leste Tocantins/Oeste do São Francisco*. Rio de Janeiro: Convênio DNPM/CPRM. Executado pela Prospec.

Costa, J. B. S. (1985). Aspectos lito-estruturais e evolução crustal da região centro-oeste de Goiás.

Cuadros, F. A., Botelho, N. F., Fuck, R. A., & Dantas, E. L. (2017). The Ticunzal Formation in central Brazil: Record of Rhyacian sedimentation and metamorphism in the western border of the São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 307-325.

CPRM (2006). Projeto Aerogeofísico Tocantins.

CPRM. (2000). Geologia e resultados prospectivos da área Barra do Gameleira, Tocantins.

Cruz, E. L. C. C., & Kuyumjian, R. M. (1998). The geology and tectonic evolution of the Tocantins granite-greenstone terrane, Almas-Dianópolis region, Tocantins State, Central Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(2), 173-182.

Cruz, E. L. C. C. (1993). Geologia e mineralizações auríferas do Terreno Granitoide-Greenstone de Almas-Dianópolis, Tocantins (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília).

Dardenne M.A. 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A (eds.), *Tectonic Evolution of South America, Brazil 2000*, 31th International. Geological Congress, Rio de Janeiro, 231-263.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Dickson, B. L., & Scott, K. M. (1997). Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 187-200.

Fonseca, D.S. (2016). Cobalto – Sumário Mineral 2016. Brasília: DNPM.

Ferreira Filho, C. F., Lima, H. A., Dantas, E. L., Daoud, W. E. K., & Salomão Neto, J. (2002). The layered mafic-ultramafic complexes of the Tocantins State, central Brazil: recently discovered large Proterozoic intrusions with favourable potential to host PGE deposits. In *Proceedings of the IX International Platinum Symposium. Extended Abstracts*, Billings, Montana (pp. 141-143).

Fuck, R. A., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Botelho, N. F., Armstrong, R., Laux, J. H., ... & Praxedes, I. F. (2014). Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, 244, 53-74.

Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2017). The northern Brasília belt. São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent, 205-220.

Gunn, P. J., Minty, B. R. S., & Milligan, P. R. (1997). The airborne gamma-ray spectrometric response over arid Australian terranes. In *Proceedings of exploration* (Vol. 97, pp. 733-740).

Haldar, S. K. (2018). Chapter 5-Exploration Geochemistry. *Mineral Exploration* (Second Edition). Ed. by HALDAR, SK Elsevier, 85-101.

Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. (Eds.). (2012). *Geologia do brasil*.

Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). *Geological interpretation of aeromagnetic data*. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists.

Kuyumjian, R. M., da Cruz, E. L. C. C., de Araújo Filho, J. O., Moura, M. A., Guimarães, E. M., & da Silva Pereira, K. M. (2012). Geologia e ocorrências de ouro do Terreno Granito-Greenstone do Tocantins, TO: síntese do conhecimento e parâmetros para exploração mineral. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(1), 213-228.

Lightfoot, P. C., & Milkereit, B. (2007). Advances in Ni-Cu-PGE sulphide deposit models and implications for exploration technologies. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 7, pp. 629-646).

Martins-Ferreira, M. A. C., Dias, A. N. C., Chemale Jr, F., Campos, J. E. G., Seraine, M., & Novais-Rodrigues, E. (2020). Multi-stage crustal accretion by magmatic flare-up and quiescence intervals in the western margin of the São Francisco Craton: U-Pb-Hf and geochemical constraints from the Almas Terrane. *Gondwana Research*, 85, 32-54.

Mantovani, M. S. M., & de Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303-315.

Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217.

Minty, B. R. S. (1997). Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 39-50.

Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.

Nabighian, M. N. (1974). Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1), 85-92.

Nabighian, M. N. (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49(6), 780-786.

Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., ... & Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND-61ND.

Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium deposita*, 34, 227-240.

Naldrett, A. J., & Naldrett, A. L. (2004). Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration. Springer Science & Business Media.

Oliveira Cordeiro, P. F., & de Oliveira, C. G. (2017). The Goiás Massif: Implications for a pre-Columbia 2.2–2.0 Ga continent-wide amalgamation cycle in central Brazil. *Precambrian Research*, 298, 403-420.

Overstreet, W. C., & Marsh, S. P. (1981). Some concepts and techniques in geochemical exploration.

Padilha, J. L. (1984). Prospecção de ouro na região nordeste de Goiás-Projeto Pindorama-DOCEGEO. SBG, Encontro Regional do Ouro de Goiás, I, Anais, 78-95.

Pires, A. C. B. (1995). Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Brazilian Journal of Geology*, 25(1), 61-68.

Pires A.C.B. & Moraes R.A.V. (2006). New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.

Saboia, A. M. (2021). Geologia, geocronologia e geoquímica dos granitoides paleoproterozoicos do domínio Almas-Conceição do Tocantins, norte do orógeno Brasília: implicações magmáticas e geodinâmicas (Doctoral dissertation).

Saunders, D. F., Branch, J. F., & Thompson, C. K. (1994). Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 59(3), 411-419.

Saunders, D. F., Burson, K. R., Branch, J. F., & Thompson, C. K. (1993). Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, 58(10), 1417-1427.

Saunders, D. F., Terry, S. A., & Thompson, C. K. (1987). Test of national uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 52(11), 1547-1556.

Silva, J. M. (2009). O Complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Americano do Brasil e sua mineralização de Ni-Cu-Co.

Silva, C.S. (2009). Níquel. In: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. *Economia Mineral do Brasil*. 1ed. Brasília: DNPM.

Santos, M. C. P. (2017). Geologia, Petrografia, Química Mineral, Litogeoquímica e Potencial Metalogenético do Corpo Máfico–Ultramáfico de Catingal, Distrito de Manoel Vitorino, Bahia.

Sousa, I. M. C., Della Giustina, M. E. S., & de Oliveira, C. G. (2016). Crustal evolution of the northern Brasília Belt basement, central Brazil: a Rhyacian orogeny coeval with a pre-Rodinia supercontinent assembly. *Precambrian Research*, 273, 129-150.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Tucker, R. D., Boyd, R., & Barnes, S. J. (1990). A U-Pb zircon age for the Råna intrusion, N. Norway: new evidence of basic magmatism in the Scandinavian Caledonides in Early Silurian time. *Norwegian Journal of Geology/Norsk geologisk tidsskrift*, 70, 229-239.

Wilford, J., & Minty, B. (2006). The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. *Developments in soil science*, 31, 207-610.

CAPÍTULO 4

4. Artigo “FOOTPRINT GEOFÍSICO E GEOQUÍMICO DO SISTEMA Ni-Cu-Co-PGE NA REGIÃO SUL DA INTRUSÃO BARRA DO GAMELEIRA, TOCANTINS.

Resumo:

Essa pesquisa apresenta a caracterização geofísica e geoquímica de um alvo prospectivo localizado em uma intrusão máfica-ultramáfica. Foram utilizados métodos geofísicos, como eletrorresistividade, IP (Polarização Induzida) e magnetometria, juntamente com a coleta de amostras de solo para análise geoquímica. Todos os dados foram adquiridos dentro de uma mesma área de estudo, definida por uma malha retangular de 1500 x 2400 metros. Além disso, um mapeamento geológico de semi-detalle foi realizado na região. Os resultados obtidos revelaram uma anomalia geoquímica de Ni-Cu-Co-PGE associada à distribuição de rochas ultramáficas. Essa tendência anômala na geoquímica e nas rochas ultramáficas também apresentou correlação com alta intensidade de magnetização e suscetibilidade magnética nos resultados magnéticos, além de baixa resistividade e alta cargabilidade nos resultados geoeletricos. De maneira geral, as mineralizações do sistema mineral Ni-Cu-Co-PGE da Intrusão Barra do Gameleira estão associadas ao alto conteúdo de minerais máfico-ultramáficos nas rochas hospedeiras, que apresentam esses contrastes geofísicos. Por meio da análise integrada de diferentes métodos, foi possível caracterizar um corpo tridimensional possivelmente mineralizado em Ni-Cu-Co-PGE. Em conclusão, este estudo fornece uma abordagem eficiente para a caracterização de alvos prospectivos em intrusões máfico-ultramáficas, utilizando métodos geofísicos e geoquímicos. Os resultados indicam a presença de um corpo mineralizado em Ni-Cu-Co-PGE, destacando a importância de amostragens diretas para validação e confirmação dos achados. Essa abordagem integrada pode ser aplicada em estudos futuros visando a exploração de recursos minerais em áreas semelhantes.

Palavras-chave: prospecção mineral, eletrorresistividade, polarização induzida, magnetometria, geoquímica.

Abstract:

This research elucidates the geophysical and geochemical characterization of a highly promising target situated within a mafic-ultramafic intrusion. Geophysical techniques encompassing electroresistivity, Induced Polarization (IP), and magnetometry were diligently employed, alongside the meticulous collection of soil samples for comprehensive geochemical analysis. The entirety of the data was acquired exclusively within the confines of a designated study area, defined by a rectangular grid measuring 1500 x 2400 units. Additionally, a meticulously conducted semi-detailed geological mapping expedition was executed within the region. The acquired results unveiled a distinctive geochemical anomaly encompassing Ni-Cu-Co-PGE, intricately associated with the spatial distribution of ultramafic rocks. This remarkable trend in geochemistry and ultramafic rock occurrences exhibited compelling correlations with heightened magnetization intensity and susceptibility observed in magnetic results, coupled with diminished resistivity and augmented chargeability evident in geoelectric outcomes. By virtue of integrating and harmonizing data from diverse methodologies, it was possible to accurately characterize a three-dimensional geological formation potentially imbued with mineralization featuring Ni-Cu-Co-PGE attributes. However, to fully validate and authenticate these findings, direct samplings within this geological formation are indispensable, given the inherently indirect nature of geophysical methodologies. In conclusion, this study presents an efficacious approach for effectively characterizing prospective targets within mafic-ultramafic intrusions, through the astute utilization of geophysical and geochemical methods. The outcomes underscore the existence of a mineralized geological formation boasting Ni-Cu-Co-PGE mineralization, thus underscoring the paramount importance of direct sampling for the definitive validation and confirmation of these remarkable findings. This integrated approach exhibits immense potential for future studies aimed at the exploration and assessment of valuable mineral resources within analogous geological domains.

Keywords: mineral exploration, induced polarization, resistivity, magnetometry, geochemistry.

1. INTRODUÇÃO

As rochas magmáticas máficas-ultramáficas possuem um destaque na prospecção mineral devido seu grande potencial de mineralização de diferentes minerais estratégicos. Resumidamente, os depósitos magmáticos sulfetados têm sua origem a partir da segregação e concentração de fluidos sulfetados em rochas máficas-ultramáficas (Whitney e Naldrett, 1989; Naldrett, 2004; Barnes et al., 2015).

Dentre as diversas origens dessas rochas, destacam-se os extensos complexos acamadados que apresentam sulfetação disseminada, no qual o foco da exploração são os elementos do grupo da platina (EGP) (Mungall e Naldrett, 2008). Outro litotipo de interesse são os cumulos formados na base das intrusões máficas-ultramáficas, que apresentam gênese e acumulação de sulfetos de Ni-Cu, maciços ou disseminados (Naldrett, 2004). Há também exemplos de exploração de condutos enriquecido em sulfetos de níquel (Ni) e cobre (Cu), em que os EGP são aproveitados como sub-produto (Barnes e Lightfoot, 2005). Beresford e Hronsky (2014) apresentam diversas classificações de depósitos de Ni-Cu magmáticos e as inserem em duas grandes classes: associados a condutos magmáticos como o depósito Limoeiro (e.g. Fruchting, 2017) ou, a intrusões acamadadas, como o Complexo Americano do Brasil (e.g. Silva, 2009).

De acordo com King (2007), concentrações de sulfetos metálicos economicamente viáveis, são geologicamente raras, porém, são facilmente distintas na geofísica, uma vez que apresentam fortes anomalias na maioria de suas propriedades físicas. Entretanto, o autor ressalta que nenhuma dessas respostas em particular, são exclusivas para caracterização dessas mineralizações sulfetadas e, conclui que a integração de diferentes métodos com informações geológicas é a chave para identificação das mineralizações sulfetadas.

Farias e Ferreira Filho (2021) apresentam as pesquisas realizadas pela Guaporé Mineração (Anglo American Group), que utilizou a geofísica de detalhe por meio da magnetometria, polarização induzida e transiente eletromagnético. Os resultados geofísicos indicaram diversas anomalias elétricas e magnéticas para realização de sondagens, que foram realizadas posteriormente e obtiveram diferentes interseções de sulfetos de Ni-Cu-PGE, desde disseminados à maciços.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo encontra-se no sudeste do Estado de Tocantins, próximo aos municípios de Almas e Dianópolis (Figura 4.1). A região de estudo engloba a Intrusão Máfica-Ultramáfica Barra do Gameleira (IBG), que tem forma semi-circular com dimensão de 8 x 9 km (Figura 4.1).

A IBG está inserida no contexto da Província Tocantins (Almeida et al., 1977), mais precisamente na Faixa Brasília Norte (Fuck et al., 2014), na qual ocorrem terrenos paleoproterozoicos expostos como o Terreno Almas (Martins-Ferreira et al., 2019; Saboia, 2021), no qual a IBG está localizada.

De maneira simplificada, a Faixa Brasília é um orógeno gerado pela colisão entre os blocos Amazônico, São Francisco e Parapanema – este último recoberto por sedimentos e inferido por dados aerogeofísicos (Mantovani e Brito Neves, 2005). Fuck et al. (2016) subdivide o orógeno em norte, central e sul, com base na vergência das estruturas. Outros autores como Valeriano et al. (2008) classificam a faixa em função dos contextos geológicos formados em relação a zona colisional.

Padilha (1984) simplifica a geologia regional em: Complexo Gnáissico-Migmatítico constituído por variações graníticas a tonalíticas; Sequência Vulcano-Sedimentar; Intrusivas tipo “Older”; Intrusivas Ácidas a Intermediárias que podem ser correlacionadas aos granitos da Província Tocantins e Intrusões Básica-Ultrabásicas (Figura 4.1). Cruz (1993) caracteriza a região em função das principais unidades geológicas regionais como: terrenos granito-greenstone formados por uma Sequência Vulcano-Sedimentar com duas principais unidades. Estas unidades foram subdivididas em uma unidade inferior (metabasaltos com alto Mg e Fe), e uma unidade superior (metassedimentar). Além destas unidades regionais caracterizou uma Associação TTG.

A Suíte Intrusiva Gameleira é caracterizada por intrusões acamadadas, com dimensões variadas que chegam a dezenas de quilômetros com formas circulares a semi-circulares. As estruturas e texturas ígneas destas intrusões estão preservadas, e foram metamorfasadas localmente nas fácies anfibolito a granulito, com retrometamorfismo em fácies xisto verde (CPRM, 2000; Saboia, 2021).

CPRM, 2000, descreve a geologia e resultados de prospecção geoquímica do Complexo máfico-ultramáfico Barra do Gameleira em Tocantins. Este corpo é caracterizado como uma intrusão acamadada, que teve deformação dúctil, metamorfismo nas fácies granulito/anfibolito e retrometamorfismo em fácies xisto-verde. O complexo é representado de forma geral, por uma unidade máfica e outra ultramáfica subordinada. As rochas máficas são descritas como gabros, leucogabros, troctolitos, olivina-gabronoritos, olivina-gabro coroníticos e noritos. Ocorrem de forma restrita microgabros e dioritos. As rochas ultramáficas são descritas como dunitos, peridotitos serpentinizados, serpentinitos e piroxenitos com textura adcumulática e acamamentos ígneos (Costa et al, 1976; Correia e Sá, 1980; CPRM, 2000).

Análises de sedimento de corrente indicam anomalias de Ni, Cu, Co, muitas vezes justapostos, que podem estar associados as rochas ultramáficas. Análises de concentrados de bateia indicam paládio (Pd) e ouro acima dos limites de detecção; platina (Pt) com valores pontuais de 64 ppb; paládio (Pd) com valores de 1 a 10 ppb, que chegam a 658 ppb. O ouro (Au) tem valores altos que chegam a 34074 ppb, que são considerados elevados em comparação com os valores observados em outras intrusões do mesmo tipo da Província Tocantins (CPRM, 2000).

Mendes et al. (2023 no prelo) apresenta resultados litogeoquímicos anômalos de níquel (Ni) e Cobre (Cu), com valores máximos de 5304 e 3485 ppm, respectivamente. Além disso, o autor realiza uma integração destes resultados com os demais dados públicos disponíveis – geoquímica de sedimentos de corrente (CPRM, 2000), geofísica aérea (CPRM, 2006) e mapeamento geológico regional (Correia Filho e Sá, 1980) – e demonstra o potencial de mineralização, principalmente nas rochas ultramáficas da IBG.

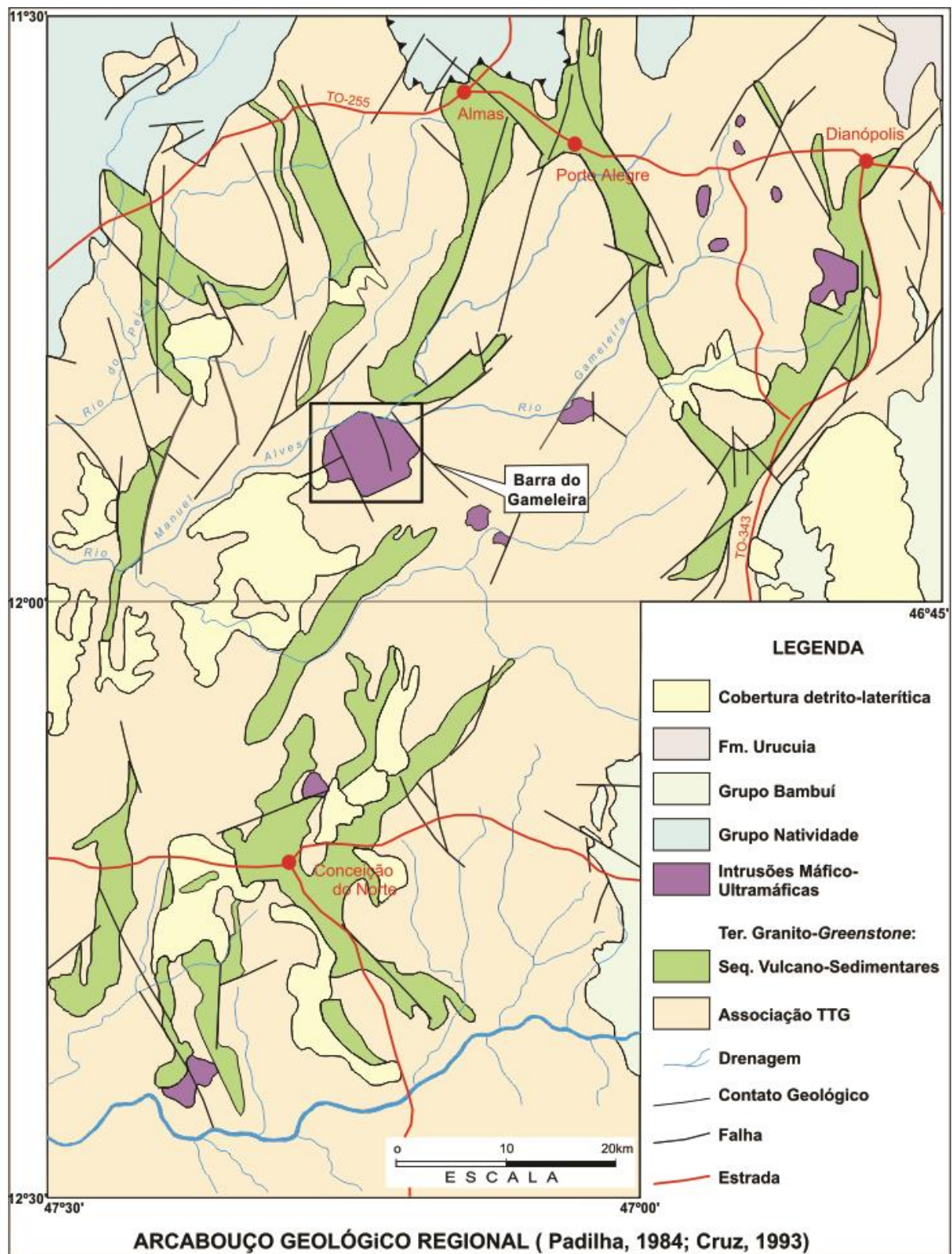


Figura 4.1: Localização da área de estudo e arcabouço geológico regional simplificado (Modificado de CPRM, 2000).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para caracterização e identificação das mineralizações sulfetadas em subsuperfície foram utilizados métodos geofísicos e geoquímicos, bem como a integração destes métodos com informações geológicas. Todas as informações foram fornecidas pela Cooperbrita LTDA para fins de prospecção mineral no Alvo Sul da Intrusão Barra do Gameleira.

Os diferentes métodos foram adquiridos em uma mesma malha de 13 linhas paralelas, espaçadas 200 metros entre si, com direção SE-NW. Os dados elétricos e geoquímicos foram coletados com espaçamento de 50 metros entre pontos, enquanto a aquisição magnética teve amostragem espacial de 10 metros (Figura 4.2).

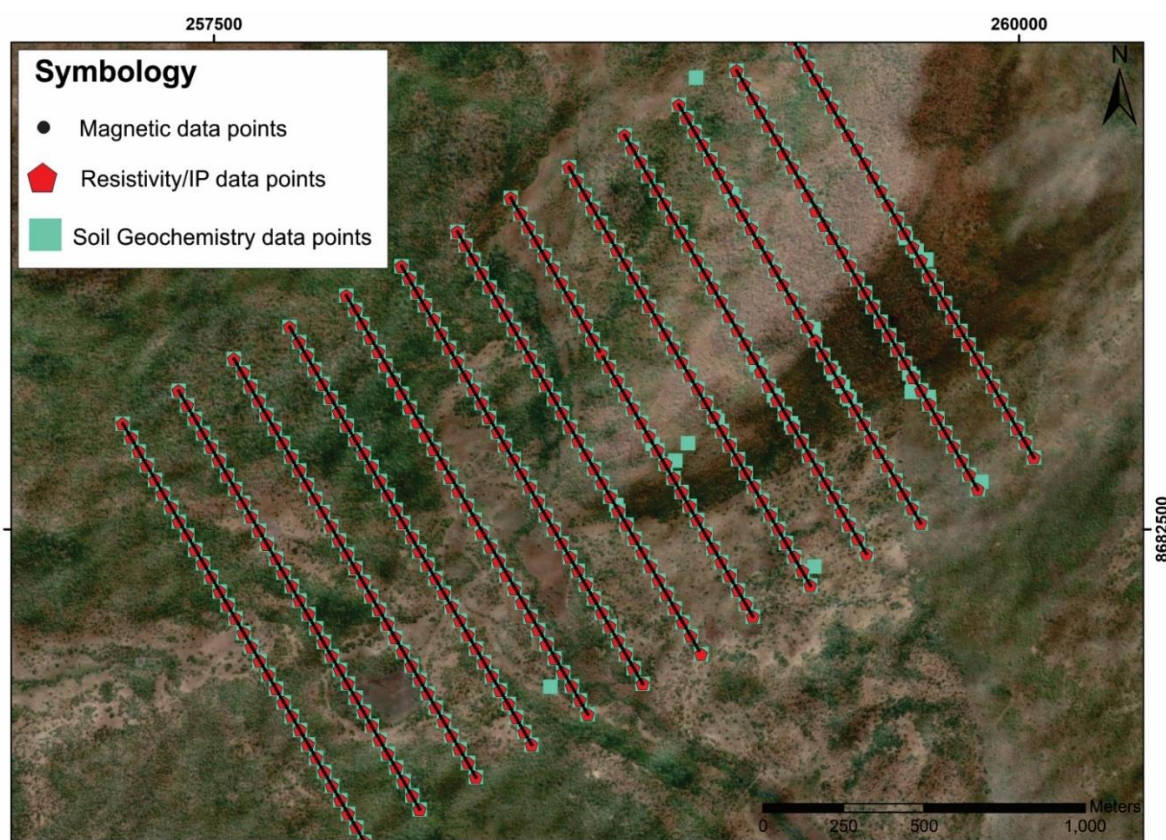


Figura 4.2: Mapa de localização da malha de pontos adquiridos no alvo sul da Intrusão Barra do Gameleira.

3.1 Magnetometria e Gradiometria Magnética

O método magnético é um dos métodos geofísicos mais antigos e é amplamente utilizado para estudar a subsuperfície terrestre. Devido à extensa variação de propriedades

magnéticas na subsuperfície terrestre, juntamente com o baixo custo de aquisição e a fácil instrumentação do método, ele se destaca entre os demais métodos geofísicos de exploração (Telford et al., 1990; Hinze et al., 2013).

Conforme estabelecido pela Lei de Ampère, a variação de corrente elétrica ao longo do tempo gera um campo magnético. Dessa forma, o campo geomagnético é produzido pelo sistema geodínamo, no qual o núcleo da Terra, composto principalmente por ferro e níquel, gera correntes elétricas que resultam no campo geomagnético terrestre. Esse campo induzido interage com os materiais presentes na parte superior da Terra, conhecida como crosta terrestre, e dependendo das propriedades do material, ele apresenta uma resposta distinta à aplicação desse campo magnético (Dentith e Mudge, 2014).

Portanto, o método magnético proporciona uma caracterização da subsuperfície com base nas propriedades magnéticas dos materiais e seus contrastes. Além disso, observa-se que as rochas máficas-ultramáficas apresentam um aumento diretamente proporcional entre a intensidade de magnetização e o teor de minerais máficos (maficidade).

Aquisição e Redução de Dados

A aquisição de dados magnéticos geralmente envolve o uso de dois magnetômetros: um magnetômetro base e outro móvel. O magnetômetro base é usado para medir variações diurnas causadas pelos ventos solares, que não estão relacionadas às variações litológicas na subsuperfície. O magnetômetro móvel, por sua vez, é responsável por registrar a intensidade do campo magnético ao longo das linhas de aquisição. No entanto, para esta pesquisa em particular, apenas o magnetômetro móvel foi utilizado, equipado com dois sensores espaçados verticalmente em uma distância de 40 centímetros, para obter o gradiente magnético vertical (Figura 4.3a).

O cálculo da variação diurna foi feito por meio de repetidas leituras, ao longo do dia, na parte sul da malha de aquisição, pois essa região é representada por Suítes TTG, que possuem baixa ou nenhuma intensidade de magnetização. As repetições foram realizadas em intervalo de 30 minutos para as horas com maior gradiente de intensidade – das 10:30 às 14:30 – e de 60 minutos para o restante da aquisição. Por meio das repetições ao longo do dia, calcula-se uma equação para a variação diurna em função do horário (Figura 4.3b). Para cada dia de aquisição foi calculado a função de variação diurna local. Por fim, ressalta-se que os dados foram

adquiridos em dias de baixo índice de variação magnética (K-index – SWPC NOAA), em que as variações do campo foram na ordem de 45 nT (nanoTesla).

Em seguida, as leituras de baixa qualidade de sinal são filtradas. Para esta pesquisa, foi utilizado o magnetômetro *overhauser* GSM-19, fabricado pela *GemSystems*. Conforme indicado no manual do equipamento, uma leitura adequada deve ter uma qualidade de sinal (sq) igual a 99. Portanto, todos os dados do banco de dados que não atendem a esse critério são removidos, a fim de eliminar ruídos e garantir a confiabilidade dos resultados (Figura 4.3b).

O filtro aplicado anteriormente desempenha um papel fundamental no próximo passo, que envolve a média das três (ou mais) repetições realizadas em cada estação. Locais com baixa qualidade de sinal, podem ser resultado de erros de aquisição ou da presença de afloramentos rochosos com alto teor de minerais magnéticos. Portanto, é essencial eliminar os dados incoerentes, para evitar inconsistências na média das leituras.

Com o intuito de eliminar as variações do campo geomagnético e analisar os resultados apenas em função das variações geológicas locais, realiza-se a remoção IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). Essa redução permite uma análise quantitativa mais precisa dos dados. Por fim, foi aplicado um filtro de passa-baixa nos dados, visando eliminar ruídos de alta frequência causados pela presença de afloramentos rochosos magnéticos (Figura 4.3c).

Em seguida, os dados são interpolados no *software Oasis Montaj*, por meio do interpolador bi-direcional e célula de tamanho igual a um quarto do espaçamento das linhas de aquisição (Figura 4.3d). A partir do *grid* de intensidade magnética anômala, são calculados os filtros e realces, utilizados para interpretação dos resultados (Figura 4.3e). Finalmente, os mesmos dados que geraram os *grids* são utilizados para modelagem 3D, por meio do algoritmo de inversão de vetor magnético (MVI, do inglês *Magnetic Vector Inversion*), no *software Oasis Montaj* (Figura 4.3f). Para realização da inversão foi utilizada uma malha regular com tamanho de célula de 20x20x10 metros e os demais parâmetros de inversão utilizados foram o padrão do *Oasis Montaj*.

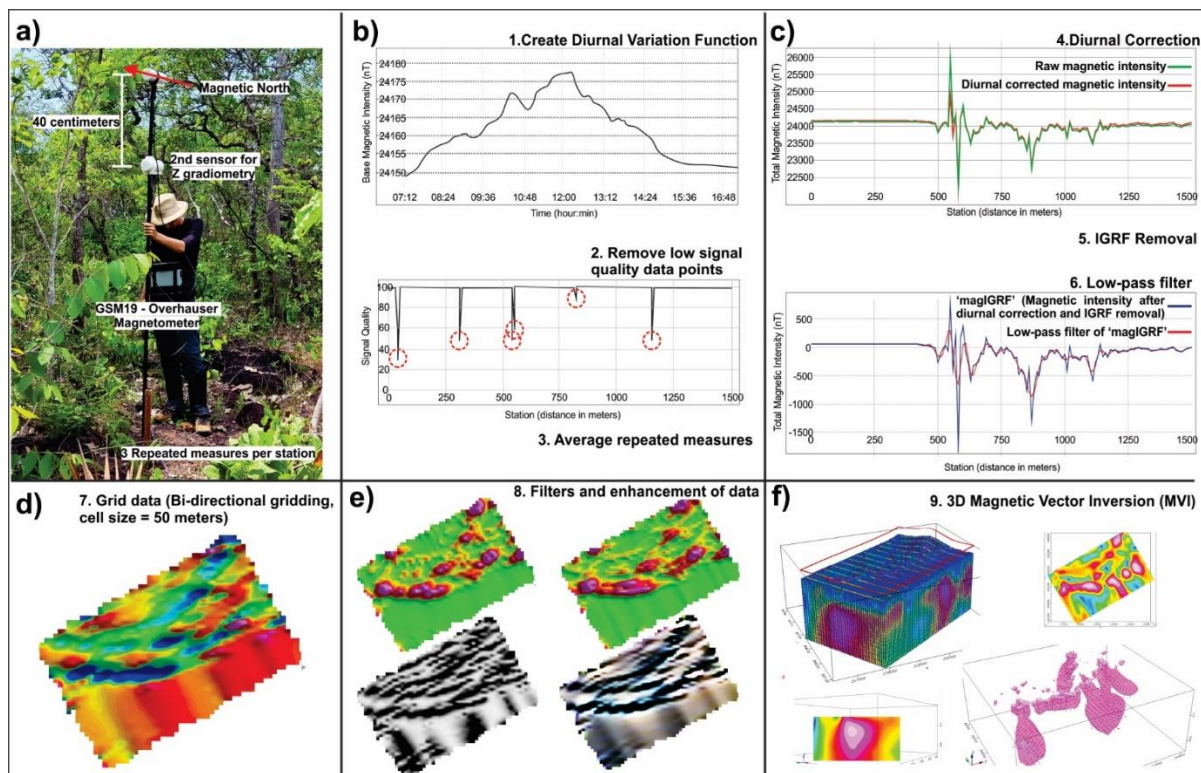


Figura 4.3: Fluxo de desenvolvimento das correções e reduções realizadas no dado bruto, para obtenção de resultados magnéticos. Em a) aquisição dos dados, b) elaboração da função de variação diurna e filtragem com base em valores de baixa qualidade do sinal, em c) realização da correção diurna, remoção do IGRF e aplicação de filtro passa-baixa, em d) interpolação do dado de magnetização corrigido e filtrado, em e) resultados de filtros e realces do dado magnético e em e) preparação e resultados da inversão MVI.

3.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida

O método da eletrorresistividade se destaca entre os diversos métodos geoeletricos devido à sua ampla aplicabilidade e alta eficácia quando utilizado corretamente. Em resumo, o método envolve a injeção de correntes artificiais por meio de eletrodos metálicos, como estacas de ferro ou aço, e a medição do potencial elétrico entre eletrodos adjacentes. Com base nesses valores e na geometria de aquisição dos eletrodos, é possível calcular a resistividade do meio.

A resistividade é a propriedade física que mensura a capacidade de um determinado material se opor a condução de corrente elétrica. Processos geológicos ou artificiais alteram as propriedades elétricas do meio e, a partir dessas alterações, pode-se correlacionar os contrastes

de resistividade. Portanto, o método possui ampla aplicabilidade em diversas áreas de estudo como: engenharia, ambiental, hidrogeologia e prospecção mineral (Braga, 2006; Loke 2000; Loke 2004; Telford et al., 1990).

O método de polarização induzida é uma técnica relativamente nova nas tecnologias geofísicas e tem sido amplamente utilizada na prospecção de minerais metálicos. Basicamente, um levantamento de IP pode ser realizado com um arranjo de quatro eletrodos, onde são feitas medidas durante a injeção de corrente e após a interrupção abrupta dessa injeção (Telford et al., 1990). Observa-se que a voltagem decai de maneira mais lenta do que a corrente, que é interrompida abruptamente. Esse efeito demonstra a capacidade dos materiais de armazenar carga, ou seja, de se polarizar, e se assemelha ao comportamento de um capacitor. Quando a corrente é reinjetada, a voltagem aumenta no mesmo tempo que levou para chegar a zero. Esse tempo de decaimento e crescimento da voltagem depende da instrumentação e de fatores geológicos (Reynolds, 2011).

A aplicação mais comum do método de polarização induzida (IP) é na busca por minérios metálicos disseminados, embora também seja utilizado, com menos frequência, em estudos de água subterrânea e exploração geotérmica (Dentith e Mudge, 2014). Além disso, o método do IP possui técnicas distintas, dentre elas, destacam-se duas. A primeira consiste na medição do potencial elétrico em função do tempo, o qual define o IP no domínio do tempo. A segunda técnica baseia-se na medição de duas ou mais resistividades com frequências geralmente inferiores a 10 Hz (Patella e Schiavone, 1977), a fim de obter o IP no domínio da frequência (Telford et al., 1990).

Para essa pesquisa, utilizou-se o IP no domínio do tempo, em que a aquisição é feita por meio de leituras consecutivas da voltagem após a interrupção abrupta de corrente. Com os dados de voltagem em função do tempo, é possível plotar uma curva de decaimento e calcular a área abaixo da curva, que define a cargabilidade

A coleta de dados de eletrorresistividade e polarização induzida foi realizada utilizando a técnica do caminhamento elétrico, que consiste na medição da resistividade ao longo de uma linha. Além disso, durante a pesquisa, foram utilizados dois arranjos eletródicos distintos: polo-dipolo (PD) e dipolo-dipolo (DD).

Existem diversos arranjos eletródicos que apresentam vantagens e desvantagens em relação ao seu uso, em função do objetivo de pesquisa. Os arranjos Wenner e Schlumberger por

exemplo, apresentam maior sensibilidade vertical, por isso são melhores para estudar estruturas horizontais como camadas geológicas. No entanto, os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo possuem maior sensibilidade lateral, configurando-os como eficazes na identificação de estruturas verticais, como falhas, fraturas e cisalhamentos (Loke, 2004).

De acordo com Loke (2004), o arranjo dipolo-dipolo (DD) é amplamente utilizado em levantamentos de resistividade devido ao seu baixo acoplamento eletromagnético entre os circuitos de potencial e corrente. Por outro lado, o arranjo polo-dipolo (PD) apresenta um acoplamento eletromagnético menor em comparação com o DD e possui como vantagem um sinal mais intenso. O autor complementa ainda que ambos os arranjos possuem maior sensibilidade a variações horizontais do que verticais, tornando-os adequados para o mapeamento de estruturas verticais.

Aquisição e Redução de Dados

Para a aquisição de dados geoeletricos, utilizou-se o transmissor GGT-10 da fabricante *Zonge* e receptor IPR12 da fabricante *Scintrex* (Figura 4a). A injeção de corrente foi feita através de 2 ou 3 eletrodos metálicos (a depender da resistência de contato), enquanto as medições de potencial foram realizadas com eletrodos porosos preenchidos por sulfato de cobre.

