Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

ASSINATURAS GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DO DEPÓSITO SANTA LÚCIA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

GEOPHYSICAL AND PETROPHYSICAL FOOTPRINT OF THE SANTA LÚCIA DEPOSIT, CARAJÁS MINERAL PROVINCE

ADRIANO LOPES VALENTE

Dissertação de Mestrado Nº 528

Orientadora: Prof. Dra. Adalene Moreira Silva

Brasília, Julho 2024

Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

ASSINATURAS GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DO DEPÓSITO SANTA LÚCIA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

GEOPHYSICAL AND PETROPHYSICAL FOOTPRINT OF THE SANTA LÚCIA DEPOSIT, CARAJÁS MINERAL PROVINCE

ADRIANO LOPES VALENTE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia – Instituto de Geociências – IG da Universidade de Brasília – UnB como requisito parcial obrigatório para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de concentração: Prospecção e Geologia Econômica

Orientador: Prof. Dra. Adalene Moreira Silva

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (Presidente)

Dr. Marco Antônio Couto Jr (Vale/(UBC-GIF)

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (UnB)

Suplente:

Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho (UnB)

Lopes Valente, Adriano
LV154a ASSINATURAS GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DO DEPÓSITO SANTA LÚCIA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS / Adriano Lopes Valente orientador Adalene Moreira Silva. -- Brasília, 2024.
138 p.

Dissertação(Mestrado em Geologia) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Assinatura Geofísica. 2. Assinatura Petrofísica. 3. Depósito Santa Lúcia. 4. Província Mineral de Carajás. 5. Cobre. I. Moreira Silva, Adalene , orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas às quais gostaria de expressar minha gratidão.

Agradeço a Deus por Sua constante presença e orientação, lembrando-me sempre de Sua promessa: "Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar." (Josué 1:9)

Agradeço à minha orientadora, Prof. Dr. Adalene Silva, por sua orientação, paciência e por compartilhar seu vasto conhecimento comigo. Com enorme satisfação, agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Santos e à Prof. Dr. Catarina pelo apoio, incentivo e contribuições para este trabalho.

À minha família, em especial à minha esposa Adriany Valente, pelo amor, paciência, carinho e pelas ricas discussões geofísicas. À minha filha Helena Valente, que é o presente de amor e alegria em minha vida. A minha mãe Isabel Valente pelos ensinamentos, conselhos e orações.

Aos meus colegas e amigos da BHP OZ Minerals, que sempre estavam dispostos a me ajudar e discutir meu projeto de pesquisa. Em especial, agradeço aos geólogos Caroline Mercer, Eduardo Rebelo, André Santos, Marco Castoldi, Mateus Silva, Luiz Costa e Meyre James, e ao geofísico Andrew Thompson.

Aos meus colegas e amigos do programa de pós-graduação em Geologia da UNB, em especial ao meu grupo de pesquisa SísMineral, pelo convívio, apoio mútuo e por todas as discussões enriquecedoras que tivemos ao longo desses anos.

Agradeço à empresa BHP OZ Minerals pelo fomento à pesquisa, desenvolvimento profissional e apoio financeiro, em especial aos seus representantes Jailson Araújo e Edson França.

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

Dedico este trabalho ao do meu pai, amigo, professor e Dr. José Alexandre da Silva Valente (in memoriam).

RESUMO

A principal meta deste trabalho é a caracterização das assinaturas geofísica e petrofísica do depósito de Cu-Au Santa Lúcia, localizado na região da Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás no estado do Pará, Brasil. A mineralização de Cu-Au ocorre em uma zona mineralizada variando de disseminado, *string*, brechado, semi-maciço e maciço. A análise dos dados geofísicos permitiu concluir que: a) os dados magnéticos regionais e terrestres não mostram contraste expressivo, indicando falta de anomalia magnética ou fracamente magnética; b) o modelo de inversão dos dados magnéticos terrestres mostra que o minério do Santa Lúcia não apresenta anomalias de suscetibilidade magnética; c) os dados de gamaespectrometria destaca anomalias com altos teores dos três radioelementos, correspondendo a rochas de composição riolítica identificadas como parte da Suíte Planalto; d) os métodos elétricos (IP) e eletromagnéticos (TDEM) revelaram um excelente contraste de anomalias geofísicas, devido ao forte contraste de cargabilidade e condutividade, permitindo a diferenciação de diferentes porções do ambiente mineralizado; e) o modelo de cargabilidade mapeia os sulfetos disseminados, mas respondeu apenas parcialmente aos sulfetos maciços; f) o modelo de resistividade desempenhou um papel mais eficaz na identificação das zonas mineralizadas, indicando que as anomalias são moderadamente condutivas; g) os levantamentos eletromagnéticos do domínio do tempo terrestre (FLTEM) e *borehole* (DHTEM) possibilitaram a modelagem de placas condutoras, correspondentes às zonas ricas em sulfetos maciços com valores da ordem de 1.500S de condutividade. Dados petrofísicos foram medidos sistematicamente em nove furos de sondagem e puderam ser agrupados em cinco classes que mostram contraste em termos das propriedades físicas das rochas. Foram obtidos dados de densidade, suscetibilidade magnética, condutividade e HF (Resposta da condutividade no domínio da frequência). Para analisar estas variações, dados petrográficos e geoquímicos foram analisados e integrados com os petrofísicos. Os resultados indicam que: a) a porção maciça da mineralização apresenta os maiores valores de condutividade, suscetibilidade magnética e densidade; b) as porções brechada e semi-maciça também

mostram um contraste petrofísico, embora não tão expressivo quanto a zona maciça; c) as rochas hospedeiras e as mineralizações disseminada, *string* e matriz mostram baixos valores de suscetibilidade magnética, densidade e condutividade. A interpretação e integração dos dados petrográficos, litogeoquímicos e petrofísicos apontam que: a) as variações de propriedades físicas estão relacionadas com a correlação entre minerais de sulfetos em termos de comportamento de massa, tamanho dos grãos e textura; b) os principais minerais de sulfetos identificados no depósito Santa Lúcia são calcopirita, pirrotita e pirita; c) as zonas de mineralização maciça no depósito Santa Lúcia apresentaram fortes contrastes petrofísicos de suscetibilidade magnética e condutividade, devido à associação de calcopirita com lamelas de pirrotita que aparecem em cristais/blastos localmente deformados, com alguns exibindo chamas de pentlandita ou inclusões de calcopirita e esfalerita; d) quando a pirrotita se transforma em pirita ou quando a pirita está inclusa na pirrotita, isso implica uma diminuição do contraste de suscetibilidade magnética, e o processo inverso da transformação da pirita em pirrotita monoclínica causa o aumento de suscetibilidade magnética; e) os valores de suscetibilidade magnética na ordem de 30 (10^{-3} SI) observados no minério maciço não são suficientes para gerar anomalias magnéticas nos levantamentos geofísicos magnetométricos no depósito Santa Lúcia; f) o forte contraste de densidade devido à presença dos sulfetos maciços indica que o levantamento gravimétrico pode ser uma ferramenta útil para mapear a zona de minério com alto teor de cobre no depósito Santa Lúcia. O entendimento do footprint geofísico e petrofísico do depósito Santa Lúcia abre portas para a exploração de depósitos que não têm assinaturas geofísicas triviais, requerendo diferentes metodologias geofísicas e petrofísicas para serem compreendidos.

Palavras-chave: Cobre, Assinatura Geofísica, Assinatura Petrofísica, Depósito Santa Lúcia, Província Mineral de Carajás.

ABSTRACT

The primary goal of this study is to characterize the geophysical and petrophysical signatures of the Cu-Au Santa Lúcia deposit, located in the Serra do Rabo region, Carajás Mineral Province, in the state of Pará, Brazil. The Cu-Au mineralization occurs in a mineralized zone with ore ranging from disseminated, stringer, brecciated, semi-massive, to massive types. Analysis of geophysical data concluded that: a) regional and ground magnetic data show no significant contrast, indicating a lack of magnetic anomaly or weakly magnetic anomaly, respectively; b) the inversion model of ground magnetic data shows that the Santa Lúcia ore does not present magnetic susceptibility anomalies; c) The gamma-ray spectrometry data highlights anomalies with high concentrations of the three radioelements, corresponding to rhyolitic composition rocks identified as part of the Planalto Suite; d) electrical (IP) and electromagnetic (TDEM) methods revealed excellent geophysical anomaly contrasts due to strong chargeability and conductivity contrasts, allowing differentiation of various portions of the mineralized environment; e) the chargeability model maps disseminated sulfides but only partially responds to massive sulfides; f) the resistivity model was more effective in identifying mineralized zones, indicating that anomalies are moderately conductive; g) time-domain electromagnetic surveys (FLTEM and DHTEM) enabled the modeling of conductive plates corresponding to zones rich in massive sulfides with conductivity values around 1,500 S. Petrophysical data were systematically measured in nine drill holes and could be grouped into five classes showing contrasts in rock physical properties. Density, magnetic susceptibility, conductivity, and HF (High Frequency Response) data were obtained. Petrographic and geochemical data were analyzed and integrated with petrophysical data to analyze these variations. Results indicate that: a) the massive portion of mineralization exhibits the highest values of conductivity, magnetic susceptibility, and density; b) brecciated and semi-massive portions also show petrophysical contrast, though not as pronounced as the massive zone; c) host rocks and disseminated, stringer, and matrix mineralizations show low values of magnetic susceptibility, density, and conductivity. Interpretation and integration of petrographic, lithogeochemical, and

petrophysical data suggest that: a) variations in physical properties are related to the correlation between sulfide minerals in terms of mass, grain size, and texture behavior; b) the main sulfide minerals identified in the Santa Lúcia deposit are chalcopyrite, pyrrhotite, and pyrite; c) massive mineralization zones in the Santa Lúcia deposit presented strong petrophysical contrasts of magnetic susceptibility and conductivity due to the association of chalcopyrite with pyrrhotite lamellae appearing in locally deformed crystals/blasts, with some exhibiting pentlandite flames or inclusions of chalcopyrite and sphalerite; d) when pyrrhotite transforms into pyrite or when pyrite is included in pyrrhotite, it implies a decrease in magnetic susceptibility contrast, and the reverse process of pyrite transforming into monoclinic pyrrhotite causes an increase in magnetic susceptibility; e) magnetic susceptibility values around 30 (10^{-3} SI) observed in massive ore are insufficient to generate magnetic anomalies in magnetic geophysical surveys at the Santa Lúcia deposit; f) the strong density contrast due to the presence of massive sulfides indicates that gravity surveys can be a useful tool for mapping the high-grade copper ore zone in the Santa Lúcia deposit. Understanding the geophysical and petrophysical footprint of the Santa Lúcia deposit opens avenues for exploring deposits with non-trivial geophysical signatures, requiring different geophysical and petrophysical methodologies to be understood.

Keywords: Copper, Geophysical Signature, Petrophysical Signature, Santa Lúcia Deposit, Carajás Mineral Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização da área de estudo no estado do Pará, principais municípios e acessos da região. 18
Figura 1.2- Localização dos polígonos dos levantamentos aerogeofísicos do Projeto Tucuruí e do Projeto Rio Maria, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, principais municípios do estado, além da área de estudo. 20
Figura 1.3 - Trabalho de campo para aquisição de dados petrofísicos e separação das amostras para análise química no galpão de testemunho do depósito Santa Lúcia na cidade de Canaã dos Carajás - PA. 27
Figura 2.1 - (a) Localização da Província Mineral de Carajás (preto) dentro do Cráton Amazônico (cinza claro), Brasil. (b) Compartimentação da Província de Carajás em domínio Rio Maria (sul) e domínio Carajás (norte), limitado ao norte pelo Domínio Bacajá. (c) Mapa geológico simplificado do Domínio Carajás. O retângulo preto mostra a localização do depósito de Santa Lúcia. Modificado de Costa et al., (2016). 36
Figura 2.2 - (a) Mapa geológico simplificado da área do depósito Santa Lúcia (Modificado de Costa et al., 2016). As figuras a seguir mostram produtos derivados de dados aerogeofísicos com espaçamento 500 metros, a saber: (b) Gradiente total do campo magnético anômalo e (c) Composição ternária RGB (K, eTh e eU) 38
Figura 2.3 – Estilos de mineralização do depósito Santa Lúcia. (a) minério disseminado, (b) minério tipo string, (c) minério em matriz, (d) minério brechado, (e) minério semi-maciço e (f) minério maciço. 41
Figura 2.4 – Resultados do processamento dos dados magnetométricos. (a) Mapa do gradiente total (Projetos Aerogeofísicos Tucuruí e Rio Maria). (b) Mapa do gradiente total derivados dos dados do levantamento magnetométrico terrestre com a localização da zona mineralizada e os furos em que foram adquiridas as medidas petrofísicas do depósito Santa Lúcia. (c) Visualização 3D em planta do modelo MVI da componente de amplitude (Ampl) e a zona mineralizada. (d) Visualização 3D com corte no

meio do deposito Santa Lúcia do modelo de modelo MVI da componente de amplitude (Ampl) e da zona mineralizada. 49
Figura 2.5 – Resultados de IP e Resistividade. (a) Mapa da seção horizontal em 50 m de profundidade dos modelos de cargabilidade com zona mineralizada. (b) Modelo invertido de cargabilidade localizado na porção central do deposito com a zona mineralizada. (c) Mapa da seção horizontal dos modelos de resistividade com zona mineralizada. (d) Modelo invertido de resistividade localizado na porção central do deposito com a zona mineralizada. 51
Figura 2.6 – Resultados de FLTEM. (a) Mapa da interpolação do canal 20 da componente Z com zona mineralizada. (b) Visualização 3D das placas modeladas no late time com o minério de baixo e alto teor integradas com os furos de sondagem que cortam a zona mineralizada. (c) Visualização 3D das placas modeladas no mid late time junto com o minério de baixo e alto teor com os furos de sondagem (DDH). 54
Figura 2.7 – Resultados de DHEM. (a) Mapa da interpolação do canal 20 da componente X dos dados de FLTEM com zona mineralizada e a localização do furo 094. (b) Visualização 3D das placas modeladas no late time junto com o minério de alto teor. (c) Visualização 3D das placas modeladas no late time junto com o minério de baixo e alto teor. Em (c) e (d) indica-se os furos de sondagem onde foi realizado as medidas petrofísica (DDH) e que validam os resultados obtidos. 55
Figura 2.8 – Box plots dos dados lito-geoquímicos e petrofísicos dos furos selecionados para o estudo petrofísico. (a) Condutividade em S/m; (b) Resposta HF em Hz; (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI; (d) Densidade em g/cc; (e) Ouro (Au) em ppm; (f) Condutividade em S/m na escala logarítmica; (g) Resposta HF em Hz na escala logarítmica; (h) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI na escala logarítmica; (i) Cobre (Cu) em porcentagem; (j) Ferro (Fe) em porcentagem. As cores representam as seguintes litologias: intrusões de pegmatitos (F-PG), vulcânicas félsicas (V-FV), zona de mineralização disseminada (M-MZds),

em string (M-MZst), em matriz (M-MZmx), brechada (M-MZbx), semi-maciça (M-MZsm) e maciça (M-MZm). 59
Figura 2.9 – Strip logs dos dados litogeoquímico e petrofísico do furo 038 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), zona de minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-Mst), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm)..... 64
Figura 2.10 – Amostras do testemunho de sondagem mostrando as principais litologias do deposito Santa Lúcia. (a) Rocha sub-vulcânica (V-FV) alterada por potassificação, (b) Corpo intrusivo de pegmatito (F-PG) alterada por greisenização, (c) Minério disseminado (M-MZds), (d) Minério disseminado (M-MZds) e string (M-MZst) associadas a veios de quartzo, (e) Minério brechado (M-MZbx), (f) Minério semi-maciço (M-MZsm), (g) Minério semi-maciço (M-MZm) com pirrotita e (g) Zona de mineralização maciça (M-MZm). Abreviações: Bt biotita, Ccp calcopirita, K-Fsp Feldspato Potássico, Pl Plagioclásio, Po pirrotita, Qz quartzo e Tur turmalina. 68
Figura 2.11- Petrografia das amostras dos testemunhos de sondagem do deposito Santa Lúcia. (a) Cristais de calcopirita (Ccp) dispersos na matriz (OZSL-01). (b) Calcopirita (Ccp) infiltrando em cristais fraturados de pirita (Py) (OZSL-02). (c) Clasto de pegmatito constituído de cristais de turmalina (Tur) e matriz composta por uma massa de calcopirita (Ccp) (OZSL-03). (d) Associação de calcopirita (Ccp), pirrotita (Po) e pirita (Py) (OZSL-04). (e) Associação calcopirita (Ccp), pirita (Py) e pirrotita (Po), os transparentes são filossilicatos (Phy) (OZSL-05). (f) Associação calcopirita (Ccp), pirrotita (Po), pentlandita (Pn), esfalerita (Sph) e cristais/blastos de pirrotita (Po) exibem lamelas de deformação (área tracejada) (OZSL-06). 69
Figura 2.12 – Diagrama da estrutura conceitual que descreve o comportamento de várias propriedades físicas comumente medidas em rochas (Dentith et al., 2020). 71

Figura 2.13 – Seção geofísica seccionando a porção central da zona mineralizada. Resultados mostram as anomalias geofísicas onde (a) Modelo de susceptibilidade magnética MVI, (b) Modelo de cargabilidade e (c) Modelo de Resistividade, em relação as zonas de alto e baixo teor de cobre Cu, litologias e placa condutora de DHEM. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), zona de minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-Mst), em matriz (M-Zmx), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm). 74