Os dados brutos, obtidos diariamente na aquisição foram submetidos a um fluxo criterioso para controle de qualidade da aquisição. Primeiramente, os dados são separados em função dos diferentes arranjos adquiridos, em um aplicativo desenvolvido nessa pesquisa. Os dois arquivos gerados são importados no *software* *Prosys* III, em que se inicia a etapa de filtragem: remoção de medidas espúrias e eliminação de pontos com curvas ruidosas de decaimento IP. Em seguida, é inserida a topografia da linha adquirida, para que o dado exportado possua informações de elevação, que será importante no processo de modelagem.

Após a etapa de filtragem e análise dos dados, inicia-se a inversão no *software* *Res2DInv* (Figura 4.4b). Para cada linha foi elaborada uma inversão de resistividade e outra de cargabilidade, com o intuito da filtragem de cada um dos resultados não influenciar na modelagem do outro, e vice-versa. Ressalta-se que são invertidos os arranjos polo-dipolo, dipolo-dipolo e a junção dos dois, denominada *mixed array*. Na Figura 4.4c há 3 resultados de inversão, pois foi inserida a aquisição da linha com espaçamento de 25 metros, ressalta-se que somente essa linha foi adquirida com esse espaçamento para realização de testes.

Posteriormente, os dados invertidos são exportados para o formato XYZ, que consiste em uma tabela com as posições dos pontos invertidos. O intuito é poder utilizar os resultados da inversão em diferentes *softwares*, principalmente aqueles que possuem interfaces de visualização e modelagem 3D, para essa pesquisa foi utilizado o *Oasis Montaj*.

Contudo, duas limitações ocorrem para importação dos dados .XYZ no *Oasis Montaj*. Primeiro, o arquivo gerado não possui informações de coordenadas geográficas. Segundo, para importação no *Oasis*, cada ponto deve ser apresentado como um vetor (*array*) de resistividade/cargabilidade em função da profundidade. Dessa maneira, foi criado um código em Python que utiliza como dados de entrada, uma planilha com as coordenadas dos pontos e o arquivo .XYZ exportado do Res2DInv. Como resultado, o código gera um arquivo .xlsx com os dados no formato correto para importação e com as coordenadas de cada ponto invertido. Por fim, os resultados são utilizados para interpolação 3D, visualização 3D e principalmente, correlação com as diferentes informações disponíveis.

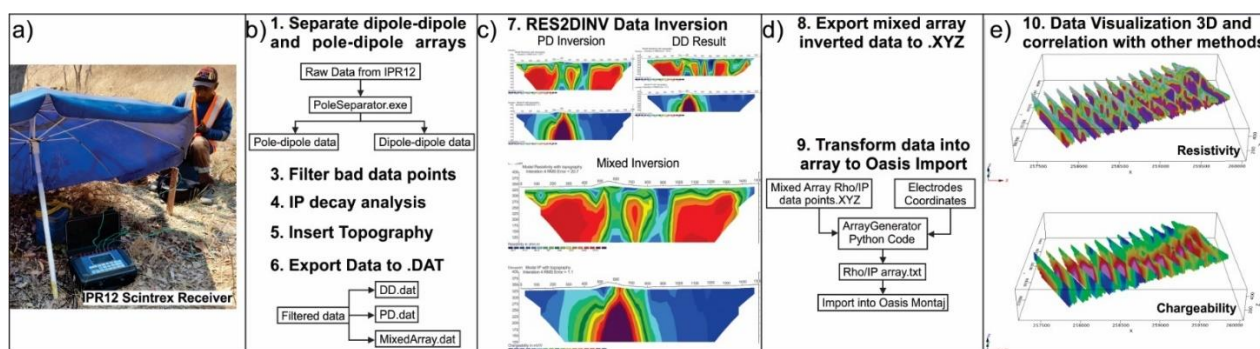


Figura 4.4: Fluxo de desenvolvimento das correções e reduções realizadas no dado bruto, para obtenção dos resultados geoeletricos em 3D. Em a) fotografia da aquisição de dados em campo, em b) as etapas de filtragem antes de realizar a inversão dos dados (c) e em d) os processamentos para plotar os dados em 3D no *Oasis Montaj* (e).

3.3 Geoquímica de Solo

Durante uma campanha de exploração mineral, a prospecção geoquímica desempenha um papel crucial como um dos vetores prospectivos utilizados. Esse método se baseia na premissa de que a ocorrência de concentrações anômalas está associada à presença de depósitos minerais, que exibem contrastes significativos de concentrações em relação aos materiais circundantes (Licht, 1998). Assim, os dados geoquímicos desempenharam um papel

fundamental na identificação de zonas anômalas, as quais estão diretamente relacionadas à presença de mineralizações sulfetadas.

De acordo com Licht (1998), a técnica de prospecção pelo solo é amplamente utilizada. Experiências demonstram que em contextos de mineralização, alguma feição química deverá ser observada nos solos residuais produzidos pela ação do intemperismo local. Quando há discordância entre a geoquímica de um solo residual e uma ocorrência de mineralização, alguns fatores devem ser levados em consideração: o material amostrado pode não ser residual da mineralização; um horizonte inadequado foi amostrado; método analítico ou de ataque químico mal selecionado para o elemento de interesse.

Para essa pesquisa, a amostragem geoquímica de solo foi feita por meio de um procedimento operacional padrão. Em cada ponto de aquisição, foi retirada o horizonte A devido sua alta presença de matéria orgânica e, a coleta é realizada no horizonte B, que é composto por argilominerais e óxidos correlatos as rochas em subsuperfície. Para cada amostra são coletados 2 kg e, foram utilizados materiais não metálicos para realização do buraco e extração do solo, com o intuito de não haver contaminação nas amostras. Por fim, são feitas medidas de posicionamento por meio do GPS de mão e captura de fotografias de cada ponto de amostragem.

Posteriormente foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (equação 4.1) para os elementos de interesse: Ni-Cu-Co-Au-PGE.

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{(var(x) * var(y))}} \quad (Equação 4.1)$$

Nesta equação, r representa o coeficiente de correlação, $cov(X,Y)$ é a covariância entre as variáveis X e Y , e $var(x)$ e $var(y)$ são as variâncias dessas mesmas variáveis. O coeficiente de correlação indica a relação numérica entre as variáveis, em que $r = 1$ representa uma correlação perfeita, $r = 0$ indica nenhuma correlação entre as variáveis, e $r = -1$ representa uma correlação perfeita, mas inversamente proporcional entre as variáveis.

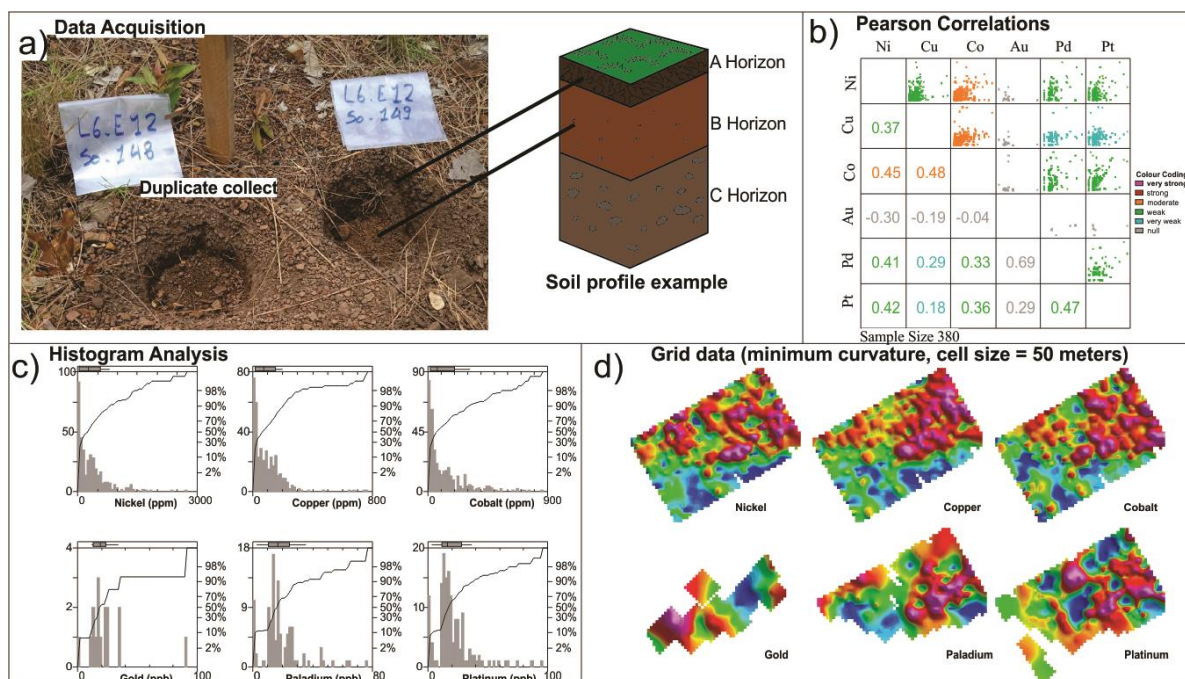


Figura 4.5: Fluxo de desenvolvimento do método geoquímico. Em a) fotografias da coleta de duas amostras em mesma posição e ilustração de perfil vertical de solo que evidencia horizonte de coleta; b) correlação de Pearson entre os elementos de interesse; c) histogramas de frequência para os elementos de interesse e d) interpolações para os elementos de interesse.

4. RESULTADOS

Os resultados geofísicos e geoquímicos obtidos foram correlacionados ao mapeamento geológico de detalhe (Figura 4.6) realizado no alvo sul da IBG. Dessa maneira, serão apresentados os resultados de cada método empregado, bem como da integração entre os diferentes resultados.

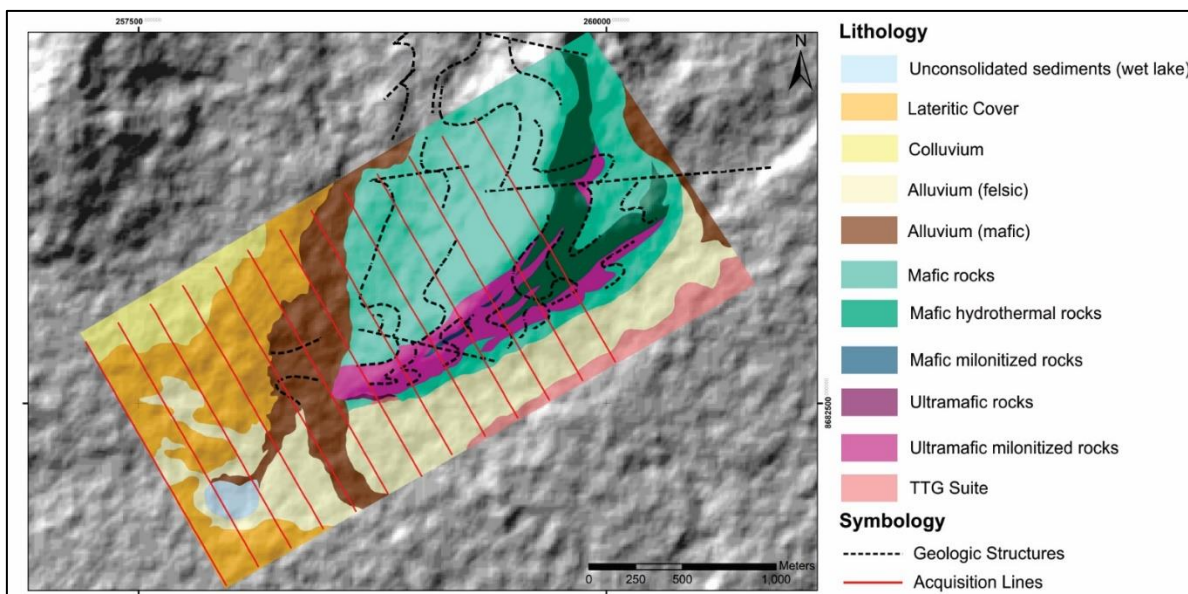


Figura 4.6: Mapa geológico simplificado da área de estudo com as linhas de aquisição da geofísica e geoquímica.

4.1 Magnetometria

A partir do levantamento magnético, foram obtidos dois conjuntos de dados: a intensidade total de magnetização (Figura 4.7a) e o gradiente vertical do campo magnético (Figura 4.7b). Os dados de intensidade foram submetidos a cálculos de filtros e realces, com o objetivo de extrair informações relevantes e correlacioná-las com a geologia. Os gradientes (Figura 4.7c e 4.7e) são utilizados para identificar as bordas das fontes magnéticas, enquanto a gradiometria, a derivada vertical (Figura 4.7d) e a derivada tilt (Figura 4.7f) são empregadas na identificação dos lineamentos magnéticos. Geralmente, os gradientes são utilizados para interpretar os diferentes domínios magnéticos (Figura 4.7g) em relação às variações litológicas, enquanto os lineamentos magnéticos estão associados à geologia estrutural. Para aprimorar a extração dos lineamentos magnéticos, foi utilizada a composição ternária de derivadas verticais com diferentes ordens de diferenciação (Figura 4.7h).

A partir dos resultados pode-se observar que há um domínio de alta intensidade de magnetização com diferentes *trends* na área de estudo. Nas linhas mais a oeste, o corpo magnético apresenta *trend* W-E até a região central, onde converge para a direção SW-NE. Observa-se que os lineamentos magnéticos apresentam majoritariamente direção SW-NE, com

raras estruturas na direção NW-SE. Destaca-se que essas últimas estão correlatas à mudança de direção do domínio de alta intensidade magnética.

Por fim, deve-se ressaltar que as descontinuidades na porção centro sul da malha, que podem ser observadas na intensidade magnética anômala (Figura 4.7a), não são relacionadas as variações geológicas. Isso ocorre devido a região apresentar uma baixa intensidade de magnetização e a correção diurna ter sido realizada por meio de uma estimativa da variação. Essas descontinuidades observadas poderiam ser eliminadas com o uso de outro magnetômetro para medição base.

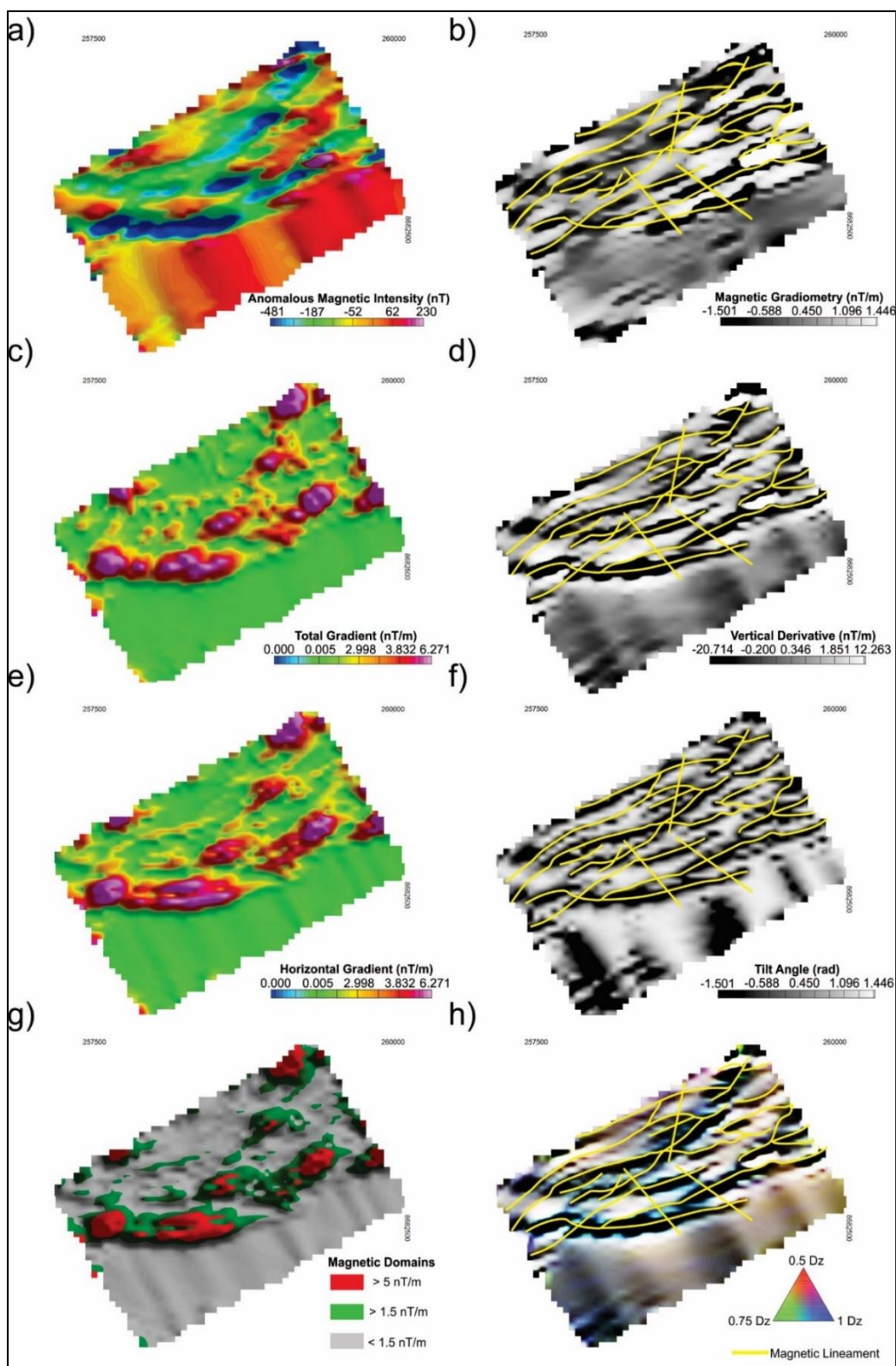


Figura 4.7: Resultados dos filtros e realces dos dados magnéticos. Em a) intensidade magnética anômala (TMI); b) gradiometria magnética medida; c) gradiente total (Amplitude do Sinal Analítico); d) derivada vertical calculada; e) gradiente horizontal; f) derivada Tilt; g) domínios magnéticos extraídos do gradiente horizontal e h) composição ternária das derivadas verticais.

4.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida

Os primeiros resultados geoeletricos obtidos referem-se a uma linha teste (Linha 4) próxima a um afloramento rochoso com alto teor de Ni-Cu, alcançando valores de até 2500 e 3400 ppm, respectivamente (Mendes et al., 2023 no prelo). Para investigar a correlação entre as anomalias geofísicas e as anomalias litogeoquímicas, foram empregados espaçamentos de 25 e 50 metros, utilizando os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo (Figura 4.8).

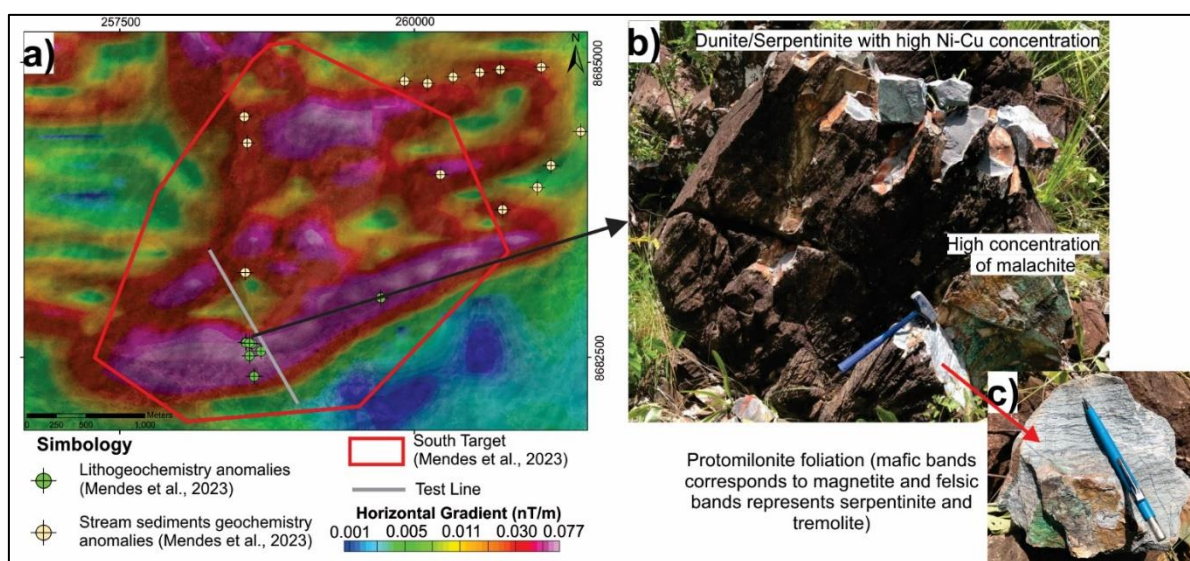


Figura 4.8: Informações geológicas do alvo sul. Em a) mapa geofísico do gradiente horizontal magnético, com anomalias geoquímicas e localização da linha de teste; em b) fotografia do afloramento rochoso onde foi coletada amostra litogeoquímica anômala em Ni-Cu; em c) fotografia de amostra de mão do afloramento.

Em todas as seções geoeletricas da Linha 4 (linha teste) é possível observar feições verticais de baixa resistividade, associadas a uma anomalia de alta cargabilidade. Apenas nos resultados do espaçamento de 25 metros a anomalia geoquímica parece estar deslocada da feição vertical condutiva, provavelmente pelo aumento da resolução espacial (Figura 4.9). Apesar das seções com espaçamento de 50 metros apresentarem feições anômalas na mesma posição da anomalia geoquímica, estes resultados apresentaram perda de resolução espacial, mas um significativo aumento na profundidade de investigação (Figura 4.10). Por fim, a junção dos arranjos e espaçamentos permitiu um resultado com alta resolução espacial e maior profundidade de investigação (Figura 4.11).

Com o objetivo de investigar a continuidade das anomalias condutivas e de cargabilidade em profundidade, os dados foram adquiridos somente com espaçamento de 50 metros por meio dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo. Nesse caso, a combinação dos arranjos (*mixed array*) foi considerada como o resultado obtido para cada linha adquirida. Ao final foi possível elaborar um bloco diagrama 3D das seções de resistividade e cargabilidade, revelando uma marcante anomalia de cargabilidade em todas as linhas e várias estruturas condutivas verticais (Figura 4.12).

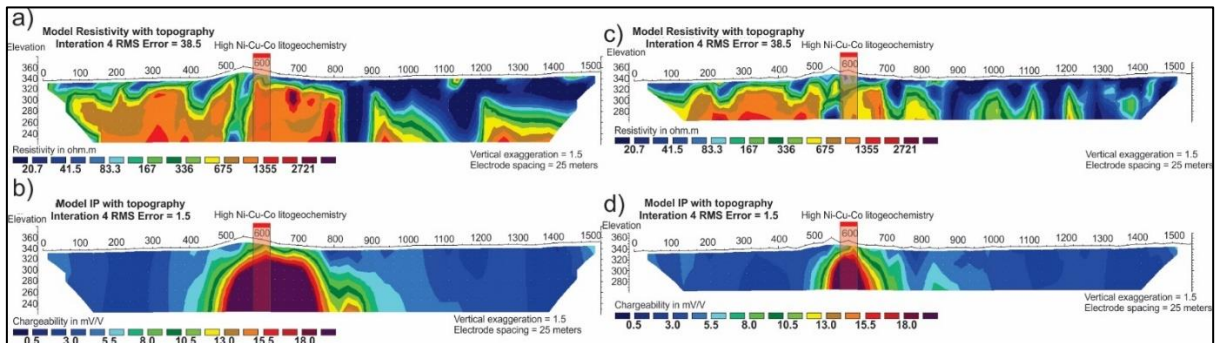


Figura 4.9: Resultados da inversão da linha teste com espaçamento de 25 metros. a) Seção de resistividade, arranjo polo-dipolo; b) Seção de cargabilidade, arranjo polo-dipolo; c) Seção de resistividade, arranjo dipolo-dipolo; d) Seção de cargabilidade, arranjo dipolo-dipolo.

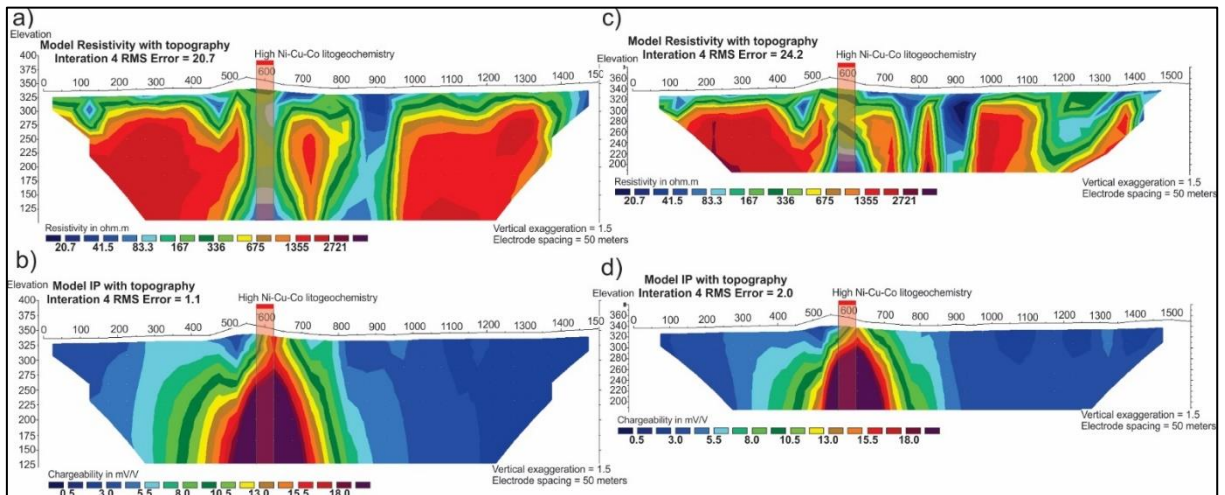


Figura 4.10: Resultados da inversão da linha teste com espaçamento de 50 metros. a) Seção de resistividade, arranjo polo-dipolo; b) Seção de cargabilidade, arranjo polo-dipolo; c) Seção de resistividade, arranjo dipolo-dipolo; d) Seção de cargabilidade, arranjo dipolo-dipolo.

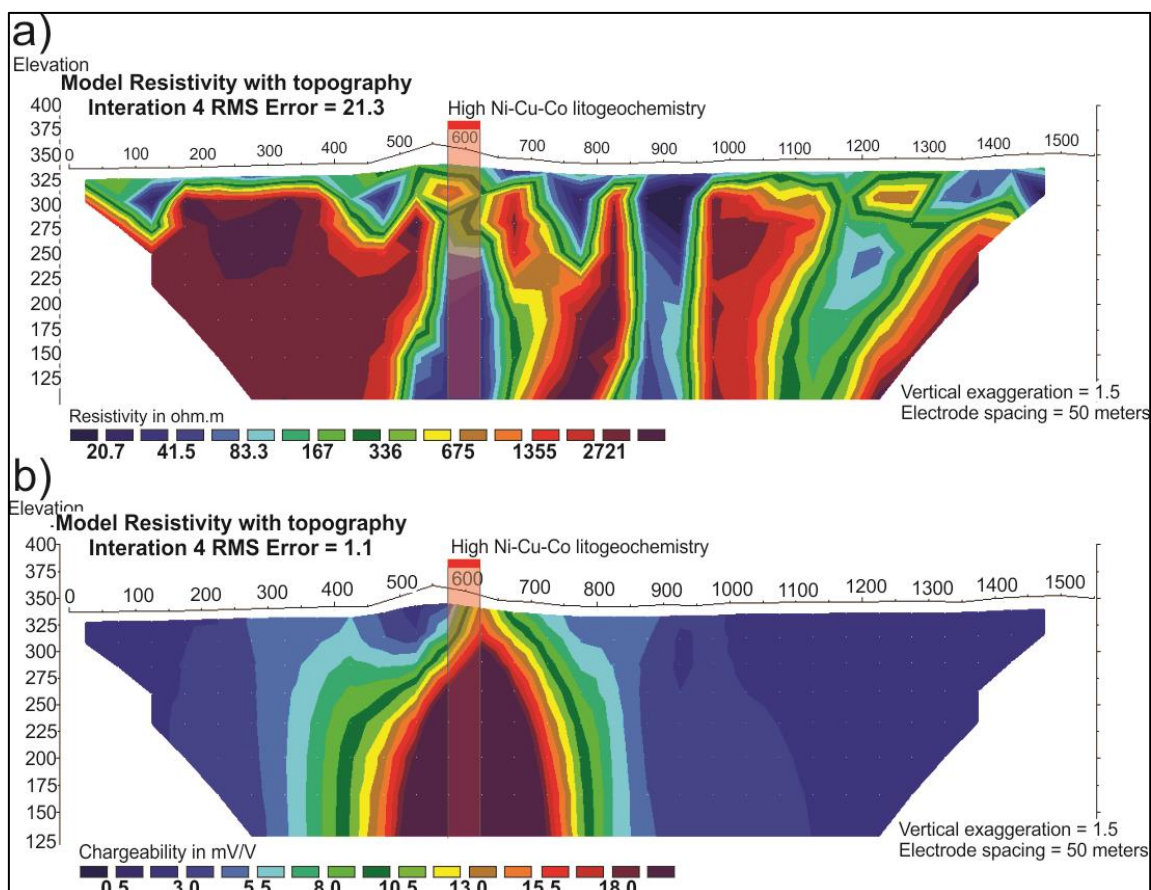


Figura 4.11: Resultados da inversão da linha teste utilizando a inversão conjunta com ambos os arranjos (*mixed array*). a) Seção de resistividade e b) Seção de cargabilidade.

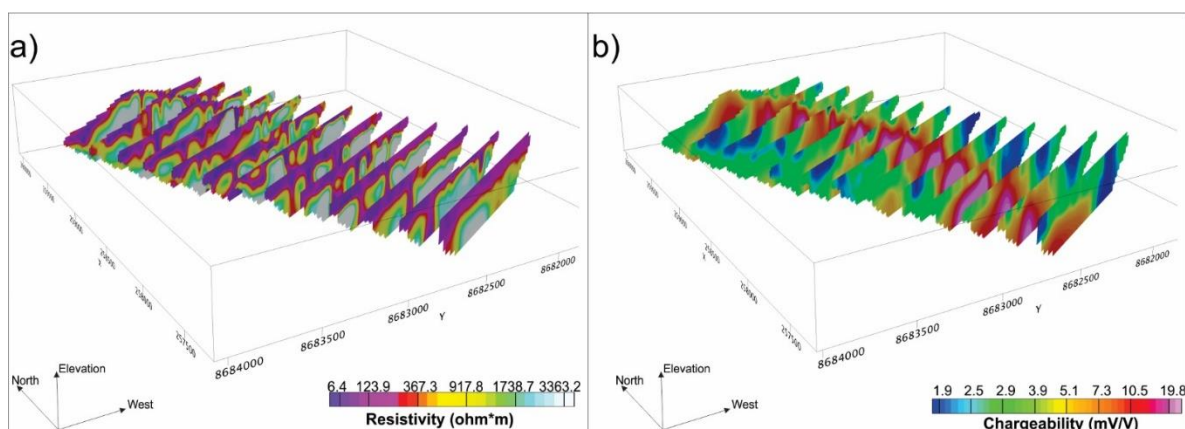


Figura 4.12: Visualização 3D de todas as seções de resistividade (a) e cargabilidade (b) adquiridas na área de estudo.

4.3 Geoquímica de Solo

Os resultados geoquímicos foram analisados em função tanto dos pontos amostrados, quanto das interpolações realizadas. O intuito da comparação foi de verificar se as interpolações apresentaram resultados coerentes à amostragem feita na área de estudo e, ao final, poder correlacionar os pontos anômalos com as zonas anômalas das malhas interpoladas.

De acordo com as correlações calculadas, os elementos escolhidos para elaboração dos resultados geoquímicos foram Ni-Cu-Co-Au-PGE. O cobalto possui correlação moderada com cobre e níquel, o que permite utilizá-lo como indicador da presença de mineralizações de Ni-Cu. Os PGE têm fraca correlação com níquel e cobalto, e muito fraca com o cobre. Por fim, o ouro não tem correlação com nenhum elemento, isso ocorre porque os únicos pontos com teores significativos de ouro foram coletados em aluviões (solos residuais de rochas félsicas) que não apresentam concentrações de Ni-Cu-Co-PGE.

Os elementos metálicos Ni-Cu-Co apresentam teores significativos em um *trend* NE-SW da porção centro-leste da área de estudo. Observa-se que na região oeste da área de estudo, onde afloram aluviões de composição félsica, não há teores anômalos de Ni-Cu-Co, com exceção de alguns pontos de alto cobalto, que podem ter tido um enriquecimento supergênico (Figuras 4.13a, 4.13b e 4.13c). De maneira geral, o elemento cobre é o que apresenta maior correlação com a distribuição espacial das rochas ultramáficas no alvo sul da IBG.

Os metais preciosos Au-PGE (Figuras 4.13d, 4.13e, 4.13f) apresentaram resultados discrepantes entre si. Enquanto os PGE tiveram uma distribuição muito semelhante ao Ni-Cu-Co, o ouro só apresentou teores acima do limite de detecção nas regiões sul e oeste da área. De maneira geral, o ouro está indiretamente correlato a presença de rochas ultramáficas, enquanto Ni-Cu-Co-PGE possuem uma forte correlação com a distribuição destas rochas. Por fim, a Figura 4.13g contém um mapa litológico simplificado em que se destacam: a forte correlação entre as rochas ultramáficas milonitizadas com teores anômalos e a ausência de teores anômalos nas litologias mais félsicas, com exceções para a amostragem de ouro.

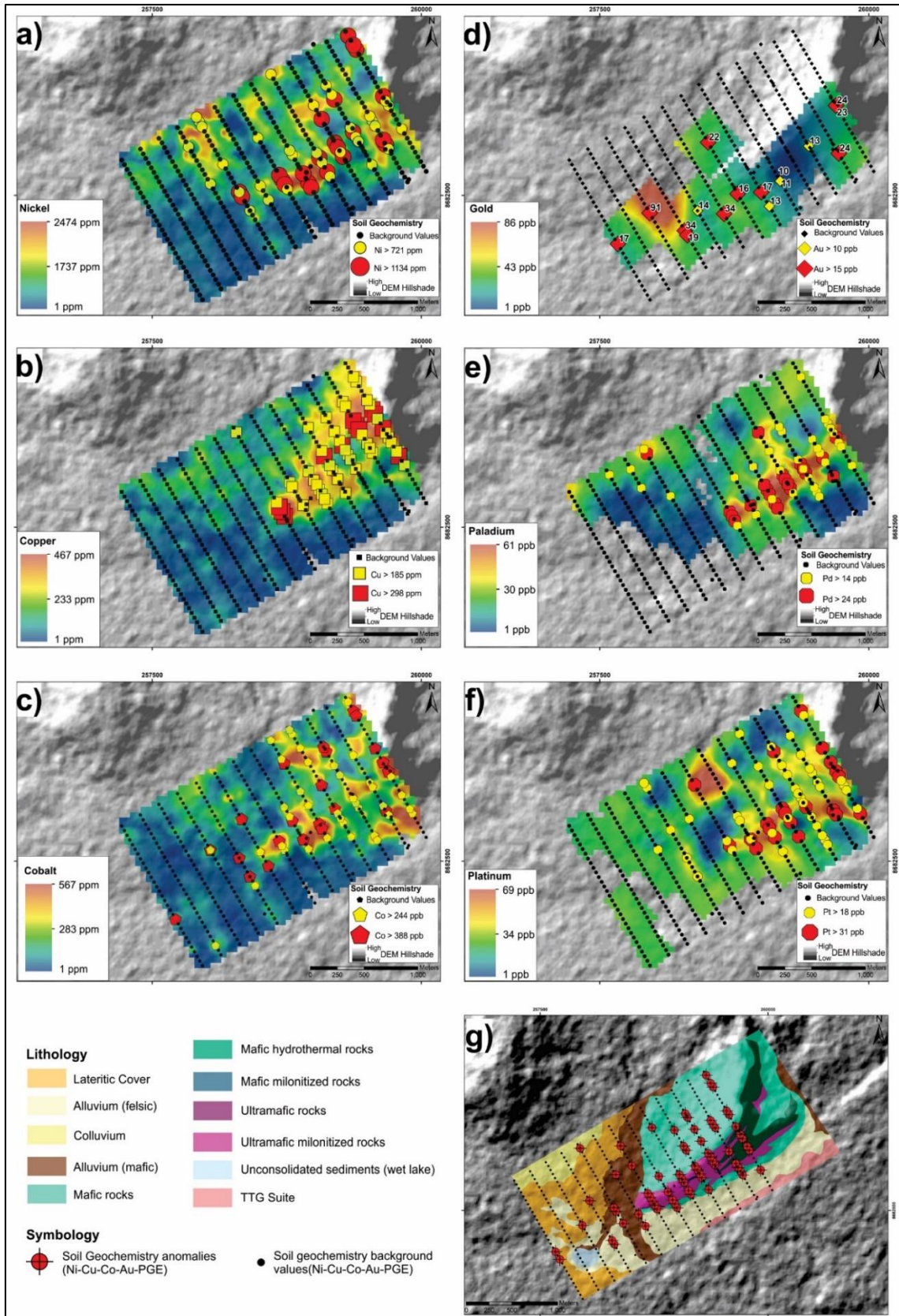


Figura 4.13: Resultados prospectivos da geoquímica de solo. Mapa de distribuição do elemento de interesse, gerado por interpolação, e valores das amostras coletadas de: a) Níquel,

b) Cobre, c) Cobalto, d) Ouro, e) Paládio e f) Platina. Em g) mapa litológico simplificado, com todas as amostragens anômalas em Ni-Cu-Co-Au-PGE.

4.4 Análise integrada

Após analisar cada método separadamente, uma análise integrada foi realizada, com o intuito de melhor compreender as assinaturas geofísicas das possíveis mineralizações. A Figura 4.14 contém o perfil de diferentes métodos em uma mesma linha (Linha 4), devido a presença de uma zona mineralizada conhecida na linha. Essa zona está localizada aproximadamente a 600 metros de distância do início da linha. A Figura 4.14a mostra que a região mineralizada é representada por unidades ultramáficas e um relevo mais acentuado. Os perfis geoquímicos apresentam um pico de concentração nos elementos Ni-Cu-Co justamente na região constituída por rochas ultramáficas, além uma outra anomalia de menor intensidade, e só de Ni-Cu, na distância de 1050 metros (Figura 4.14b). De maneira concordante, o gradiente horizontal magnético (Figura 4.14c) apresenta três picos: o primeiro relacionado as rochas ultramáficas e a anomalia principal de geoquímica, o segundo associado somente a uma fraca anomalia de níquel e o último correlato a anomalia de Ni-Cu de menor intensidade ao final do perfil. Esse resultado indica que as mineralizações de níquel podem estar associadas a ocorrência de minerais magnéticos como magnetita e pirrotita. A seção de resistividade (Figura 4.14d) contém três anomalias condutivas verticais, associadas aos picos magnéticos e geoquímicos. Já a seção de cargabilidade (Figura 4.14e) apresenta uma única anomalia, correlata apenas ao primeiro pico anômalo de geoquímica e magnetometria que é representado pelas rochas ultramáficas. Por fim, a seção de suscetibilidade magnética obtida pela inversão MVI (Figura 4.14f) evidencia três corpos magnéticos, sendo o primeiro que é correlato as anomalias mais significativas, raso, e o último com menor intensidade e com alta profundidade.

Com o intuito de visualizar a continuidade lateral desses sinais anômalos, foi elaborado um mapa com isosuperfícies de cargabilidade a 100 metros de profundidade, isosuperfícies do gradiente horizontal de magnetização e todas as amostras com teores anômalos em Ni-Cu-Co-PGE (Figura 4.15). O ouro não foi inserido nessa análise, pois os pontos anômalos não têm nenhuma correlação com os métodos elétricos, nem com o método magnético.

A partir do mapa foi possível observar uma correlação intensa das mineralizações, com a isosuperfície de cargabilidade. Pode-se observar que a zona anômala apresenta um *trend* E-

W com uma inflexão para NE no centro da área. Além disso, há uma direção magnética NE com teores anômalos, que não apresenta altos valores de cargabilidade.

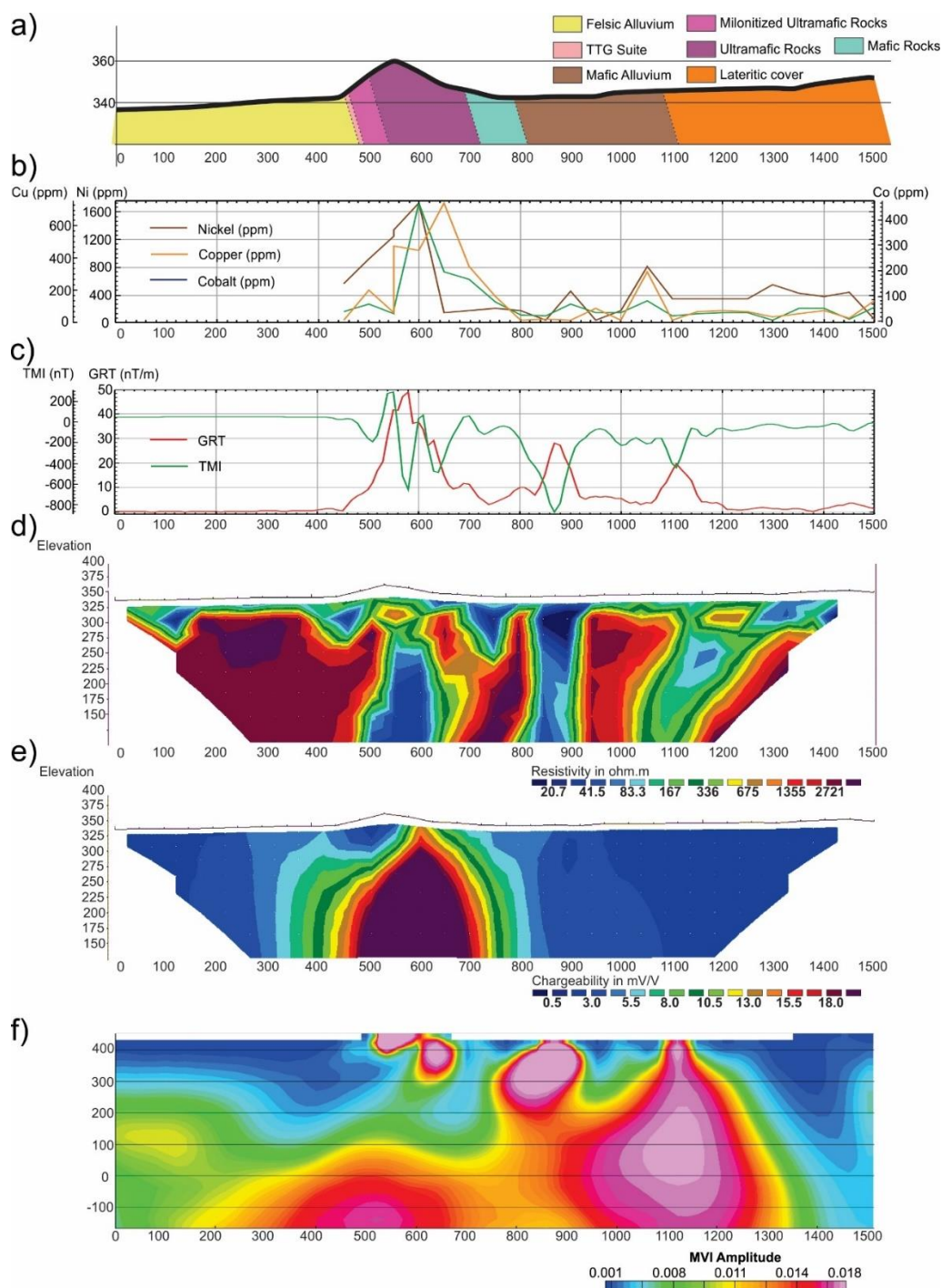


Figura 4.14: Análise integrada dos diferentes dados na Linha 4. Em a) Perfil Geológico; b) Perfis de distribuição da concentração de Ni-Cu-Co; c) Perfis de intensidade anômala de magnetização (TMI) e gradiente horizontal da intensidade (GHT); d) Seção invertida de resistividade aparente, e) Seção invertida de cargabilidade aparente; f) Seção invertida de suscetibilidade magnética.

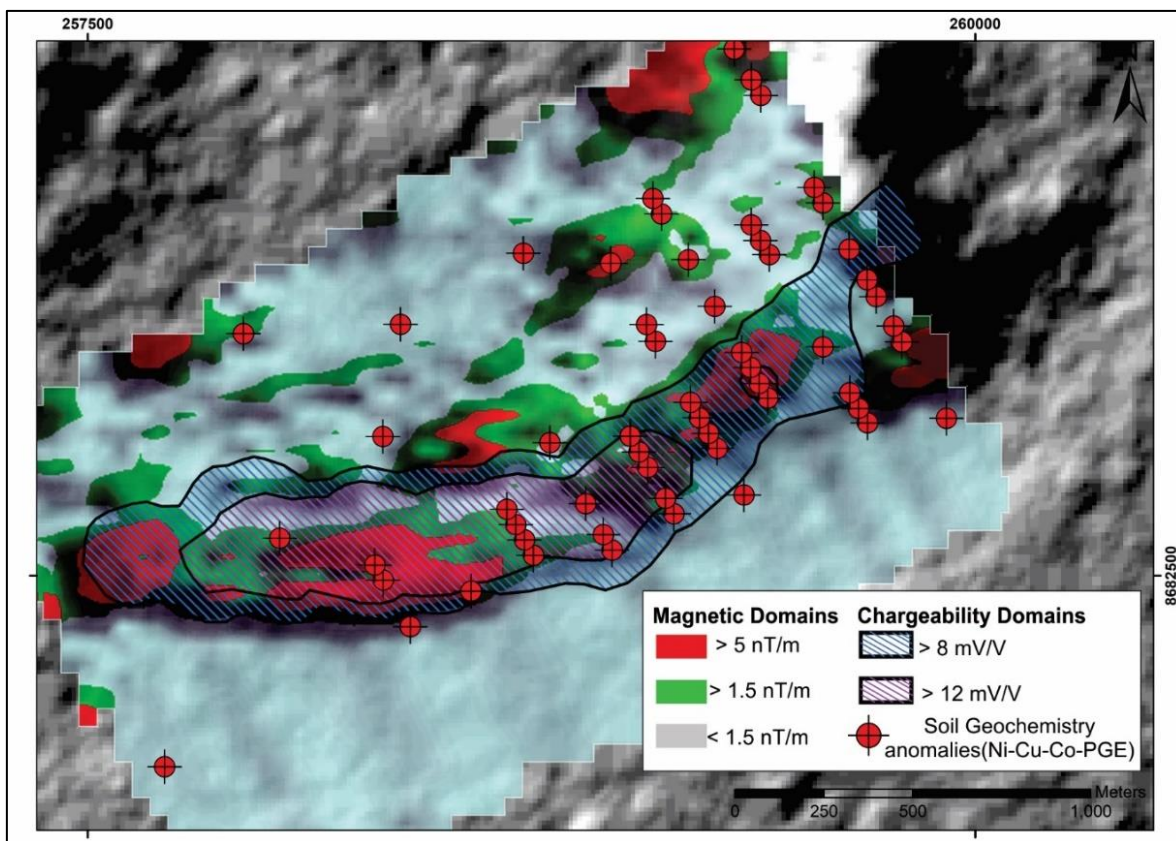


Figura 4.15: Mapa de análise integrada entre os métodos elétricos e magnéticos, em relação à presença de anomalias litogeoquímicas de solo em Ni-Cu-Co-PGE.

Os resultados geofísicos demonstraram a presença de um corpo com valores anômalos de cargabilidade (Figura 4.16a) e suscetibilidade magnética (Figura 4.16b). Além disso, esse corpo apresentou correlação com a presença de teores geoquímicos anômalos, justapostos à presença de litologias ultramáficas da IBG.

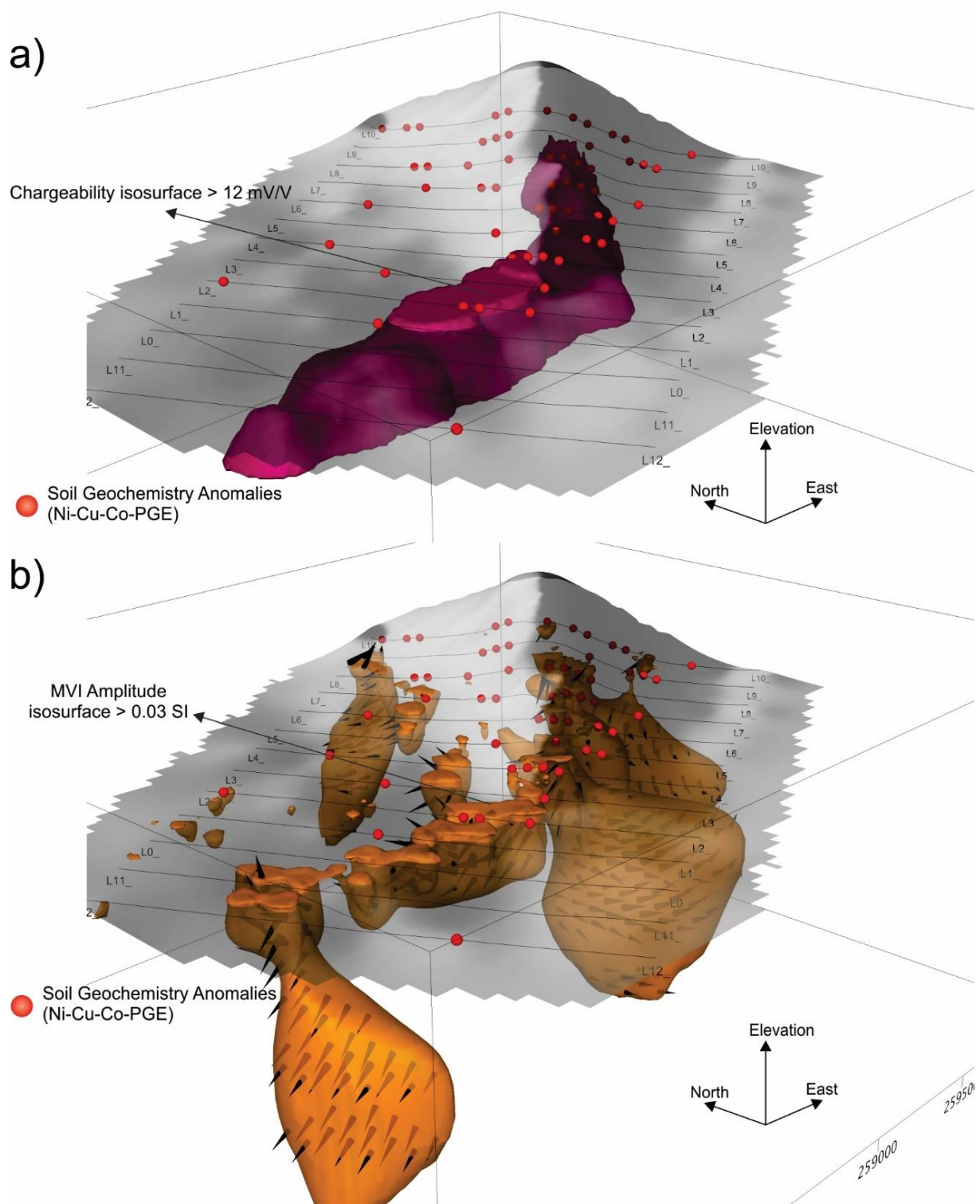


Figura 4.16: Modelagem tridimensional dos dados elétricos (a) e magnéticos (b). Em a) a isosuperfície de cargabilidade acima de 12 mV/V, em b) isosuperfície da amplitude MVI maior que 0.03 SI. Em ambas as figuras o modelo digital de elevação foi plotado como uma superfície sombreada, além dos pontos de geoquímica anômalos (primeira e segunda ordem).

5. CONCLUSÕES

A utilização de métodos geofísicos e geoquímicos aplicados a prospecção mineral, é uma etapa essencial na identificação de feições potenciais de mineralizações. Por meio da correlação entre os halos de dispersão geoquímicos com as anomalias geofísicas, pode-se traçar uma projeção do corpo potencialmente mineralizado em subsuperfície.

Os resultados magnéticos apresentaram uma correlação direta da intensidade de magnetização com a presença de teores geoquímicos anômalos em Ni-Cu-Co-PGE. De acordo com a mineralogia observadas nessas rochas, a interpretação dos resultados da inversão MVI sugere que a intrusão tenha profundidade de mais de 500 metros. Outra interessante aplicação do método foi na identificação de estruturas geológicas como lineamentos, falhas e cisalhamentos, os quais estão diretamente relacionados a presença de mineralizações.

A aplicação dos métodos elétricos na procura de sulfetos disseminados é uma ferramenta já consolidada na prospecção mineral. Os resultados geoeletricos evidenciaram estruturas verticais condutivas, associadas a anomalias de cargabilidade e altas concentrações de Ni-Cu-Co-PGE. Em algumas seções, foram identificadas mais de uma estrutura vertical condutiva, que não estavam associadas a anomalias de cargabilidade. Vale ressaltar que as estruturas observadas na resistividade também foram observadas com alto gradiente de intensidade magnética, o que corrobora para a presença de minerais magnéticos nessas feições.

As feições geoquímicas anômalas foram consideradas indicadores principais na caracterização do potencial corpo mineralizado. Os elementos Ni-Cu-Co-PGE tiveram uma correlação direta com a presença de litologias ultramáficas, enquanto o Au foi encontrado apenas em aluviões. Os resultados apresentaram um *trend* anômalo com direção NE a partir da porção centro-leste da área, que possui formato muito semelhante a distribuição de rochas ultramáficas na área de estudo. Apesar dos resultados geofísicos apresentarem uma continuidade da anomalia na porção centro-oeste da área, as amostras geoquímicas nessa região contêm teores baixos, devido a profundidade do potencial corpo mineralizado.

Por meio da correlação entre os diferentes métodos foi possível caracterizar um corpo em subsuperfície com alto potencial de mineralizações de Ni-Cu-Co-PGE. Contudo, os métodos geofísicos são indiretos, isto é, estimam propriedades em subsuperfície a partir de medições em superfície. Portanto, para confirmação dos resultados geofísicos devem ser realizadas amostragens diretas, como furos de sondagem das anomalias identificadas pela

geofísica. Se confirmado o potencial de exploração mineral no alvo sul da IBG, as técnicas utilizadas para elaboração dessa pesquisa poderão servir como um guia para a prospecção de mineralizações de Ni-Cu-Co-PGE, em outros alvos da intrusão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.

Barnes, S.J.; Osborne, G.A.; Cook, D.; Barnes, L.; Maier, W.D.; Godel, B. 2011. The Santa Rita Nickel Sulfide Deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: Geology, Sulfide Geochemistry, and Genesis. *Society of Economic*

Barnes, S. J., & Lightfoot, P. C. (2005). Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents.

Beresford, S. W., & Hronsky, J. M. A. (2014). THE CHONOLITH Ni-Cu MODEL: EXPANDING THE FOOTPRINT OF Ni-Cu DEPOSITS. In 12th International Platinum Symposium. Abstracts (pp. 102-103).

Braga, A. C. D. O. (2006). Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.

Costa, L. A. M., Nilson, A. A., Vale, C. R. O., Marchetto, C. L. M., Santos, E. L., Meneguesso, G., ... & Silva, W. G. (1976). Projeto Leste Tocantins/Oeste do São Francisco. Rio de Janeiro: Convênio DNPM/CPRM. Executado pela Prospec.

Correia Filho F. D. C. L., & Sá, A. M. D. (1980). Projeto Natividade: Relatório Final.

Cruz, E. L. C. C. (1993). Geologia e mineralizações auríferas do Terreno Granitoide-Greenstone de Almas-Dianópolis, Tocantins (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília).

CPRM. (2000). Geologia e resultados prospectivos da área Barra do Gameleira, Tocantins.

de Farias, J. S., & Ferreira Filho, C. F. (2021). Ultramafic intrusions hosting Ni–Cu sulfide mineralization along a suture zone in the southwestern margin of the Amazonian craton, Brazil: Examples from Morro Sem Boné, Morro do Leme and their satellite intrusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103240.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Fruchting, A. (2017). Estratégias para utilização de dados geofísicos na exploração de mineralizações do tipo Ni-Cu-PGE: a descoberta do depósito de limoeiro, PE.

Fuck, R. A., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Botelho, N. F., Armstrong, R., Laux, J. H., ... & Praxedes, I. F. (2014). Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, 244, 53-74.

Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.

King, A., & Milkereit, B. (2007, September). Review of geophysical technology for Ni-Cu-PGE deposits. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 7, pp. 647-665).

Licht, O. A. B. (1998). *Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos*. CPRM.

Loke, M. H. (2004). *User's Manual for RES2DINV Software*. Geotomo Software, 128.

Loke, M. H. (2000, May). Topographic modelling in electrical imaging inversion. In *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition, Glasgow (Ecosse)* (Vol. 29).

Mantovani, M. S. M., & de Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303-315.

Martins-Ferreira, M. A. C., Dias, A. N. C., Chemale Jr, F., Campos, J. E. G., Seraine, M., & Novais-Rodrigues, E. (2020). Multi-stage crustal accretion by magmatic flare-up and

quiescence intervals in the western margin of the São Francisco Craton: U-Pb-Hf and geochemical constraints from the Almas Terrane. *Gondwana Research*, 85, 32-54.

Mungall, J. E., & Naldrett, A. J. (2008). Ore deposits of the platinum-group elements. *Elements*, 4(4), 253-258.

Naldrett, A. J., & Naldrett, A. L. (2004). *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration*. Springer Science & Business Media.

Padilha, J. L. (1984). Prospecção de ouro na região nordeste de Goiás-Projeto Pindorama-DOCEGEO. SBG, Encontro Regional do Ouro de Goiás, I, Anais, 78-95.

Patella, D., & Schiavone, D. (1977). Comparative analysis of time domain and frequency domain in the induced polarization prospecting method. *Geophysical prospecting*, 25(3), 496-511.

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Saboia, A. M. (2021). *Geologia, geocronologia e geoquímica dos granitoides paleoproterozoicos do domínio Almas-Conceição do Tocantins, norte do orógeno Brasília: implicações magmáticas e geodinâmicas (Doctoral dissertation)*.

Silva, J. M. (2009). *O Complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Americano do Brasil e sua mineralização de Ni-Cu-Co*.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Valeriano, C. D. M., Pimentel, M. M., Heilbron, M., Almeida, J. C. H., & Trouw, R. A. J. (2008). Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 197-210.

Whitney, J. A., Naldrett, A. J., & Robertson, J. M. (1989). Ore deposition associated with magmas. *Society of Economic Geologists*.

CAPÍTULO 5

5. Discussões e Conclusões

Apesar do potencial de mineralização, a IBG ainda não havia sido estudada com maior detalhamento como apresentado nestes estudos. O projeto de prospecção realizado pela CPRM (2000) teve maior foco na interpretação dos resultados geoquímicos, no qual o mapeamento geológico apresentado não tinha muitas diferenças em relação ao primeiro, elaborado por Correia Filho e Sá (1980). A partir da utilização dos métodos geofísicos, somados aos mapeamentos feitos na IBG, pode-se diferenciar de forma mais precisa a intrusão, principalmente em sua porção leste, onde afloram rochas ultramáficas.

Os estudos geoquímicos apresentados pela CPRM (2000) já mostravam um potencial de mineralização para a IBG. Os resultados litogeoquímicos, obtidos na primeira etapa de prospecção, corroboram a eficácia das amostragens realizadas pela CPRM. Pois as zonas anômalas identificadas pelos sedimentos de corrente e concentrados de bateia apresentaram alta correlação com anomalias litogeoquímicas, em locais a montante das drenagens amostradas.

Resultados litogeoquímicos apresentaram teores extremamente anômalos em Cu – 3400 ppm – e Ni – 5300 ppm – na IBG. Contudo, deve-se ressaltar que esses valores para o Ni foram obtidos em uma amostra laterítica em processo de enriquecimento supergênico. Já a amostra anômala em cobre, foi obtida de uma amostra ultramáfica com presença de sulfetações.

A utilização de dados de domínio público, como a aerogeofísica e a geoquímica foi uma ferramenta muito importante no entendimento da intrusão como um todo. Essa pesquisa ressalta a importância de reutilizar esses dados disponíveis, uma vez que são extremamente eficientes no entendimento do arcabouço geológico local.

Os dados aeromagnéticos foram os que tiveram a maior correlação com a presença de rochas máfica-ultramáficas, e os dados radiométricos também apresentaram alta correlação, porém negativa, com a distribuição dessas litologias. Por meio dos filtros e realces magnéticos foi possível delimitar domínios e lineamentos magnéticos, esses correlatos as litologias e estruturas geológicas, respectivamente.

Deve-se atentar a utilização de dados aerogamaespectrométricos em que as rochas estudadas são máficas-ultramáficas. Por vezes durante a correção dos dados, os valores próximos a zero (referentes as litologias mais ultramáficas), são convertidos em teores negativos após as correções que devem ser aplicadas aos dados. Nessa pesquisa, optou-se por normalizar os dados de 0.001 a 1.001 com o intuito de não eliminar esses valores, uma vez que esses são justamente o objeto de estudo.

As normalizações propostas por Saunders et al. (1987) e Saunders (1993, 1994) se mostraram uma ferramenta útil para a identificação das litologias UM dentro da intrusão. O termo CRAD criado, teve como objetivo somar as normalizações de urânio e potássio, uma vez que ambas apresentaram correlação a presença de rochas UM.

O termo IMUM foi criado com o intuito de contribuir nas pesquisas em que as rochas estudadas são de composição mais ferro-magnésiana. O IMUM foi baseado no IM de Pires e Moraes (2006), porém utilizou constatações teóricas – como a melhor aplicação do GHT como detector de bordas de fontes magnéticas – e empíricas – como a utilização do elemento potássio ao quadrado no denominador, devido aos resultados petrofísicos – para que o novo filtro tivesse maior detalhamento dentro da intrusão.

Os resultados da prospecção em sedimentos de corrente e concentrado de bateia, foram correlacionados com um diferente resultado: a dupla composição entre os novos filtros CRAD e IMUM. A partir da integração, interpretou-se que a dupla composição é correlata a fonte desses sedimentos, uma vez que a anomalia de dupla composição sempre se localizava à montante da drenagem amostrada.

Com a utilização de dados de domínio público, algumas amostras litogeoquímicas e um mapeamento geológico foi possível elaborar o modelo prospectivo e definir 3 alvos: norte, sul e leste. Essa foi a primeira etapa de reconhecimento mais “regional” da intrusão e resultou na elaboração de um artigo científico com as técnicas utilizadas.

Posteriormente, um trabalho de maior detalhe foi realizado no alvo sul, pois esse apresentou os melhores resultados: amostram com 3400 ppm de Cu, alta intensidade de magnetização, presença de sulfetações em afloramentos rochosos e principalmente, a existência de uma zona de cisalhamento correlata às anomalias ditas anteriormente.

Os resultados no Alvo Sul mostraram uma alta correlação entre anomalias de condutividade, cargabilidade, intensidade de magnetização e geoquímica de solo.

Os dados magnéticos foram adquiridos sem a medição de uma base e mesmo assim apresentaram resultados condizentes. Apesar do desnivelamento observado na porção sul da malha, as anomalias referentes a zona mineralizada têm amplitude na ordem de dez vezes o valor do desnivelamento. Portanto, essa pesquisa demonstrou que por conta do alto teor de minerais magnéticos na IBG, a não utilização de uma base foi considerada aceitável. Esse ruído gerado influenciou mais na inversão MVI, contudo, ressalta-se que os dados terrestres recuperam menores comprimentos de onda, o que influencia também nas inversões.

Os métodos geoeletricos apresentaram resultados semelhantes e distintos ao mesmo tempo. Para o IP, foi observada uma única anomalia contínua de cargabilidade, na área de estudo. Já na resistividade, diferentes estruturas verticais foram identificadas e em cada linha apenas uma era concomitante a anomalia de cargabilidade.

A geoquímica de solo mostrou uma correlação entre os elementos Ni-Cu-Co-PGE e por meio das interpolações foi possível observar uma estreita relação das anomalias com a distribuição das rochas ultramáficas.

Sumarizando, essa pesquisa consistiu na caracterização da IBG como um todo, em escala de 1:50 000, utilizando principalmente dados públicos, definindo um modelo prospectivo e três alvos. De forma contínua o alvo sul foi selecionado para realização de uma pesquisa mais detalhada em uma malha de 1500 x 2400 metros, em que foi caracterizado um corpo potencialmente mineralizado.

Devem ser feitas campanhas de sondagem para verificação das técnicas empregadas nessa pesquisa. Uma vez que as sondagens confirmarem a presença de mineralizações significativas, essa pesquisa servirá como um guia prospectivo em intrusões máficas-ultramáficas semelhantes a IBG.

Independentemente da presença de mineralizações, essa pesquisa contribuiu de forma significativa na compreensão da formação da Suíte Gameleira. Apesar de esse não ser o foco da pesquisa, resultados importantes acerca da geologia da IBG foram apresentados e podem ser utilizados por pesquisadores para evolução na compreensão do conhecimento da Suíte Gameleira.

CAPÍTULO 6

6. Referências Bibliográficas

Abram, M. B. 1993. O corpo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela, Ipiaú-BA: caracterização petrográfica, geoquímica, tipologia e implicações metalogenéticas. Tese Mestrado, Inst. de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, p. 137.

Airo, M. L., & Loukola-Ruskeeniemi, K. (2004). Characterization of sulfide deposits by airborne magnetic and gamma-ray responses in eastern Finland. *Ore Geology Reviews*, 24(1-2), 67-84.

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.

Ames, D. E., Farrow, C. E. G., & Goodfellow, W. D. (2007). Metallogeny of the Sudbury mining camp, Ontario. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5, 329-350.

Araújo Filho, J. D. (2000). The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection between Brasiliano fold-thrust belts in Central Brazil and implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 144-148.

Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359-382.

Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1), 67-79.

Barbosa, I. O. (2012). Modelo de depósito do complexo máfico-ultramáfico de Niquelândia, GO, com base em dados multitemáticos.

Barnes, J. W., & Lisle, R. J. (2013). Basic geological mapping. John Wiley & Sons.

Barnes, S.J.; Maier, W.D.; Curl, E.A. 2010. Composition of the Marginal Rocks and Sills of the Rustenburg Layered Suite, Bushveld Complex, South Africa:

Barnes, S.J.; Osborne, G.A.; Cook, D.; Barnes, L.; Maier, W.D.; Godel, B. 2011. The Santa Rita Nickel Sulfide Deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: Geology, Sulfide Geochemistry, and Genesis. Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology, v. 106, 1083–1110.

Barreto, P. B. (2020). Caracterização e concentração do minério de cobre da Mineração Caraíba.

Baxe, O. S. S. (2007). Geocronologia de complexos máfico-ultramáficos: exemplo da série superior do complexo de Niquelândia, Brasil, e do complexo Kunene, Angola.

Blaufox, M. D. (1996, July). Becquerel and the discovery of radioactivity: Early concepts. In Seminars in nuclear medicine (Vol. 26, No. 3, pp. 145-154). WB Saunders.

Boyle, R. W. (1974). The use of major elemental ratios in detailed geochemical prospecting utilizing primary halos. Journal of Geochemical Exploration, 3(4), 345-369.
hawkes 1957

Brim, R.J.P. (1985). Prospecção Geoquímica. Métodos e técnicas de pesquisa mineral. Brasília: MME/DNPM.

Butler, R. F., & Butler, R. F. (1992). Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes (Vol. 319). Boston: Blackwell Scientific Publications.

Campos, D.A (eds.), Tectonic Evolution of South America, Brazil 2000, 31th International. Geological Congress, Rio de Janeiro, 231-263.

Carminatti, M. G. (2007). Modelagem geofísica dos corpos máficos-ultramáficos de Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto, centro de Goiás. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25, 460-460.

Carminatti, M. G., Marangoni, Y. R., & Correia, C. T. (2003). Modelagem gravimétrica do complexo de Cana Brava e seqüência de Palmeirópolis, GO. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(3), 245-254.

Castro, F. F. D., Góes, G. S., Peiter, C. C., Góes, G. S., Britto, F. G. A. D., Green, M. P. L., & Matriz e Miranda, F. S. D. (2022). Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira.

Cesar Fonseca Ferreira Filho; Humberto Alcântara Ferreira Lima; Elton L. Dantas; Walid

Chapman, S., & Bartels, J. (1940). *Geomagnetism*, vol. II: Analysis of the data, and physical theories. *Geomagnetism*.

Cohen, D., & Howell, R. (2014). 13.24-Exploration Geochemistry. *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed.; Holland, HD, Turekian, KK, Eds, 623-650.

Collett, L. S. (1990). History of the induced-polarization method.

Correia Filho F. D. C. L., & Sá, A. M. D. (1980). Projeto Natividade: Relatório Final.

Correia, C. T., & Girardi, V. V. (1998). Geoquímica e petrologia das rochas máficas e ultramáficas do complexo estratiforme de Cana Brava-GO, e das suas encaixantes. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 29, 1-37.

Costa, J. B. S. (1985). Aspectos lito-estruturais e evolução crustal da região centro-oeste de Goiás.

Costa, L. A. M., Nilson, A. A., Vale, C. R. O., Marchetto, C. L. M., Santos, E. L., Meneguesso, G., ... & Silva, W. G. (1976). Projeto Leste Tocantins/Oeste do São Francisco. Rio de Janeiro: Convênio DNPM/CPRM. Executado pela Prospec.

CPRM. (2000). Geologia e resultados prospectivos da área Barra do Gameleira, Tocantins.

Cruz, E. L. C. C. (1993). Geologia e mineralizações auríferas do Terreno Granitoide-Greenstone de Almas-Dianópolis, Tocantins (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília).

Cruz, E. L. C. C., & Kuyumjian, R. M. (1998). The geology and tectonic evolution of the Tocantins granite-greenstone terrane, Almas-Dianópolis region, Tocantins State, Central Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(2), 173-182.

Cuadros, F. A., Botelho, N. F., Fuck, R. A., & Dantas, E. L. (2017). The Ticunzal Formation in central Brazil: Record of Rhyacian sedimentation and metamorphism in the western border of the São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 307-325.

Dardenne M.A. 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A (eds.), *Tectonic Evolution of South America, Brazil 2000*, 31th International. Geological Congress, Rio de Janeiro, 231-263.

de Oliveira, S. B., & Rocha, M. M. D. (2011). Krigagem indicadora aplicada aos litotipos do depósito de Ni-Cu de Americano do Brasil, GO. *Geologia USP. Série Científica*, 11(2), 123-134.

de Lima, O. A., & Sharma, M. M. (1992). A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. *Geophysics*, 57(3), 431-440.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers* (No. 3). Cambridge university press.

Dickson, B. L., & Scott, K. M. (1997). Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 187-200.

Ferreira Filho, C. F., Pimentel, M. M., de Araujo, S. M., & Laux, J. H. (2010). Layered intrusions and volcanic sequences in Central Brazil: geological and geochronological constraints for Mesoproterozoic (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) igneous associations. *Precambrian Research*, 183(3), 617-634.

Ferreira Filho, C. F., Lima, H. A., Dantas, E. L., Daoud, W. E. K., & Salomão Neto, J. (2002). The layered mafic-ultramafic complexes of the Tocantins State, central Brazil: recently discovered large Proterozoic intrusions with favourable potential to host PGE deposits. In *Proceedings of the IX International Platinum Symposium. Extended Abstracts, Billings, Montana* (pp. 141-143).

Fleischer, M. (1953). Recent estimates of the abundances of the elements in the earth's crust (Vol. 285). US Department of the Interior, Geological Survey.

Fonseca, D.S. (2016). Cobalto – Sumário Mineral 2016. Brasília: DNPM.

Fuck, R. A., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Botelho, N. F., Armstrong, R., Laux, J. H., ... & Praxedes, I. F. (2014). Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, 244, 53-74.

Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2017). The northern Brasília belt. São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent, 205-220.

Fuck, R. A. (1994). A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, 4, 184-187.

Goldschmidt, V. M. (1937). The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 655-673.

Govett, G. J. S. (1983). *Handbook of exploration geochemistry. Rock geochemistry in mineral exploration*, 1.

Guigues, J., & Devismes, P. (1969). La prospection minière à la batée dans le Massif armoricain.

Gunn, P. J., Minty, B. R. S., & Milligan, P. R. (1997). The airborne gamma-ray spectrometric response over arid Australian terranes. In *Proceedings of exploration* (Vol. 97, pp. 733-740).

Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. (Eds.). (2012). *Geologia do brasil*.

Hallenstein, C. P., & Pedersen, J. L. (1983). Scheelite mineralization in central East Greenland. *Mineralium Deposita*, 18(Suppl 2), 315-333.

Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.

International Agency Energy. 2011. *The Role of Critical World Energy Outlook Special*

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). *Geological interpretation of aeromagnetic data*. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists.