Figura 2.14 - Gráficos de correlação entre propriedades físicas e teor de cobre das amostras dos testemunhos de sondagem no depósito de Santa Lúcia. a) Correlação entre densidade e susceptibilidade magnética. b) Correlação entre densidade e condutividade. c) Correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade. d) Boxplot da densidade. e) Boxplot da susceptibilidade magnética em escala logarítmica. f) Boxplot da condutividade em escala logarítmica. Litologias: Pegmatito (F-PG), vulcânicas félsicas (V-FV), minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-Mst), em matriz (M-Zmx), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm)..... 77

Figura 2.15- Correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade com teor de cobre das amostras de minério maciço dos testemunhos de sondagem no depósito de Santa Lúcia..... 79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16

1.1. OBJETIVOS 17

1.2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 18

1.3. MATERIAIS E MÉTODOS 18

1.3.1. Trabalho de campo e amostragem 19

1.3.2. Dados aerogeofísicos 19

1.3.2. Dados geofísicos terrestre 21

1.3.2.1. Levantamento magnetométrico 21

1.3.2.2. Levantamento de polarização induzida e resistividade 22

1.3.2.3. Levantamento eletromagnético no domínio do tempo 24

1.3.3. Dados Petrofísicos 26

1.3.4. Dados geoquímicos e petrográficos 27

2. GEOPHYSICAL AND PETROPHYSICAL FOOTPRINT OF THE SANTA LÚCIA DEPOSIT, CARAJÁS MINERAL PROVINCE. 30

2.1. INTRODUÇÃO 32

2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOFÍSICO 33

2.2.1. Província Mineral de Carajás 33

2.2.2. Geologia do Depósito Santa Lúcia 37

2.3. MATERIAIS E MÉTODOS 42

2.3.1. Levantamento Magnetométrico 42

2.3.2. Levantamento de Polarização Induzida e Resistividade 43

2.3.3. Levantamento eletromagnético no domínio do tempo (TDEM) 44

2.3.4. Dados Petrofísicos 46

2.3.5. Dados Geoquímicos e Mineralógicos 46

2.4. RESULTADOS 47

2.4.1. Magnetometria 47

2.4.2. Inversão de Dados de IP e Resistividade 50

2.4.3. Modelagem de Dados Eletromagnéticos no Domínio do tempo ... 52
2.4.4. Análise dos Dados Petrofísicos, Litogeoquímicos e Mineralógicos. 56
2.5. DISCUSSÕES ... 70
2.5.1. FOOTPRINT GEOFÍSICO ... 71
2.5.2. FOOTPRINT PETROFÍSICO ... 75
2.6. CONCLUSÕES ... 84
REFERÊNCIAS ... 87
APÊNDICE A ... 95
APÊNDICE B ... 96
APÊNDICE C ... 99
APÊNDICE D ... 101
APÊNDICE E ... 102
APÊNDICE F ... 103
APÊNDICE G ... 107
APÊNDICE H ... 115
3. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES ... 121
4. REFERÊNCIAS ... 130
APÊNDICE I ... 138

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O depósito de cobre-ouro (Cu-Au) Santa Lúcia de idade neoarqueana está localizado na porção sudeste do Domínio Carajás nas adjacências da Serra do Rabo. A mineralização está hospedada em subvulcânicas de composição riolítica, associadas ao Grupo Grão Pará e é truncada por um corpo pegmatítico (Hunger *et al.*, 2021). Dados disponíveis da literatura mostram que o depósito de Cu-Au Santa Lúcia representa um membro dos sistemas Cu-polimetálicos que é diferente do estilo de mineralização dos principais depósitos de classe mundial de óxidos de ferro, inclusos no modelo *iron oxide-copper-gold deposits* (IOCG) (Hunger *et al.*, 2021).

As atividades atuais de exploração mineral estão concentradas em alvos mais difíceis de serem detectados devido à complexidade no entendimento do *footprint* do sistema mineral. O desenvolvimento de novas abordagens para criação de modelos de sistemas minerais tem como base a correlação de dados de geologia-estrutural-mineralogia-litogeoquímica-petrofísica-geofísica, e levam em consideração as suas principais assinaturas. Essas abordagens dão apoio ao entendimento de novas estratégias que possibilitam a descobertas de novos depósitos minerais (Lesher *et al*., 2017).

Por outro lado, o cobre se tornou um metal crítico para a sociedade e a procura de novos depósitos com mineralização cupro-aurífera tem sido o foco de Estado em vários países e de muitas empresas do ramo da mineração. Importante ressaltar também a mudança de paradigma, onde alvos com alto teor e geometricamente menores tem sido alvo de interesse de empresas juniores e médias, uma vez que, de modo geral, os grandes depósitos já foram descobertos, o que valoriza o projeto de pesquisa com a escolha do depósito Santa Lúcia.

Baseado no exposto, a meta principal desta dissertação de mestrado é a caracterização das assinaturas geofísica e petrofísica por meio do processamento, análise e integração de dados geofísicos, litogeoquímicos e petrofísicos para o mapeamento da assinatura do ambiente mineralizado dentro

do sistema mineral Cu-Au da região da Serra do Rabo, Provincia Mineral de Carajás.

1.1. Objetivos

O objetivo central desta pesquisa é mapear o footprint geofísico e petrofísico do sistema mineral Cu-Au do depósito Santa Lúcia na região da Serra do Rabo, utilizando dados geofísicos, de propriedades físicas de rocha e sua correlação com dados geológicos, petrográficos e litogeoquímicos.

Os objetivos específicos consistem em:

- Processar dados geofísicos aéreos (magnetometria e gamaespectrometria) e terrestres disponíveis (magnético, polarização induzida e eletromagnético no domínio do tempo) que recobrem a área do depósito e adjacências para refinamento do arcabouço geológico e mapeamento das diferentes assinaturas em diferentes escalas;
- Aquisição de dados de propriedades física de rocha (susceptibilidade magnética, condutividade, condutividade no domínio frequência e densidade) em furos de sondagem em testemunhos de sondagem mais representativos do depósito Santa Lúcia;
- Caracterização petrofísica das zonas mineralizadas, visando a análise das variações das propriedades físicas de rocha associadas ao processo hidrotermal;
- Identificação dos principais minerais minério associados com as zonas de alteração hidrotermal identificados em testemunhos de sondagem e petrografia;
- Estabelecer a assinatura das zonas mineralizadas a partir da integração de dados petrofísicos, petrográficos e geoquímicos.
- Análise integrada das assinaturas geofísica e petrofísica para compreensão do ambiente mineralizado.

1.2. Localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se dentro dos limites do município de Canaã dos Carajás, no estado do Pará, Brasil. O deposito Santa Lucia está aproximadamente 20 km do principal centro urbano de Canaã dos Carajás, O acesso é feito pela PA-160 até a entrada da fazenda Umuarama, onde o percurso é seguido por um acesso sem pavimentação (Figura 1.1).

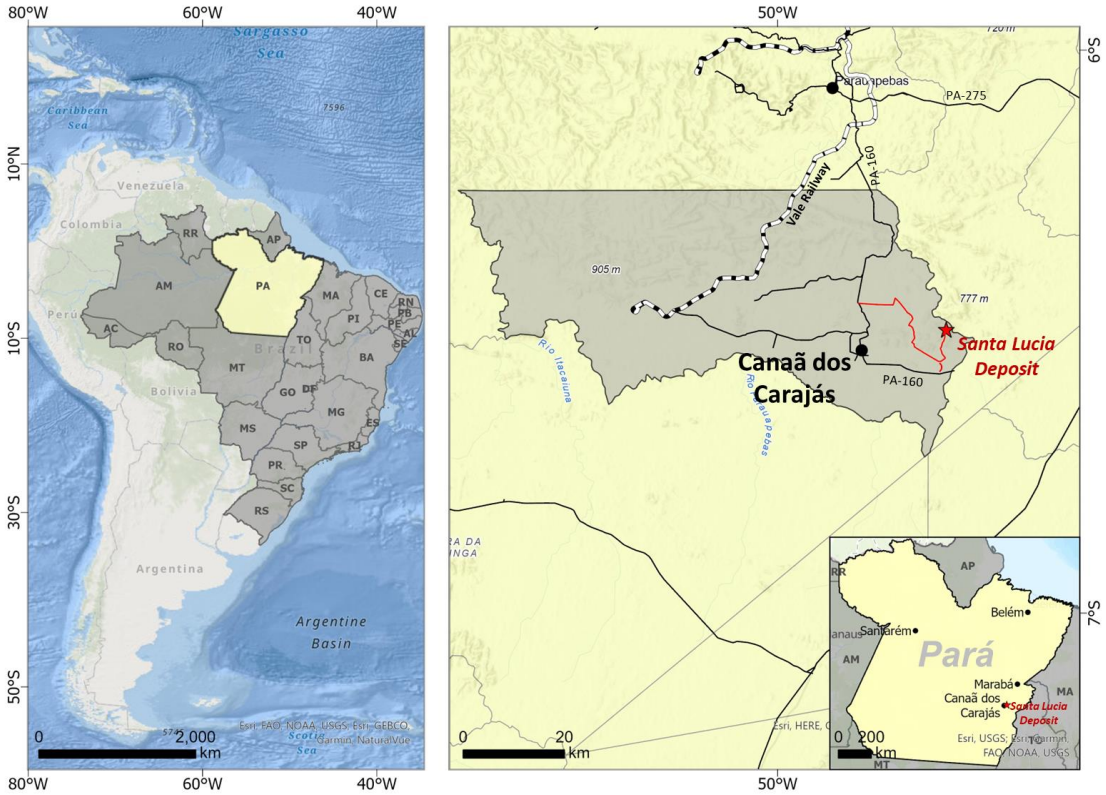


Figura 1.1- Localização da área de estudo no estado do Pará, principais municípios e acessos da região.

1.3. Materiais e métodos

Com a finalidade de alcançar os objetivos neste projeto, foram realizadas as seguintes etapas de trabalho. Os dados utilizados dentro desta pesquisa fazem parte do banco de dados do Serviço Geológico Brasil (SGB) e da Oz Minerals e incluem dados geofísicos aéreos e terrestres que recobrem o depósito Santa Lúcia, bem como dados de testemunhos de sondagem, geológicos e de perfilagem.

1.3.1. Trabalho de campo e amostragem

O trabalho de campo foi efetuado em uma campanha com 12 dias de duração, onde foi realizada a descrição dos testemunhos de furos dispostos em seções tipo representativas de depósito Santa Lúcia com o intuito de caracterizar as rochas encaixantes, hospedeiras, zonas de alteração hidrotermal e o minério. A coleta sistemática foi efetuada resultando em 1727 medições. A partir das medições efetuadas foram selecionadas amostras para a aquisição de dados petrográficos e litogeoquímicos dos furos de sondagem que seccionam a mineralização do depósito Santa Lúcia.

1.3.2. Dados aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria utilizados na pesquisa são provenientes dos levantamentos dos Projetos Aerogeofísicos Tucuruí e Rio Maria, com os códigos 1097 e 1129, respectivamente, ambos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG) em parceria com outras empresas. O levantamento do Projeto Tucuruí foi realizado entre 13 de abril e 13 de julho de 2010 na região centro-leste do Estado do Pará. Já o levantamento do Projeto Rio Maria ocorreu entre 24 de janeiro e 9 de novembro de 2014. Como os limites das áreas cobertas por ambos os levantamentos não abrangem completamente a área de estudo, foi necessário unir os dois bancos de dados para obter cobertura total do depósito Santa Lúcia e suas adjacências (Figura 1.2).

A cobertura completa da área relativa ao Projeto Aerogeofísico Tucuruí foi de aproximadamente 97.421 km lineares, com espaçamento entre linhas de voo de 500 m (direção NS) e 10.000 m para as linhas de controle (direção EW). Foram realizadas 328 linhas de voo (92.720,83 km) e 38 linhas de controle (4.700,15 km). A altura de voo do aerolevantamento foi fixada em 100 m (CPRM, 2010).

Para cobertura completa da área relativa ao Projeto Aerogeofísico Rio Maria, a cobertura foi de aproximadamente 118.201 km lineares, com

espaçamento entre linhas de voo de 500 m (direção NS) e 10.000 m para as linhas de controle (direção EW). 557 linhas de voo foram realizadas (112.516 km) e 39 linhas de controle (5.685 km). A altura de voo do aerolevantamento foi fixada em 100 m (CPRM, 2015).

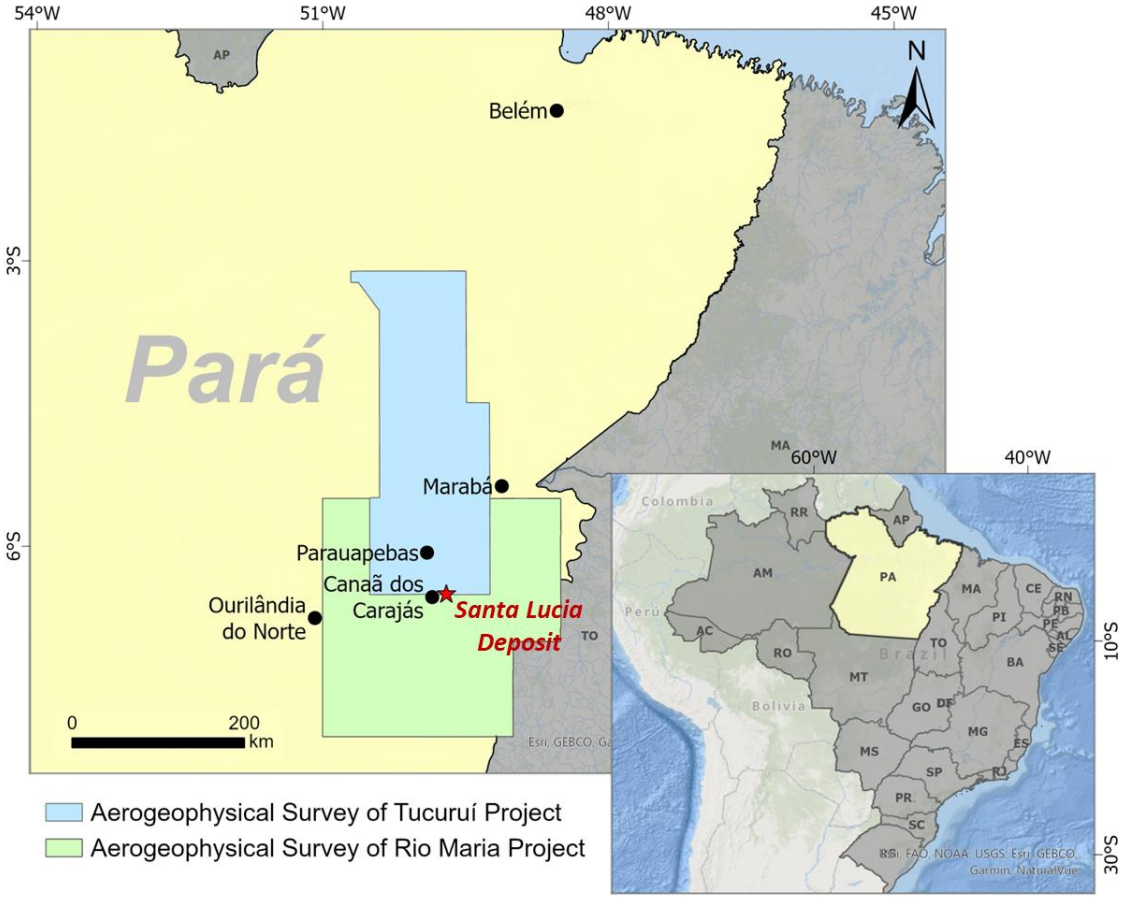


Figura 1.2- Localização dos polígonos dos levantamentos aerogeofísicos do Projeto Tucuruí e do Projeto Rio Maria, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, principais municípios do estado, além da área de estudo.

A interpolação dos dados magneticos foi realizada com o método bidirecional (*spline Akima*), e os gamaespectrométricos foram interpolados com o método curvatura mínima, 1/4 do espaçamento das linhas de voo, ou seja, uma célula de 125 metros de dentro *Oasis Montaj* versão 2022.2.

Os dados magnetométricos foram reduzidos do *Internacional Geomagnetic Reference* (IGRF) e foram gerados os seguintes produtos derivados do campo magnético anômalo: gradiente total (GT), 1ª derivada vertical (1DV), 2ª derivada vertical (2DV), gradiente horizontal total (GHT),

inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT).

Os mapas derivados de dados gamaespectrométricos foram elaborados a partir dos grids convertidos para concentração de radioelementos, sendo que o K em %, ppm para eU e eTh e µR/h para o canal de contagem total. A composição ternária foi realizada utilizando os padrões de cores **RGB** das concentrações dos elementos K (vermelho – ***R**ed*), eU (verde – ***G**reen*) e eTh (azul – ***B**lue*). A combinação das cores presentes no mapa ternário indica as principais variações de concentração entre os três elementos (APÊNDICE I)

1.3.2. Dados geofísicos terrestre

Os dados geofísicos terrestres foram coletados em escala de depósito e cobrem a área de estudo. Levantamentos de magnetometria, resistividade elétrica (DC), polarização induzida (IP) e eletromagnético no domínio do tempo (TDEM).

1.3.2.1. Levantamento magnetométrico

O levantamento foi executado através da contratada Geomag, no período de 19 a 22 de fevereiro de 2004. O levantamento foi realizado com um magnetômetro base e outro como móvel. Ambos os equipamentos efetuaram medidas do campo magnético total e são do modelo GSM-19.

A cobertura completa da área relativa do depósito Santa Lúcia e suas adjacências foi de aproximadamente 19,90 km lineares. A malha foi composta por 14 linhas, com comprimentos variando de 1,10 km até 1,55 km. O espaçamento entre as linhas variou entre 50 e 400 m na direção EW, e a distância das estações de medidas foi de 10 a 20 m.

No pré-processamento, os dados do levantamento magnetométrico foram corrigidos pelas variações magnéticas diurnas e, posteriormente, retirando os ruídos e spikes com o software *OASIS montaj - versões 4.3 e 5.0*, da GEOSOFT.

Para o reprocessamento e interpolação dos grids para esta dissertação, foi utilizado o software *Oasis Montaj versão 2022.2.*

A interpolação dos dados foi realizada com o método curvatura mínima, e, posteriormente, foi efetuada a remoção do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) e gerados os seguintes produtos derivados do campo magnético anômalo: gradiente total (GT), 1ª derivada vertical (1DV), 2ª derivada vertical (2DV), gradiente horizontal total (GHT), inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT).

O modelo magnético 3D dos dados de magnetometria terrestre foi obtido através da solução de inversão na nuvem VOXI Earth Modelling com a técnica Inversão do Vetor de Magnetização (MVI) disponível no software Oasis Montaj versão 2022.2. Essa técnica leva em consideração a magnetização induzida, remanência, desmagnetização e a anisotropia dos materiais magnéticos para calcular a amplitude e a direção dos domínios magnéticos presentes na área do levantamento (Ellis *et al*., 2012). A aplicação da técnica inversão Interativa Ponderada (IRI) em loop utiliza o modelo voxels ajustado de uma inversão como modelo inicial para a reponderação da próxima interação para a obtenção de um modelo mais refinado e focado (Seequent, 2024).

1.3.2.2. Levantamento de polarização induzida e resistividade

Os métodos elétricos de Resistividade e Polarização Induzida (IP) baseiam-se na injeção de corrente elétrica e na medição da diferença de potencial por meio de eletrodos de corrente e eletrodos de potencial, respectivamente. Durante o levantamento de resistividade, a corrente contínua (DC) é injetada no solo, e a resistividade é medida como parte da metodologia de aquisição de dados de IP. A polarização induzida é medida após o desligamento da corrente, registrando-se a queda de tensão ao longo do tempo, no domínio do tempo. Na interpretação dos modelos obtidos a partir da inversão desses dados, os resultados de resistividade e cargabilidade se complementam e são analisados em conjunto. (Dentith & Mudge, 2014).

O levantamento de DCIP realizando sobre o deposito Santa Lúcia utilizou o arranjo dipolo no domínio do tempo. O transmissor utilizado foi o Txll-5000, fabricado pela GDD Instrumentation, alimentado por um gerador CSM de 8,5kVA, com corrente injetada na faixa que variava de 0,1 A a 5 A. A recepção dos dados foi realizada pelo sistema ASIP que utilizou 31 canais simultâneos. Este sistema permite a coleta de dados de cargabilidade e resistividade elétrica, conectando um número ilimitado de eletrodos e realizando medições simultâneas, fabricado pela empresa AFC Geofísica (Costa *et al*., 2019). A empresa AFC Geofísica, contratada pela OZ Minerals, foi responsável pelo serviço de levantamento dos dados de DCIP, que ocorreu entre os dias 17/10/2022 e 23/11/2022. A cobertura completa da área relativa do depósito Santa Lúcia e suas adjacências foi de aproximadamente 9 km linear levantadas com o espaçamento entre linhas de 100 m e distância entre os eletrodos MN e AB de 50 m.

A medição cargabilidade começou aos 340 ms após o desligamento da corrente e foi concluída aos 1600 ms, permitindo a coleta de dados de decaimento de carga dentro desse período. O controle de qualidade dos dados QAQC foi realizado o software *TQIPdb*.

Para a modelagem das seções de Polarização Induzida (IP) e Resistividade no software RES2DINV, foram utilizados diversos parâmetros específicos para otimizar o processo de inversão. O cálculo do Jacobiano foi realizado através do método de otimização Gauss-Newton, garantindo maior precisão na solução do problema inverso. Optou-se pela inversão simultânea de resistividade e cargabilidade, o que permite a obtenção de seções integradas dessas duas propriedades em um único processo de inversão. Um fator de amortecimento (*damping*) de 0,1 foi definido para os dados de IP e número máximo de iterações foi limitado a 7. Além disso, os limites para o fator de *damping* do modelo foram definidos entre 0.4 (mínimo) e 2.5 (máximo), ajustando a suavidade aplicada ao modelo de resistividade e IP. O limite de convergência foi estabelecido em 5,0, indicando o ponto em que as variações no modelo se tornam pequenas o suficiente para não justificarem novas iterações e variação mínima do erro RMS foi fixada em 0.5%, garantindo um ajuste adequado entre

os dados observados e o modelo final. Esses parâmetros configuram uma abordagem otimizada para a inversão dos dados de resistividade e IP.

1.3.2.3. Levantamento eletromagnético no domínio do tempo

Os métodos eletromagnéticos no domínio do tempo, a mudança no campo magnético primário é produzida ao desligar ou ligar abruptamente uma corrente contínua (DC) através de um transmissor (Tx). Um pulso de corrente é induzido no condutor que está em subsuperfície. As correntes de Eddy circulam no condutor por um curto período e rapidamente decaem à medida que perdem energia, gerando um campo magnético secundário, esse campo decai com o tempo e é medido pelo receptor (Rx). A força e duração do campo secundário dependem das propriedades elétricas e da geometria do condutor, portanto, monitorar seu decaimento fornece informações sobre a condutividade do meio ou dos corpos condutores (Dentith & Mudge, 2014).

A força do campo magnético secundário é medida em função do tempo a partir do desligamento (turn-off) ou acionamento (turn-on) do campo primário, um período conhecido como tempo de atraso. Essas medições são organizadas em canais, que são numerados de acordo com o tempo de atraso, sendo os canais associado ao menor tempo de atraso (*early time*) e os últimos canais sendo os maiores tempo de atraso (*late time*). Na maioria dos sistemas, as medições são realizadas após o desligamento do pulso, quando o campo primário não está mais presente, e são chamadas de medições em *off-time* (Dentith & Mudge, 2014).

O levantamento de TDEM terrestre foi realizado com o modo de loop fixo ou estacionário com o sistema *off-time*. Quando o receptor se move sobre o terreno em estações de medidas no modo loop fixo, o levantamento é denominado *fixed loop transient electromagnetic* (FLTEM). Quando os dados são adquiridos com o receptor dentro do furo de sondagem no modo loop fixo, o levantamento é denominado *downhole transient electromagnetic* (DHTEM).

Primeiramente foi aplicado o levantamento de FLTEM, cobrindo depósito Santa Lúcia. A corrente contínua (DC) inserida no loop fixo para gerar com

campo magnético primário foi controlada e injetada pelo transmissor (Tx) EMIT SMARTx4. O campo magnético secundário foi detectado em três componentes (X, Y e Z) pelo receptor (Rx) EMIT magnetômetro fluxgate. As estações de medida foram planejadas em linhas E-W e a direção X do magnetômetro foi apontado para leste. A cobertura completa da área do levantamento totalizou 14,4 km lineares e ocorreu entre os dias 10/03/2021 e 21/04/2021, os dados foram adquiridos pela equipe de geofísica da OZ Minerals. A malha foi composta por 16 linhas, com comprimento de 0,9 km, espaçamento entre as linhas de 50 m e a distância das estações de medidas foi de 50 m. O tamanho do loop transmissor no formato retangular de 850 m x 500 m. A frequência base utilizada foi de 1 Hz, com uma forma de onda em pulso quadrado de 21 A e tempo de desligamento (turn-off) de 533 ms.

Para o levantamento de DHTEM, o levantamento foi realizado no furo 094. A corrente contínua (DC) inserida no loop fixo para gerar com campo magnético primário foi controlada e injetada pelo transmissor (Tx) EMIT SMARTx4. O campo magnético secundário foi detectado em três componentes (A, U e V) pelo receptor (Rx) EMIT Magnetômetro Fluxgate (Probe). As medições foram realizadas a cada 5 m dentro do furo de sondagem revestido com tubos plástico PVC 60 mm visando a segurança do equipamento. A cobertura completa da área do levantamento totalizou 153 m lineares perfilado e ocorreu entre os dias 08/07/2022 e 18/07/2022, os dados foram adquiridos pela equipe de geofísica da OZ Minerals. O tamanho do loop transmissor no formato quadrado de 300 m x 300 m. A frequência base utilizada foi de 1Hz, forma de onda um pulso quadrado com corrente de 31 A e o tempo de desligamento (turn-off) 373 ms.

A série temporal dos 36 canais, em ambos os levantamentos, foi dividida em três intervalos: canais 1 a 12 (early-time), canais 13 a 24 (mid-time) e canais 25 a 36 (late-time). As repostas condutivas presentes nos dados observados foram modeladas por meio de placas condutoras através do software *Maxwell versão 8.0*.

1.3.3. Dados Petrofísicos

Na mineração, os dados petrofísicos são utilizados para avaliar e caracterizar variações geológicas, incluindo alterações minerais causadas por mineralização (Dentith *et al.*, 2020). A utilização da petrofísica tem como objetivo compreender o comportamento das propriedades físicas de cada litologia e da mineralização que compõem um depósito, no caso o Santa Lúcia, para o entendimento das assinaturas geofísicas provenientes dos levantamentos eletromagnético (*FLEM/DHEM*), elétrico (IP e Resistividade) e magnetométrico.

A coleta dos dados petrofísicos pode ocorrer de duas maneiras, numa escala de campo (em afloramentos ou por meio da perfilagem geofísica), ou na escala de bancada (por meio de medidas laboratoriais das propriedades físicas em amostras de rochas e fluidos). Como o objetivo deste trabalho é entender o comportamento da composição e a textura do minério, os dados petrofísicos foram adquiridos nos testemunhos dos furos de sonda do alvo Santa Lúcia disponíveis no galpão da OZ Minerals na cidade de Canaã dos Carajás-PA.

O equipamento KT-10, fabricado pela TerraPlus, foi utilizado para as medições de susceptibilidade magnética, enquanto o Probe Magnetic Susceptibility and Conductivity Meter, fabricado pela GDD Instrumentation (MPP), foi utilizado para medir a resposta em alta frequência (HF) e a condutividade. A susceptibilidade magnética é indicada por um fator de 10^{-3} SI (Sistema Internacional de unidades) e o seu valor aumenta com a quantidade de materiais magnéticos na amostra. A resposta em alta frequência (HF) é medida em Hertz (Hz) e indica as variações de condutividade em alta frequência. O valor da resposta HF aumenta com a quantidade de material condutor presente na amostra. A condutividade é medida em (Mhos/m equivalente a S/m) e é independente da quantidade de material condutivo na amostra (Instrumentation GDD, 2023).

Durante o trabalho de campo desenvolvido no depósito Santa Lúcia, entre os dias 07/08/2022 e 19/08/2022, estabeleceu-se o procedimento para a aquisição de dados petrofísicos nos testemunhos de sondagem, levando em consideração o tamanho das zonas mineralizadas com base no contraste de

propriedade física, além do controle de qualidade das medidas. O tratamento dos dados petrofísicos foi realizado no software IOGAS 64 Geoscience Analytics System versão 8.0.

Foram selecionados nove furos representativos do depósito Santa Lúcia para a realização das 1727 medidas petrofísicas (Figura 1.3).



Figura 1.3 - Trabalho de campo para aquisição de dados petrofísicos e separação das amostras para análise química no galpão de testemunho do depósito Santa Lúcia na cidade de Canaã dos Carajás - PA.

Para as medidas densidade de uma amostra, o método utilizado baseia-se no princípio de Arquimedes. O princípio de Arquimedes, que afirma quando um objeto é submerso em um fluido, ele desloca um volume de fluido igual ao volume do objeto. A diferença de peso do objeto no ar e na água é igual ao peso do volume de água deslocado. O cálculo da densidade é realizado da seguinte forma, massa amostra no ar dividida pela diferença entre a massa da amostra no ar e a massa da amostra submersa na água, considerando a densidade da água 1g/cc (Sears e Zemansky, 1978). Os equipamentos utilizados são balança digital de precisão, pesos de calibração de 1kg, medidor de temperatura, bandejas de alumínio, suporte de plástico para o armazenamento da água e grade para sustentação das amostras.

1.3.4. Dados geoquímicos e petrográficos

As dosagens de elementos maiores, menores, traço e ETR de amostras coletadas a cada um metro nos testemunhos de sondagem e foram enviadas

para o Laboratório Comercial de Geoquímica ALS, onde foram feitas análise de rocha total para as amostras coletadas a cada um metro nos testemunhos de sondagem. Para as dosagens dos elementos maiores, menores, elementos traços, incluindo os elementos terras raras foi utilizado o método ME-MS61 (ICP – AES – MS), ouro por Fire Assay e determinação por AAS (Au - AA24) e minério de cobre de alto teor com ICP-AES ou AAS (Cu - OG62).

O tratamento dos dados geoquímicos foi realizado no software IOGAS 64 Geoscience Analytics System versão 8.0.

As análises petrográficas foram realizadas em amostras de rochas utilizando microscópio óptico, tanto em luz transmitida quanto em luz refletida. As descrições petrográficas incluem a identificação da textura e das assembleias mineralógicas diagnósticas da zona mineralizada dos processos relacionados à alteração hidrotermal (Anexo IV).

CAPÍTULO 2

Artigo Científico

2. GEOPHYSICAL AND PETROPHYSICAL FOOTPRINT OF THE SANTA LÚCIA DEPOSIT, CARAJÁS MINERAL PROVINCE.

RESUMO

Este trabalho aborda a caracterização das assinaturas geofísica e petrofísica do depósito de Cu-Au Santa Lúcia, localizado na região da Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás. A mineralização de Cu-Au ocorre em uma zona mineralizada com o minério variando de disseminado, tipo *string*, em matriz, brechado, semi-maciço e maciço. A análise dos dados geofísicos permitiu concluir que: a) os dados magnéticos regionais (1:100.000) e terrestres (1:10.000) não mostram contraste expressivo, indicando uma anomalia fracamente magnética nos dados terrestres; b) O modelo de inversão dos dados magnéticos terrestres indica que o minério do Santa Lúcia não apresenta contraste de suscetibilidade magnética; c) os métodos elétricos (IP) e eletromagnéticos (TDEM) mostram um forte contraste de cargabilidade e condutividade, permitindo a diferenciação de diferentes porções do ambiente mineralizado; d) o modelo de cargabilidade mapeia os sulfetos disseminados, mas respondeu apenas parcialmente aos sulfetos maciços; e) o modelo de resistividade desempenhou um papel mais eficaz na identificação das zonas mineralizadas, indicando que as anomalias são condutivas; f) os levantamentos eletromagnéticos do domínio do tempo terrestre (FLTEM) e *borehole* (DHTEM) possibilitaram a modelagem de placas condutoras, correspondentes às zonas ricas em sulfetos maciços com valores da ordem de 1.500 S de condutividade. Dados petrofísicos foram medidos sistematicamente em nove furos de sondagem e puderam ser agrupados em cinco classes que mostram contraste em termos das propriedades físicas das rochas. Foram obtidos dados de densidade, suscetibilidade magnética, condutividade e HF (*High Frequency*). Para analisar estas variações, dados petrográficos e geoquímicos foram analisados e integrados com os dados petrofísicos. Os resultados indicam que: a) a porção maciça da mineralização apresenta os maiores valores de condutividade, suscetibilidade magnética e densidade; b) as porções brechada e semi-maciça também mostram um contraste petrofísico, embora não tão expressivo quanto a zona maciça; c) as

rochas hospedeiras e as mineralizações disseminada, string e matriz mostram baixos valores de suscetibilidade magnética, densidade e condutividade. A interpretação e integração dos dados petrográficos, litogeoquímicos e petrofísicos apontam que: a) as variações de propriedades físicas estão relacionadas com a correlação entre minerais de sulfetos em termos de comportamento de massa, grão e textura; b) os principais minerais de sulfetos identificados no depósito Santa Lúcia são calcopirita, pirrotita e pirita; c) as zonas de mineralização maciça no depósito Santa Lúcia apresentaram contrastes petrofísicos de suscetibilidade magnética e condutividade, devido à associação de calcopirita com lamelas de pirrotita que aparecem em cristais/blastos localmente deformados, com alguns exibindo chamas de pentlandita ou inclusões de calcopirita e esfalerita; d) quando a pirrotita se transforma em pirita ou quando a pirita está inclusa na pirrotita, isso implica uma diminuição do contraste de suscetibilidade magnética, e o processo inverso da transformação da pirita em pirrotita monoclínica causa o aumento de suscetibilidade magnética; e) os valores de suscetibilidade magnética na ordem de 30×10^{-3} SI observados no minério maciço não são suficientes para gerar anomalias magnéticas nos levantamentos geofísicos magnetométricos no depósito Santa Lúcia; f) o forte contraste de densidade devido à presença dos sulfetos maciços indica que o levantamento gravimétrico gradiométrico pode ser uma ferramenta útil para mapear a zona de minério com alto teor de cobre no depósito Santa Lúcia. O entendimento do *footprint* geofísico e petrofísico do depósito Santa Lúcia abre portas para a exploração de depósitos que possuem assinaturas geofísicas mais complexas, requerendo diferentes metodologias geofísicas e petrofísicas para serem compreendidos.