Keller, G. V. (1988). Rock and mineral properties. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1, 13-52.

Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*.

Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., ... & Zimmermann, E. (2012). An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.

Koljonen, T., Gustavsson, N., Noras, P., & Tanskanen, H. (1992). The geochemical atlas of Finland.

Lazarin, F. D. A. (2011). Geologia, petrologia e estudos isotópicos dos depósitos de níquel-cobre sulfetados Santa Rita e Peri-Peri, Nordeste do Brasil.

Li, X. H., Su, L., Chung, S. L., Li, Z. X., Liu, Y., Song, B., & Liu, D. Y. (2005). Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~ 825 Ma south China mantle plume?. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 6(11).

Licht, O. A. B. (1998). *Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos*. CPRM.

Lightfoot, P. C., & Milkereit, B. (2007). Advances in Ni-Cu-PGE sulphide deposit models and implications for exploration technologies. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 7, pp. 629-646).

Loke, M. H. (2004). *User's Manual for RES2DINV Software*. Geotomo Software, 128.

Loke, M. H. (2000). Topographic modelling in electrical imaging inversion. In *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition, Glasgow (Ecosse)* (Vol. 29).

Lord, R.A.; PRICHARD, H.M.; SÁ, J.H.S.; NEARY, C.R. 2004. Chromite Geochemistry and EGP Fractionation in the Campo Formoso Complex and Ipueira-Medrado Sill, Bahia State, Brazil. *Economic Geology* Vol. 99, 339–363.

Machado, I. A demanda mundial de minerais críticos. *Brasil Mineral*, São Paulo, ano, 28, 58-75.

- Mansur, E. T., & Ferreira Filho, C. F. (2016). Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic–Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil. *Lithos*, 266, 28-43.
- Mantovani, M. S. M., & de Brito Neves, B. B. (2005). The Paranapanema lithospheric block: Its importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) supercontinent theories. *Gondwana Research*, 8(3), 303-315.
- Mao, J. W., Pirajno, F., Zhang, Z. H., Chai, F. M., Wu, H., Chen, S. P., ... & Zhang, C. Q. (2008). A review of the Cu–Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): principal characteristics and ore-forming processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4), 184-203.
- Madden, T. R., & Cantwell, T. (1967). Part D: Induced Polarization, a Review.
- Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959). Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*, 24(4), 790-816.
- Martins-Ferreira, M. A. C., Dias, A. N. C., Chemale Jr, F., Campos, J. E. G., Seraine, M., & Novais-Rodrigues, E. (2020). Multi-stage crustal accretion by magmatic flare-up and quiescence intervals in the western margin of the São Francisco Craton: U-Pb-Hf and geochemical constraints from the Almas Terrane. *Gondwana Research*, 85, 32-54.
- McCafferty, A. E., & Van Gosen, B. S. (2009). Airborne gamma-ray and magnetic anomaly signatures of serpentinite in relation to soil geochemistry, northern California. *Applied Geochemistry*, 24(8), 1524-1537.
- McLellan, B.; Corden, G.; Saleem, A.; Golev, A. Rare metals, unconventional resources, and sustainability. *Special Paper of the Geological Society of America*. v. 520, p. 57 - 65,
- Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217.

Minty, B. R. S. (1997). Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 39-50.

Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.

Nabighian, M. N. (1974). Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39(1), 85-92.

Nabighian, M. N. (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49(6), 780-786.

Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., ... & Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND-61ND.

Naldrett, A. J. (1997). Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 283-315.

Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. *Mineralium deposita*, 34, 227-240.

Naldrett, A. J., & Naldrett, A. L. (2004). *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration*. Springer Science & Business Media.

Nascimento, M., & Soares, P. S. M. (2019). Cobalto no Brasil: metalurgia extrativa, ocorrências e projetos.

Olhoeft, G. R. (1985). Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50(12), 2492-2503.

Oliveira Cordeiro, P. F., & de Oliveira, C. G. (2017). The Goiás Massif: Implications for a pre-Columbia 2.2–2.0 Ga continent-wide amalgamation cycle in central Brazil. *Precambrian Research*, 298, 403-420.

Overstreet, W. C., & Marsh, S. P. (1981). Some concepts and techniques in geochemical exploration.

Padilha, J. L. (1984). Prospecção de ouro na região nordeste de Goiás-Projeto Pindorama-DOCEGEO. SBG, Encontro Regional do Ouro de Goiás, I, Anais, 78-95.

Patella, D., & Schiavone, D. (1977). Comparative analysis of time domain and frequency domain in the induced polarization prospecting method. *Geophysical prospecting*, 25(3), 496-511.

Pimentel, M. M., Fuck, R. A., & Gioia, S. M. C. L. (2000). The Neoproterozoic Goiás magmatic arc, central Brazil: a review and new Sm-Nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1), 35-39.

Pinto, V. D. P. (2019). Polarização induzida espectral: teoria, modelagem e aplicação.

Pires, A.C.B. & Moraes R.A.V. 2006. New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.

Pride, D. E., Timson, G. H., & Robinson, C. S. (1978). Use of Selected Elements to Study Hydrothermal Alteration-mineralization of a Porphyry Molybdenum Propspect, Breckenridge Mining District, Colorado.

Queiroz, L. C. (2012). Estudos comparativos de áreas com anomalias geofísicas na região da fazenda Mirabela, sul da Bahia. Salvador: Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.

Ratie, G. J. E. (2015). Fracionamento isotópica do níquel, estudo do ciclo natural e antropogênico nos maciços ultramaficas: o caso de Barro Alto e Niquelandia.

Rebouças, I. S. (2022). O estado da arte dos depósitos cromitíferos do Vale do Jucurici (Ipueira-Medrado): conceitos sobre modelagem geológica 3D, de geoestatística e integração dados.

Reeves, C. (2005). Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation (Vol. 155, p. 2005). Washington (DC): Geosoft.

Report Minerals in Clean Energy Transitions. 2021.

Revil, A., & Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1480-1498.

Revil, A., Kessouri, P., & Torres-Verdín, C. (2014). Electrical conductivity, induced polarization, and permeability of the Fontainebleau sandstone. *Geophysics*, 79(5), D301-D318.

Reynolds, J. M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.

Rijo, L. (1977). MODELING OF ELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC DATA. The University of Utah.

Ripley, E. M., & Li, C. (2011). A review of conduit-related Ni-Cu-(PGE) sulfide mineralization at the Voisey's Bay deposit, Labrador, and the Eagle deposit, northern Michigan.

Rose, A. W., Hawkes, H. E., & Webb, J. S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. 2nd edn, 1979. Association of Applied Geochemists.

Saboia, A. M. (2021). Geologia, geocronologia e geoquímica dos granitoides paleoproterozoicos do domínio Almas-Conceição do Tocantins, norte do orógeno Brasília: implicações magmáticas e geodinâmicas (Doctoral dissertation).

Santos, M. C. P. (2017). Geologia, Petrografia, Química Mineral, Litogeoquímica e Potencial Metalogenético do Corpo Máfico–Ultramáfico de Catingal, Distrito de Manoel Vitorino, Bahia.

Sharma, P. V. (1987). Magnetic method applied to mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 2(4), 323-357.

Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D. S., & Vozoff, K. (2007). The early history of the induced polarization method. *The Leading Edge*, 26(3), 312-321.

Silva, C.S. (2009)a. Níquel. In: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. *Economia Mineral do Brasil*. 1ed. Brasília: DNPM.

Silva, J. M. (2009)b. O Complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Americano do Brasil e sua mineralização de Ni-Cu-Co.

Silva, W. G. (1976). Projeto Leste Tocantins/Oeste do São Francisco. Rio de Janeiro: Convênio DNPM/CPRM. Executado pela Prospec.

Sluzhenikin, S. F., Krivolutskaya, N. A., Rad'ko, V. A., Malitch, K. N., Distler, V. V., & Fedorenko, V. A. (2014). Ultramafic-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni sulfide deposits of the Noril'sk Province, Polar Siberia. *Field trip guidebook*.

Sousa, I. M. C., Della Giustina, M. E. S., & de Oliveira, C. G. (2016). Crustal evolution of the northern Brasília Belt basement, central Brazil: a Rhyacian orogeny coeval with a pre-Rodinia supercontinent assembly. *Precambrian Research*, 273, 129-150.

Teixeira, L.R. 1997. O complexo Caraíba e a suíte São José do Jacuípe no Cinturão Salvador-Curaçá (Bahia, Brasil): petrologia, geoquímica e potencial metalogenético. Tese (Doutorado

em Geologia Econômica)-Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 202p.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge university press.

Tucker, R. D., Boyd, R., & Barnes, S. J. (1990). A U-Pb zircon age for the Råna intrusion, N. Norway: new evidence of basic magmatism in the Scandinavian Caledonides in Early Silurian time. *Norwegian Journal of Geology/Norsk geologisk tidsskrift*, 70, 229-239.

Valeriano, C. D. M., Pimentel, M. M., Heilbron, M., Almeida, J. C. H., & Trouw, R. A. J. (2008). Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 197-210.

Ward, S. H., & Hohmann, G. W. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Voume 1, Theory* (pp. 130-311). Society of Exploration Geophysicists.

Ward, S. H. (1980). Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods. *Geophysics*, 45(11), 1659-1666.

Ward, S. H., & Fraser, D. C. (1967). Part B—Conduction of electricity in rocks. In *Mining Geophysics, Volume II, Theory* (pp. 197-223). Society of Exploration Geophysicists.

Wilford, J., & Minty, B. (2006). The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. *Developments in soil science*, 31, 207-610.

Willemse, J. (1969). The geology of the Bushveld Igneous Complex, the largest repository of magmatic ore deposits in the world.

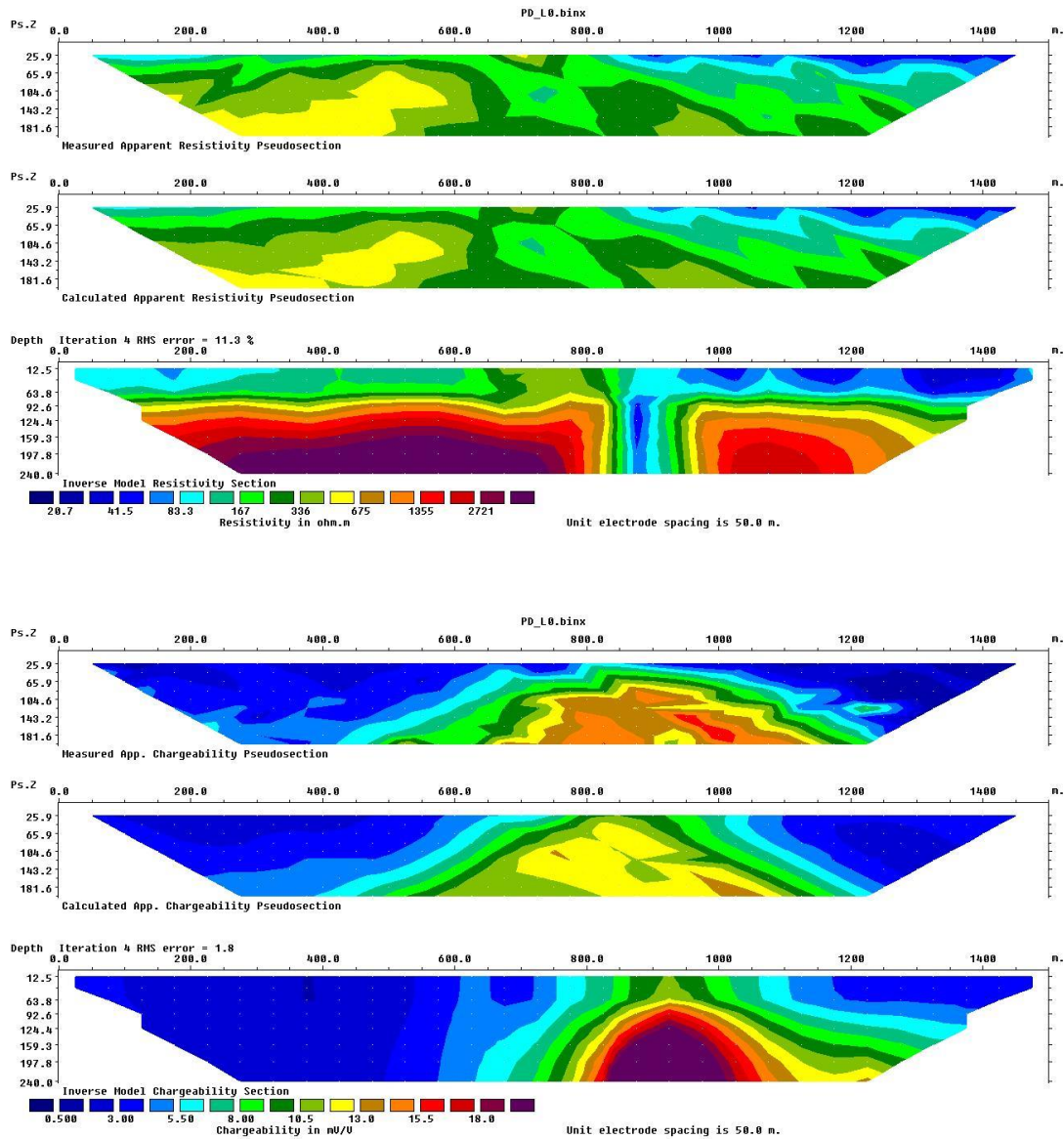
Winter, J. D. (2013). Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson education.

Zhdanov, M. S., & Keller, G. V. (1994). The geoelectrical methods in geophysical exploration. *Methods in geochemistry and geophysics*, 31, I-IX.

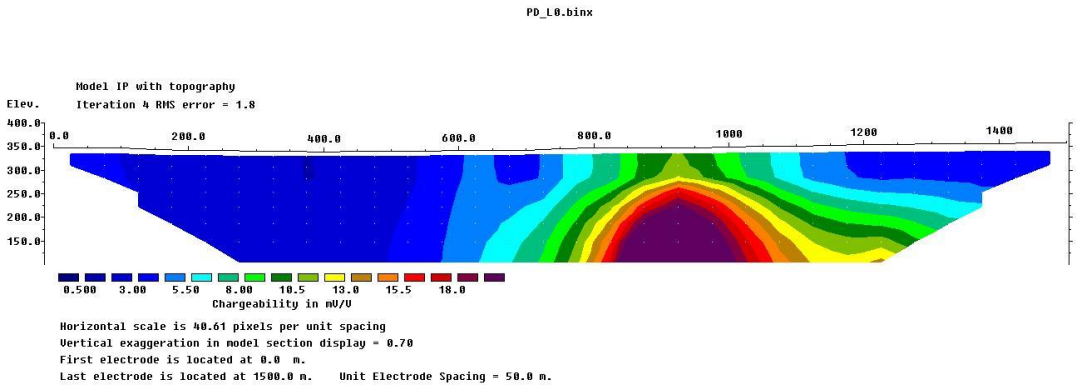
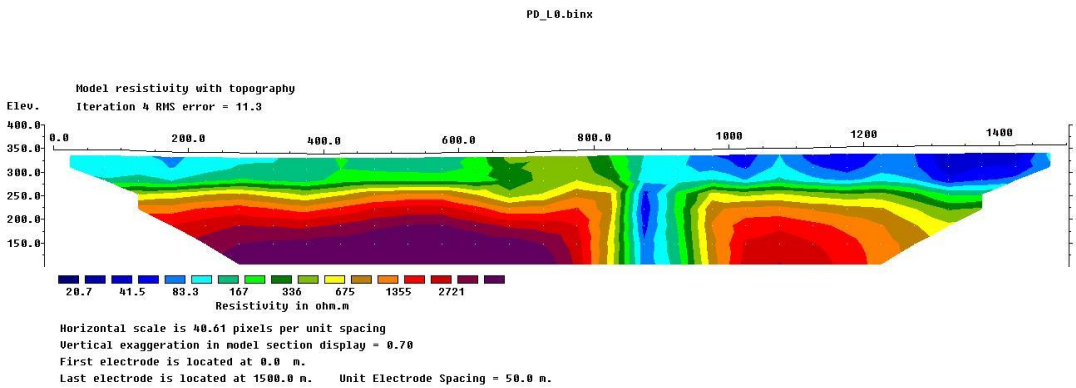
Zhdanov, M. (2008). Generalized effective-medium theory of induced polarization. *Geophysics*, 73(5), F197-F211.

Seções Geolétricas

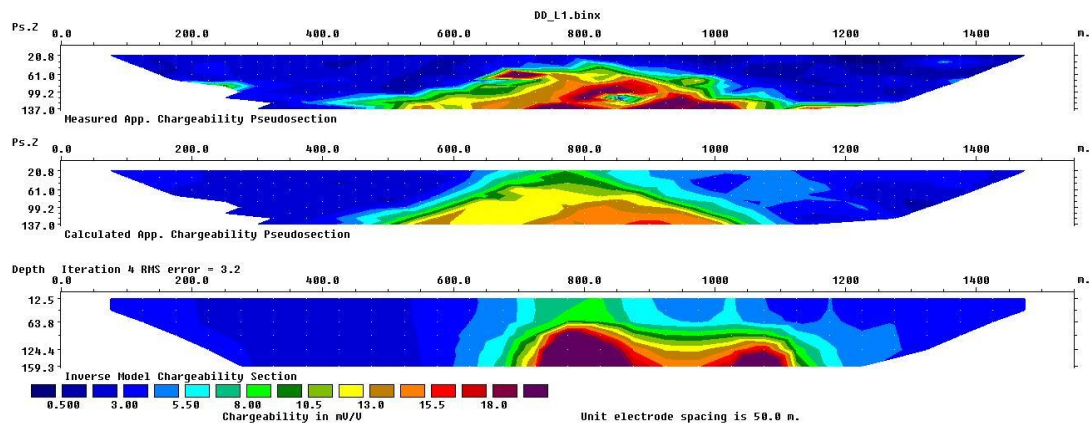
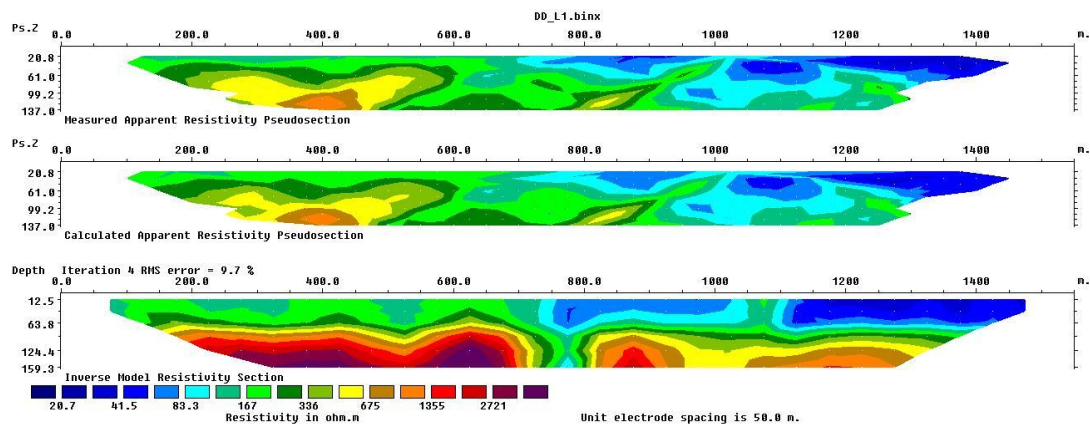
L0: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



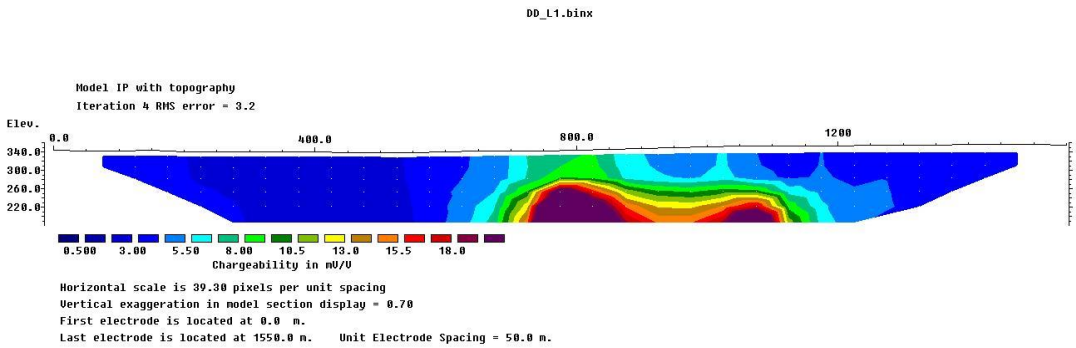
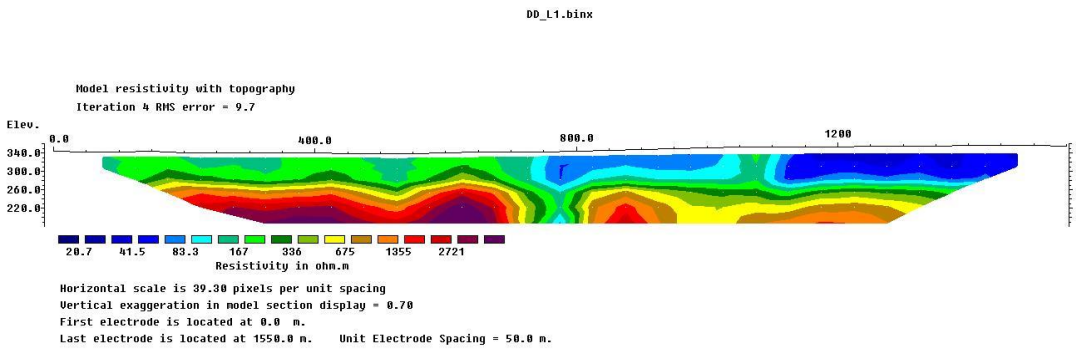
L0: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



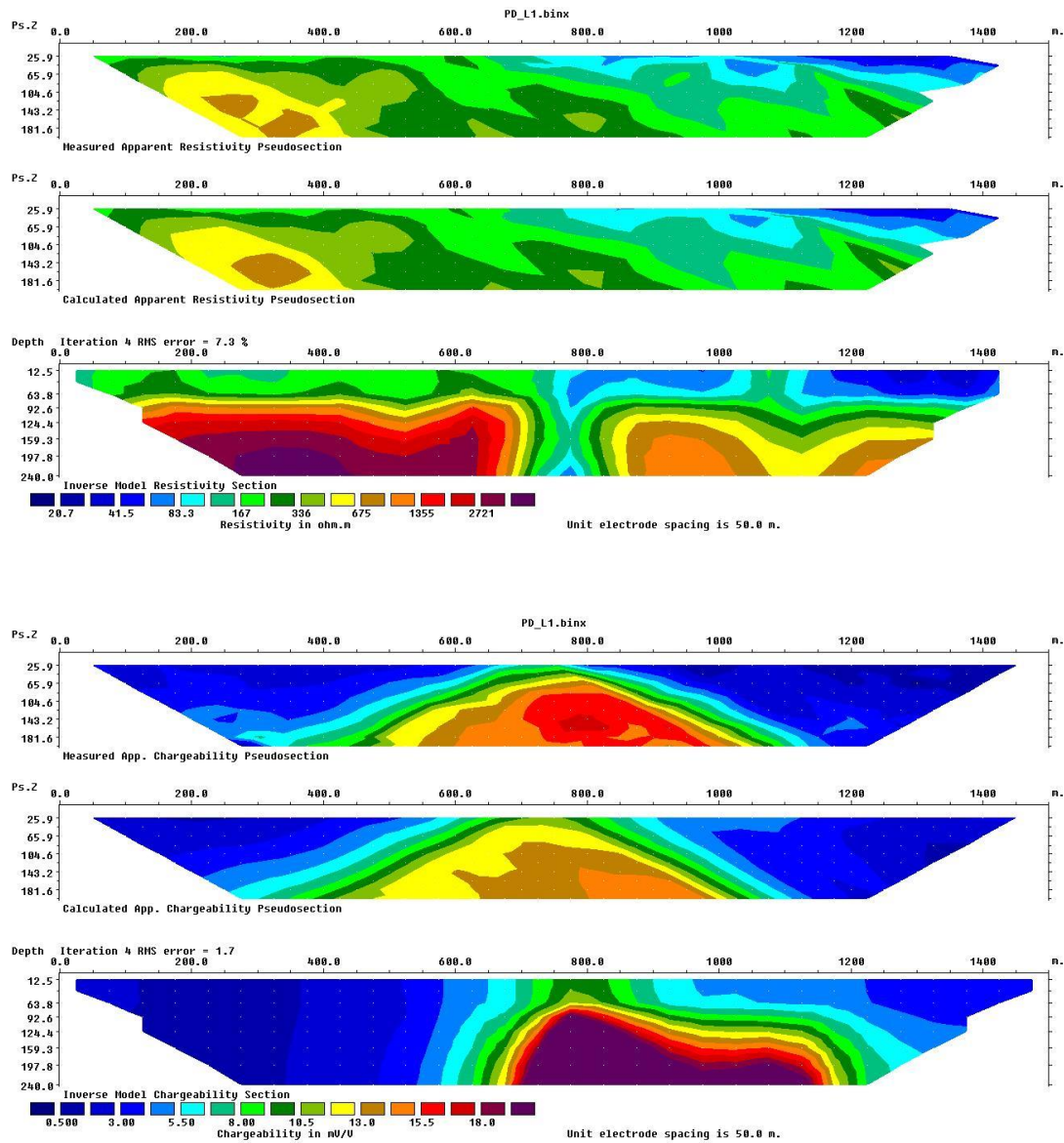
L1: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



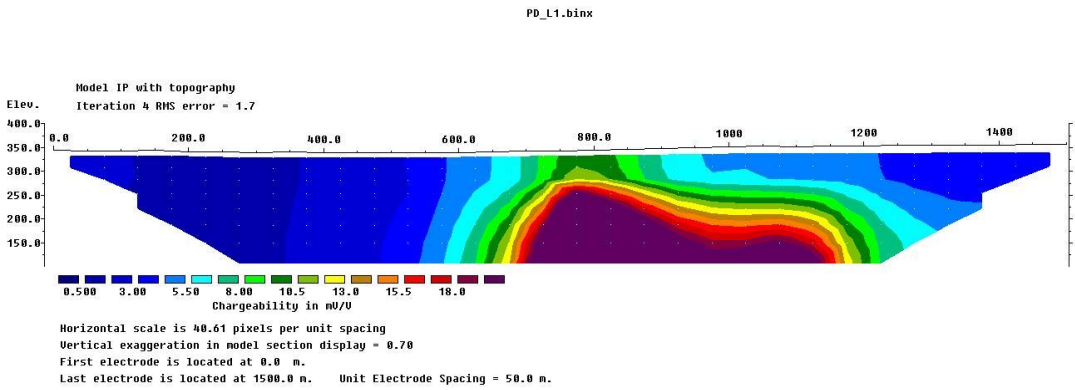
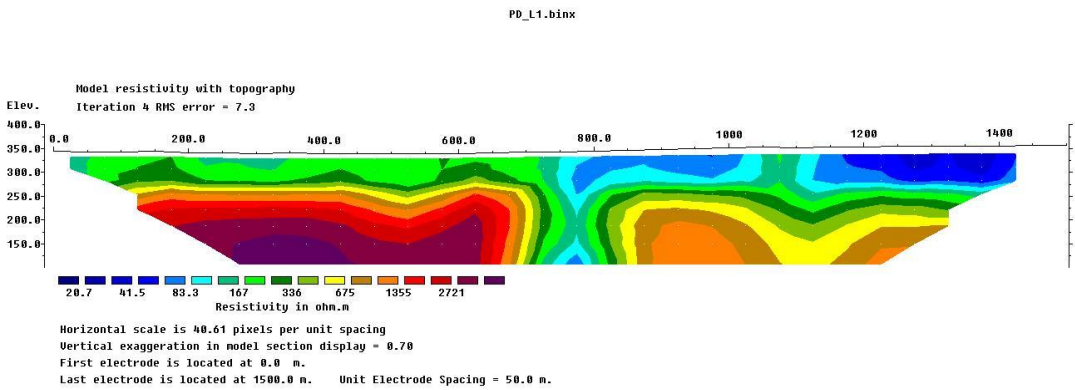
L1: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



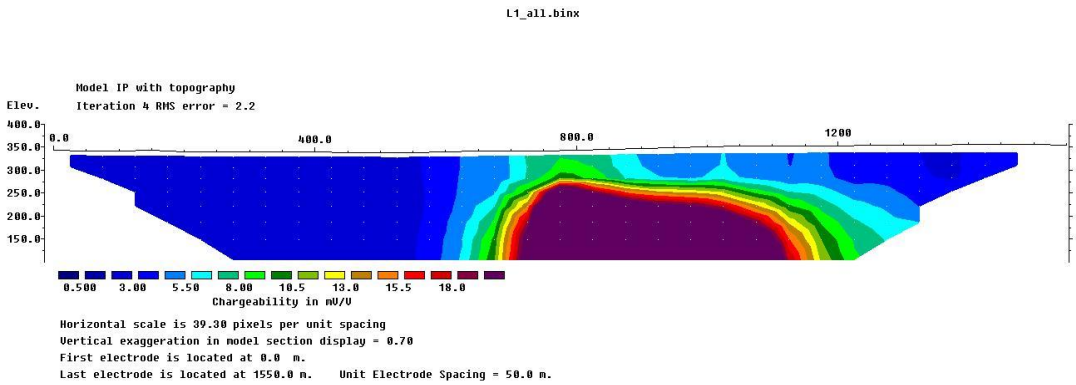
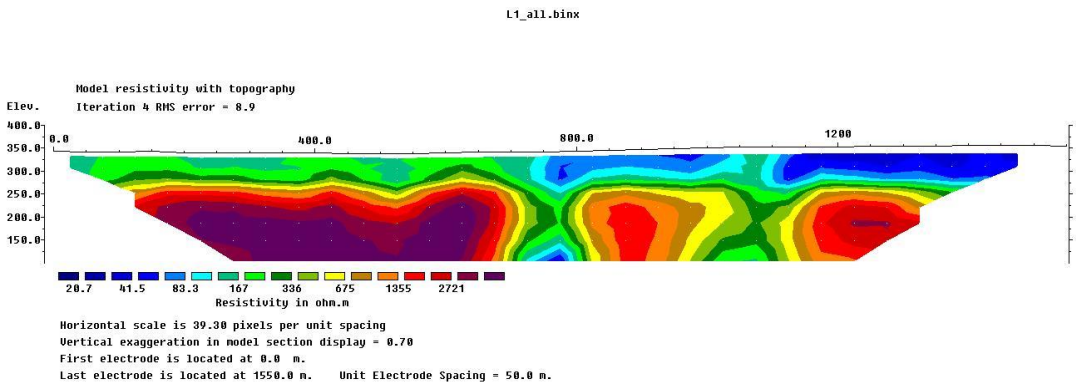
L1: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



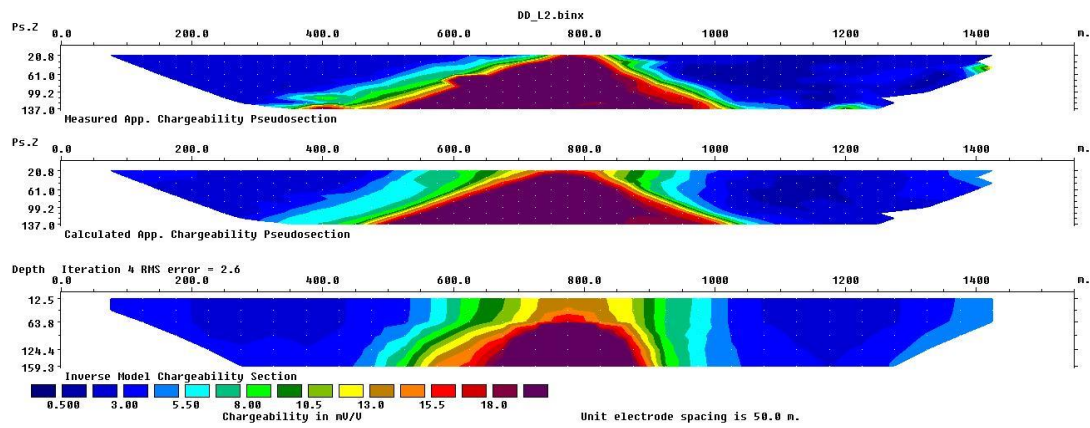
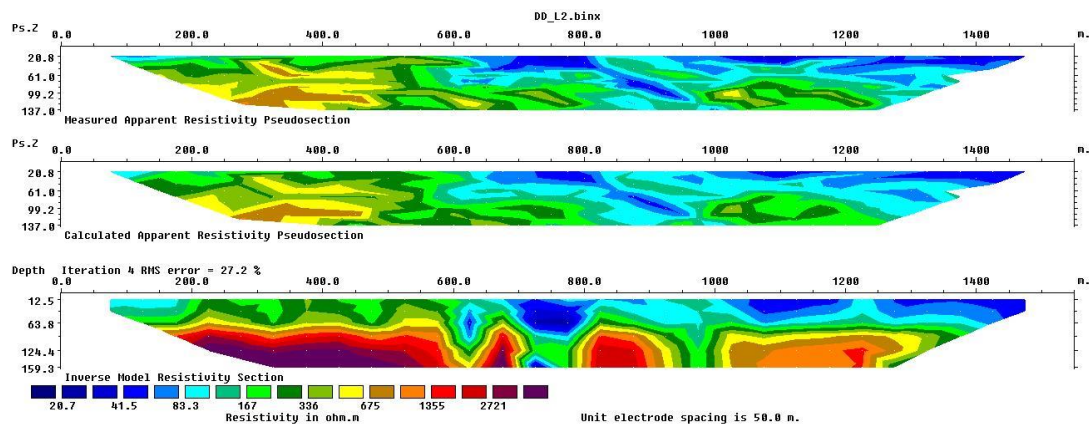
L1: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



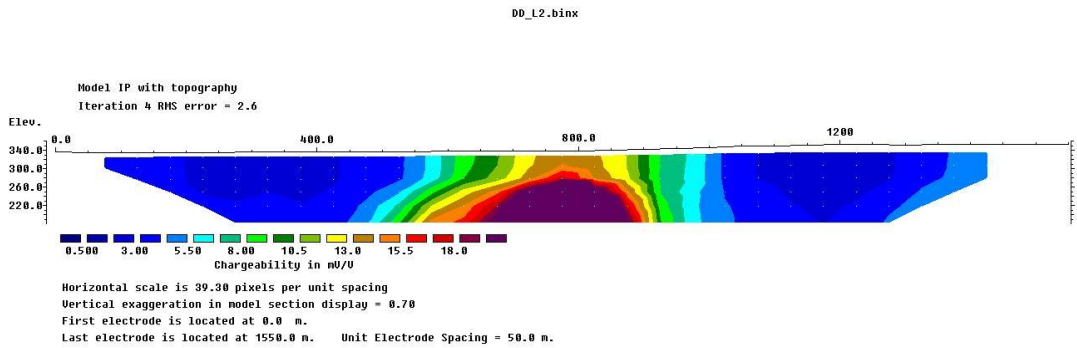
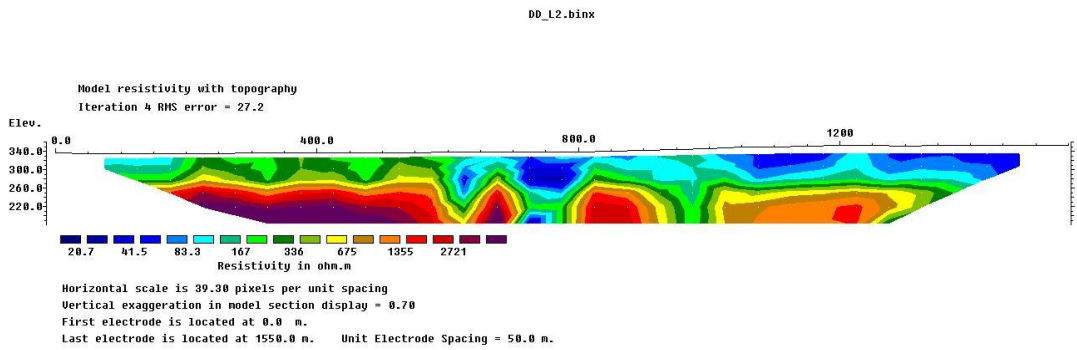
L1: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia



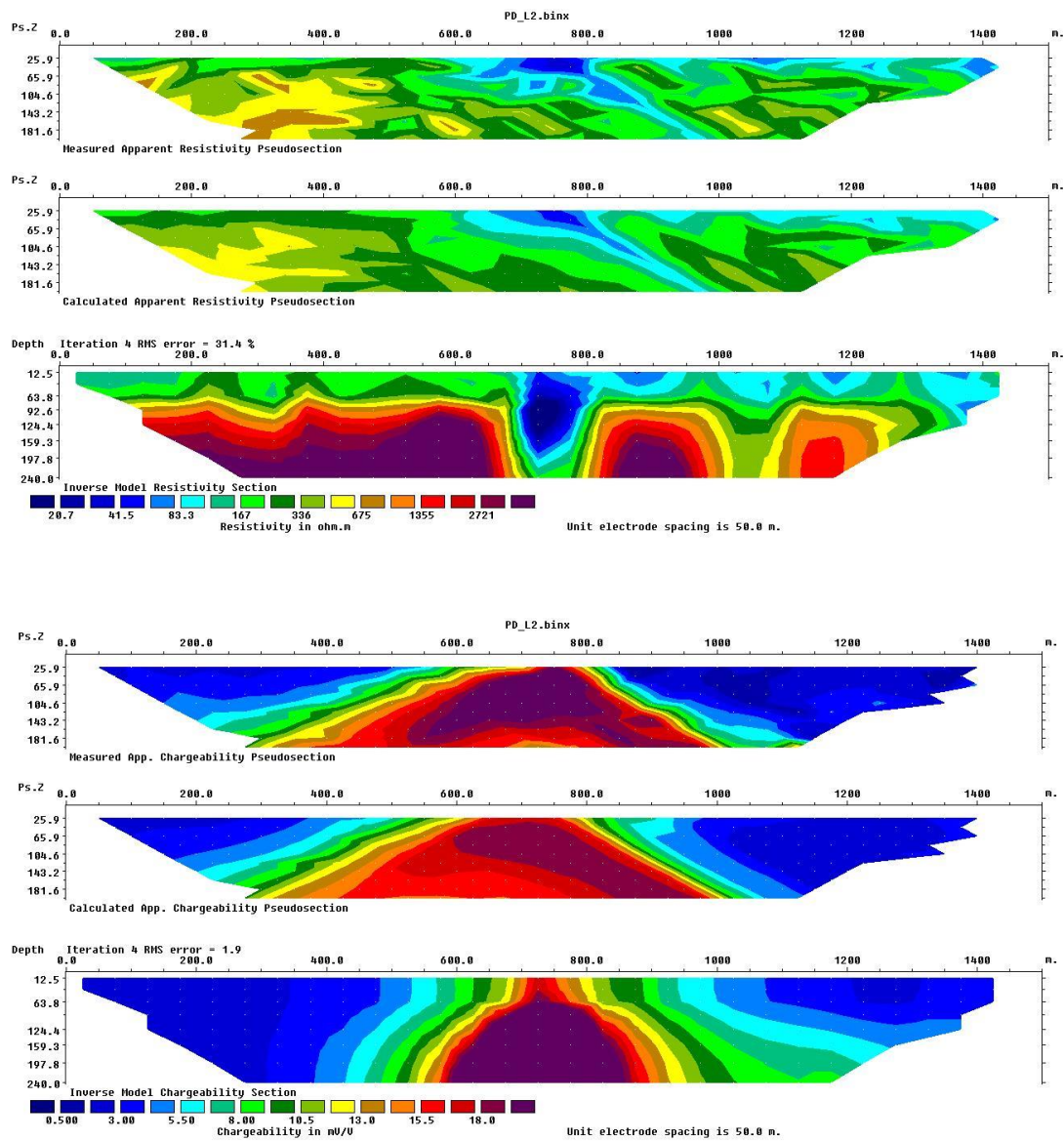
L2: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



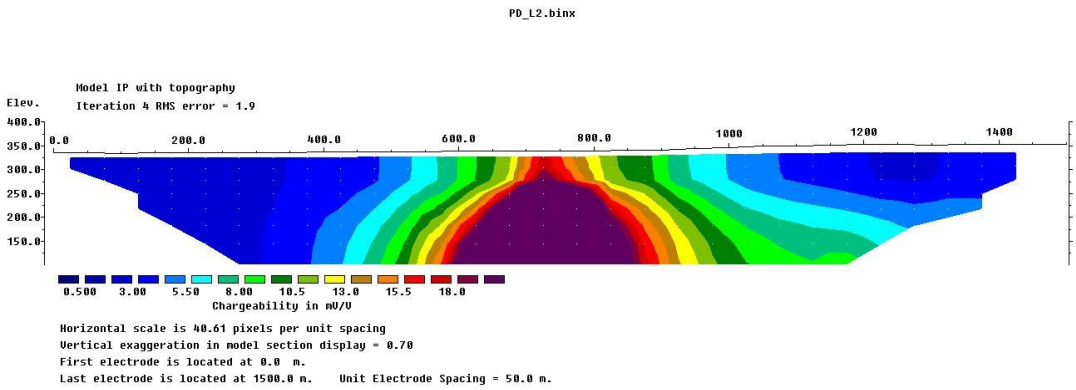
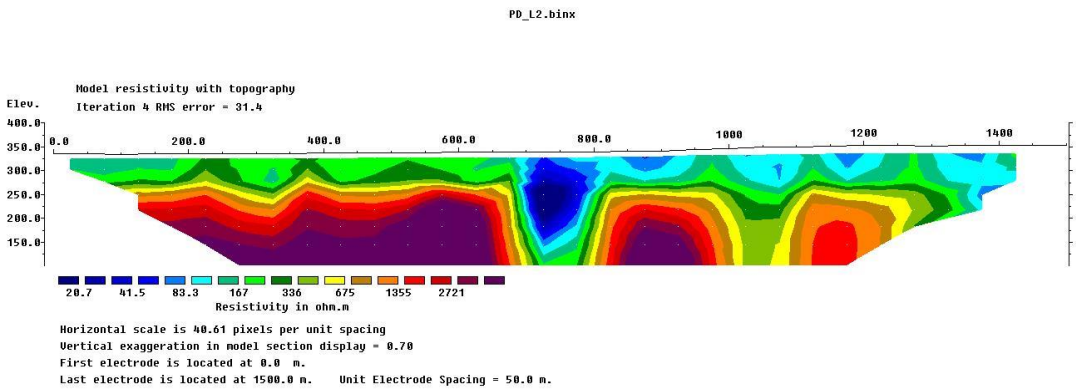
L2: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



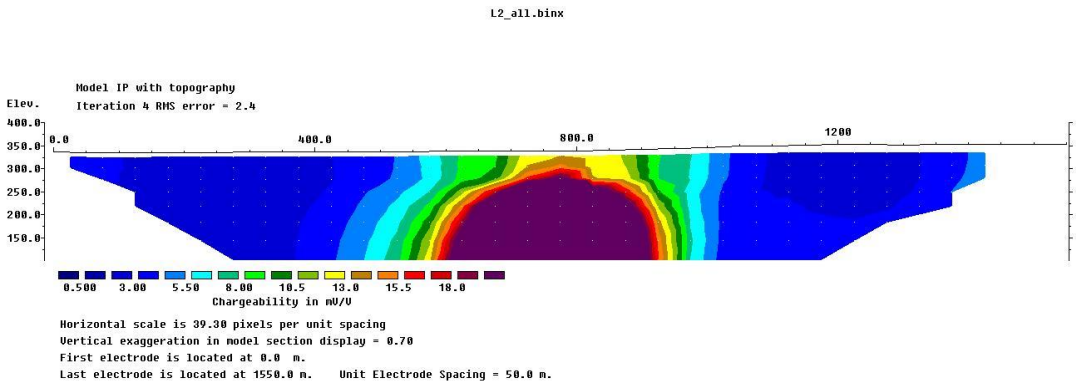
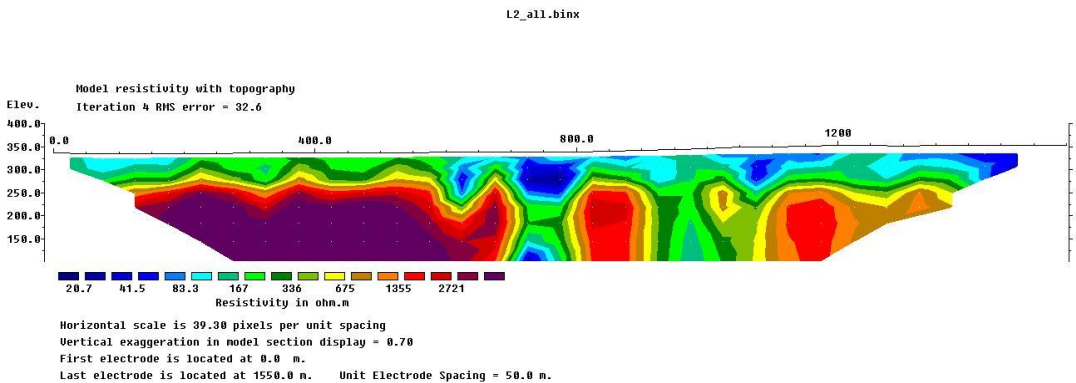
L2: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



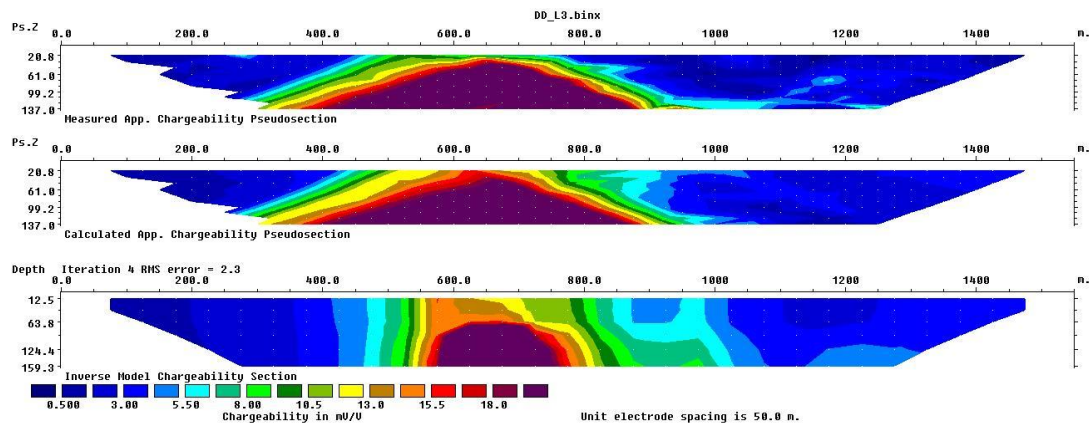
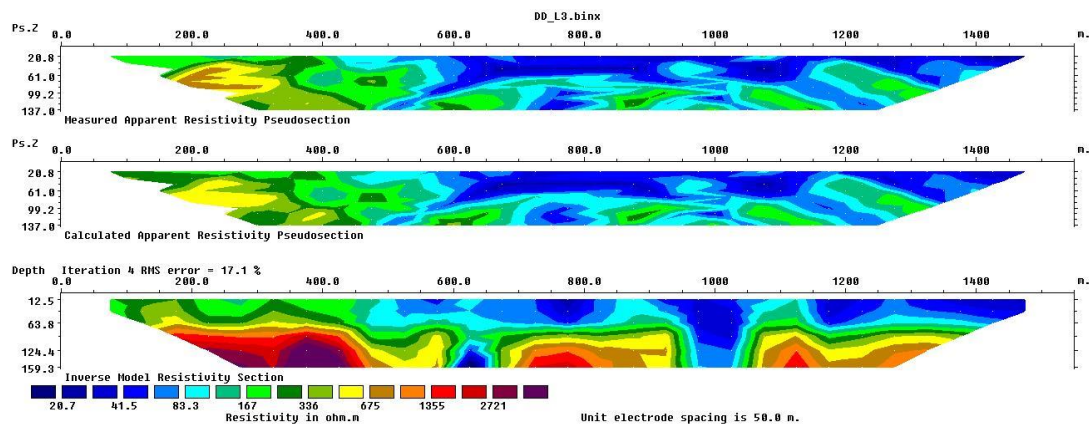
L2: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



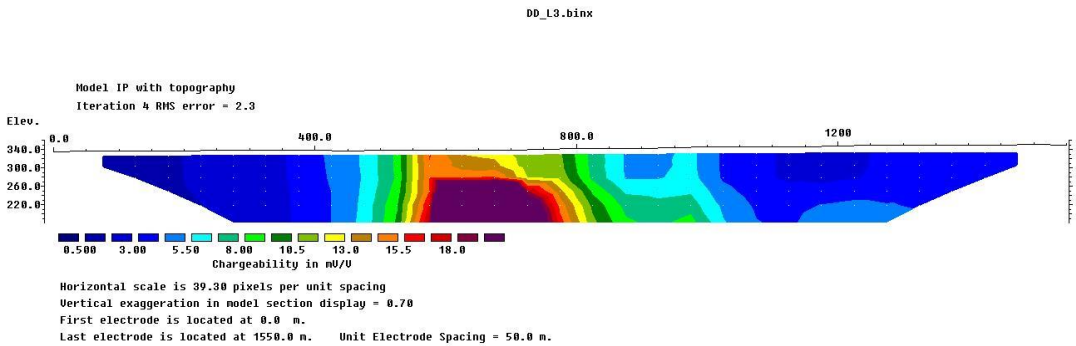
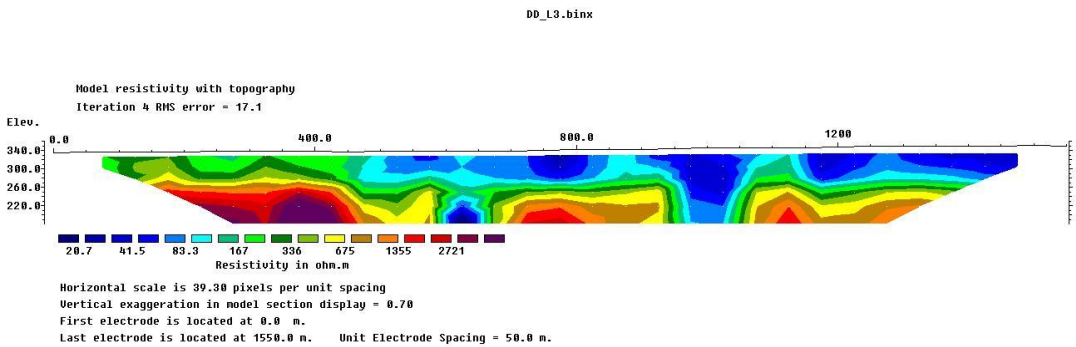
L2: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia



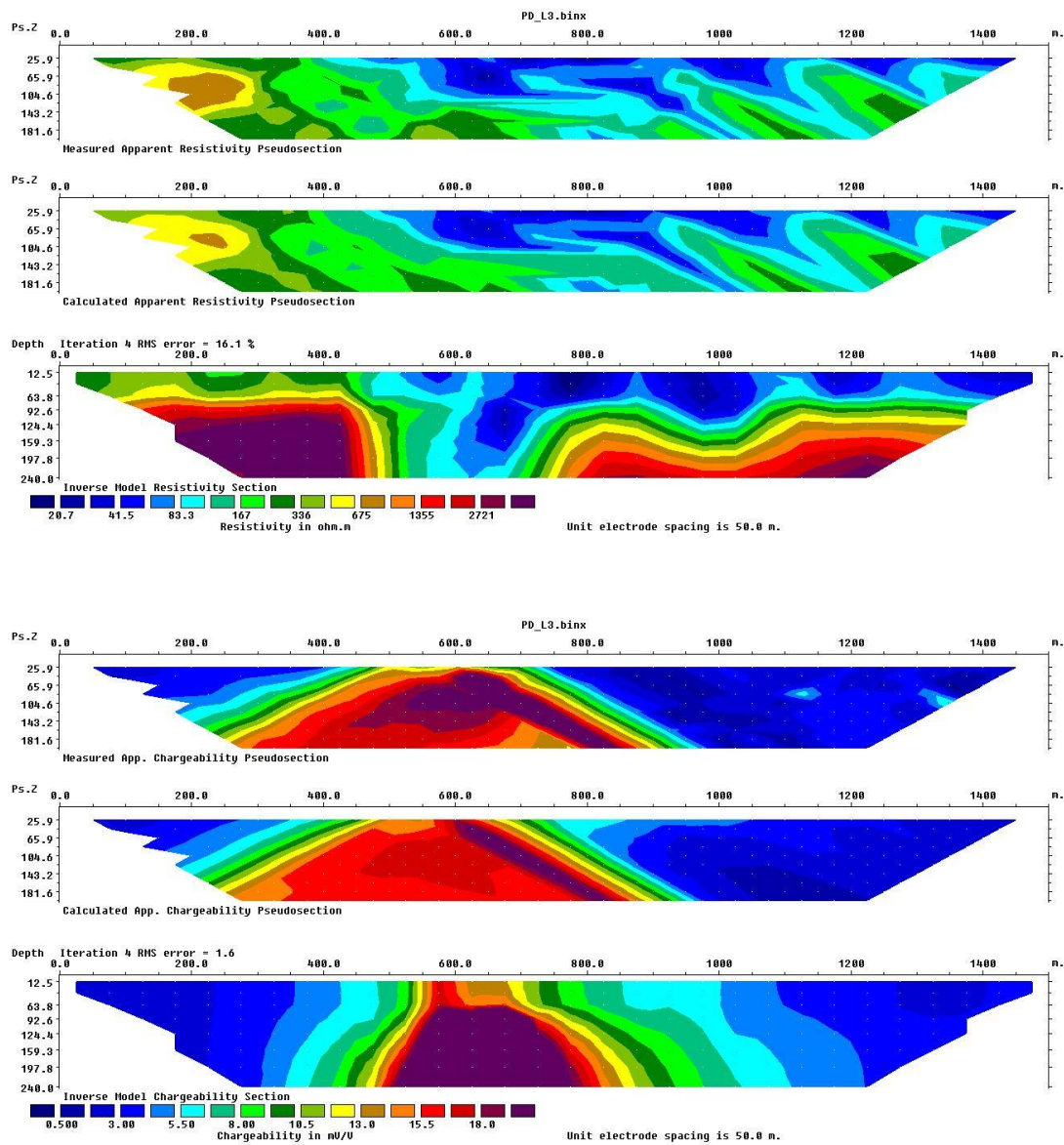
L3: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



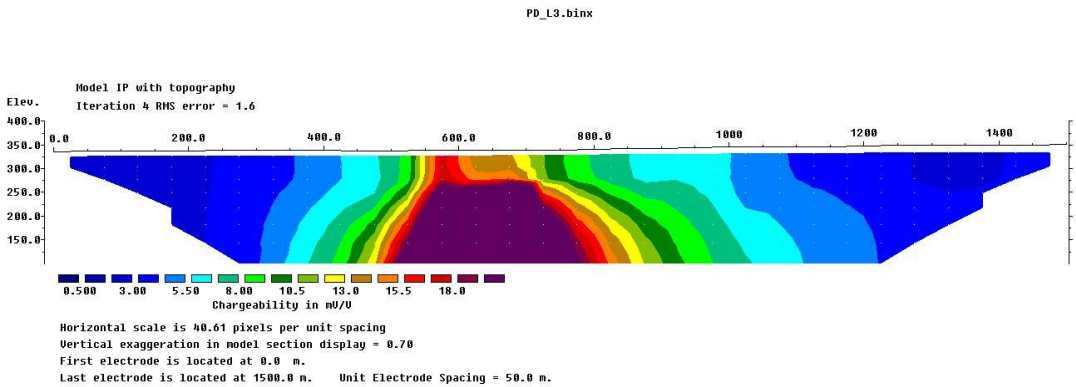
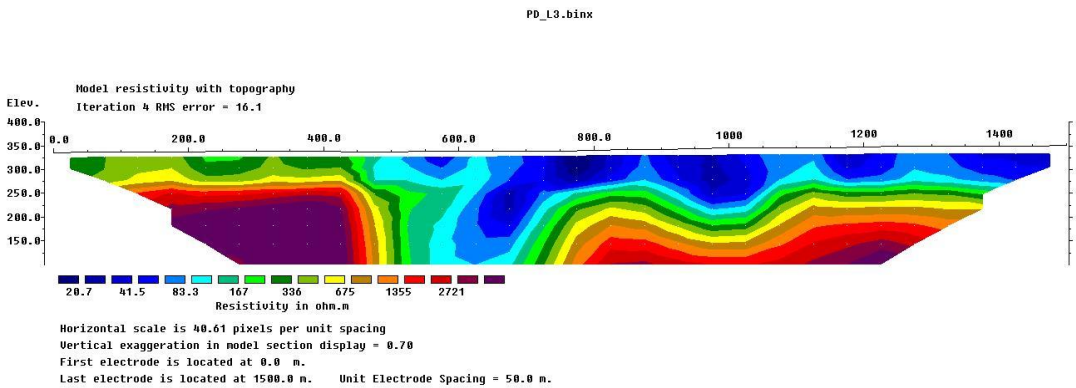
L3: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



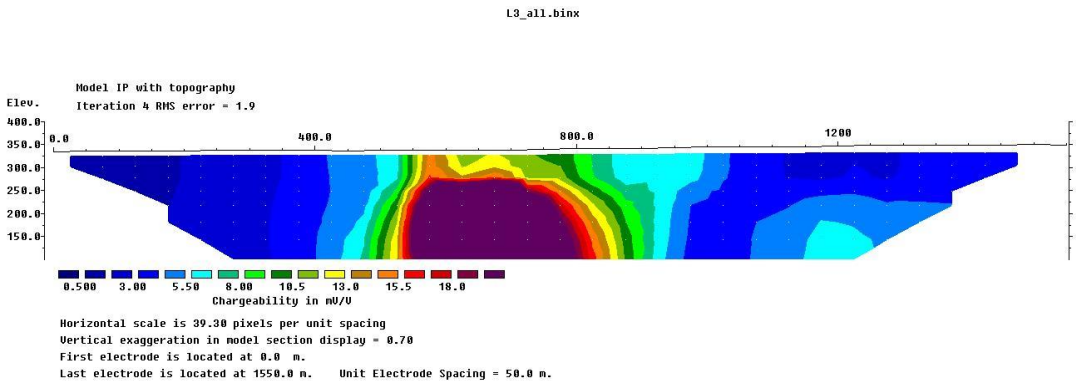
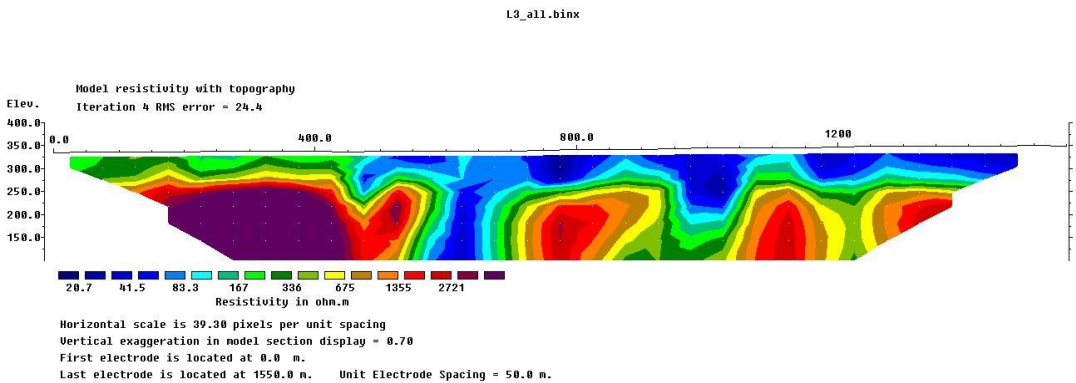
L3: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



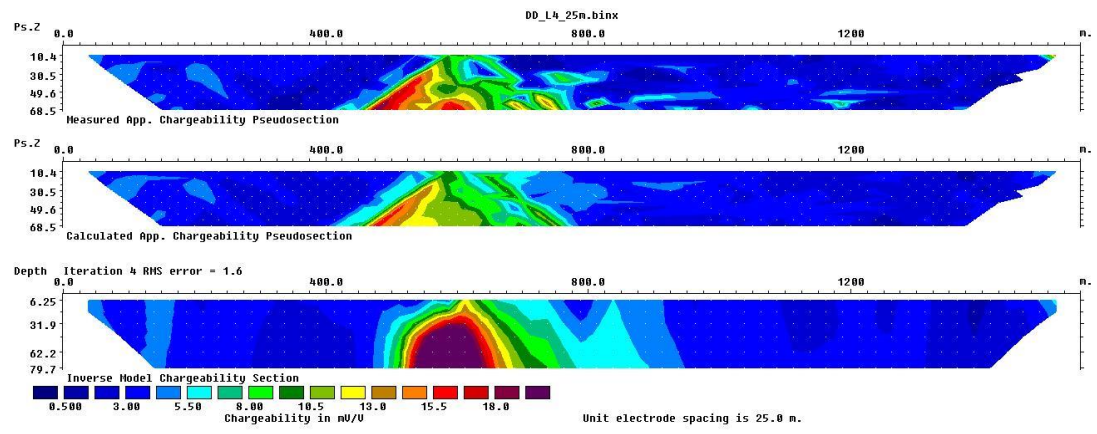
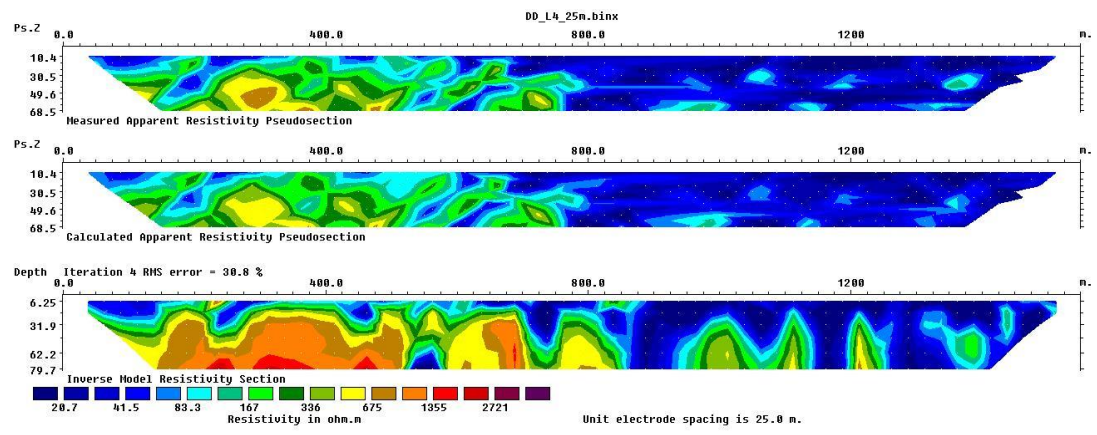
L3: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



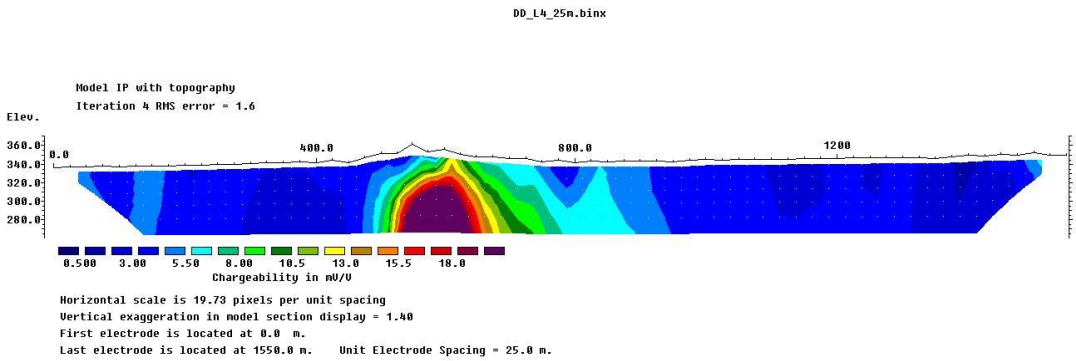
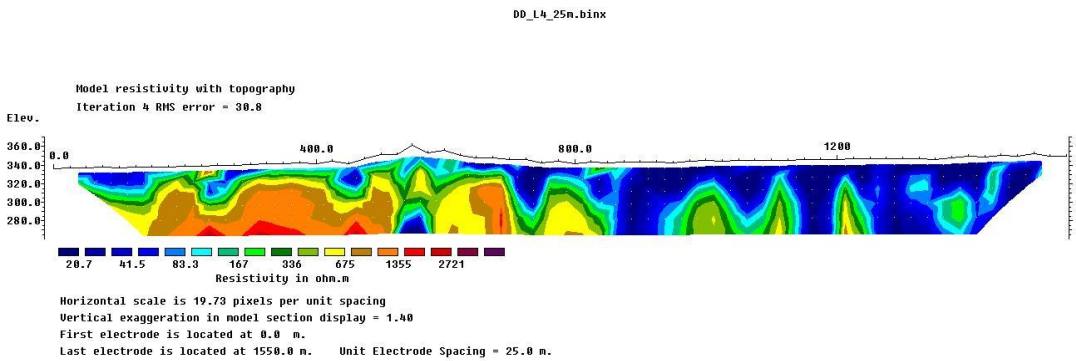
L3: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



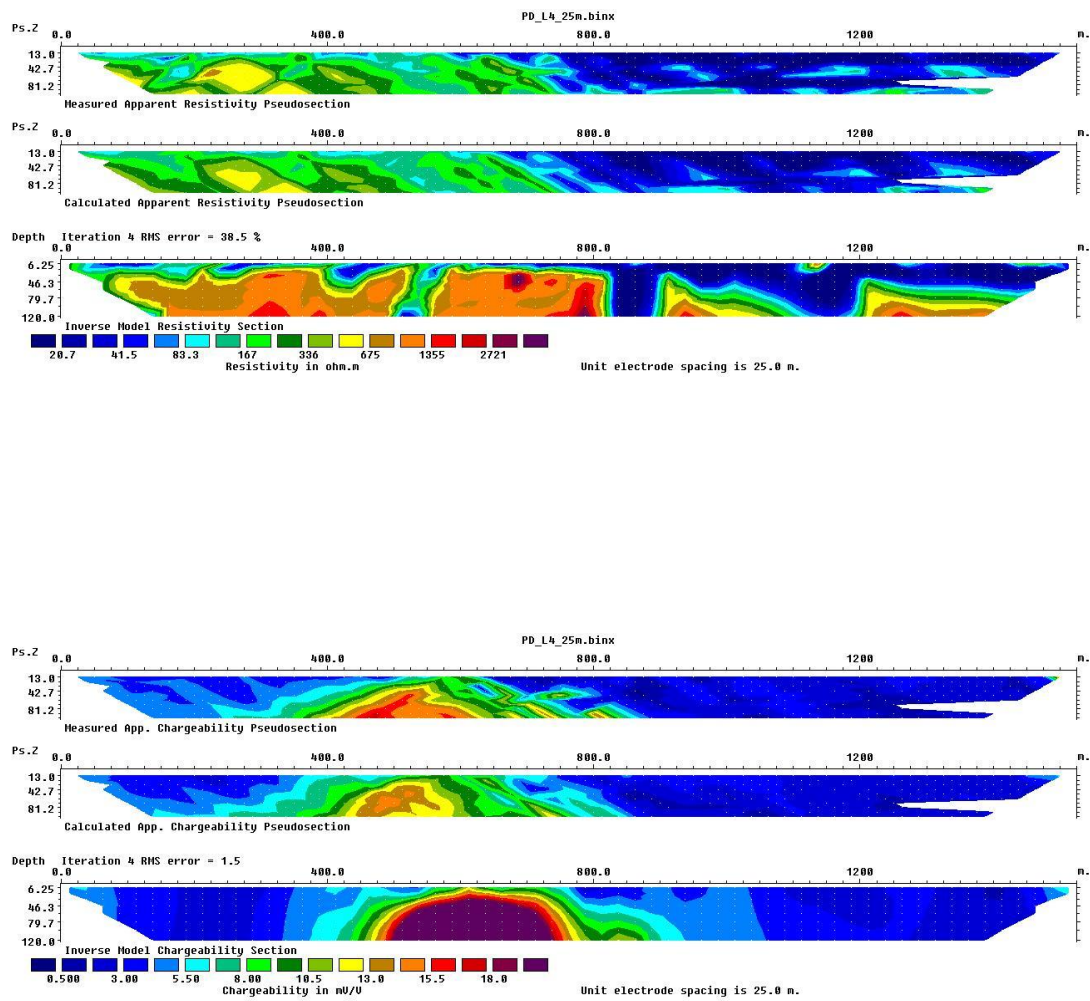
L4: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas) – espaçamento de 25 metros.



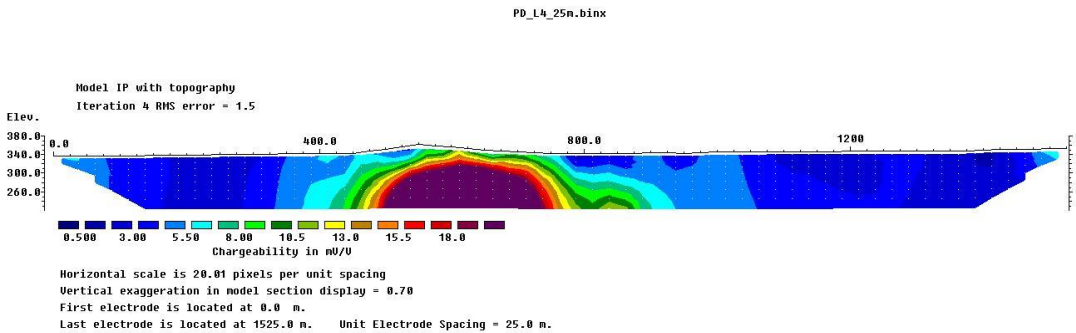
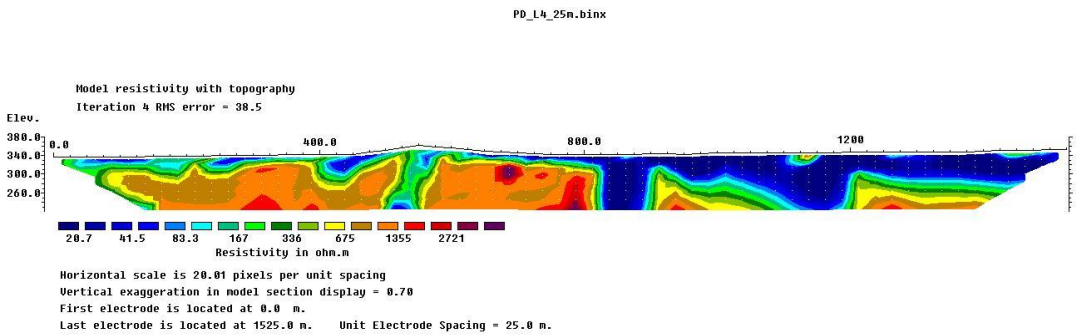
L4: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia) – espaçamento de 25 metros



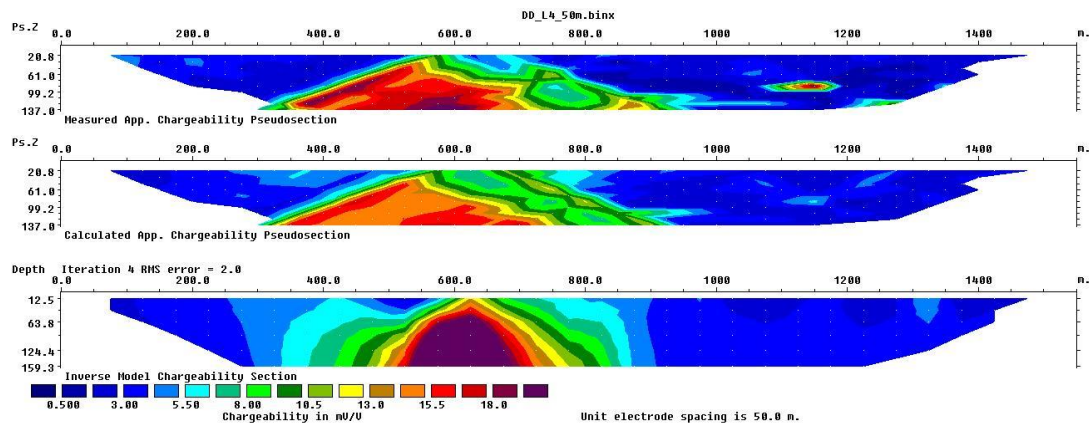
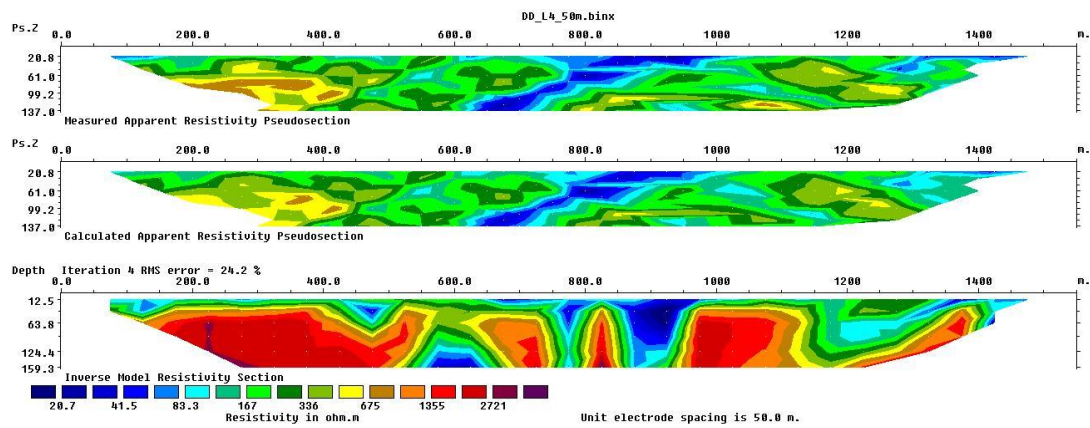
L4: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas) – espaçamento de 25 metros.