Palavras-chave: Cobre, Assinatura Geofísica, Assinatura Petrofísica, Depósito Santa Lúcia, Província Mineral de Carajás.

2.1. Introdução

O cobre, um mineral crítico na atual transição energética, desempenha um papel essencial na eletrificação e na expansão das energias renováveis. A crescente demanda por este metal acentua a necessidade de explorar depósitos em subsuperfície, muitas vezes cegos e de difícil detecção. Dentre os depósitos mais expressivos no Brasil estão os da Provincia Mineral de Carajás e classificados como do tipo *iron oxide-copper-gold deposits* (IOCG). Como discutido por Skirrow (2022), a classificação dos depósitos IOCG é complexa e maioria dos depósitos IOCG se formam em ambientes tectônicos complexos, frequentemente associados a eventos tectono-metamórficos regionais e magmatismo bimodal. Ele propõe um novo framework para a classificação dos depósitos IOCG, destacando a importância de critérios geológicos, mineralógicos e geoquímicos. Por outro lado, diante dessa complexidade, é fundamental integrar dados geofísicos e petrofísicos na caracterização da assinatura de depósitos minerais.

Dentith *et al*., (2020) enfatizam a necessidade de utilizar uma abordagem integrada que combine geofísica e petrofísica para mapear e identificar depósitos minerais em subsuperfície. Essa abordagem é essencial para melhorar a precisão e a eficiência na exploração mineral, especialmente em ambientes geológicos complexos, onde os depósitos são mais difíceis de serem encontrados.

Na Provincia Mineral de Carajás, existem dois estudos de caso que ilustram a assinatura do depósito Furnas por Leão-Santos *et al*., (2015) e Melo *et al*., (2015) sobre a assinatura do depósito Cristalino. O depósito de Furnas, está hospedado em rochas metavulcânicas e intrusões graníticas, enquanto o depósito Cristalino está associado a rochas subvulcânicas riolíticas e intrusões de pegmatito, correlacionadas ao Grupo Grão Pará. O depósito de Furnas é notável por sua assinatura magnética e eletromagnética, enquanto o depósito Cristalino combina assinaturas magnéticas e geoquímicas complexas, refletindo a diversidade dos sistemas minerais na Província Mineral de Carajás.

O depósito de cobre-ouro (Cu-Au) Santa Lúcia, de idade neoarqueana, está localizado na porção sudeste do Domínio Carajás, nas adjacências da Serra

do Rabo. A mineralização está hospedada em subvulcânicas de composição riolítica, associadas ao Grupo Grão Pará, e é truncada por um corpo pegmatítico (Hunger et al., 2021). Dados disponíveis na literatura mostram que o depósito de Cu-Au Santa Lúcia representa um membro dos sistemas Cu-polimetálicos, diferenciando-se do estilo de mineralização dos principais depósitos de classe mundial de óxidos de ferro, inclusos no modelo IOCG (iron oxide-copper-gold deposits) (Hunger et al., 2021).

Dada a complexidade na detecção de novos alvos minerais, é chave desenvolver metodologias inovadoras para mapear e compreender a assinatura de sistemas minerais complexos, para gerar proxies que auxiliem no mapeamento de novos vetores exploratórios. Ou seja, o estudo da assinatura de novos depósitos fornecerá insights valiosos sobre a potencialidade inexplorada da Província Mineral de Carajás.

Frente ao exposto, a meta central deste artigo é mapear o *footprint* geofísico e petrofísico do depósito Santa Lúcia por meio do processamento de dados geofísicos, petrofísicos, litogeoquímicos e mineralógico, para mapear a assinatura do ambiente mineralizado dentro do sistema mineral polimetálico tipo Cu-Au da região da Serra do Rabo.

2.2. Contexto Geológico e Geofísico

2.2.1. Província Mineral de Carajás

A Província Mineral de Carajás é um dos núcleos cratônicos mais bem preservados do mundo (Figura 2.1a). Tectonicamente formado e estabilizado durante o Neoarqueano (Teixeira *et al.*, 1989; Tassinari 1996; Tassinari & Macambira 1999), ele consiste em dois domínios arqueanos: Rio Maria, ao sul, e Carajás, ao norte (Figura 2.1b), separados por uma descontinuidade tectônica regional e geofisicamente restrita E-W (Feio *et al.*, 2013).

No Domínio Carajás (Figura 2.1c), rochas do embasamento mais antigas incluem ortognaisses, TTGs gneissificados e migmatizados e ortogranulitos máficos de idade Mesoarqueana (2974 ± 15 Ma) do Complexo Xingu (Avelar *et al.*, 1999; Pidgeon *et al.*, 2000) e lentes de greenstone belts (Hirata *et al.*, 1982;

Araújo & Maia, 1991). Adicionalmente, granitos do Mesoarqueano (cerca de 3,0-2,83 Ga), como os tonalitos Bacaba e Campina Verde, a trondhjemito Rio Verde e os granitos Canaã dos Carajás, Cruzadão, Bom Jesus e Serra Dourada (Moreto *et al.*, 2011; Feio *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.* 2014), são considerados parte do embasamento. O Domínio Rio Maria é um terreno de idade Mesoarqueana, composto por suítes TTG, rochas do tipo greenstone belt com idades entre 2,97-2,90 Ga (Moreto *et al.*, 2015b)

Sequências vulcano-sedimentares do Neoarqueano (cerca de 2,76-2,74 Ga) do Supergrupo Itacaiúnas (Wirth *et al.*, 1986; DOCEGEO 1988; Machado *et al.*, 1991) sobrepõem as rochas do embasamento do Domínio Carajás. O Supergrupo Itacaiúnas é subdividido em quatro unidades: Grupos Igarapé Salobo, Grão Pará, Igarapé Bahia e Igarapé Pojuca (DOCEGEO, 1988). Tavares *et al.*, (2018) dividiram o Supergrupo Itacaiúnas em três sequências, a inferior formada por metabasaltos e metariolitos da Formação Parauapebas, seguida pelos formação ferríferas bandadas (BIFs) da Formação Carajás, enquanto a superior é formada por unidades sedimentares clásticas misturadas com rochas vulcânicas da Formação Igarapé Cigarra.

A Formação Águas Claras, acima de uma discordância angular, sobrepõe o Supergrupo Itacaiúnas e representa uma cobertura siliciclástica arqueana não metamorfizada. Essa formação é composta principalmente por arenitos, siltitos e ortoconglomerados depositados em ambientes fluviais a rasos marinhos (Nogueira *et al.*, 1995).

Três episódios principais de intrusão granítica foram identificados no Domínio Carajás, representados por corpos intrusivos que cortam tanto sequências supracrustais quanto rochas do embasamento mesoarqueano: (i) granito sintectônico, foliado, subalcalino e calcialcalino do tipo A, com cerca de 2,76-2,73 Ga, composto pelas suítes Plaquê, Planalto, Estrela, Serra do Rabo, Igarapé-Gelado e Pedra Branca (Avelar *et al.*, 1999; Huhn *et al.*, 1999; Barros *et al.*, 2004; Sardinha *et al.* 2006; Feio *et al.* 2012, 2013); (ii) granito peralcalino a metaluminoso, com cerca de 2,57 Ga, representado pelos granitos Velho Salobo, Itacaiúnas e GT-46 (Machado *et al.*, 1991; Souza *et al.*, 1996; Toledo *et al.*, 2019); e (iii) granito alcalino do tipo A a subalcalino e metaluminoso a

ligeiramente peraluminoso, com cerca de 1,88 Ga, da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás (granitos Central de Carajás, Novo Salobo, Cigano, Pojuca, Breves e Rio Branco) (Machado *et al.*, 1991; Tallarico *et al.*, 2004).

Sobre as unidades Neoproterozoicas, uma sequência transgressiva-regressiva foi depositada no Paleoproterozoico (2,37-2,06 Ga), a parte inferior da sequência é formada pela Formação Azul sobreposta por arenitos e conglomerados da Formação Águas Claras (Araújo Filho *et al.*, 2020).

Pelo menos três modelos tectônicos foram propostos para explicar a evolução do Domínio Carajás: (i) a criação de uma bacia de pull-apart (Bacia de Carajás) durante uma fase de transtensão dextral, subsequentemente invertida tectonicamente em estruturas de flor positiva por meio de transpressão sinistral (Araújo *et al.*, 1988); (ii) formação durante o processo de rifteamento continental associado à atividade de plumas mantélicas (Tallarico, 2003); e (iii) a formação em um ambiente de arco vulcânico relacionado a processos de subducção (Meirelles, 1986; Dardenne *et al.*, 1988; Meirelles & Dardenne, 1991; Teixeira, 1994; Lobato *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2010).

Segundo Tavares *et al.* (2018), a repetição de eventos colisionais-extensionais, ocorridos desde o Neoarqueano (2,76-2,52 Ga) até o Paleoproterozoico (2,09-1,88 Ga), possibilitou o desenvolvimento de um sistema ligado ao rifte e à subsequente formação de sequências vulcano-sedimentares no Domínio Carajás. Este processo evoluiu sobre um substrato de embasamento que já estava estabilizado anteriormente, por volta de 2,87 a 2,83 Ga.

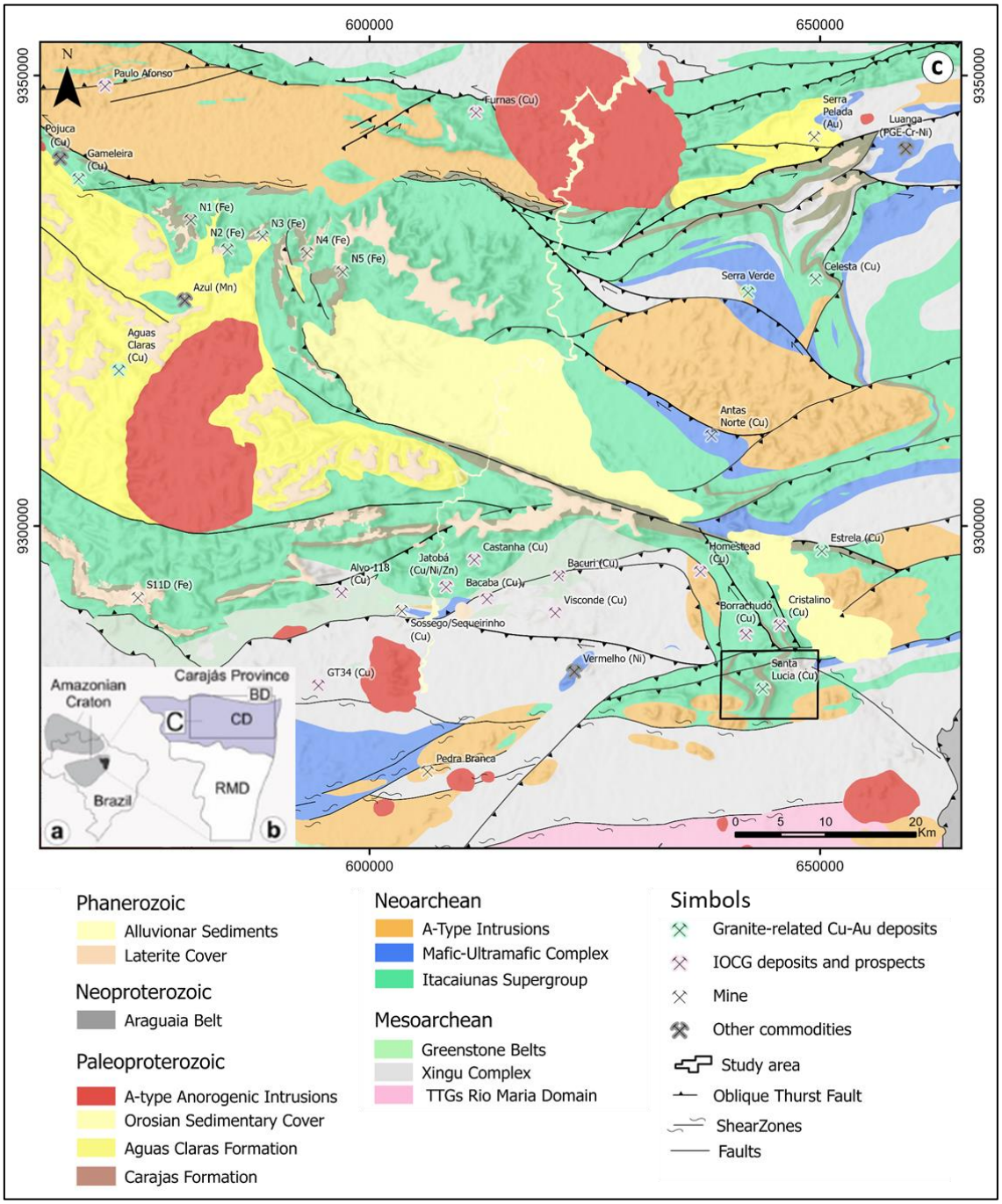


Figura 2.1 - (a) Localização da Província Mineral de Carajás (preto) dentro do Cráton Amazônico (cinza claro), Brasil. (b) Compartimentação da Província de Carajás em domínio Rio Maria (sul) e domínio Carajás (norte), limitado ao norte pelo Domínio Bacajá. (c) Mapa geológico simplificado do Domínio Carajás. O retângulo preto mostra a localização do depósito de Santa Lúcia. Modificado de Costa *et al.*, (2016).

2.2.2. Geologia do Depósito Santa Lúcia

O depósito de cobre e ouro de Santa Lúcia está localizado na sul-sudeste da Serra do Rabo e está hospedado em vulcânicas de composição riolítica do Grupo Grão Pará (Hunger *et al*., 2021) (Figura 2.2a). A composição ternária RGB (KeTheU) realça anomalias com altos teores dos três radioelementos e que correspondem as rochas de composição riolítica mapeadas como Suite Planalto. Estas rochas estão milonitizadas, alteradas hidrotermalmente e são cortadas por um corpo pegmatítico (Figuras 2.2a e 2.2c).

Pinheiro (1997) e Pinheiro & Holdsworth (2000) descreveram a configuração estrutural da Serra do Rabo, destacando a complexidade tectônica da região. Os dados mostram uma estrutura regional com tendência WNW-ESE que se ramifica para o sul em falhas NW-SE. Essa configuração estrutural complexa, provavelmente, resultou de eventos tectônicos que afetaram as formações ferríferas, influenciando significativamente a migração e a concentração de fluidos hidrotermais essenciais para a formação e enriquecimento das formações ferríferas durante o Neoarqueano e Paleoproterozoico. O depósito de Santa Lúcia está localizado em um vale entre dois platôs de formações ferríferas bandadas orientados S45E e S45W e bem marcados no gradiente total do campo magnético anômalo (Figuras 2.2a e 2.2b).

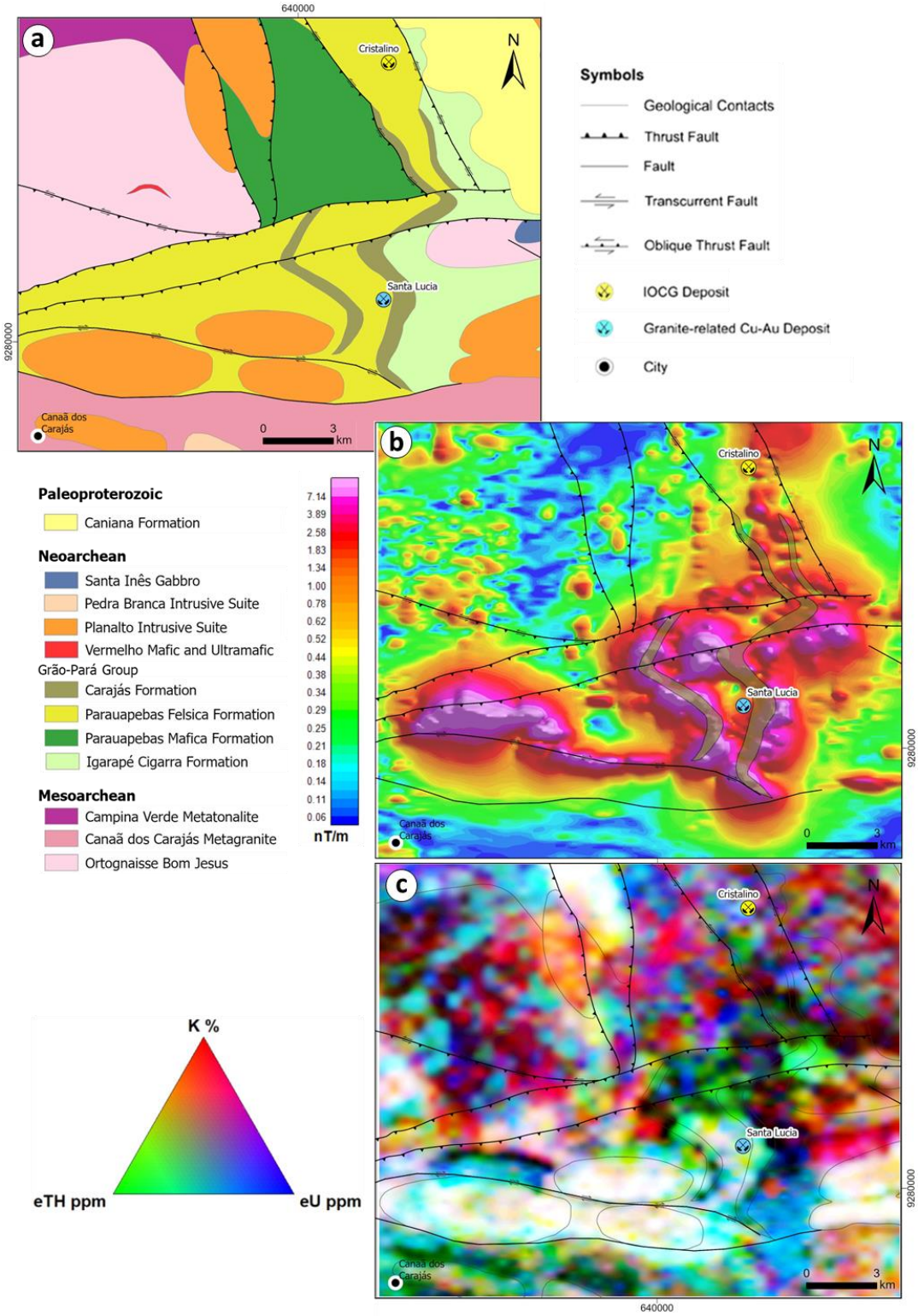


Figura 2.2 - (a) Mapa geológico simplificado da área do depósito Santa Lúcia (Modificado de Costa et al., 2016). As figuras a seguir mostram produtos derivados de dados aerogeofísicos com espaçamento 500 metros, a saber: (b) Gradiente total do campo magnético anômalo e (c) Composição ternária RGB (K, eTh e eU)

A evolução paragenética no depósito de Santa Lúcia envolve uma fase inicial de alteração clorítica, seguida por alteração potássica com microclina, greisenização (quartzo-moscovita-turmalina), precipitação de minério de cobre e ouro, e formação tardia de veios de sericita e preenchimento de fraturas por hematita. A mineralização de cobre é dominada por brechas de calcopirita-esfalerita-pirrotita-pentlandita-pirita, que estão espacialmente associadas à alteração tipo greisen e caracterizadas pelo enriquecimento de elementos terras raras leves (LREE), níquel, cobalto e cromo (Hunger *et al*., 2021).

No total, foram identificados cinco estágios de alteração hidrotermal em Santa Lúcia, sendo o primeiro caracterizado por uma fase inicial de alteração clorítica, seguida por alteração potássica com microclina. Posteriormente, ocorre uma intensa greisenização, com precipitação de quartzo, moscovita e turmalina, seguida pela mineralização de cobre-ouro. O último estágio envolve a formação tardia de veios de sericita e hematita, além do preenchimento de fraturas (Hunger *et al.*, 2021).

A mineralização de Cu-Au ocorre em zonas de brecha hospedada na rocha subvulcânica e subordinadamente associada com veios de quartzo leitoso ou disseminada. Corpos de sulfeto maciço e brechas associadas correspondem a alto teor (Cpy, Py, ±Sph, ±Po) com a matriz associada comumente com allanita, biotita, carbonato, clorita, fluorapatita, quartzo, moscovita e turmalina. A brechas sulfetadas são suportadas pela matriz e algumas zonas por clastos que são derivados da rocha hospedeira, afetadas por alteração clorítica e potássica, e com cristais de quartzo leitoso.

A zona mineralizada do depósito Santa Lúcia exibe uma variedade de estilos com variações, texturais e mineralógicas, que permite classificá-la da seguinte forma (Figura 2.3):

- minério disseminado (M-MZds) que ocorre disseminado na rocha subvulcânica (Figura 2.3a);
- minério tipo *string* (M-MZst), com ocorrência de mineralização dentro de pequenos veios e fraturas (Figura 2.3b);

- minério em matriz (M-MZmx, esta zona exibe uma mineralização disseminada, mas com uma proporção significativa de minerais de minério incrustados na matriz da rocha hospedeira (Figura 2.3c);
- minério brechado (M-MZbx), onde a mineralização está associada a zonas de brechas (Figura 2.3d);
- minério semi-maciço (M-MZsm) é caracterizado com uma proporção de 15-60% de calcopirita (Figura 2.3e);
- minério maciço (M-MZm) representa porções da zona mineralizada com uma proporção maior que 60% de Calcopirita: (Figura 2.3f).

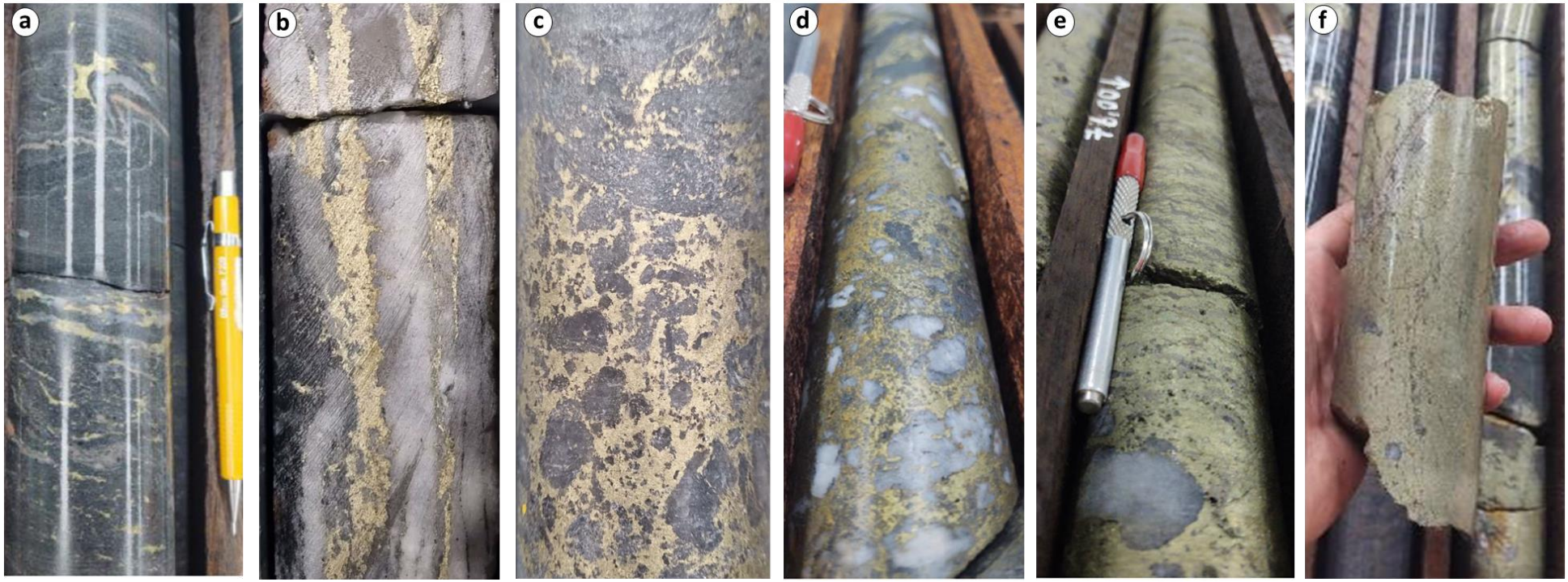


Figura 2.3 – Estilos de mineralização do depósito Santa Lúcia. (a) minério disseminado, (b) minério tipo string, (c) minério em matriz, (d) minério brechado, (e) minério semi-maciço e (f) minério maciço.

2.3. Materiais e Métodos

2.3.1. Levantamento Magnetométrico

Os dados aerogeofísicos de magnetometria utilizados na pesquisa são provenientes dos levantamentos dos Projetos Aerogeofísicos Tucuruí e Rio Maria, com os códigos 1097 e 1129, respectivamente, ambos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG) (localização dos polígonos dos levantamentos aerogeofísicos, Apêndice A). Ambos os levantamentos tem o espaçamento entre linhas de voo de 500 m (direção NS) e altura de voo do aerolevantamento foi fixada em 100 m. A interpolação dos dados de magnetometria foi realizada com o método bidirecional (S*pline Akima*).

O levantamento magnetométrico terrestre foi realizado com um magnetômetro base e outro como móvel. Ambos os equipamentos efetuaram medidas do campo magnético total e são do modelo GSM-19. A cobertura completa da área relativa do depósito Santa Lúcia e suas adjacências foi de aproximadamente 19,90 km lineares. A malha foi composta por 14 linhas, com comprimentos variando de 1,10 km até 1,55 km. O espaçamento entre as linhas variou entre 50 e 400 m na direção EW, e a distância das estações de medidas foi de 10 a 20 m (mapa com a localização das linhas do levantadas, Apêndice B). A interpolação dos dados foi realizada com o método curvatura mínima, pois apresentou os melhores resultados.

Para processamento e interpolação dos grids dos dados aéreos e terrestre, foi utilizado o software *Oasis Montaj versão 2022.2.* Os dados magnetométricos forma reduzidos do IGRF e foram gerados os seguintes produtos derivados: gradiente total (GT), 1ª derivada vertical (1DV), 2ª derivada vertical (2DV), gradiente horizontal total (GHT), inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT) (Apêndice III).

O modelo magnético 3D dos dados de magnetometria terrestre foi obtido através da solução de inversão na nuvem VOXI Earth Modelling com a técnica Inversão do Vetor de Magnetização (MVI) disponível no software Oasis Montaj

versão 2022.2. Essa técnica leva em consideração a magnetização induzida, remanência, desmagnetização e a anisotropia dos materiais magnéticos para calcular a amplitude e a direção dos domínios magnéticos presentes na área do levantamento (Ellis et al.., 2012). A aplicação da técnica inversão Interativa Ponderada (IRI) em loop utiliza o modelo voxels ajustado de uma inversão como modelo inicial para a reponderação da próxima interação para a obtenção de um modelo mais refinado e focado (Seequent, 2024).

Como entrada para inversão do Vetor de Magnetização (MVI) foi utilizando o grid do campo magnético anômalo (CMA). A malha escolhida para a modelagem 3D tem células com dimensões de 25 x 25 x 12,5 metros nas direções x, y e z e a inversão utilizou a restrição do IRI configurado com fator 2 positivo. É importante definir um valor de erro para o desvio padrão, que normalmente não é previamente conhecido para dados de campo. Nesse caso, o valor foi determinado como 5% da amplitude dos dados 9,03 nT, sendo que os dados residuais apresentaram um desvio padrão de 9,047 nT, que é muito próximo do valor definido. A inversão do Vetor Magnetização gerou três voxels como saída: componente de amplitude (Ampl), componente perpendicular (Eperp) e componente projetada (Eproj), na qual foi utilizando neste trabalho a componente de amplitude (Ampl).

2.3.2. Levantamento de Polarização Induzida e Resistividade

Os métodos elétricos de Resistividade e Polarização Induzida (IP) baseiam-se na injeção de corrente elétrica e na medição da diferença de potencial por meio de eletrodos de corrente e eletrodos de potencial, respectivamente.

O levantamento de DCIP realizando sobre o deposito Santa Lúcia utilizou o arranjo dipolo no domínio do tempo. O transmissor utilizado foi o Txll-5000, fabricado pela GDD Instrumentation, alimentado por um gerador CSM de 8,5kVA, com corrente injetada na faixa que variava de 0,1 A a 5 A. A recepção dos dados foi realizada pelo sistema ASIP que utilizou 31 canais simultâneos. Este sistema permite a coleta de dados de cargabilidade e resistividade elétrica,

conectando um número ilimitado de eletrodos e realizando medições simultâneas, fabricado pela empresa AFC Geofísica (Costa *et al*., 2019).

A empresa AFC Geofísica foi contrada pela OZ Minerals para realizar o levantamento de DCIP sobre área relativa do depósito Santa Lúcia e suas adjacências, aproximadamente 9 km linear levantadas com o espaçamento entre linhas de 100 m e distância entre os eletrodos MN e AB de 50 m (mapa de localização da malha de DCIP, Apêndice II).

A medição cargabilidade começou aos 340 ms após o desligamento da corrente e foi concluída aos 1600 ms, permitindo a coleta de dados de decaimento de carga dentro desse período. O controle de qualidade dos dados QAQC foi realizado o software *TQIPdb*. Para a modelagem das seções de Polarização Induzida (IP) e Resistividade no software RES2DINV, foram utilizados diversos parâmetros específicos para otimizar o processo de inversão. O cálculo do Jacobiano foi realizado através do método de otimização Gauss-Newton, garantindo maior precisão na solução do problema inverso. Optou-se pela inversão simultânea de resistividade e cargabilidade, o que permite a obtenção de seções integradas dessas duas propriedades em um único processo de inversão. Um fator de amortecimento (*damping*) de 0,1 foi definido para os dados de IP e número máximo de iterações foi limitado a 7. Além disso, os limites para o fator de *damping* do modelo foram definidos entre 0.4 (mínimo) e 2.5 (máximo), ajustando a suavidade aplicada ao modelo de resistividade e IP. O limite de convergência foi estabelecido em 5,0, indicando o ponto em que as variações no modelo se tornam pequenas o suficiente para não justificarem novas iterações e variação mínima do erro RMS foi fixada em 0.5%, garantindo um ajuste adequado entre os dados observados e o modelo final. Esses parâmetros configuram uma abordagem otimizada para a inversão dos dados de resistividade e IP.

2.3.3. Levantamento eletromagnético no domínio do tempo (TDEM)

O levantamento de TDEM terrestre foi realizado com o modo de loop fixo ou estacionário com o sistema *off-time*. Quando o receptor se move sobre o

terreno em estações de medidas no modo loop fixo, o levantamento é denominado *fixed loop transient electromagnetic* (FLTEM). Quando os dados são adquiridos com o receptor dentro do furo de sondagem no modo loop fixo, o levantamento é denominado *downhole transient electromagnetic* (DHTEM) (Dentith & Mudge, 2014).

Primeiramente foi aplicado o levantamento de FLTEM, cobrindo depósito Santa Lúcia. A corrente contínua (DC) inserida no loop fixo para gerar com campo magnético primário foi controlada e injetada pelo transmissor (Tx) EMIT SMARTx4. O campo magnético secundário foi detectado em três componentes (X, Y e Z) pelo receptor (Rx) EMIT magnetômetro fluxgate. As estações de medida foram planejadas em linhas E-W e a direção X do magnetômetro foi apontado para leste. A cobertura completa da área do levantamento totalizou 14,4 km lineares os dados foram adquiridos pela equipe de geofísica da OZ Minerals. A malha foi composta por 16 linhas, com comprimento de 0,9 km, espaçamento entre as linhas de 50 m e a distância das estações de medidas foi de 50 m. O tamanho do loop transmissor no formato retangular de 850 m x 500 m. A frequência base utilizada foi de 1 Hz, com uma forma de onda em pulso quadrado de 21 A e tempo de desligamento (turn-off) de 533 ms.

Para o levantamento de DHTEM, o levantamento foi realizado no furo 094. A corrente contínua (DC) inserida no loop fixo para gerar com campo magnético primário foi controlada e injetada pelo transmissor (Tx) EMIT SMARTx4. O campo magnético secundário foi detectado em três componentes (A, U e V) pelo receptor (Rx) EMIT Magnetômetro Fluxgate (Probe). As medições foram realizadas a cada 5 m dentro do furo de sondagem que totalizou 153 m lineares perfilado. O tamanho do loop transmissor no formato quadrado de 300 m x 300 m. A frequência base utilizada foi de 1Hz, forma de onda um pulso quadrado com corrente de 31 A e o tempo de desligamento (turn-off) 373 ms (mapa de localização da malha de FLTEM, localização do loop e o furo 094-DHTEM, Apêndice II).

A série temporal dos 36 canais, em ambos os levantamentos, foi dividida em três intervalos: canais 1 a 12 (early-time), canais 13 a 24 (mid-time) e canais 25 a 36 (late-time). As repostas condutivas presentes nos dados observados

foram modeladas por meio de placas condutoras através do software *Maxwell versão 8.0*. (exemplo da modelagem de placas com os dados de DHTEM, Apêndice D).

2.3.4. Dados Petrofísicos

A coleta dos dados petrofísicos foi realizada em 09 furos de sondagem estratégicos, com um espaçamento de 50 em 50 cm, que pode ser reduzido para intervalos de 10 em 10 cm, dependendo da espessura das zonas mineralizadas (casos hipotéticos para a escolha do intervalo de medidas, Apêndice D).

Os equipamentos KT-10, fabricado pela TerraPlus, e Probe Magnetic Susceptibility and Conductivity Meter, fabricado pela GDD Intrumentation (MPP), foram utilizados para as medidas de susceptibilidade magnética, resposta HF e condutividade. A susceptibilidade magnética é indicada por um fator de 10^{-3} SI (Sistema Internacional de unidades) e o seu valor aumenta com a quantidade de materiais magnéticos na amostra. A resposta HF é a medida do condutor em Hertz (Hz), ele mede as variações de alta frequência e o seu valor aumenta com a quantidade de material condutor na amostra. A condutividade é medida em (Mhos/m equivalente a S/m) e é independente da quantidade de material condutivo na amostra (Instrumentation GDD, 2023).

Para as medidas densidade foi aplicado o princípio de Arquimedes e utilizou-se uma balança digital de precisão, pesos de calibração de 1kg, medidor de temperatura, bandejas de alumínio, suporte de plástico para o armazenamento da água e grade para sustentação das amostras.

O tratamento dos dados petrofísicos foi realizado no software IOGAS 64 Geoscience Analytics System versão 8.0.