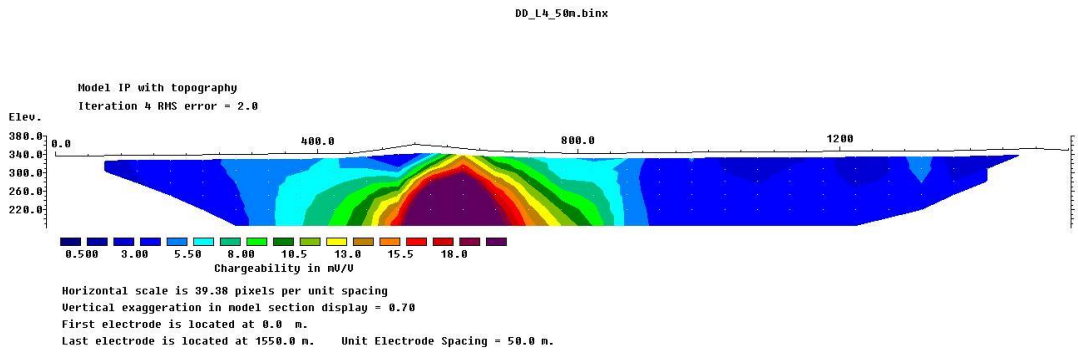
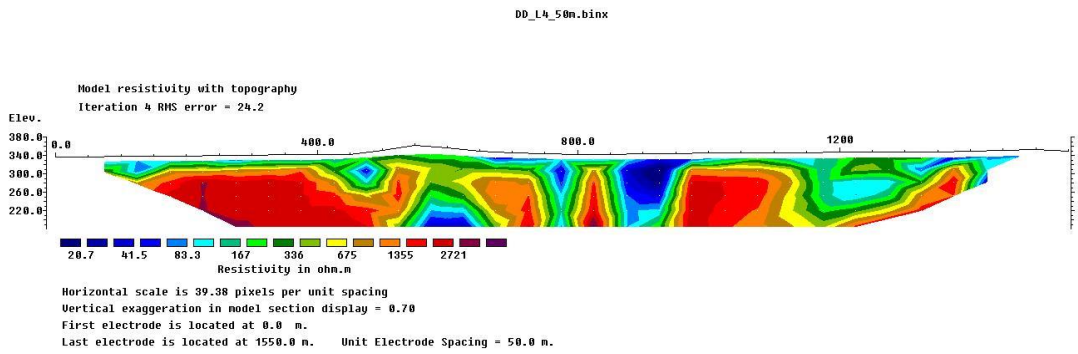
L4: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia) – espaçamento de 25 metros



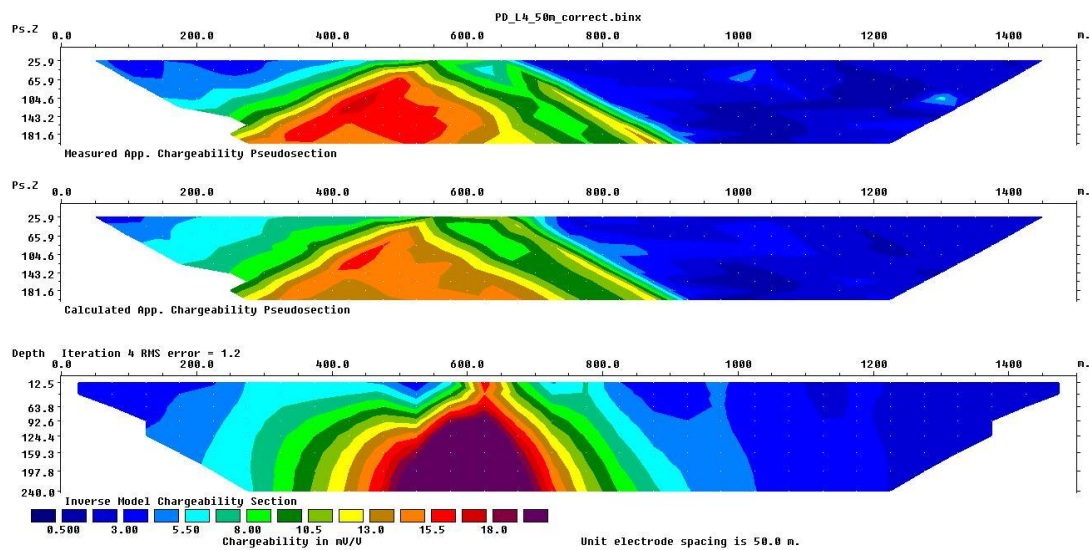
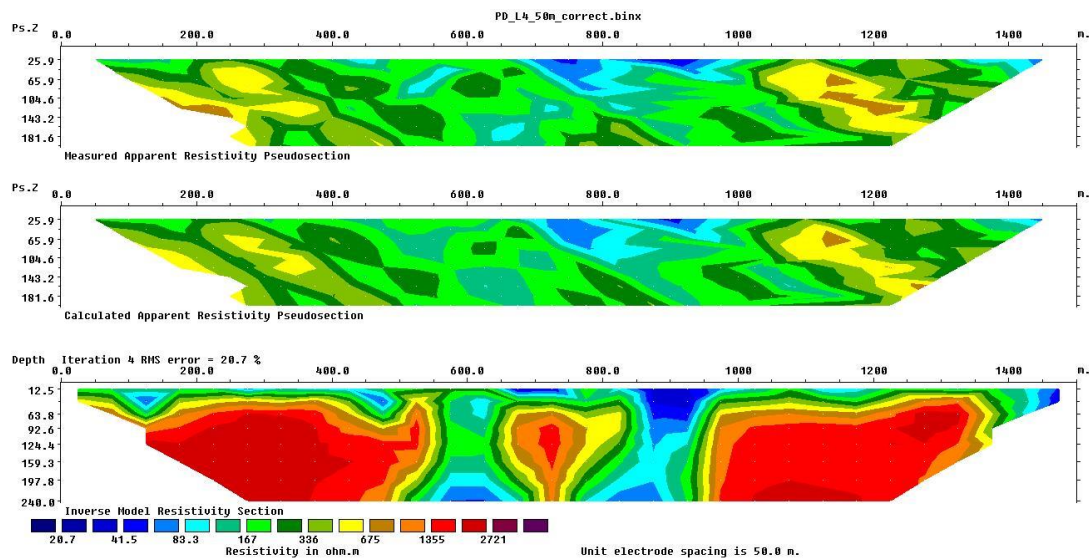
L4: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas) – espaçamento de 50 metros.



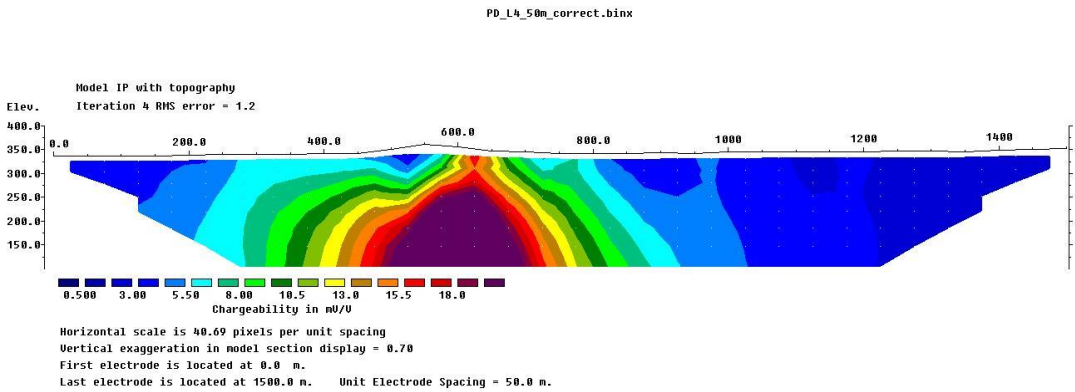
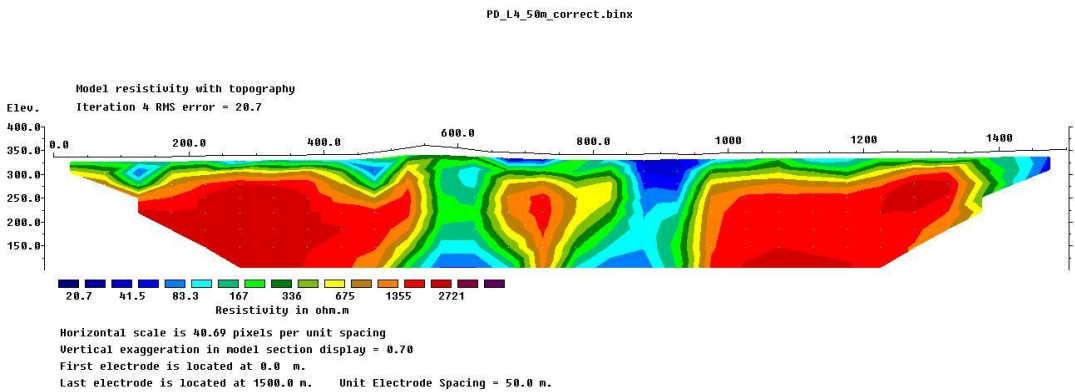
L4: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia) – espaçamento de 50 metros



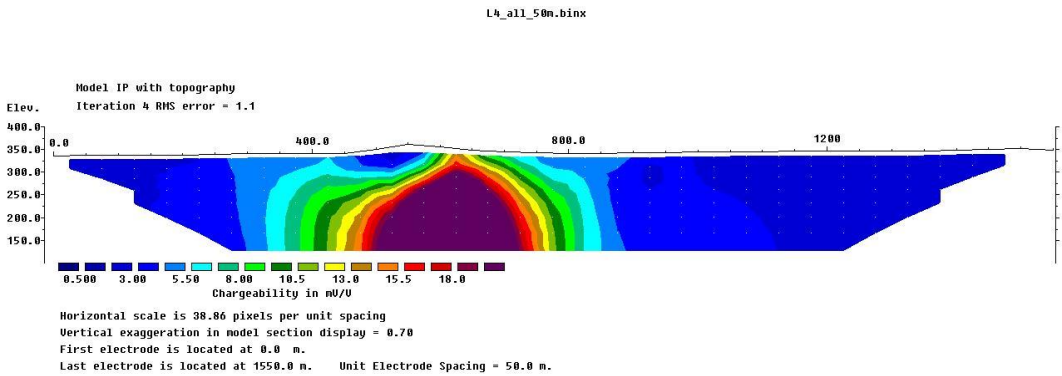
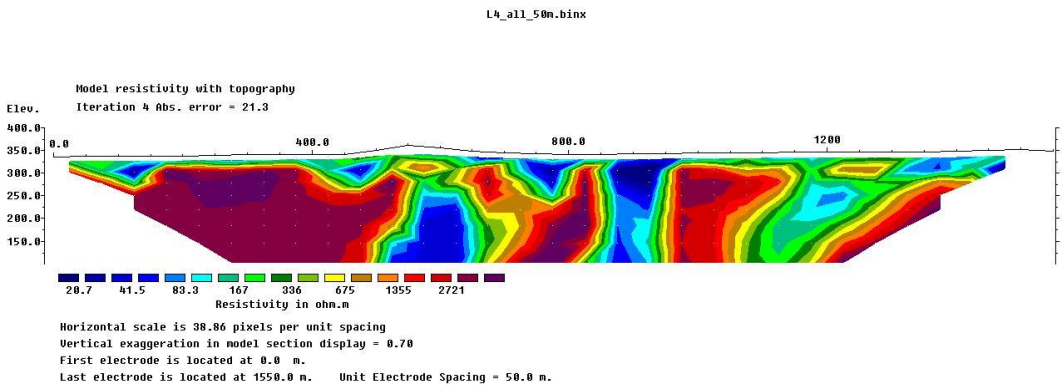
L4: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas) – espaçamento de 50 metros.



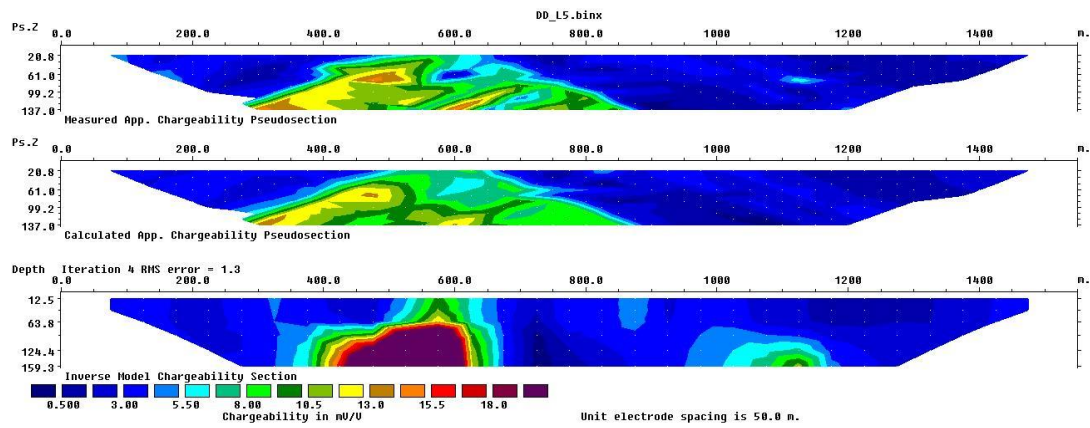
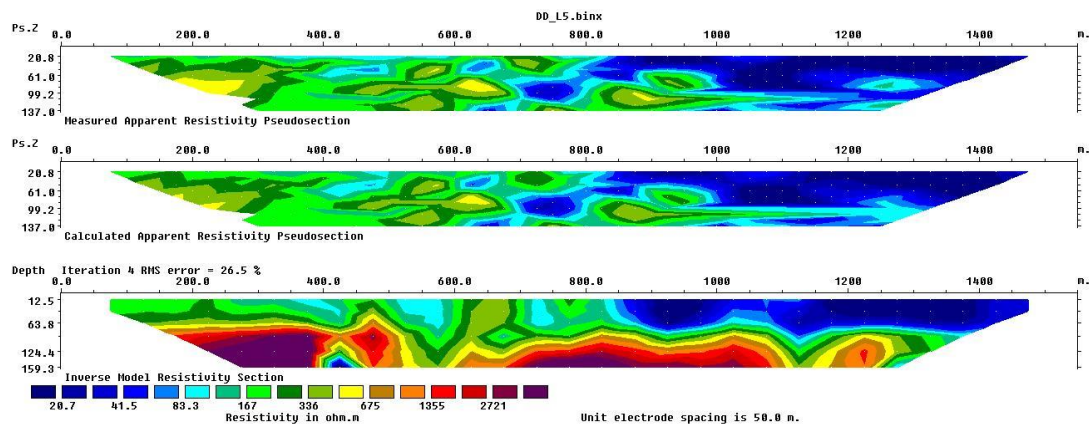
L4: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia) – espaçamento de 50 metros



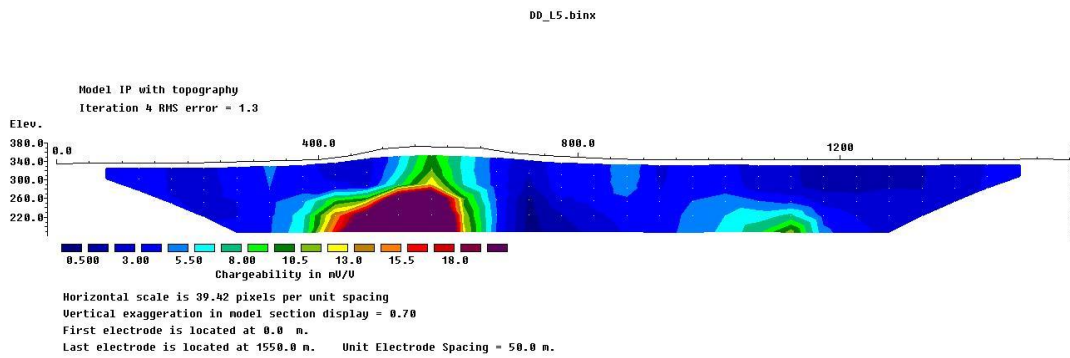
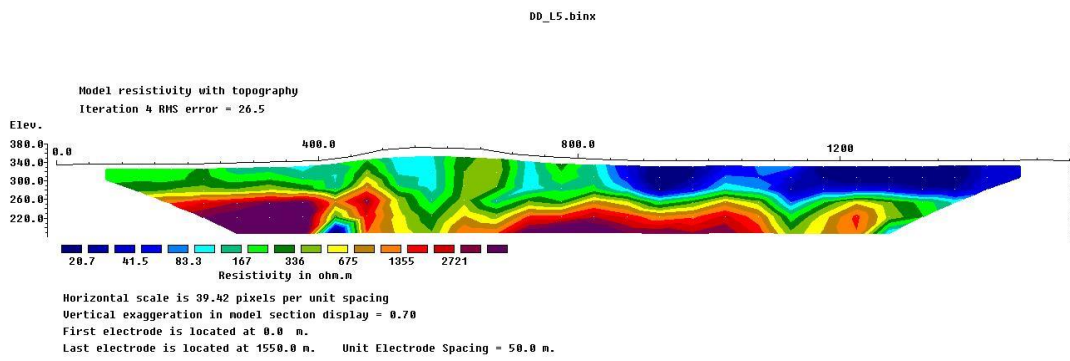
L4: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



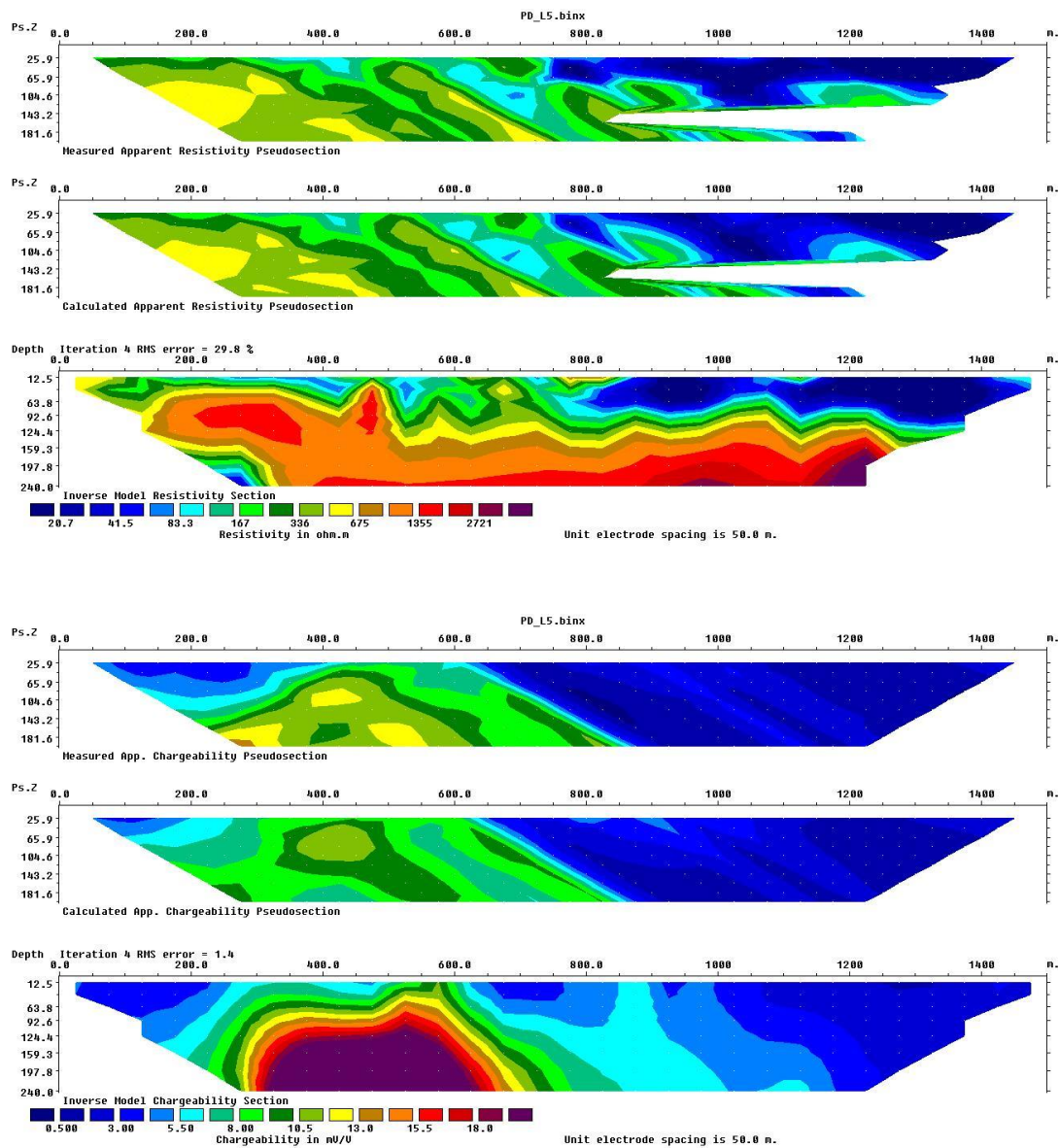
L5: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



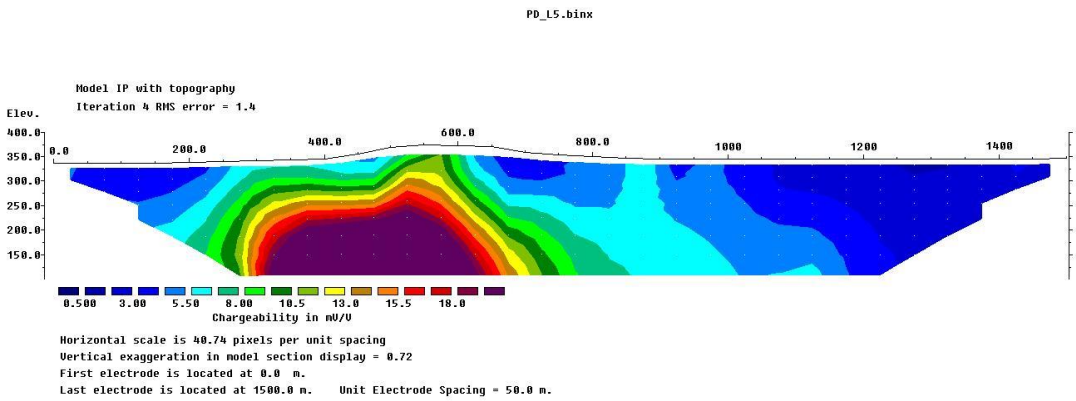
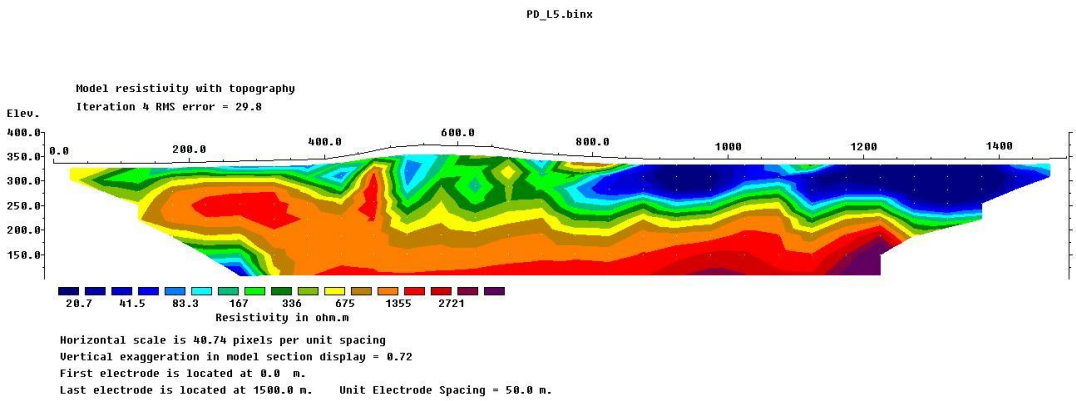
L5: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



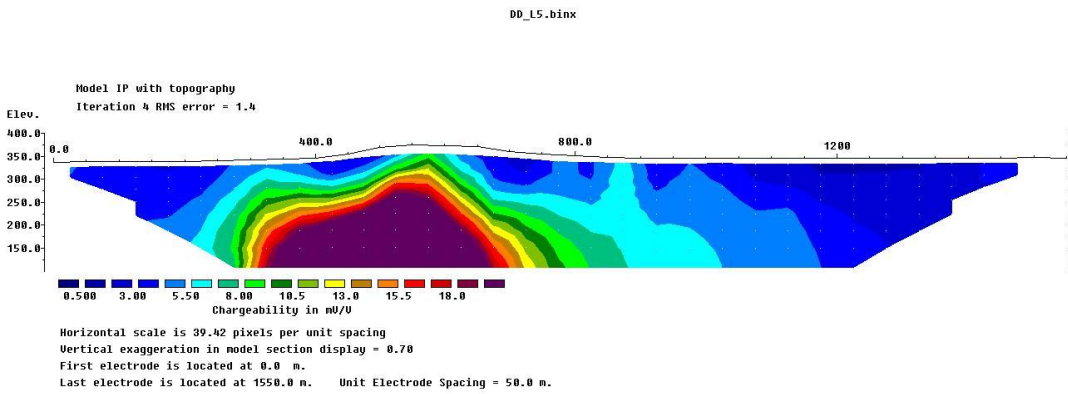
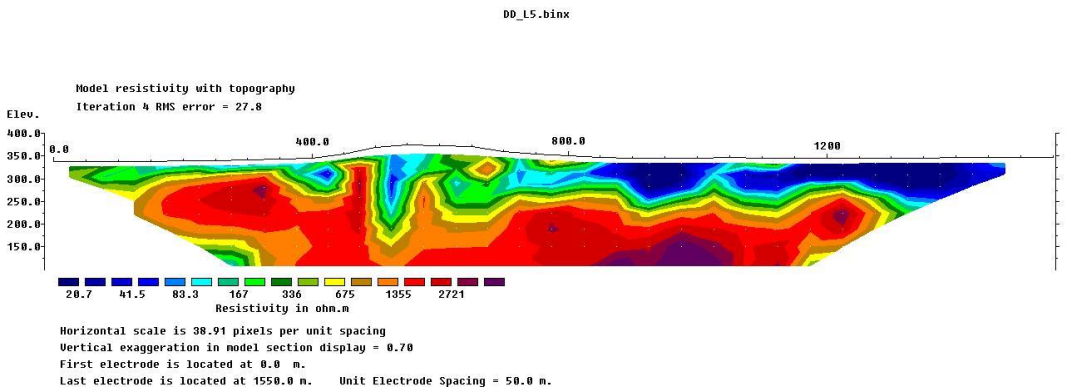
L5: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



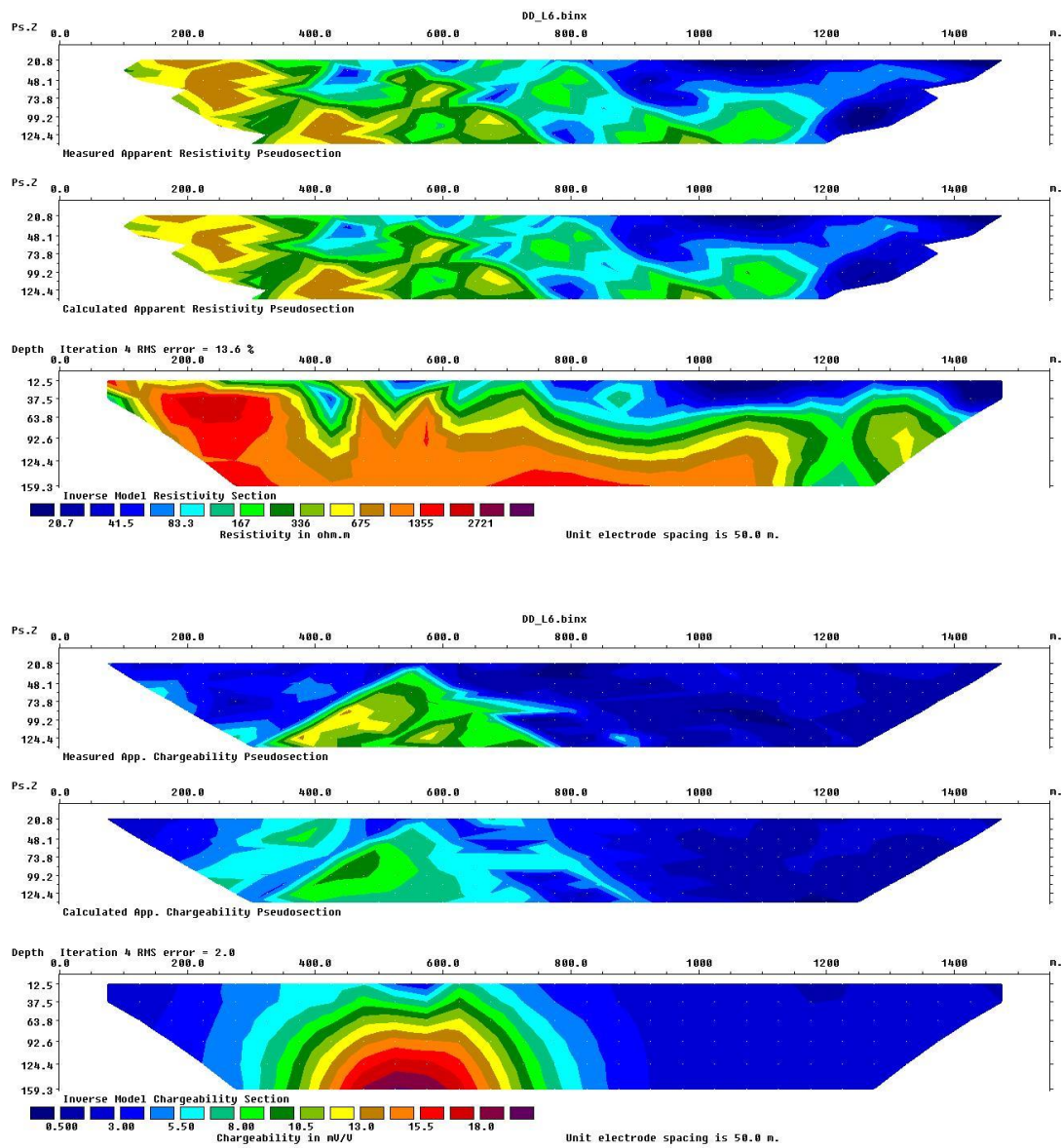
L5: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



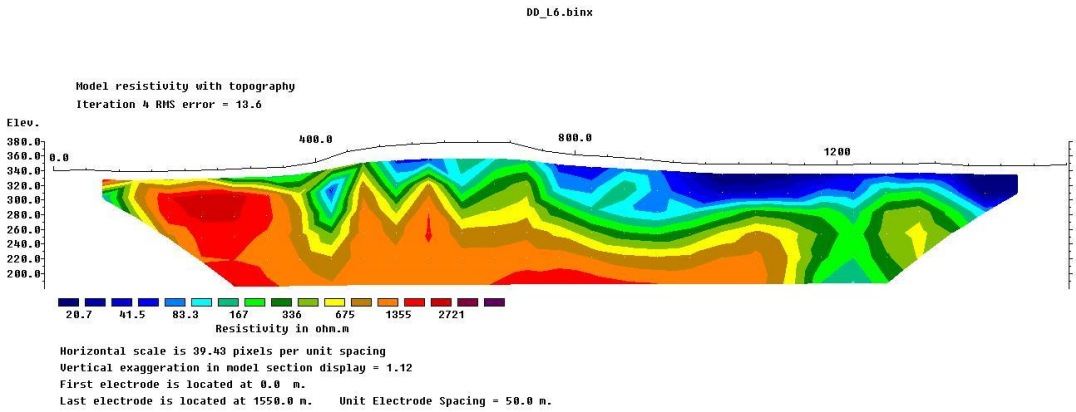
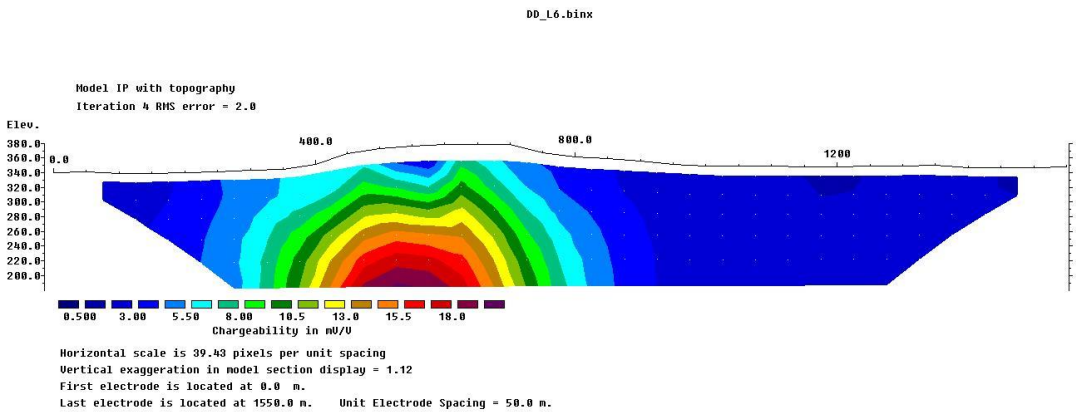
L5: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



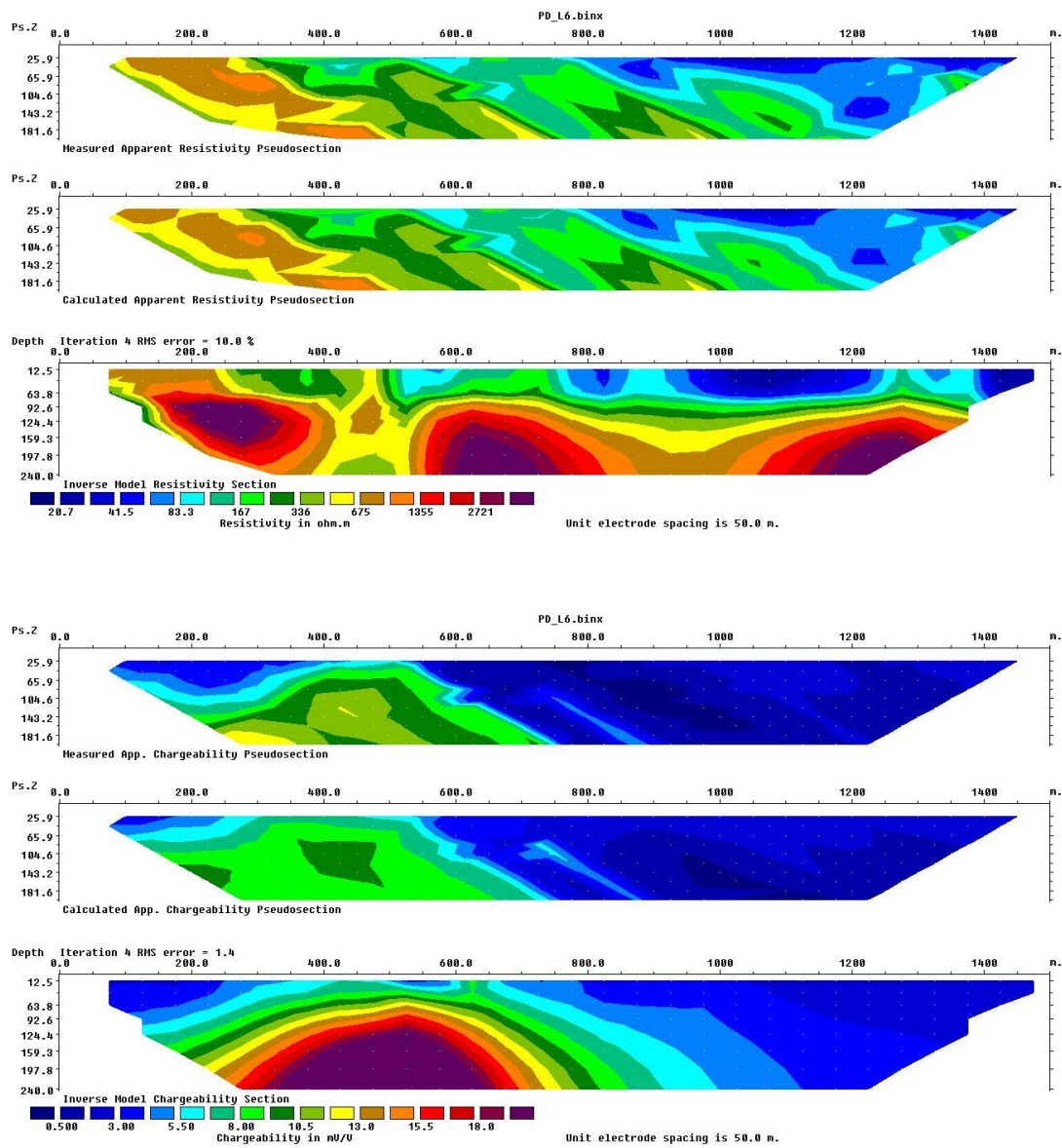
L6: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



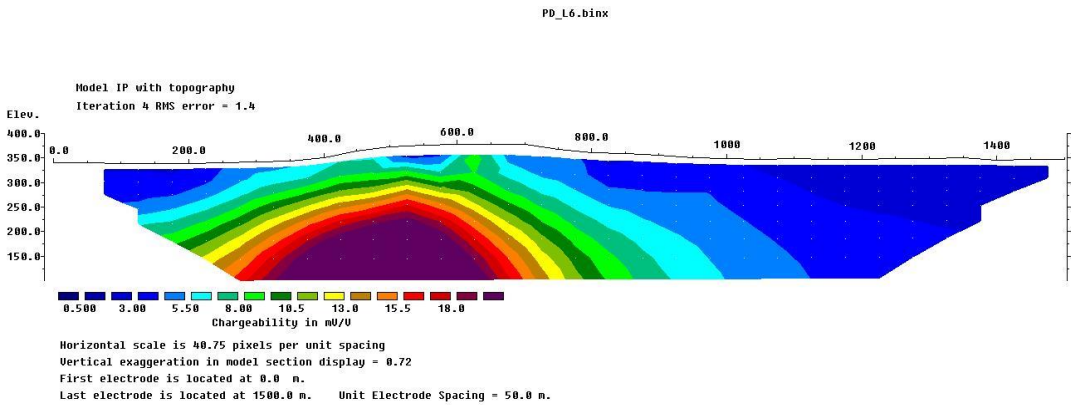
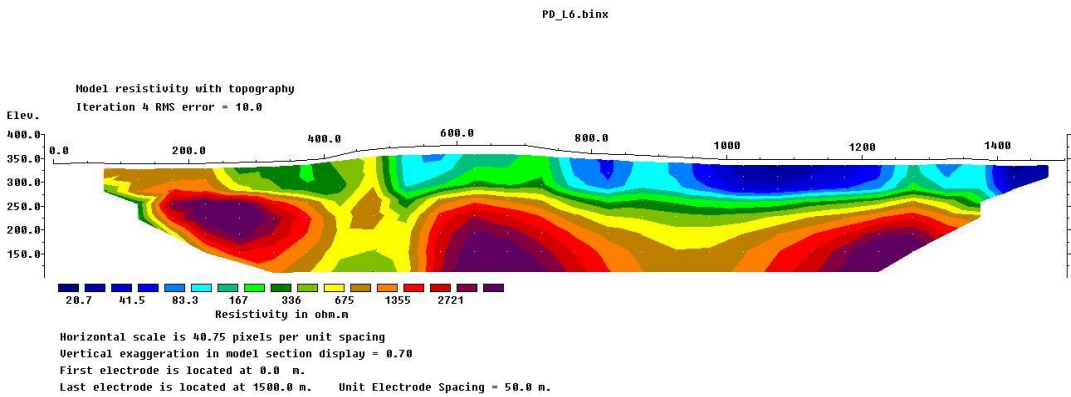
L6: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



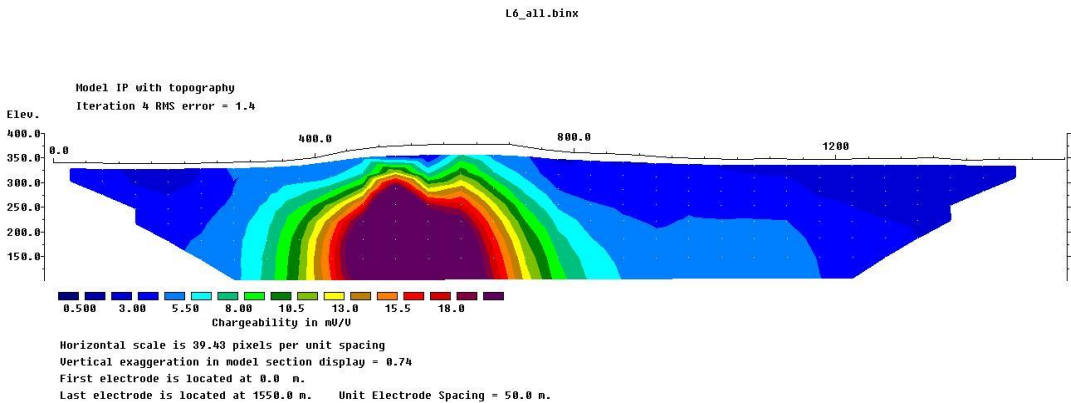
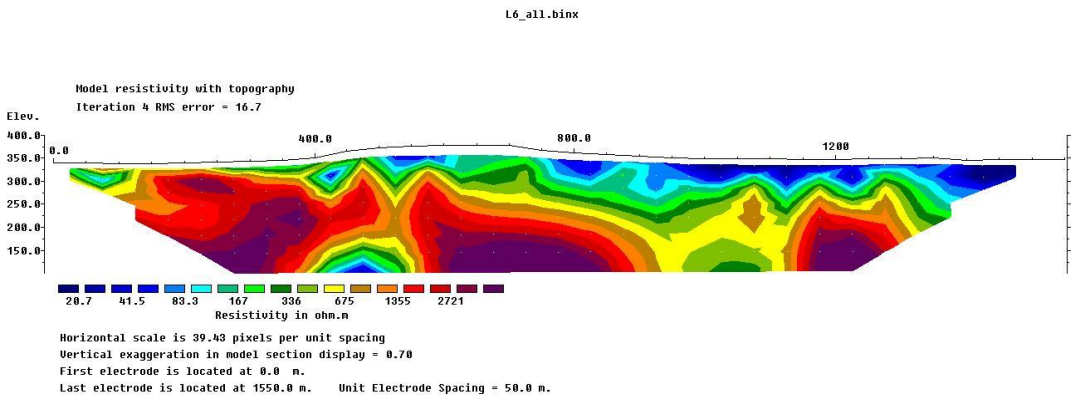
L6: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



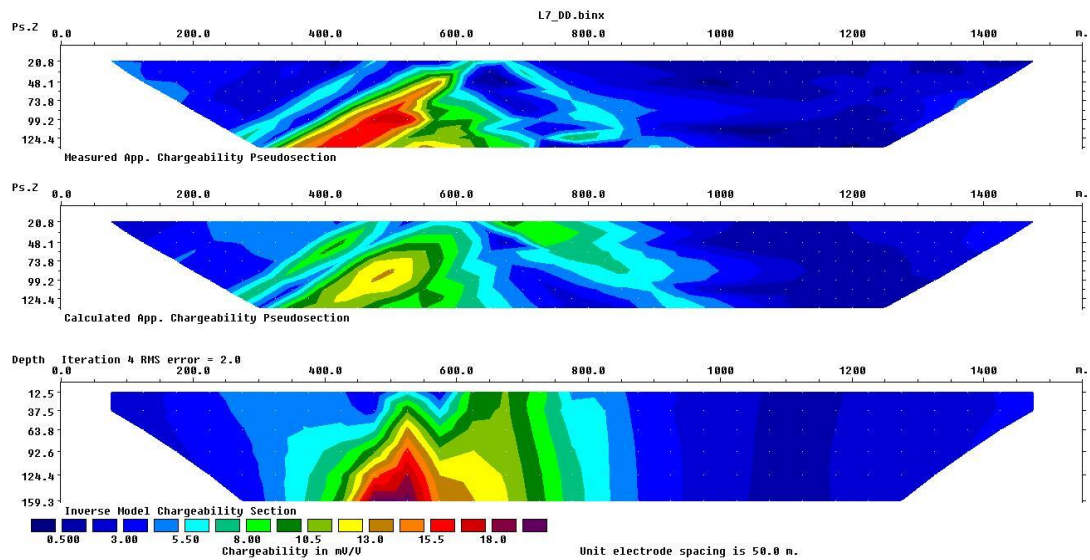
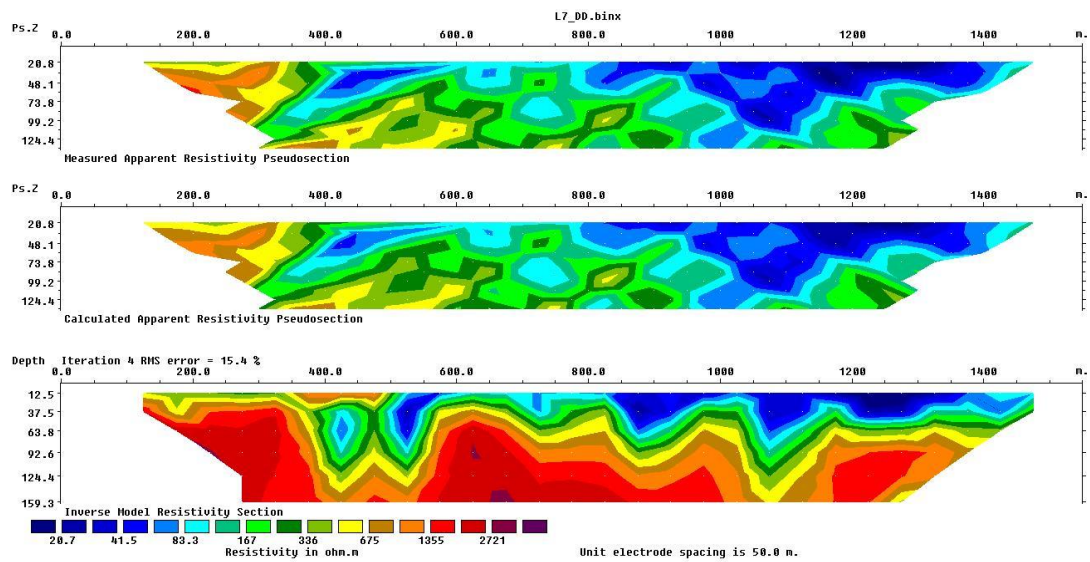
L6: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



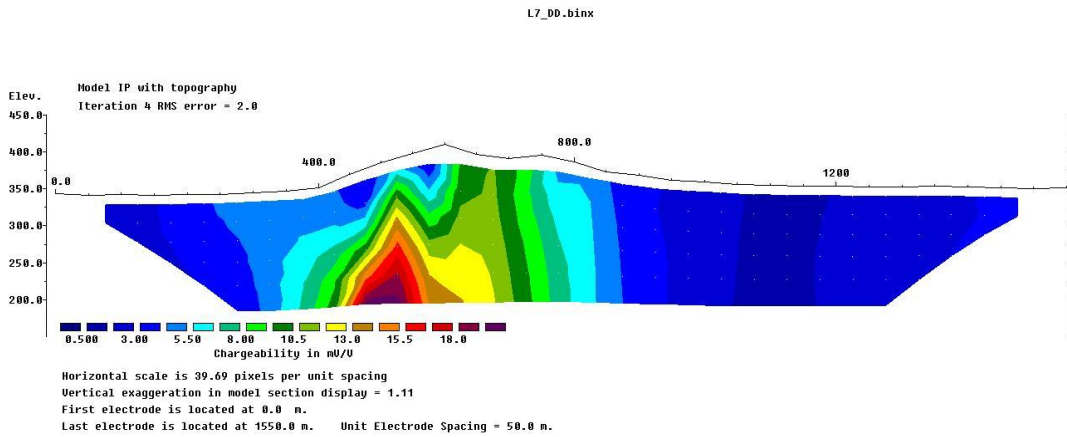
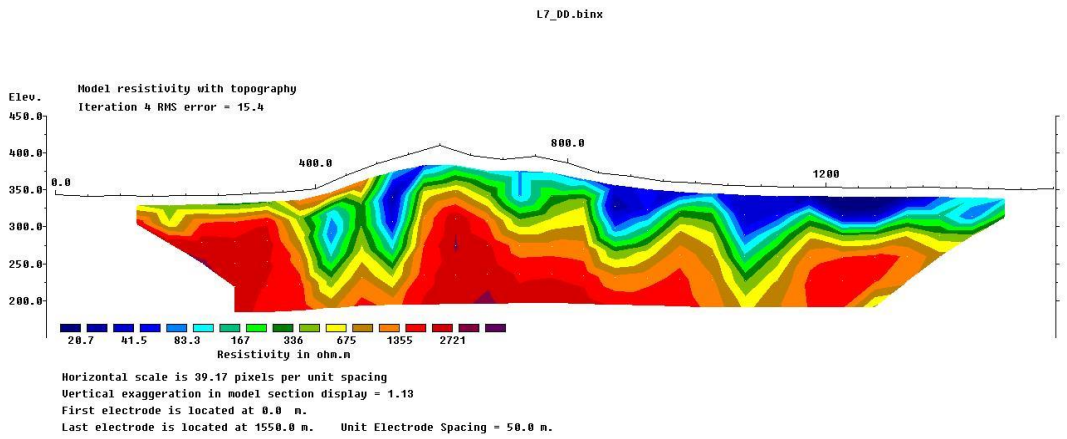
L6: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



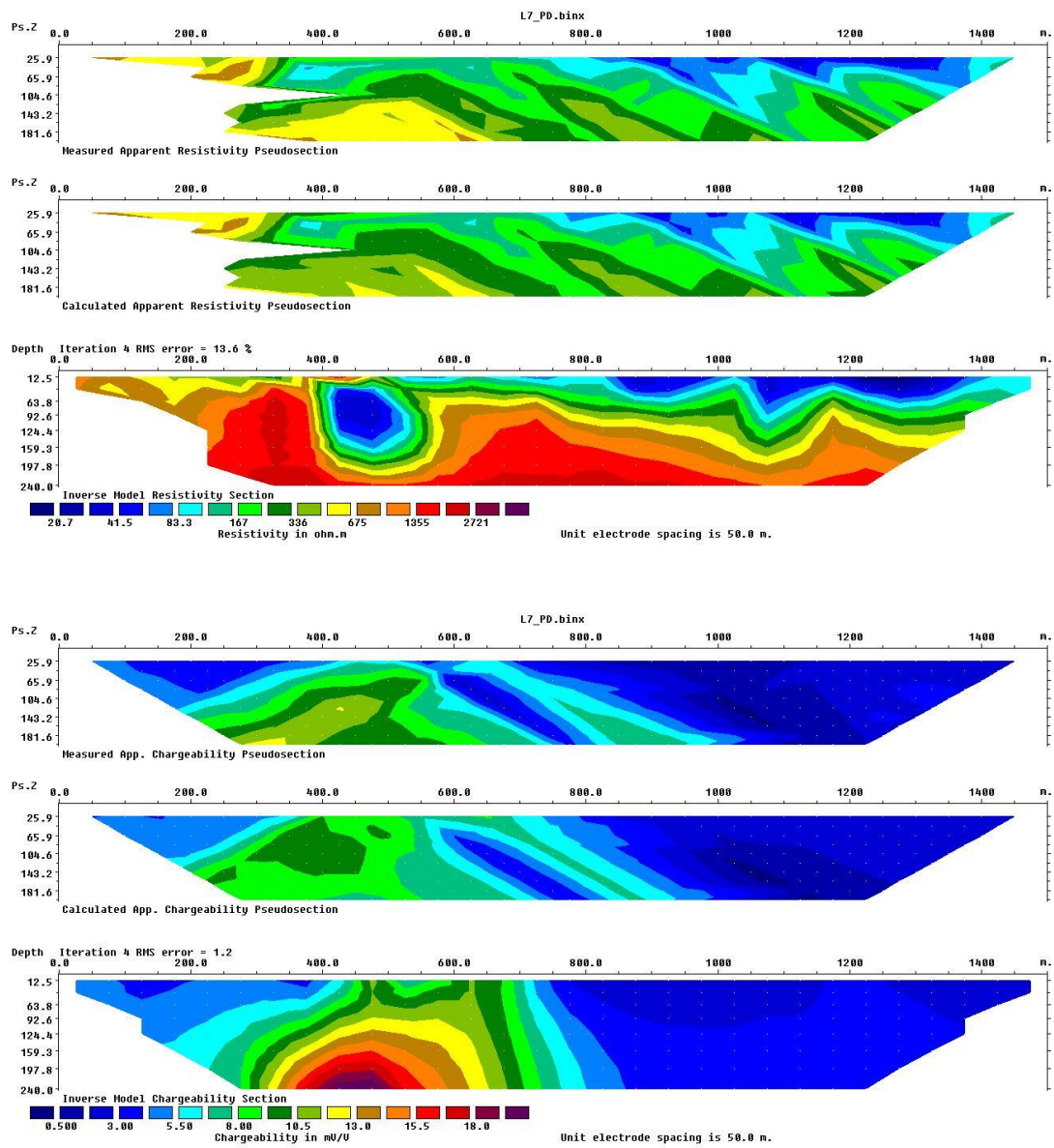
L7: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



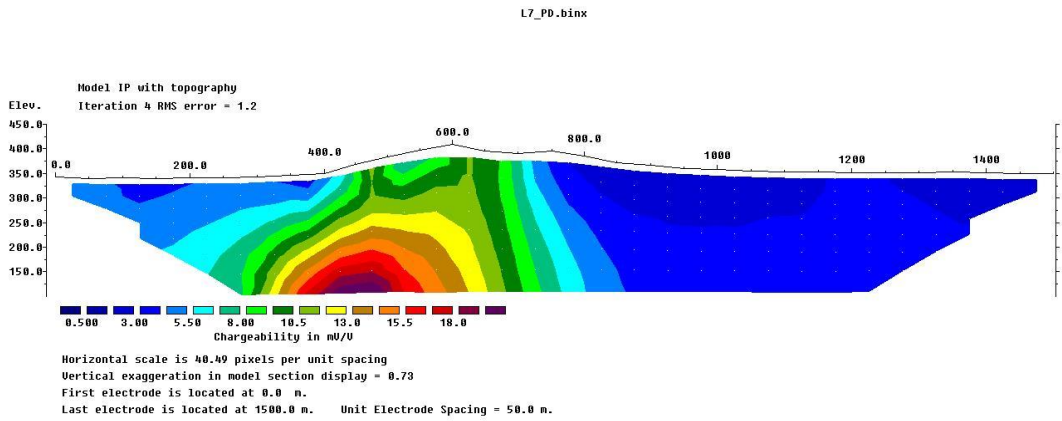
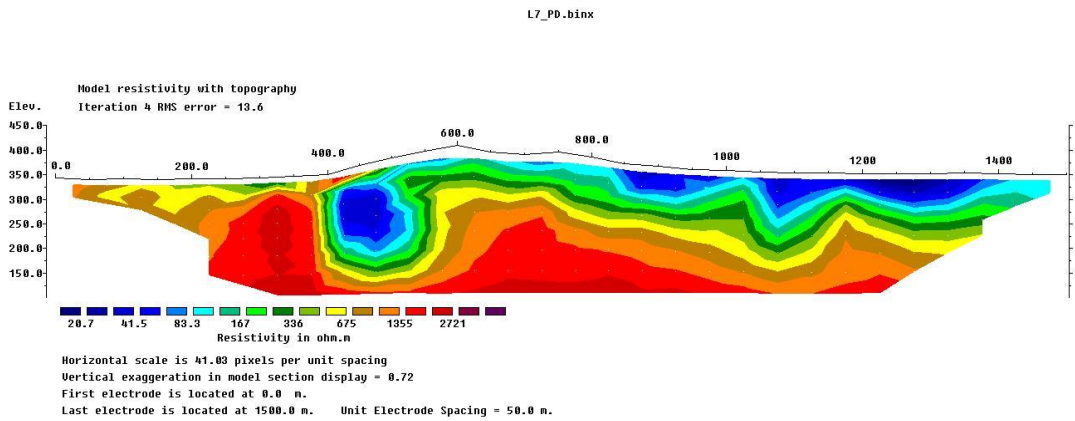
L7: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



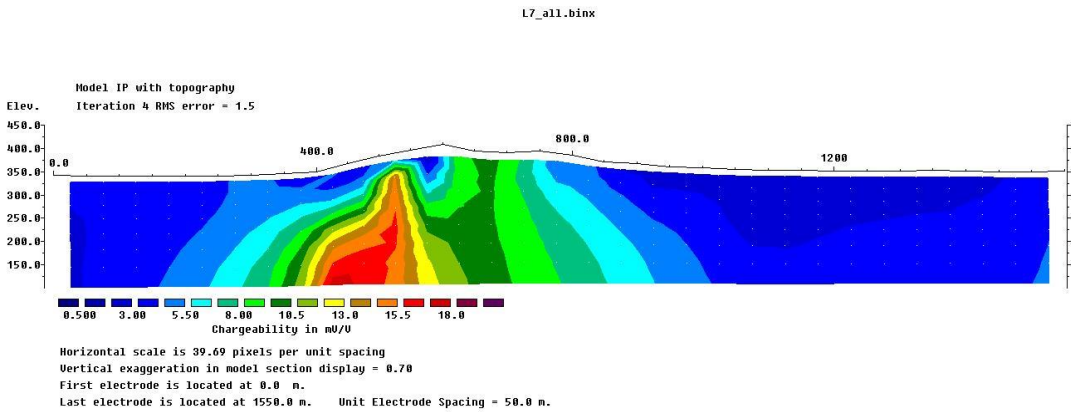
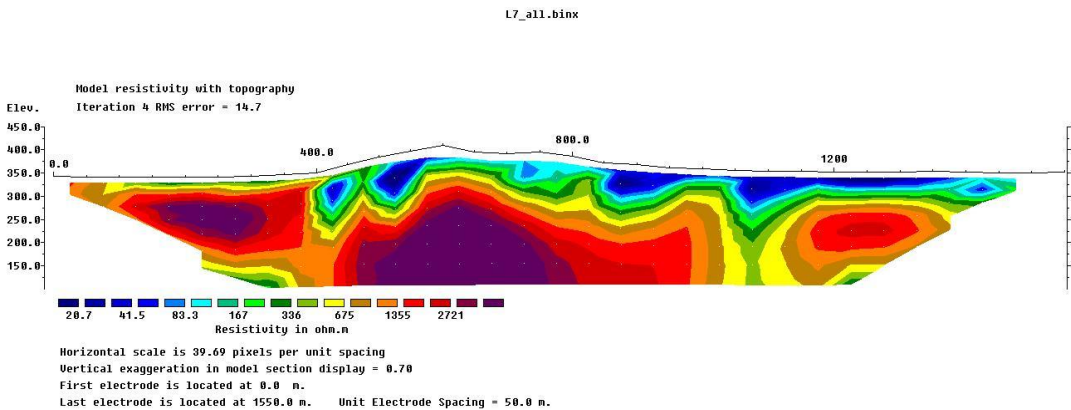
L7: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



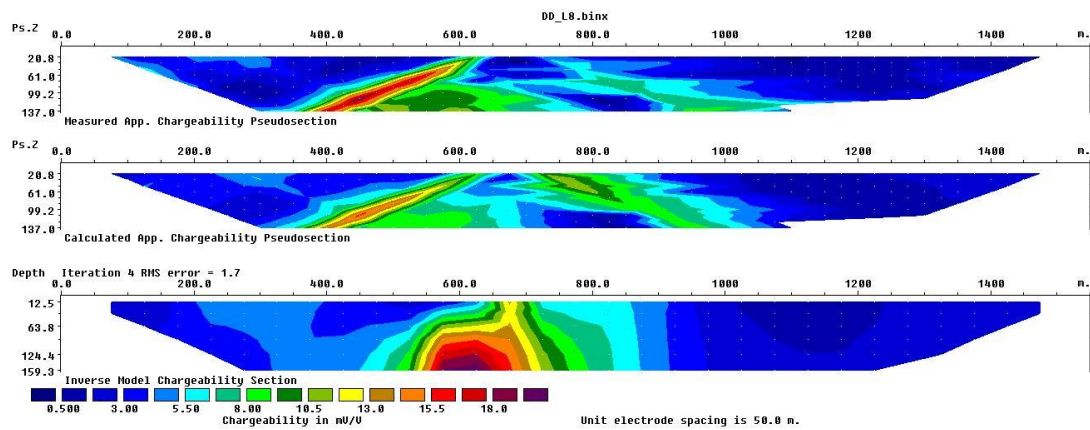
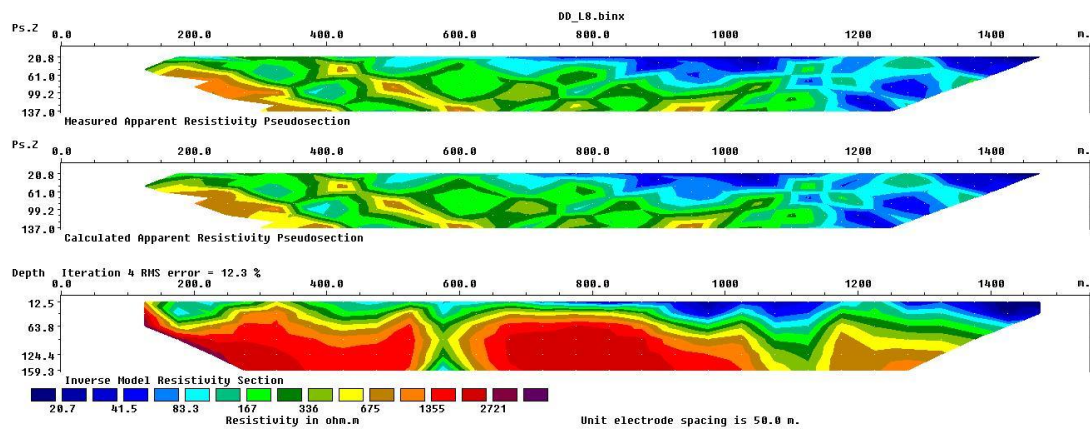
L7: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



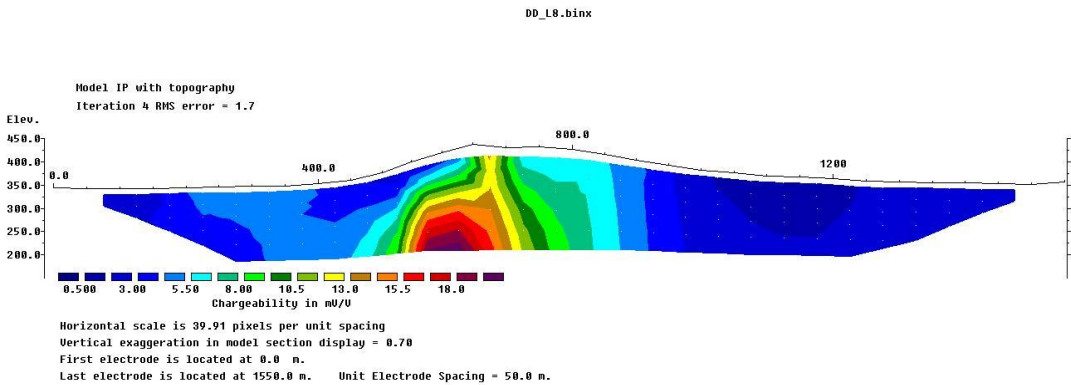
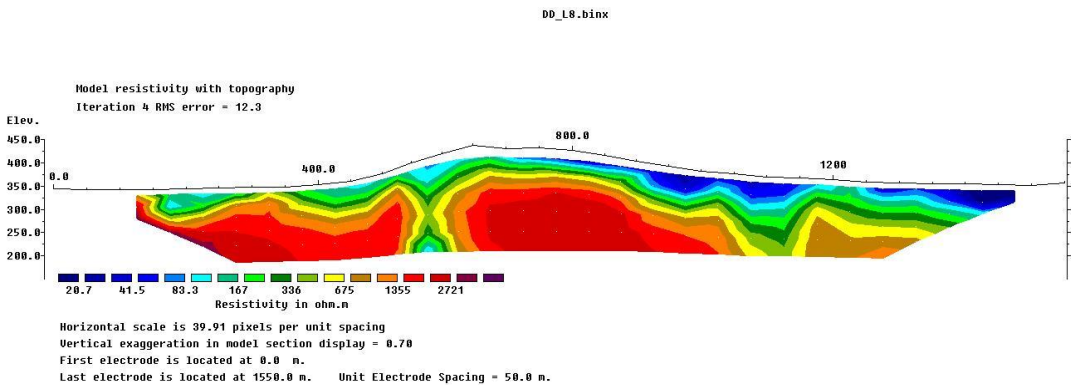
L7: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



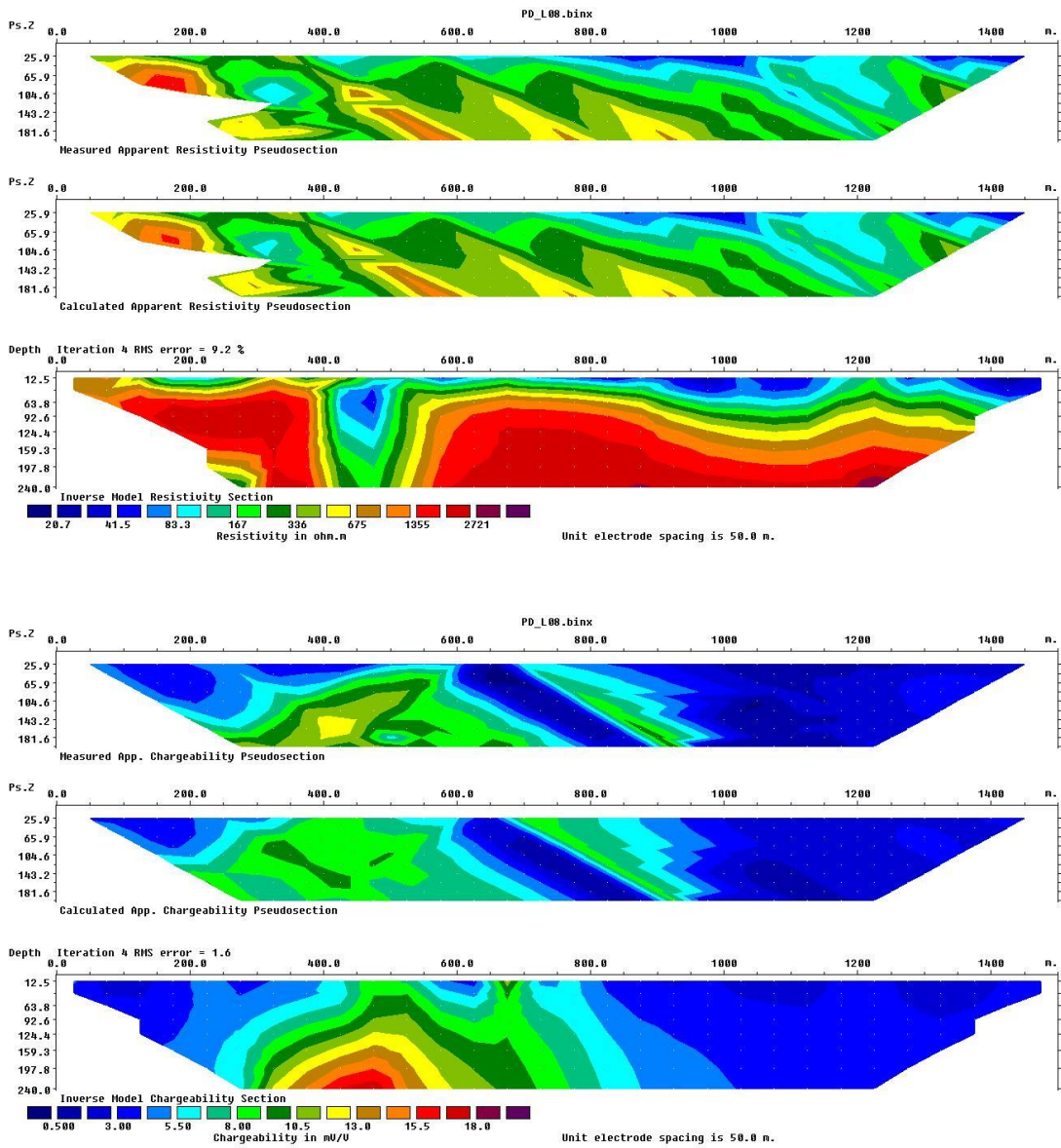
L8: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



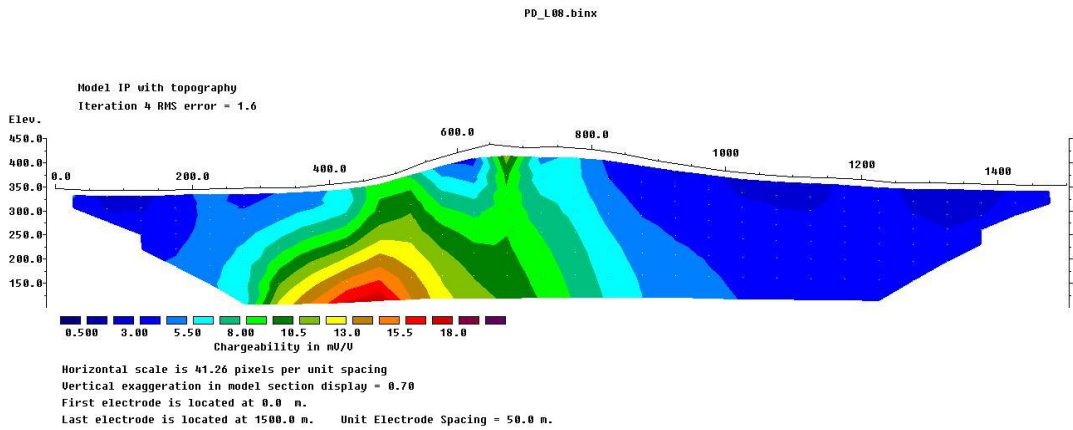
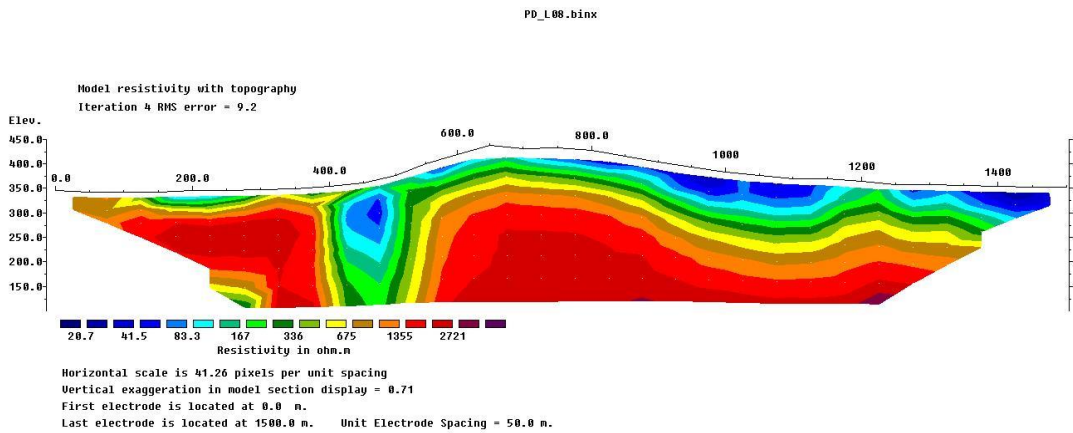
L8: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