2.3.5. Dados Geoquímicos e Mineralógicos

As dosagens de elementos maiores, menores, traço e ETR de amostras coletadas a cada um metro nos testemunhos de sondagem e foram enviadas para o Laboratório Comercial de Geoquímica ALS, onde foram feitas análise de

rocha total para as amostras coletadas a cada um metro nos testemunhos de sondagem. Para as dosagens dos elementos maiores, menores, elementos traços, incluindo os elementos terras raras foi utilizado o método ME-MS61 (ICP – AES – MS), ouro por Fire Assay e determinação por AAS (Au - AA24) e minério de cobre de alto teor com ICP-AES ou AAS (Cu - OG62).

As análises petrográficas foram realizadas em amostras de rochas utilizando microscópio óptico, tanto em luz transmitida quanto em luz refletida. As descrições petrográficas incluem a identificação da textura e das assembleias mineralógicas diagnósticas da zona mineralizada dos processos relacionados à alteração hidrotermal.

2.4. Resultados

2.4.1. Magnetometria

Em escala regional (1:100.000), o depósito Santa Lucia não apresenta contraste de anomalia magnética. As anomalias magnéticas visualizadas no mapa de gradiente total do campo magnético anômalo (Figura 2.4a) estão associadas às formações ferríferas bandadas, referentes aos platôs S45E e S45W, localizados nas proximidades do depósito. No entanto, a realização de um levantamento em escala de depósito foi crucial para a análise da assinatura magnética, uma vez que as fortes anomalias magnéticas da Formação Carajás poderiam mascarar outras de menor intensidade, mesmo com a aplicação de filtragens convencionais durante o processamento.

Em escala de depósito (1:10.000), o levantamento magnético terrestre está em escala de depósito, com uma malha mais densa de 50 m entre linhas sobre a área do depósito. Os resultados do mapa do gradiente total (Figura 2.4b) revelam que as anomalias magnéticas não coincidem com o depósito Santa Lúcia. As anomalias presentes nos dados terrestres corroboram os resultados do levantamento aéreo, indicando que o depósito não apresenta um contraste nos dados magnéticos em escala regional e de deposito. No entanto, observam-se fracas anomalias nas bordas do depósito, especialmente nas porções E, SE

e NE, que podem estar relacionadas a borda da formação Carajás, gerando anomalias de alta frequência em pequenos corpos mais rasos na subsuperfície.

Os resultados obtidos na inversão do Vetor Magnetização (MVI) da componente de amplitude (Ampl) indica que a zona mineralizada do depósito Santa Lúcia não apresenta contraste de susceptibilidade magnética, conforme demonstrado na figura 2.4c. Quando se realiza um corte no modelo 3D MVI ao longo do meio do depósito (Figura 2.4d), observa-se que a zona mineralizada possui valores próximos a $3{,}7 \times 10^{-3}$ SI, evidenciando a ausência de minerais ferromagnéticos no minério do depósito Santa Lúcia.

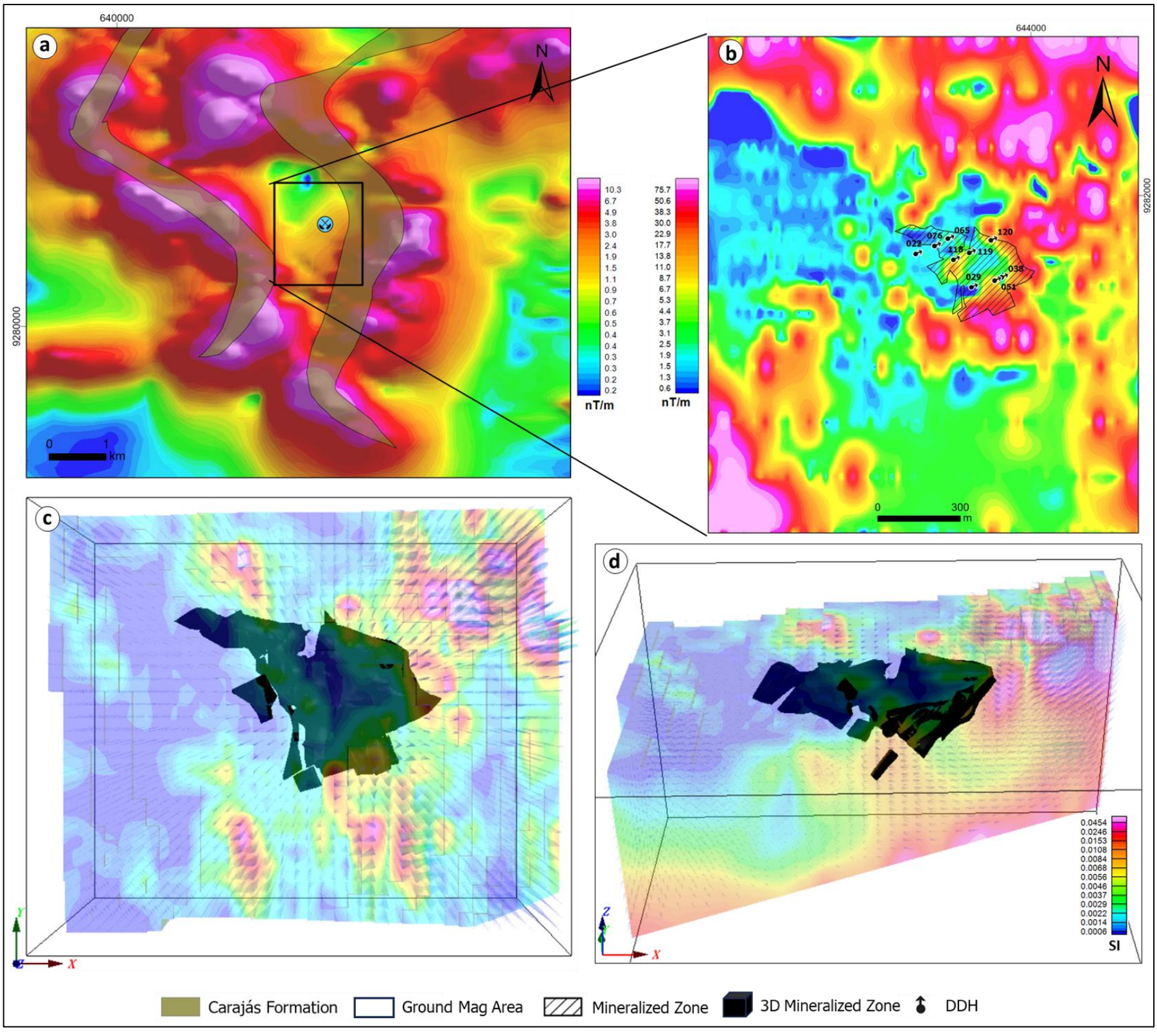


Figura 2.4 – Resultados do processamento dos dados magnetométricos. (a) Mapa do gradiente total (Projetos Aerogeofísicos Tucuruí e Rio Maria). (b) Mapa do gradiente total derivados dos dados do levantamento magnetométrico terrestre com a localização da zona mineralizada e os furos em que foram adquiridas as medidas petrofísicas do depósito Santa Lúcia. (c) Visualização 3D em planta do modelo MVI da componente de amplitude (Ampl) e a zona mineralizada. (d) Visualização 3D com corte no meio do depósito Santa Lúcia do modelo de modelo MVI da componente de amplitude (Ampl) e da zona mineralizada.

2.4.2. Inversão de Dados de IP e Resistividade

A inversão dos dados de polarização induzida (IP) e resistividade (DC) utilizando o arranjo dipolo-dipolo resultou na obtenção dos modelos de cargabilidade e resistividade, cujas seções abrangem o depósito Santa Lúcia.

A partir dos modelos em seções de resistividade e cargabilidade, utilizando o método de interpolação do inverso da distância 3D, foi possível gerar uma seção horizontal a 50 metros de profundidade. A visualização em mapa da seção horizontal dos modelos de cargabilidade revela uma anomalia de maior intensidade na porção central do depósito, com valores superiores a 30 mV/V (Figura 2.5a).

A análise da seção do modelo de cargabilidade, localizada na porção central do depósito, indica que a anomalia de IP está razoavelmente correlacionada com a mineralização de sulfetos conhecidos, principalmente o minério de baixo teor de Cu, que se encontra na porção mais rasa. Entretanto, a zona de minério com alto teor de Cu não é bem delineada pela cargabilidade. De maneira geral, a cargabilidade está correlacionada com os sulfetos disseminados, mas responde apenas parcialmente aos sulfetos maciços (Figura 2.5b).

A visualização em mapa da seção horizontal dos modelos de resistividade revela a presença de anomalias condutivas com maior intensidade também na porção central do depósito de Santa Lúcia, apresentando valores de resistividade abaixo de 200 ohm.m (Figura 2.5c). Os modelos de resistividade desempenham um papel muito mais eficaz na identificação das zonas mineralizadas, indicando que as anomalias são moderadamente condutivas. Ao contrário da resposta da cargabilidade, as anomalias condutivas mapeiam de maneira mais precisa as zonas de minério de baixo teor e as de alto teor de Cu, intensificando o contraste de condutividade onde estão localizadas as zonas de sulfetos maciços (Figura 2.5d).

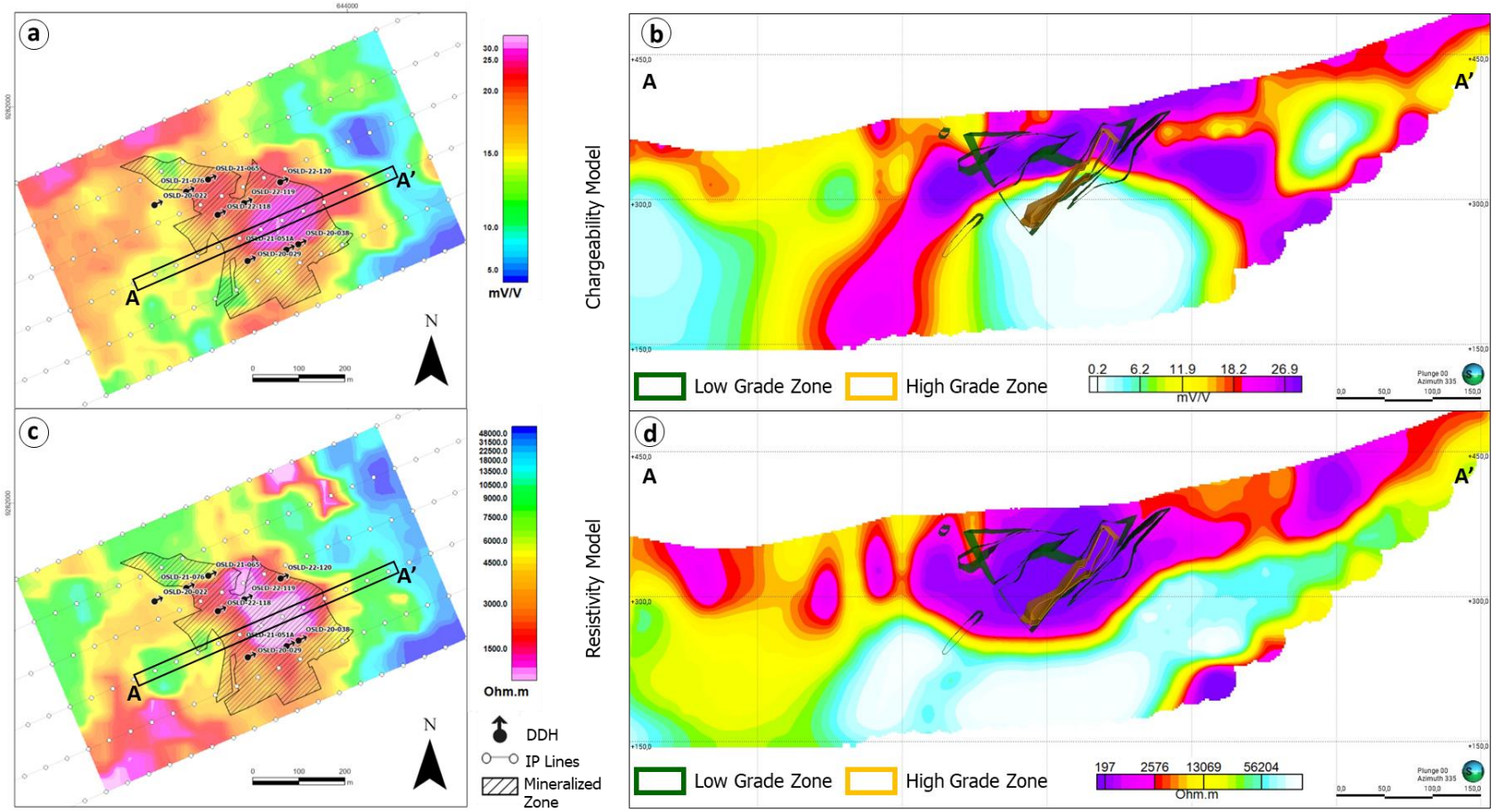


Figura 2.5 – Resultados de IP e Resistividade. (a) Mapa da seção horizontal em 50 m de profundidade dos modelos de cargabilidade com zona mineralizada. (b) Modelo invertido de cargabilidade localizado na porção central do deposito com a zona mineralizada. (c) Mapa da seção horizontal dos modelos de resistividade com zona mineralizada. (d) Modelo invertido de resistividade localizado na porção central do deposito com a zona mineralizada.

2.4.3. Modelagem de Dados Eletromagnéticos no Domínio do tempo

O resultado obtido por meio dos dados derivados do levantamento eletromagnético terrestre no domínio do tempo (TDEM), utilizando um loop transmissor fixo (FLTEM), revela uma marcante correlação entre a mineralização e as anomalias condutivas. A resposta eletromagnética manifesta-se nas três componentes (x, y e z) ao longo das diferentes janelas de tempo: inicial (*early time*), intermediária (*mid time*) e tardia (*late time*). As placas condutoras foram especialmente modeladas durante nos períodos *mid time e late time*, devido à expressiva condutividade presente no depósito.

A anomalia destacada no mapa da interpolação do canal 20 da componente Z reflete com precisão a localização da região mais condutiva do depósito, que corresponde à porção central do minério de Santa Lúcia. É nessa área central que as principais placas eletromagnéticas foram modeladas, conforme ilustrado na figura 2.6a.

Ao todo, foram modeladas cinco placas condutoras, sendo três no *mid time*, com condutâncias variando entre 182 e 486 S, e duas no *late time*, com condutâncias variando entre 4.115 e 6.515 S. As configurações desses condutores estão resumidas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Configurações dos condutores de FLTEM modelados no depósito Santa Lúcia.

Model	Modeled Channels	Dip (°)	Dip Dir (°)	Strike Length (m)	Depth Extent (m)	CT (S)
Plate1	Mid	55	245	60	50	300
Plate2	Mid	30	222.5	100	133	486
Plate3	Mid	40	222.5	70	80	182
Plate4	Late	40.05	222.5	55	134	6515
Plate5	Late	40.05	222.5	50	80	4115

As placas condutoras modeladas no *late time* exibem fortes condutividades, encontram-se em camadas mais profundas e estão situadas nas proximidades das zonas de sulfetos maciços (Figura 2.6b). Por outro lado, as placas modeladas no *mid time* apresentam condutividades mais moderadas, localizando-se em camadas mais rasas, entre as zonas de baixo e alto teor de Cu, como evidenciado na figura 2.6c.

A perfilagem eletromagnética no domínio do tempo (DHTEM) foi realizada no furo 094, que não faz parte dos furos selecionados para o estudo de dados petrofísicos. As placas condutoras foram modeladas a partir dos dados de DTHEM e tiveram uma melhor correlação com o minério maciço do Santa Lúcia quando comparadas com os modelos de EM provenientes do levantamento de FLTEM. A resposta eletromagnética é uma anomalia fora do furo (off-hole) e está presente em diferentes janelas de tempo: inicial (early time), intermediária (mid time) e tardia (late time).

As placas condutoras foram modeladas no *late time* com uma variedade de condutância entre 1500S e 4800S. Foram modeladas três placas que se localizam na porção central do depósito. As configurações desses condutores estão resumidas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Configurações dos condutores de DHTEM modelados no depósito Santa Lúcia.

Model	Modeled Channels	Dip (°)	Dip Dir (°)	Strike Length (m)	Depth Extent (m)	CT (S)
Plate1	Late	50	220	100	80	4800
Plate2	Late	50	220	129	88	2835
Plate3	Late	50	220	100	160	1500

A figura 2.7a mostra a anomalia no mapa da interpolação do canal 20 da componente X, resultado do levantamento de FLTEM, a localização do loop fixo utilizado no levantamento de DHTEM e o furo 094, além da localização dos modelos condutores e da zona mineralizada. É possível notar que as placas estão na zona de sulfeto, como mostram as figuras 2.7b e 2.7c em diferentes visadas.

A mineralização no depósito de Santa Lúcia revela uma variabilidade nos valores de condutividade. No entanto, os modelos gerados a partir dos dados de FLTEM e DHTEM são restritos às áreas correspondentes às zonas de sulfetos maciços.