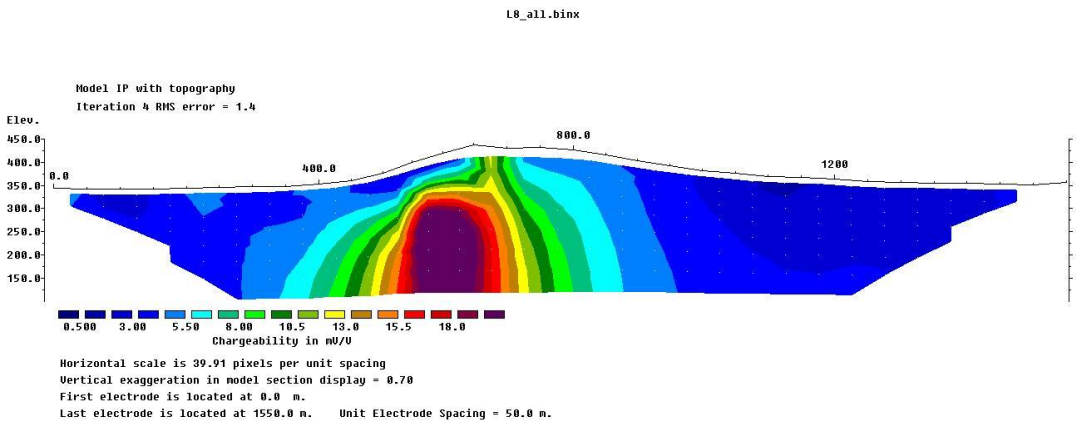
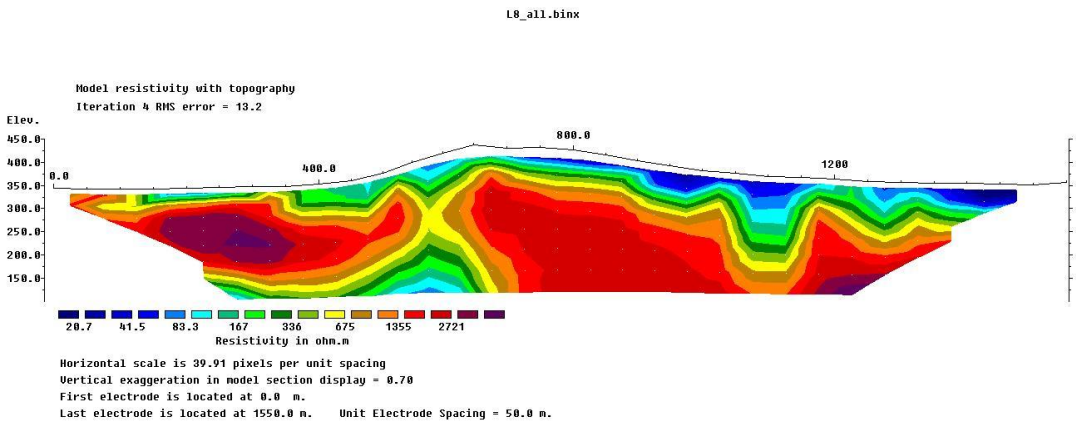
L8: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



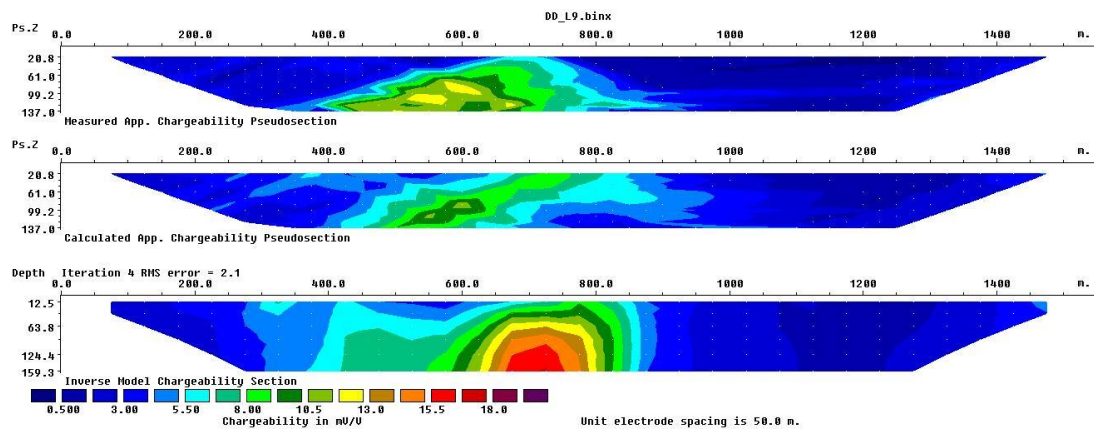
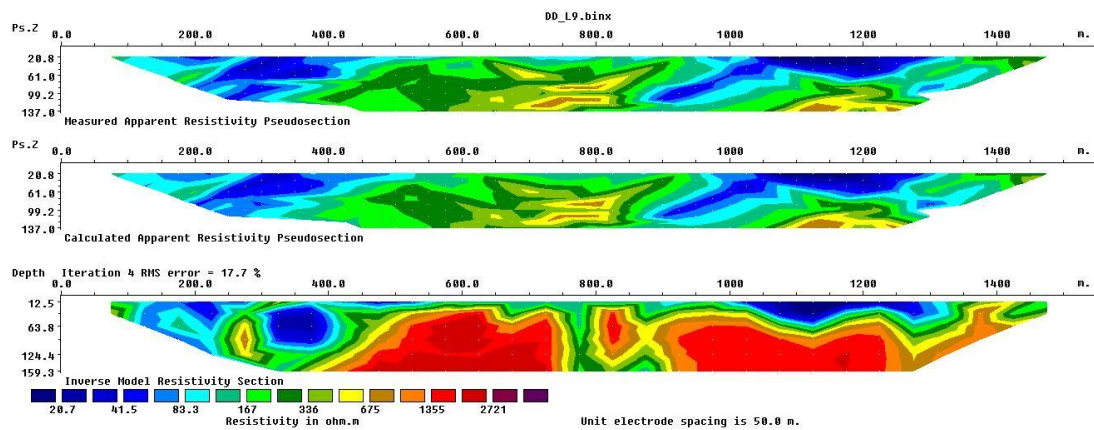
L8: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



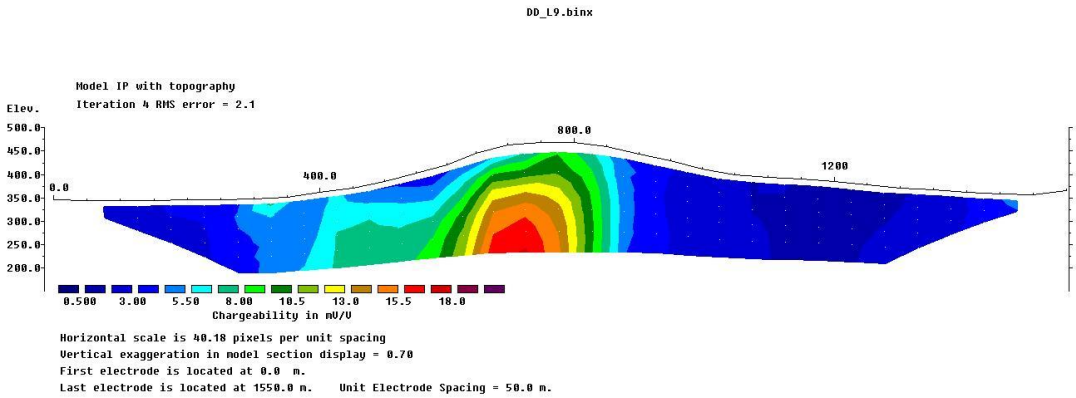
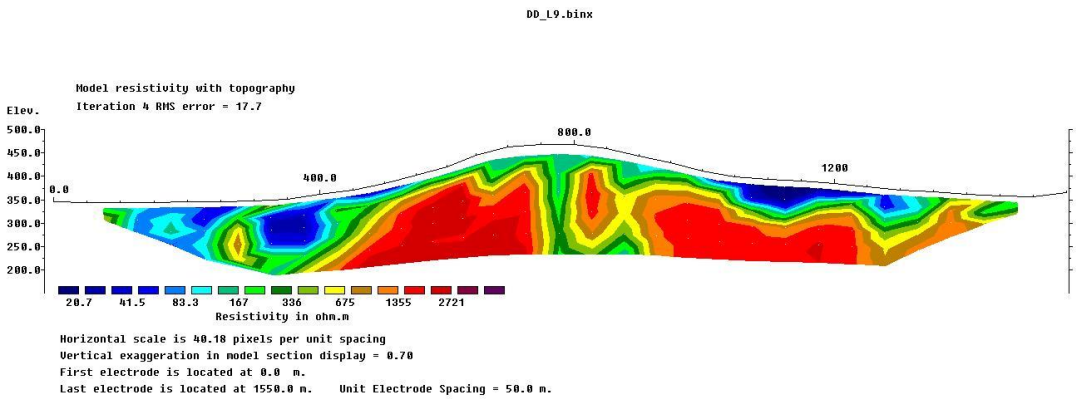
L8: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



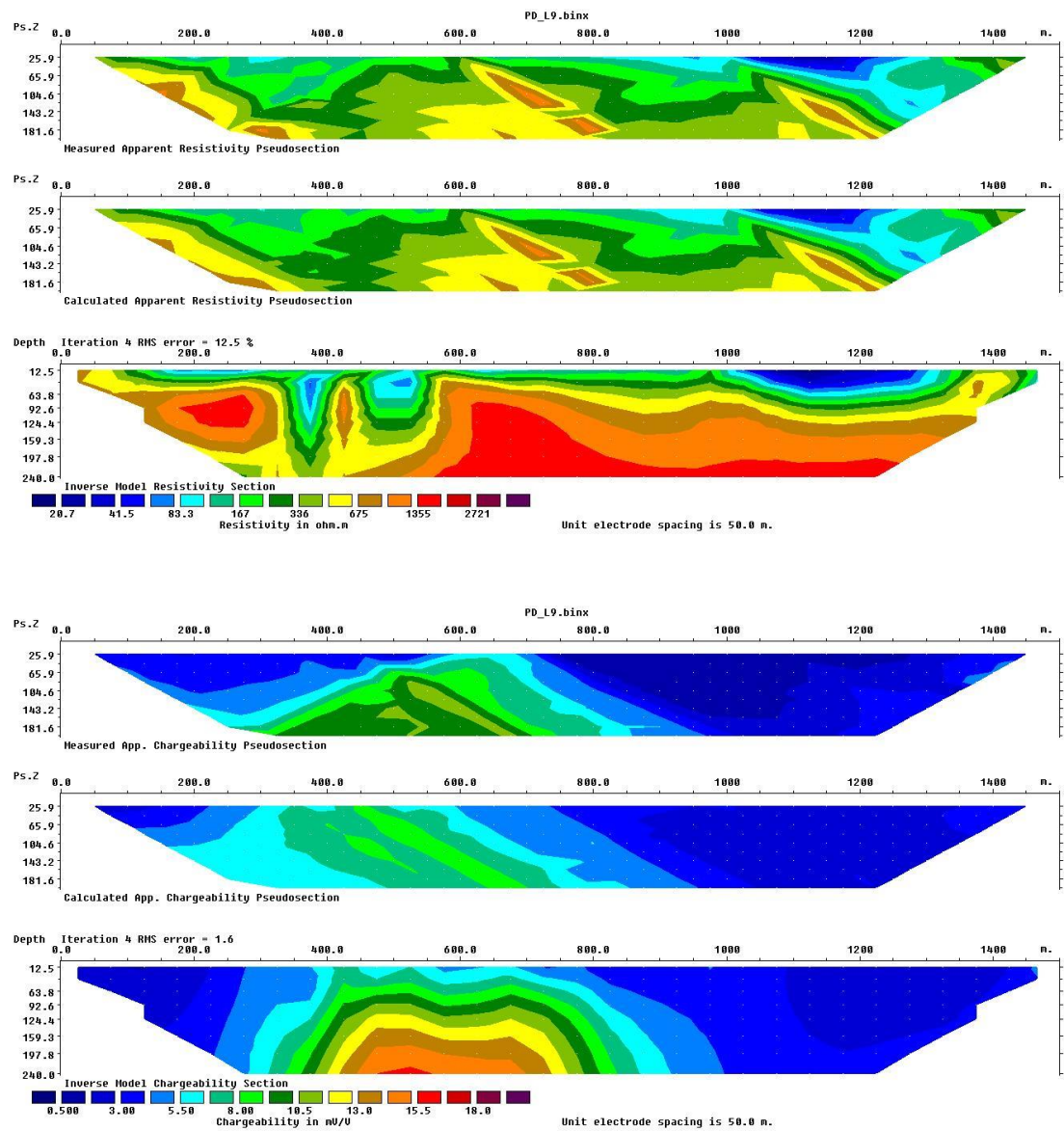
L9: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



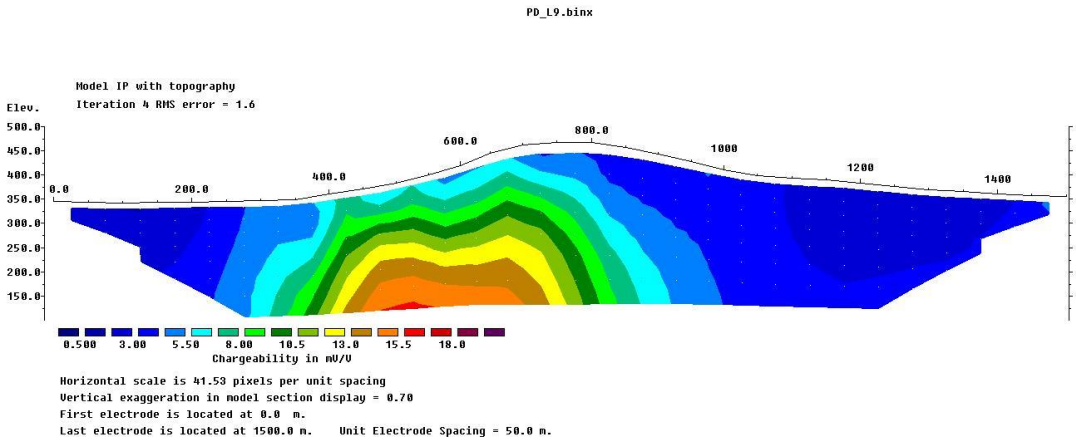
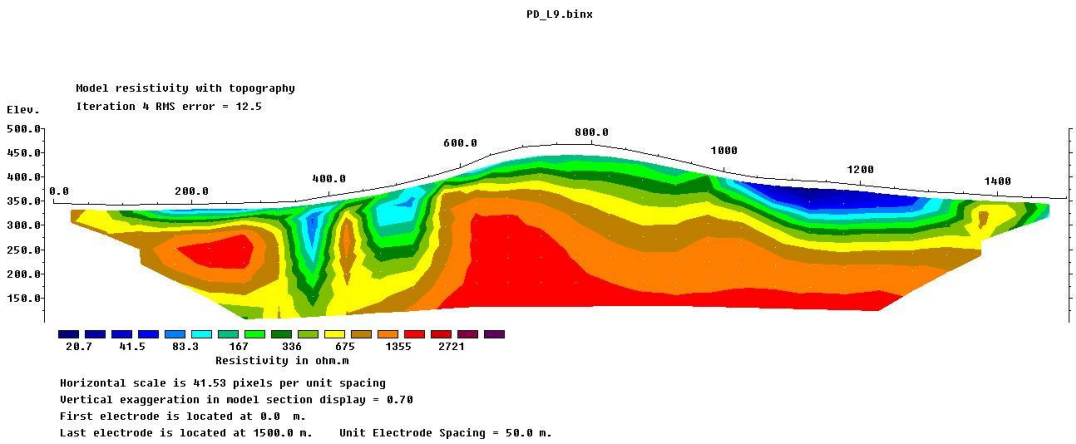
L9: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



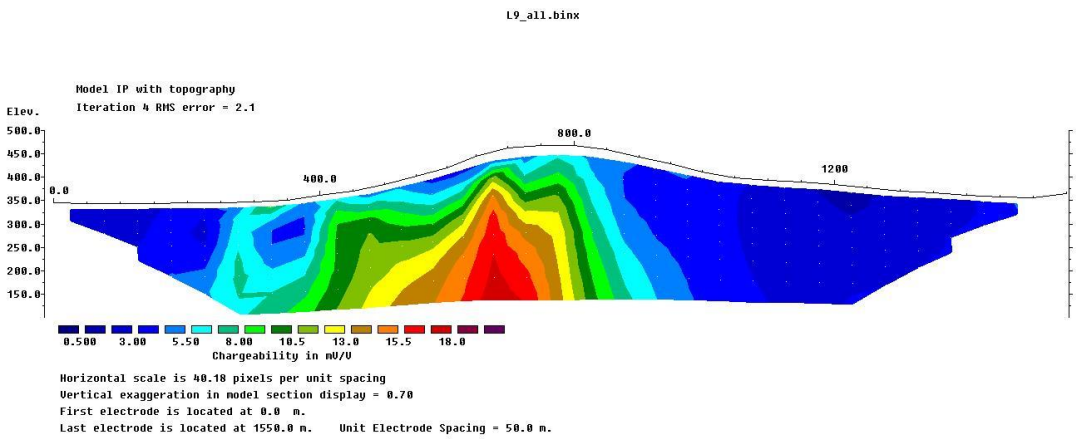
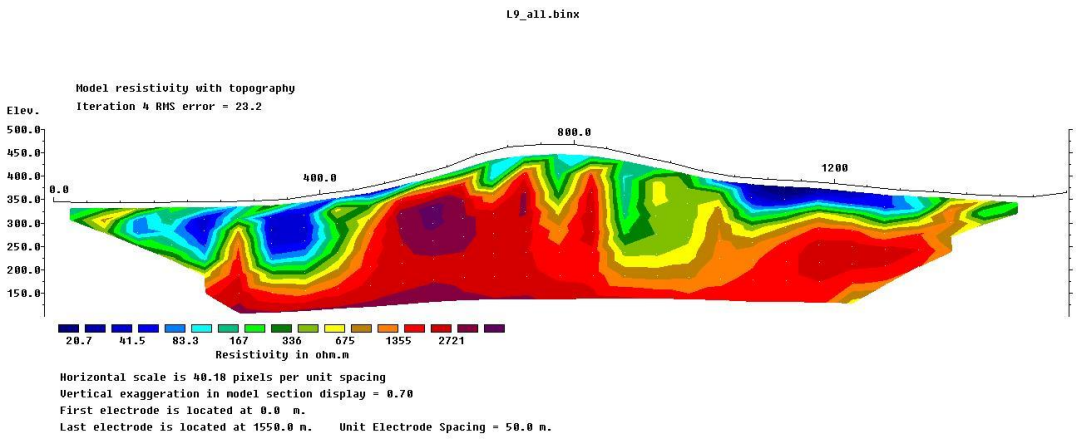
L9: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



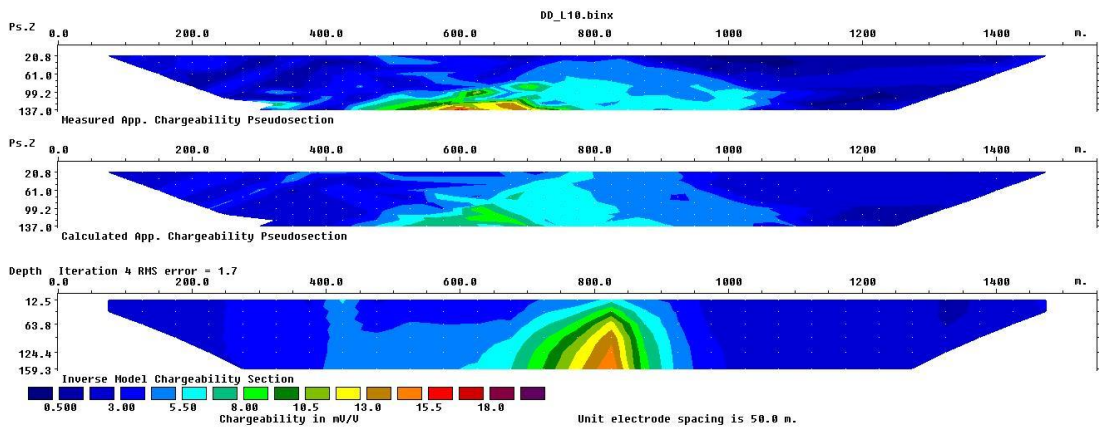
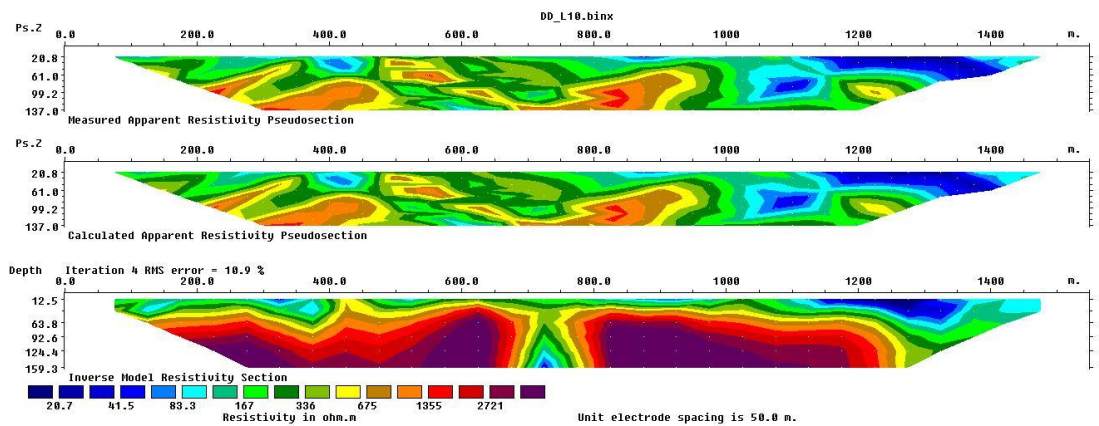
L9: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



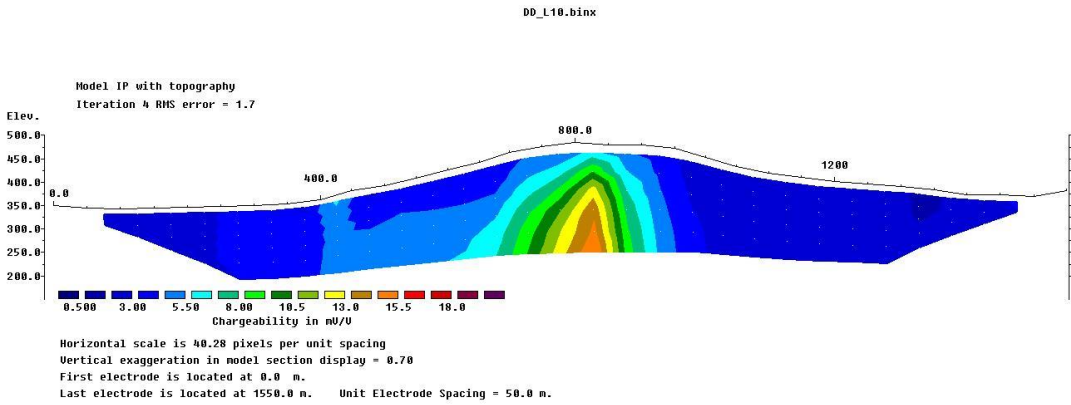
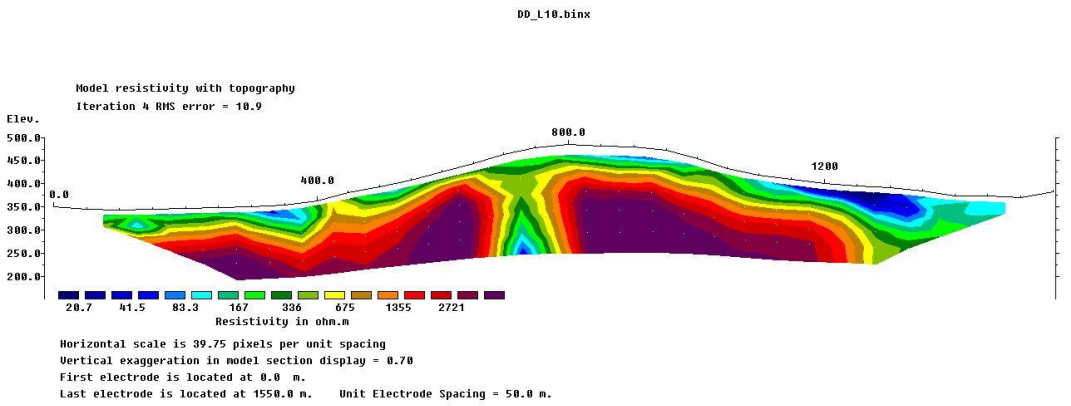
L9: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



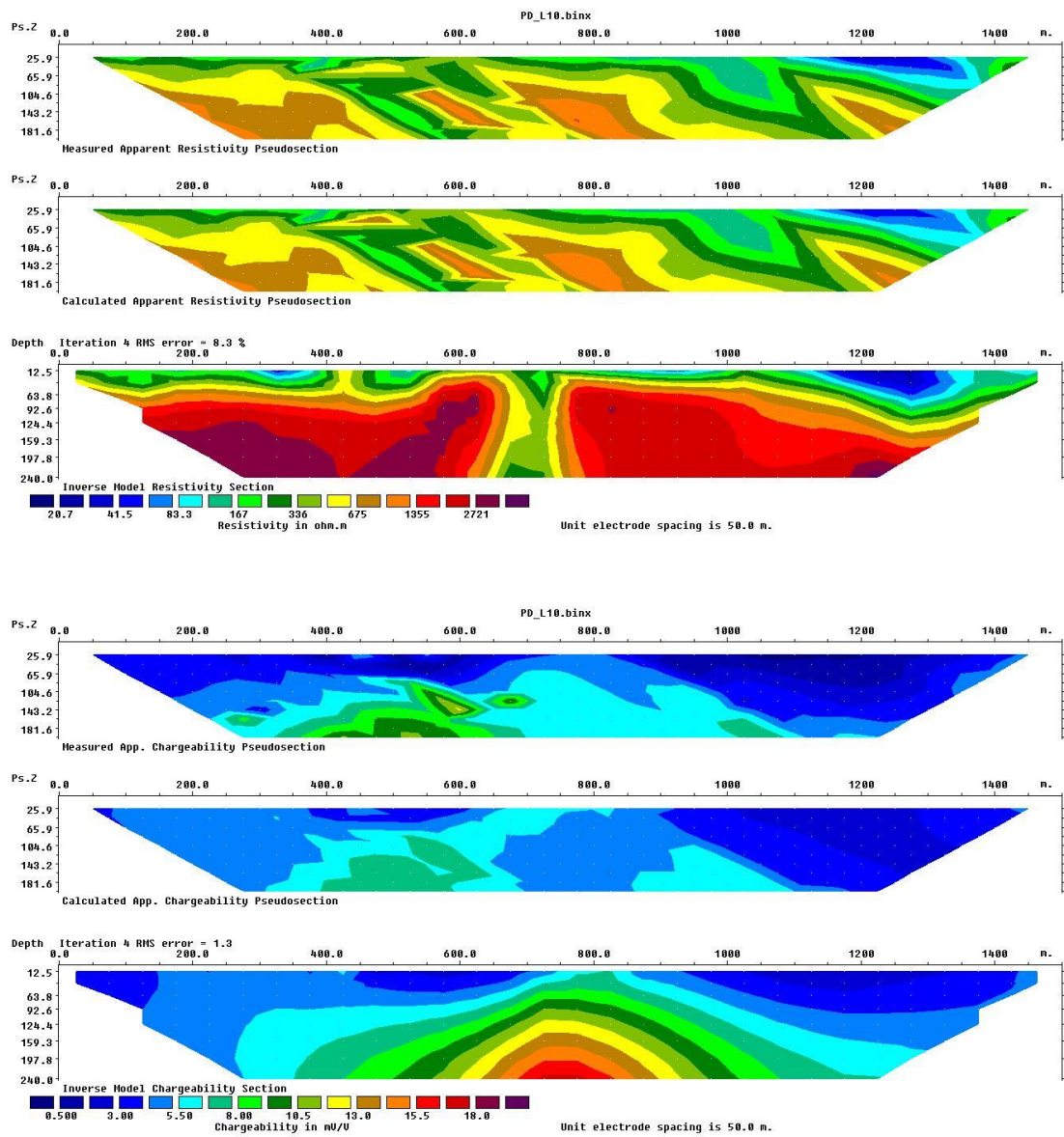
L10: Arranjo DD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



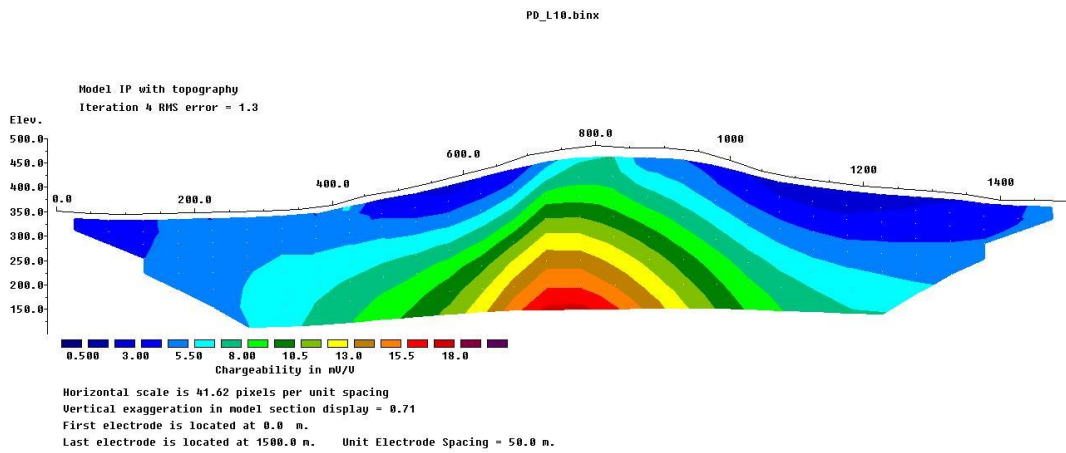
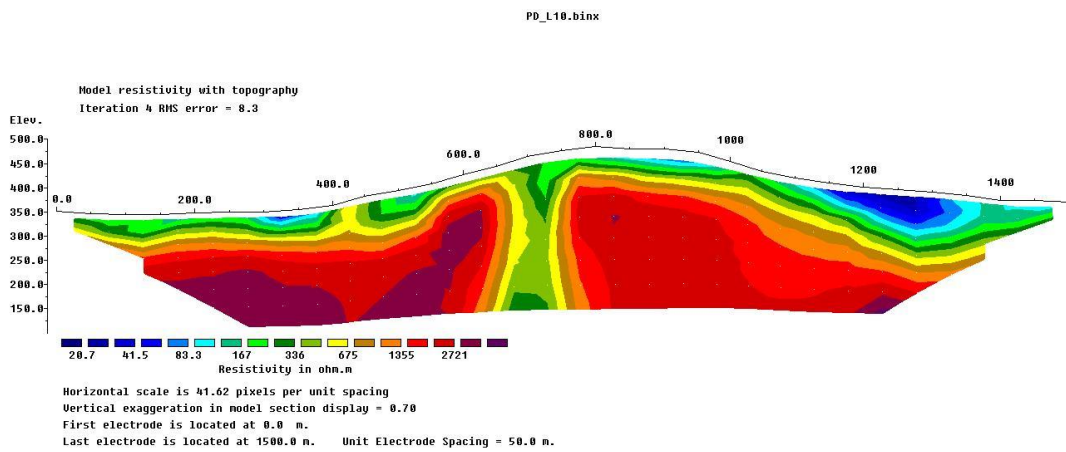
L10: Arranjo DD (Seções invertidas com topografia)



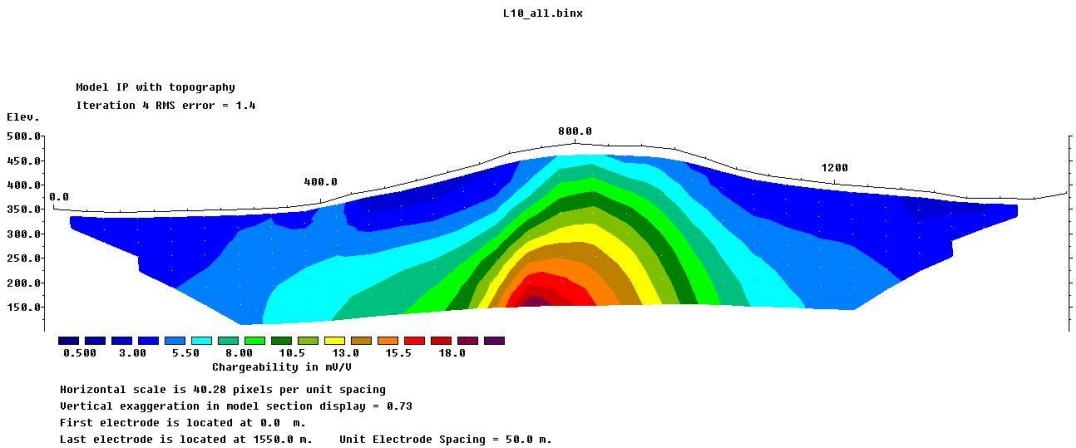
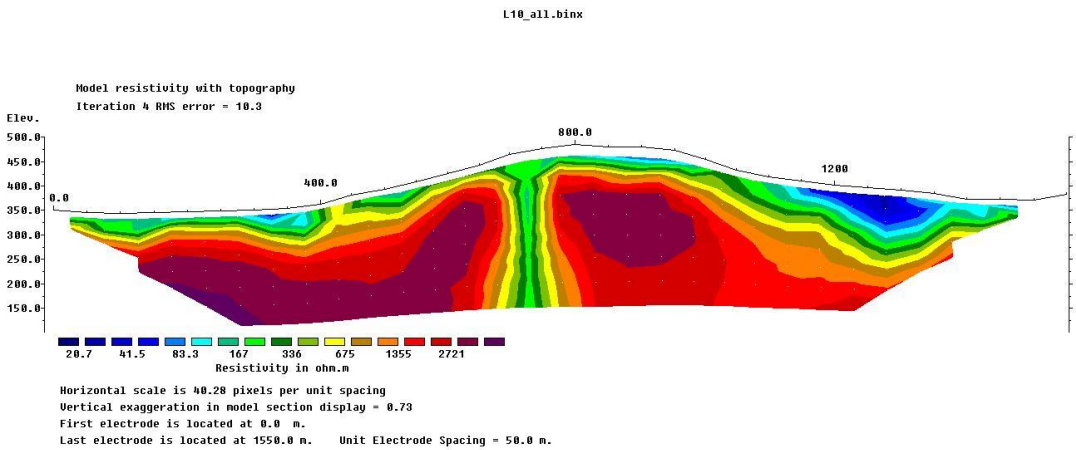
L10: Arranjo PD (Seções medidas, calculadas e invertidas)



L10: Arranjo PD (Seções invertidas com topografia)



L10: Seções mixed array (junção dos arranjos DD e PD) invertido com topografia.



Script Array:

#1 importação do dataframe (df)

#uma observação importante: você deve manter no arquivo .XYZ somente a tabela que irá utilizar, apagando todas as outras.

```
df = pd.read_fwf('LINHAINVERTIDA.XYZ')
```

#2 primeiro vamos filtrar a coluna X em ordem crescente

```
dx = df.sort_values('X')
```

#3 agora vamos filtrar a coluna Depth em ordem crescente, levando em conta o primeiro sort já feito

```
dy = dx.sort_values('Elevation', ascending = False)
```

#4 importar agora a topografia

```
topo = pd.read_csv('TOPOGRAFIA.csv')
```

#5 realizar um join entre os dataframes considerando as colunas X e Dist_C para para realização do join

```
ip = dy.set_index('X').join(topo.set_index('Dist'))
```

#6 agora é só exportar e ser feliz!! lembre-se: troque o nome da saída para a linha que está realizando o processo!!

```
ip.to_excel(r'ARRAY_LINHAINVERTIDA', index=False, header=True)
```

Formato do arquivo .XYZ:

/	X	Elevation	Resistivity	Conductivity	I.P.
	25.000	328.552	214.480	0.004662	3.764

Formato do arquivo de topografia:

Dist	X	Y	Elevation
0	257527		8685785
			346

PoleSeparator.exe

O programa criado para separação dos arranjos do arquivo de saída do equipamento IPR12 (Scintrex) pode ser baixado através do link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1n5VUx8ibkOFCfR0v8jysZ5YWlIL1ACjd?usp=sharing>

[g](#)

Para utilizar o programa, basta copiar o arquivo de saída na pasta do programa e seguir os passos informados pelo mesmo.