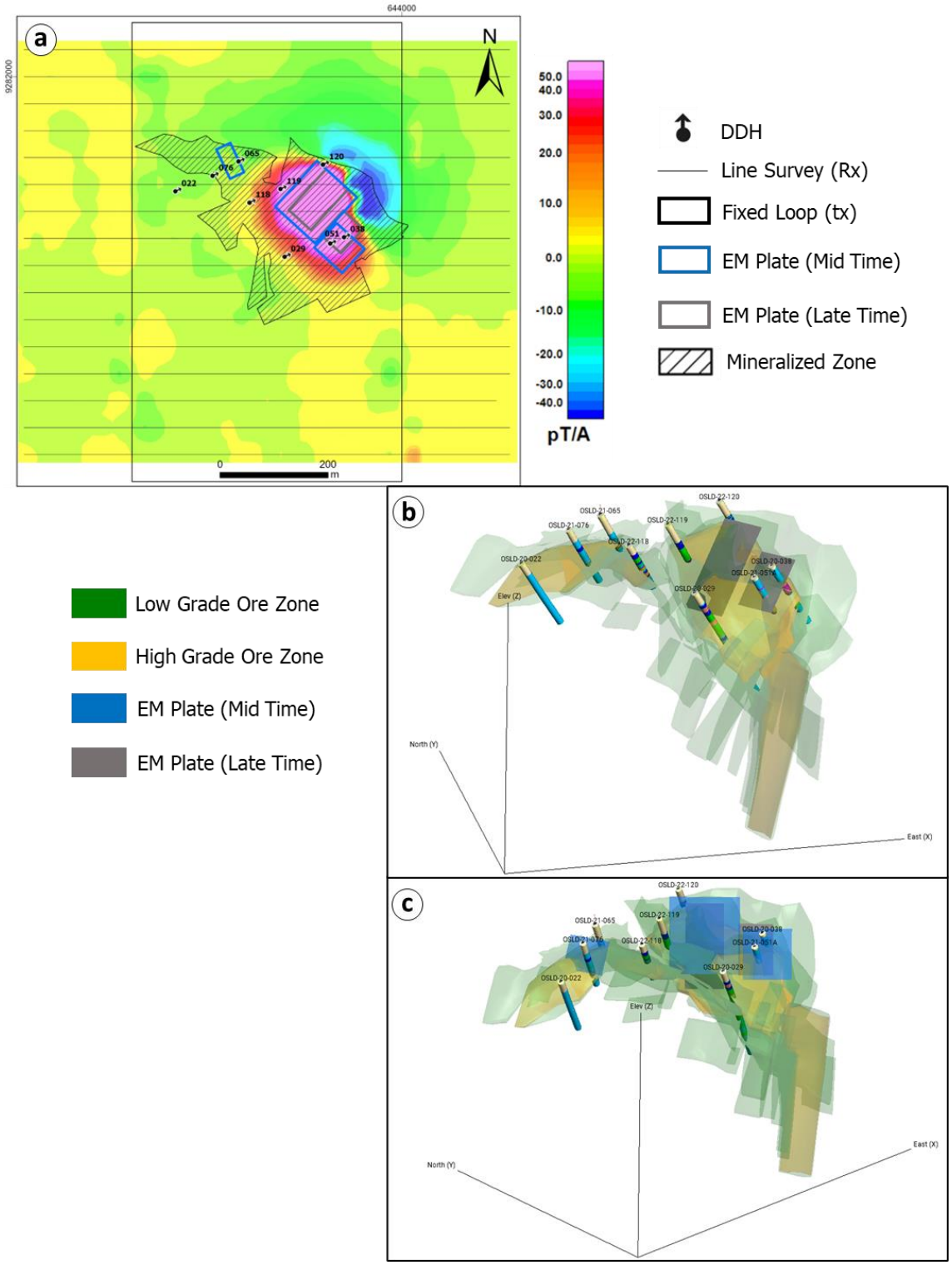


Figura 2.6 – Resultados de FLTEM. (a) Mapa da interpolação do canal 20 da componente Z com zona mineralizada. (b) Visualização 3D das placas modeladas no late time com o minério de baixo e alto teor integradas com os furos de sondagem que cortam a zona mineralizada. (c) Visualização 3D das placas modeladas no *mid late time* junto com o minério de baixo e alto teor com os furos de sondagem (DDH).

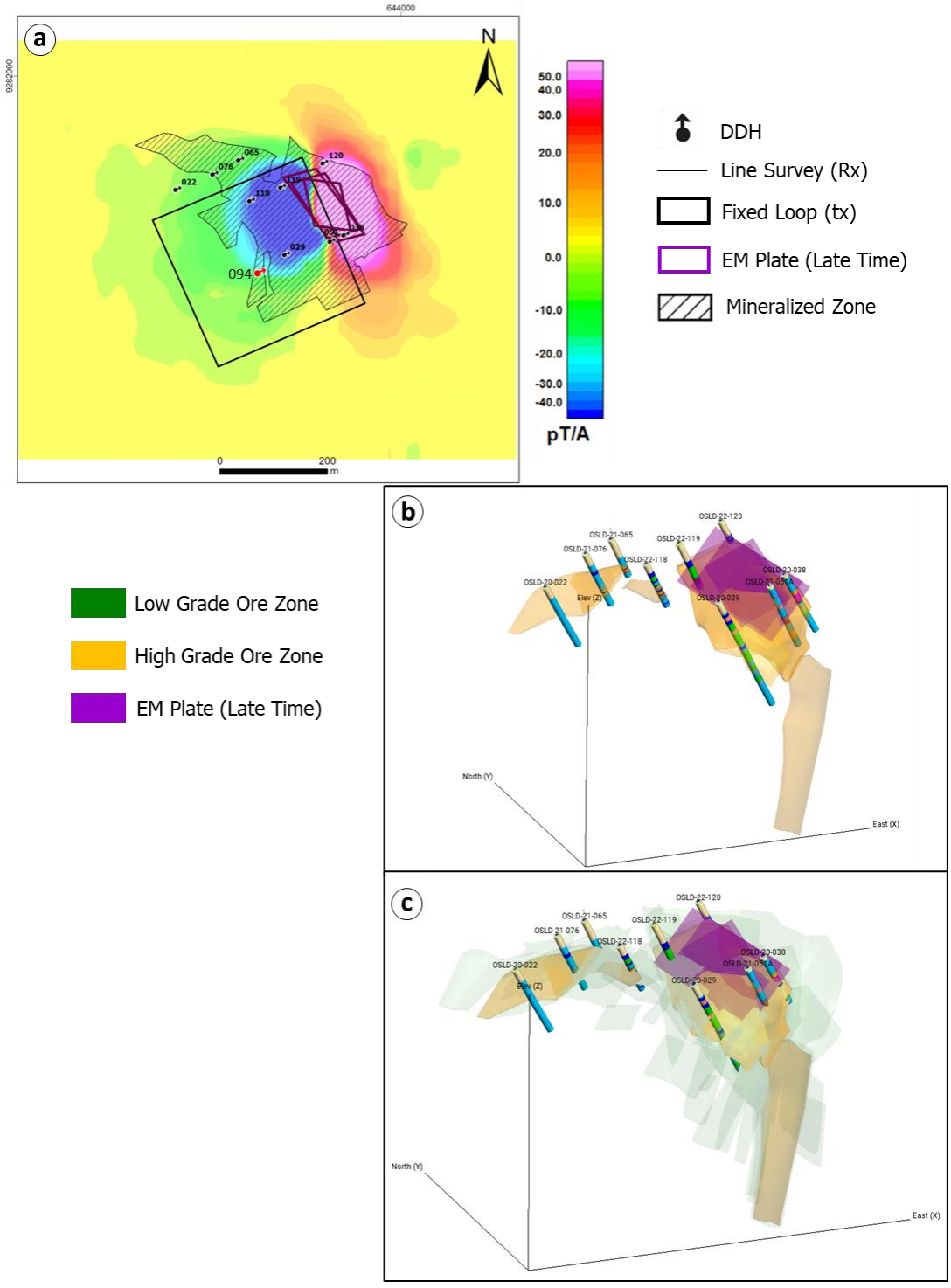


Figura 2.7 – Resultados de DHEM. (a) Mapa da interpolação do canal 20 da componente X dos dados de FLTEM com zona mineralizada e a localização do furo 094. (b) Visualização 3D das placas modeladas no late time junto com o minério de alto teor. (c) Visualização 3D das placas modeladas no *late time* junto com o minério de baixo e alto teor. Em (c) e (d) indica-se os furos de sondagem onde foi realizado as medidas petrofísica (DDH) e que validam os resultados obtidos.

2.4.4. Análise dos Dados Petrofísicos, Litogeoquímicos e Mineralógicos.

A análise dos dados petrofísicos, geoquímicos e mineralógicos permitiu a interpretação da variação das zonas de mineralização do depósito Santa Lúcia. A correlação entre os valores medidos de condutividade, resposta HF, susceptibilidade magnética e densidade com as litologias e os elementos geoquímicos revelou padrões distintos que contribuem para uma melhor compreensão da resposta dos levantamentos geofísico, características das propriedades físicas do depósito e distribuição mineralógica.

Condutividade e Resposta HF

A condutividade mede a capacidade de um material de conduzir corrente elétrica. Minerais de sulfetados metálicos calcopirita, pirrotita e pirita são mais condutivos que minerais ricos em sílica e carbonato que são resistivos. A condutividade da rocha depende da interconectividade e textura dos minerais metálicos que implica em formar caminhos contínuos que facilitam o fluxo de corrente (Dentith & Mudge, 2014). O comportamento da textura e estrutura da rocha descreve como os minerais metálicos estão organizados e distribuídos nas zonas mineralizadas. As medições de condutividade nas amostras nos testemunhos de sondagem, é repleto de dificuldades e coletar uma medida representativa é um desafio (Dentith *et al.*, 2020). Para uma análise detalhada para o entender condutividade e a reposta HF é preciso correlacionar o comportamento petrofísico com a litogeoquímica (tabelas contendo mínimo, máximo, média e mediana dos valores de condutividade, Apêndice F).

Dos furos que foram selecionados para as medições petrofísicas, os resultados mostram que as rochas hospedeiras vulcânicas félsicas têm geralmente menor contraste de condutividade, com algumas variações, podendo chegar 10,75 S/m e os pegmatitos não apresentaram contraste condutividade também, que é previsível por não apresentar altas concentrações de minerais metálicos.

O minério disseminado não apresenta contraste de condutividade dentro do conjunto de dados obtidos. Já o tipo *string* apresenta, localmente, valores da ordem de 232,50 S/m, mas o valor médio é de 1,16 S/m. As medidas mais condutivas apresentam conectividade entre os grãos de minerais metálicos.

O minério em matriz mostra valor máximo de condutividade de 18 S/m e média 1,98 S/m, sugerindo uma presença maior de minerais condutores em comparação com disseminando e *string*. Já o minério brechado apresenta uma ampla variação de condutividade, com valor máximo em 231 S/m e média 7,89 S/m. A presença maior de minerais condutores facilita o fluxo de corrente e aumenta a condutividade. O minério semi-maciço tem valores significativamente mais altos que as outras texturas de minério, com condutividade máxima em 28,90 S/m, média em 7,86 S/m e mediana 3,25 S/m.

As zonas com mineralização maciça exibem os maiores valores de condutividades, com valor máximo de 851 S/m, mediana em torno de 30,63 S/m, indicando uma intensa concentração e conectividade devido à presença maciça de minerais condutores.

A análise gráfica dos *boxplots* representada na figura 2.8a mostra que o minério maciço apresenta condutividades elétricas mais elevadas, enquanto as outras litologias possuem valores muito baixos, dificultando a avaliação comparativa. Para uma melhor compreensão, é necessária a análise gráfica do *boxplot* de condutividade em escala logarítmica (Figura 2.8f). Nessa escala, observa-se que as rochas hospedeira da mineralização e o minério disseminado não mostram variações significativas de condutividade. No entanto, há um aumento progressivo nas médias dos valores de condutividade, iniciando no minério tipo string, seguida pelo minério em matriz, brechado, semi-maciço, até alcançar os valores mais altos no minério maciço. O comportamento observado nos diagramas é devido às texturas dos minerais metálicos, que mesmo com a presença de sulfetos e concentrações significativas de cobre e ferro, não têm uma interconectividade bem definida (Figuras 2.8 i e j). Portanto, muitas medidas têm valores de condutividade próximos de zero, enquanto os restantes apresentam valores moderados e altos de condutividade.

A resposta HF tem um resultado similar a condutividade, mas varia significativamente entre os diferentes litotipos. As rochas hospedeiras e a zona de mineralização disseminada não apresentam contraste. O minério tipo string tem respostas um pouco mais altas que o minério disseminado, com valor máximo em 55 Hz e média em 0,8 Hz. O minério em matriz tem o valor máximo em 16 Hz e valor médio em 1,6 Hz que é superior ao minério disseminado e tipo *string*. O minério brechado mostra que a resposta HF tende a ser moderada, com valor máximo em 40 Hz e média em 2,9 Hz. O minério semi-maciço exibe respostas altas, com valor máximo em 28 Hz e média em 3,9 Hz e mediana em 2,3 Hz, indicando uma mineralização mais intensa com sulfetos condutivos. Por fim, o minério maciço apresenta as respostas mais altas, com valor máximo em 300Hz, média em 104,8Hz e mediana em 85 Hz, sugerindo uma concentração e maior volume de minerais metálicos.

A análise gráfica dos boxplots revela um comportamento similar ao dos diagramas de condutividade (Figura 2.8b). O minério maciço apresenta respostas de alta frequência (HF) mais elevadas, enquanto as outras litologias possuem valores muito baixos, dificultando a avaliação comparativa. Para uma melhor compreensão, foi necessária a análise gráfica da resposta HF em escala logarítmica também, mostrada na figura 2.8g. Nessa escala, observa-se que as rochas vulcânicas félsicas, pegmatitos e as zonas de minério disseminado não apresentam variações significativas na resposta HF. No entanto, há um aumento progressivo nas médias dos valores de resposta HF, começando nas mineralizações tipo *string*, seguidas pelo minério em matriz, brechado, semi-maciço, até atingir os valores mais altos na mineralização no minério maciço.

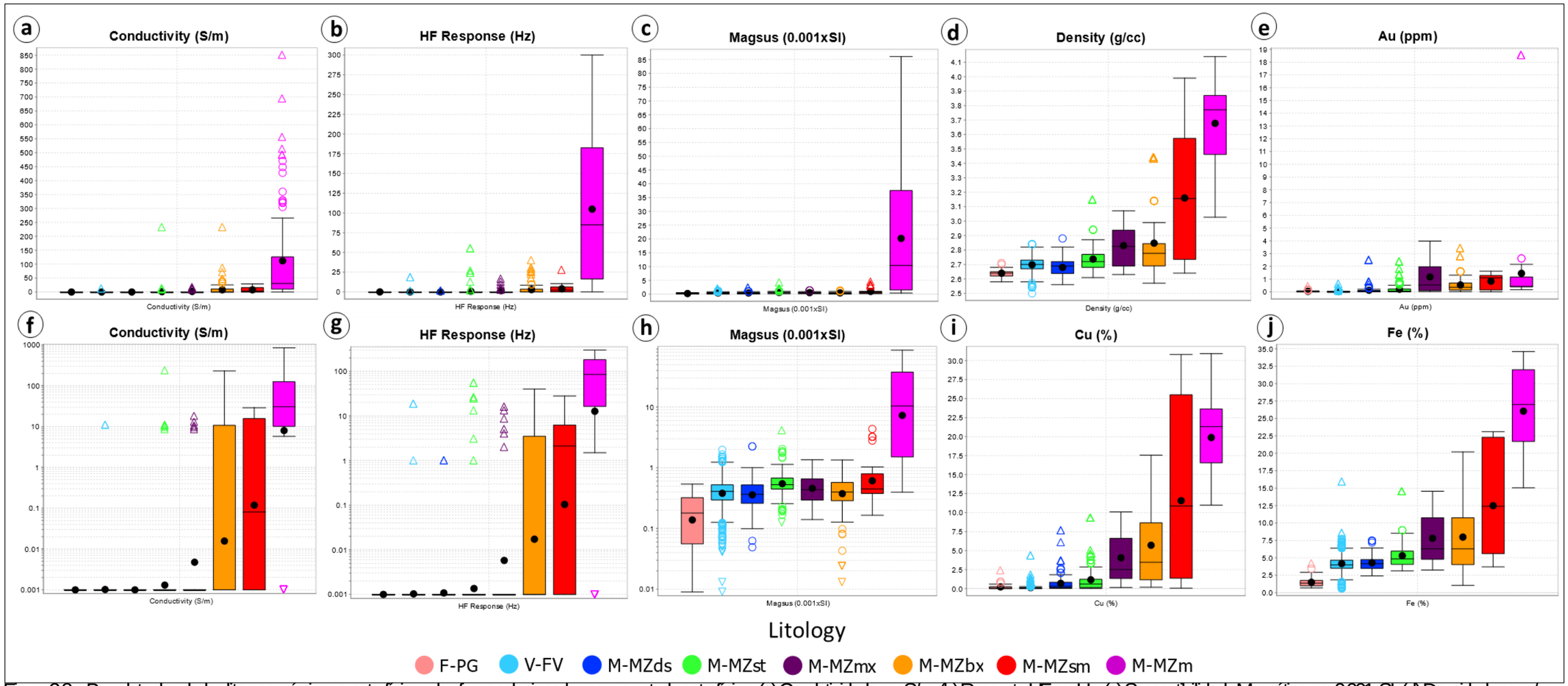


Figura 2.8 – Box plots dos dados lito-geoquímicos e petrofísicos dos furos selecionados para o estudo petrofísico. (a) Condutividade em S/m; (b) Resposta HF em Hz; (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI; (d) Densidade em g/cc; (e) Ouro (Au) em ppm; (f) Condutividade em S/m na escala logarítmica; (g) Resposta HF em Hz na escala logarítmica; (h) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI na escala logarítmica; (i) Cobre (Cu) em porcentagem; (j) Ferro (Fe) em porcentagem. As cores representam as seguintes litologias: intrusões de pegmatitos (F-PG), vulcânicas félsicas (V-FV), zona de mineralização disseminada (M-MZds), em string (M-MZst), em matriz (M-MZmx), brechada (M-MZbx), semi-maciça (M-MZsm) e maciça (M-MZm).

Susceptibilidade Magnética

Os resultados das medidas de susceptibilidade magnética das rochas vulcânicas félsicas apresentam baixos valores, com máximo de 2,0 × 10^{-3} SI e média de 0,4 × 10^{-3} SI, indicando um percentual baixo de minerais magnéticos. Os pegmatitos exibem valores de susceptibilidade muito baixos, com valor máximo em 0,5 × 10^{-3} SI e média de 0,2 × 10^{-3} SI, indicando ausência de minerais ferromagnéticos. O minério disseminado também possui valores baixos, valor máximo em 2,2 × 10^{-3} SI e média em 0,4 × 10^{-3} SI, refletindo uma baixa concentração de minerais ferromagnéticos. De maneira similar, o minério tipo *string* apresenta susceptibilidades baixas, comparáveis ao disseminado, valor máximo em 4,1× 10^{-3} SI e média em 0,6 × 10^{-3} SI. O minério em matriz mostra valor máximo em 1,4 × 10^{-3} SI e média em 0,5 × 10^{-3} SI. O minério brechado possuem valor máximo em 1,3 × 10^{-3} SI e média em 0,5 × 10^{-3} SI. O minério semi-maciço exibe susceptibilidades mais altas, com valor máximo em 4,3 × 10^{-3} SI, média em 1.0 × 10^{-3} SI e mediana em 0,4 × 10^{-3} SI, o que indica uma maior concentração de minerais ferromagnéticos. Finalmente, o minério maciço mostra os valores mais altos de susceptibilidade magnética em relação as outras litologias, valor máximo em 86,1 × 10^{-3} SI, média 20,2 × 10^{-3} SI e mediana em 10,4 × 10^{-3} SI, refletindo uma alta concentração de minerais ferromagnéticos em relação as outras zonas mineralizadas, como mostra o gráfico do boxplot da susceptibilidade magnética na figura 2.8c. A figura 2.8h mostra que minério maciço tem a maior susceptibilidade magnética, tanto em escala linear quanto logarítmica (tabelas contendo mínimo, máximo, média e mediana dos valores de susceptibilidade magnética, Apêndice F).

Densidade

As rochas vulcânicas félsicas apresentam densidade relativamente baixa, com valor máximo em 2,8 g/cc e média em 2,6 g/cc, refletindo a menor densidade dos minerais presente na rocha. Os pegmatitos têm baixa densidade também, com valor máximo em 2,7 g/cc e média 2,6 g/cc. O minério disseminado exibe valores de densidade relativamente baixos, valor máximo em 2,9 g/cc e média

2,8 g/cc. O minério tipo string possui densidades similares às do disseminado, valor máximo em 3,1 g/cc e média em 2.7 g/cc. O minério em matriz apresenta densidades com valor máximo em 3,1 g/cc e média em 2,8 g/cc. O minério brechado tem densidade um pouco maior em relação as outras litologias, com valor máximo em 3,4 g/cc e média em 2,8 g/cc. O minério semi-maciço exibe densidades mais altas, valor máximo em 4,0 g/cc, média em 3,2 g/cc e mediana em 3.2 g/cc, refletindo uma maior presença de minerais densos. O minério maciço apresenta as maiores densidades, com valor máximo em 4,1 g/cc, média em 3,7 e mediana em 3,8, refletindo uma alta densidade dos minerais da rocha como podemos observar na figura 2.8b (tabelas contendo mínimo, máximo, média e mediana dos valores de densidade, Apêndice F).

Interpretação de dados geoquímicos

As concentrações dos elementos químicos refletem diretamente a composição mineralógica das rochas, fornecendo informações cruciais sobre a distribuição e abundância dos minerais presentes. Isso ressalta a importância das concentrações geoquímicas na interpretação mineralógica das rochas, algo essencial na petrofísica. A figura 2.8 (em e, i e j) apresenta os *boxplots* nas diferentes litologias e textura de minério para os elementos geoquímicos ouro, cobre e ferro, respectivamente.

As rochas vulcânicas félsicas e pegmatitos apresentam concentrações muito baixas de ouro, cobre e ferro, refletindo a sua natureza de rochas hospedeiras.

O minério disseminado possui baixas concentrações de ouro com valor máximo em 2,5 ppm e média em 0,1 ppm. Já os valores de cobre possuem valor máximo em 7,6% e média de 0,7%, enquanto os de ferro mostram valores máximo e médio de 7,5% e 4,3%, respectivamente.

O minério tipo string apresenta concentrações químicas de ouro, cobre e ferro mais expressivas. Ouro com valor máximo em 2,4 ppm, média em 0,2 ppm e mediana 0,1 ppm. Cobre com valor máximo em 9,3%, média de 1,2% e

mediana em 0,6%. Ferro com valor máximo em 14,5%, média de 5,3% e mediana 4,9%.

O minério em matriz tem concentrações químicas maiores que o minério disseminado e tipo *string*. Ouro com valor máximo em 4 ppm, média em 1,2 ppm e mediana 0,5 ppm. Cobre com valor máximo em 10,1%, média de 4,1% e mediana em 2,5%. Ferro com valor máximo em 14,6%, média de 7,8% e mediana 6,3%.

O minério brechado também apresenta concentrações químicas com variações significativas refletindo a natureza heterogênea. Ouro com valor máximo em 3,4 ppm, média em 0,5 ppm e mediana 0,4 ppm. Cobre com valor máximo em 17,6%, média de 5,7% e mediana em 3,5%. Ferro com valor máximo em 20,2%, média de 8,0% e mediana 6,3%.

O minério semi-maciço também apresenta concentrações geoquímicas bem maiores que as outras texturas de minério. Ouro com valor máximo em 1,6 ppm, média em 0,8 ppm e mediana 1,1 ppm. Cobre com valor máximo em 30,8%, média de 11,6% e mediana em 10,9%. Ferro com valor máximo em 23,1%, média de 12,5% e mediana 12,4%.

Finalmente, o minério maciço exibe as concentrações geoquímicas mais altas. Ouro com valor máximo em 18,6 ppm, média em 1,5 ppm e mediana 0,4 ppm. Cobre com valor máximo em 30,9%, média de 19,9% e mediana em 21,3%. Ferro com valor máximo em 34,6%, média de 26,1% e mediana 27,0% (tabelas contendo mínimo, máximo, média e mediana dos valores de geoquímica, Apêndice F).

Integração dos dados Petrofísicos e litogeoquímicos

A análise dos dados petrofísicos e litogeoquímicos e revela comportamentos distintos entre as diferentes litologias ao longo do perfil de profundidade, como podemos observar com *strip-log* do furo 038 que corta o deposito Santa Lúcia. Entre todas as zonas analisadas, a zona maciça destaca-se como a mais importante, pois apresenta características geoquímicas e

petrofísicas que indicam uma significativa presença de minerais metálicos (*striplogs* dos outros furos, Apêndice G)

A zona maciça exibe alta condutividade e resposta HF, sugerindo a maior presença de minerais condutores (Figuras 2.9 a e b). A susceptibilidade magnética (Figura 2.9c) elevada nessa área indica a presença de minerais ferromagnéticos, comuns em ambientes mineralizados. Além disso, a densidade é maior nessa zona, refletindo a presença de minerais densos que contribuem para a alta densidade das rochas (Figura 2.9d).

O minério maciço é enriquecido com minerais de sulfetos e os elementos geoquímicos como ouro, cobre e ferro, corroboram seu potencial econômico (Figuras 2.9e, f e d).

Em comparação, os minérios tipo *string,* brechado e semi-maciço também mostram comportamentos indicativos de mineralização significativa, mas não tão proeminente quanto a zona maciça. Essas zonas apresentam alta condutividade, resposta HF, susceptibilidade magnética e densidade, refletindo a presença de minerais metálicos, mas em menores concentrações em relação zona maciça.

As rochas vulcânicas félsicas exibem características petrofísicas e geoquímicas indicativas de uma menor presença de minerais metálicos. A baixa condutividade, resposta HF e susceptibilidade magnética, juntamente com a menor densidade, sugerem uma composição mineralógica dominada por minerais não metálicos.

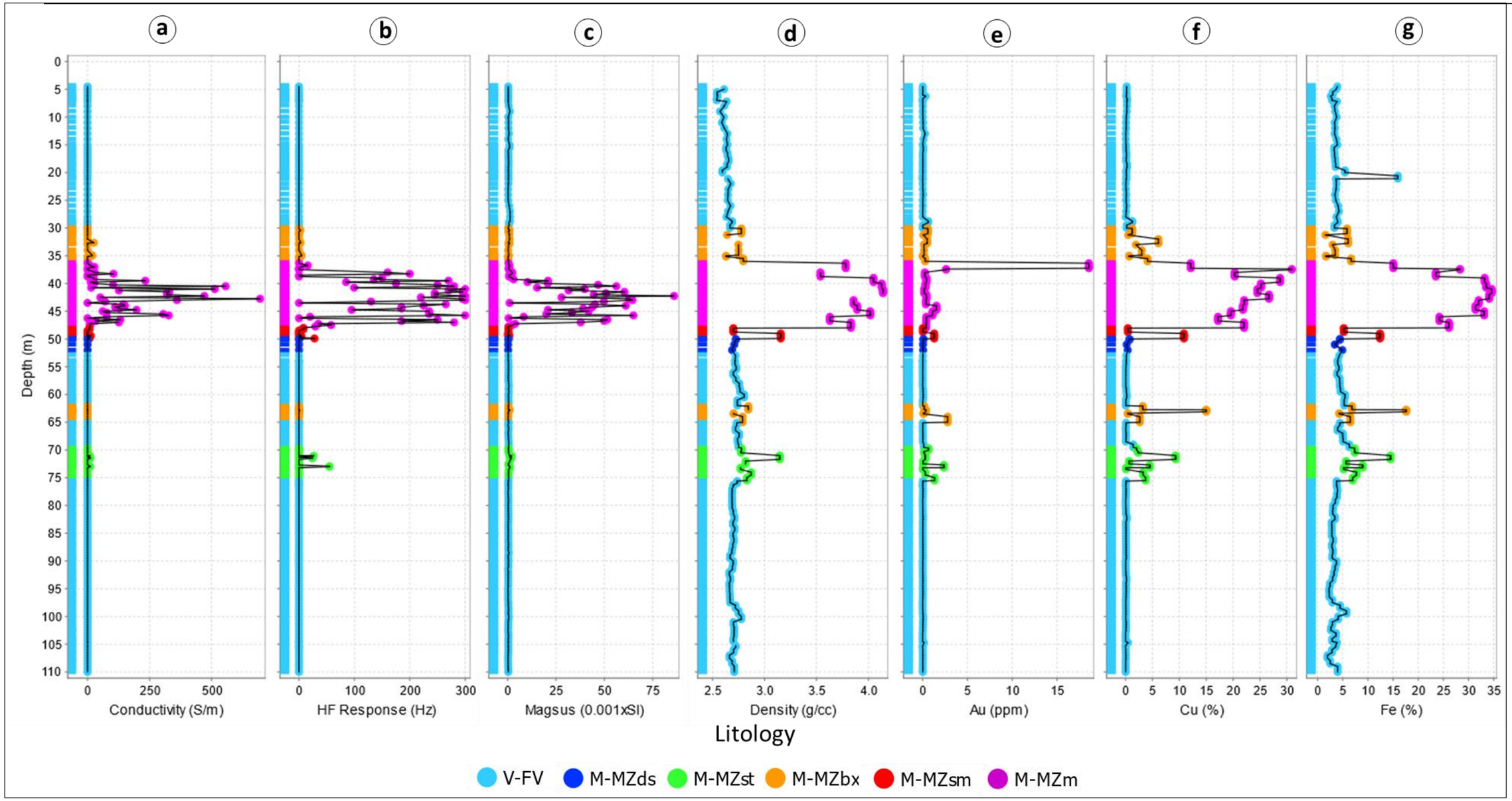


Figura 2.9 – Strip logs dos dados litogeoquímico e petrofísico do furo 038 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), zona de minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-MZst), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm).

Descrição da Zona Mineralizada

A zona mineralizada do depósito Santa Lúcia mostra litotipos distintos que refletem o processo de alteração hidrotermal. A descrição macroscópica e microscópica das rochas nos testemunhos de sondagem foi crucial para o entendimento das variações dentro da zona mineralizada e integração com a análise obtida com dados petrofísicos e geoquímicos (fotomicrografia das amostras de minério, Apêndice F)

A rocha subvulcânica, hospedeira da mineralização, apresenta textura granular, com cristais de feldspato potássico e plagioclásio exibindo substituição parcial por biotita, indicando um processo de potassificação que altera a composição original da rocha (Figura 2.10a). Os pegmatitos que cortam as subvulcânicas estão greizenizados e mostram quartzo (Qz), turmalina (Tur) e feldspato potássico (K-Fsp) com cristais grandes e bem formados. A greisenização é evidenciada pela presença disseminada de turmalina, substituindo parcialmente os feldspatos (Figura 2.10b).

O minério disseminado é representado por calcopirita (Ccp) e quartzo (Qz), com os cristais de calcopirita distribuídos de maneira disseminada na matriz rochosa (Figuras 2.10c). Em lâmina delgada e polida, observa-se uma textura granular. A rocha é composta de calcopirita, esfalerita, pirita e pirrotita, e subordinadamente, de clorita e allanita associadas com cristais de biotita (Figura 2.11.a).

Na figura 2.10d, observa-se também o tipo *string* caracterizado pela presença de calcopirita (Ccp), turmalina (Tur) e quartzo (Qz). Observa-se que os veios de quartzo cortam a matriz rochosa, com calcopirita e turmalina preenchendo as fraturas e cavidades. De forma geral, encontra-se clastos de pegmatito e de rocha subvulcânica foliada e hidrotermalizada, ocasionalmente em contato com o pegmatito e com uma matriz rica em sulfetos, que compõe mais de 50% da moda mineral, frequentemente fraturados e infiltrados pela matriz sulfetada ou contendo inclusões de sulfetos. A matriz sulfetada contém uma variedade de minerais opacos. Calcopirita está presente em cristais/blastos com inclusões de esfalerita, pirita e, raramente, pirrotita. A calcopirita também

pode conter pontuações de prata. A pirita aparece em cristais/agregados com fraturas frequentemente preenchidas por calcopirita e esfalerita, além de apresentar inclusões de calcopirita e esfalerita. De forma geral, mapeia-se quartzo, K-feldspato, apatita, clorita, mica branca epidoto, turmalina, e traços de allanita. Minerais menos comuns incluem biotita, plagioclásio e argilominerais (raríssimos). Sulfetos são uma parte significativa da matriz mineral, com calcopirita presente, pirita e esfalerita. A pirrotita, que são encontrados em traços (Figura 2.11b).

O minério brechado apresenta com fragmentos angulares de rocha matriz cimentados por pirrotita (Po), calcopirita (Ccp) e quartzo (Qz). A pirrotita é o principal mineral condutor e é visível na figura 2.10e. De forma geral, observa-se clastos de pegmatito compostos por cristais de turmalina associados a cristais de quartzo e, localmente, mica branca. Esses clastos, que constituem cerca de 50% da moda, são predominantemente angulosos a subangulosos e podem apresentar fraturas preenchidas pela matriz sulfetada ou conter inclusões de sulfetos. Os sulfetos que compõem a matriz são dominados pela calcopirita, que forma uma massa homogênea associada a escassos cristais finos a muito finos de pirita, pirrotita e esfalerita, ou contendo inclusões desses sulfetos. Calcopirita também apresenta fraturas preenchidas por pirita, localmente associada à esfalerita, e pode estar inclusa nos cristais de turmalina ou preencher fraturas aleatórias que cortam este silicato. A composição mineralógica da rocha, inclui 1% de quartzo, 48% de turmalina, traços de mica branca/sericita, pirita, esfalerita, pirrotita e goethita. A calcopirita representa 50% da composição mineral. A figura 2.11c apresenta a fotomicrografia com luz refletida de clasto de pegmatito constituído de cristais de turmalina e matriz composta por uma massa de calcopirita.

O minério semi-maciço é caracterizado calcopirita (Ccp) e apresenta alto teor de cobre (Cu) (Figura 2.10f). A rocha pode apresentar ou não pirrotira. Quando pirrotita, observa-se agregados de pirrotita (Po) e calcopirita (Ccp) intercalados com quartzo (Qz) e turmalina (Tur). A pirrotita e a calcopirita formam massas contínuas, sugerindo um alto grau de concentração minerais de sulfetos mostrados (Figura 2.10g). Ao microscópico, os sulfetos que compõem a matriz

são dominados pela calcopirita, que aparece em cristais/blastos com inclusões de esfalerita, pirrotita, pirita e molibdenita. As reações possíveis que podem ocorrer incluem a transformação de pirrotita em pirita, pirita em magnetita, e pirita e magnetita em hematita. Além disso, a calcopirita pode se transformar em covellita ou goethita (Figura 2.11d).

De modo geral, o minério maciço é condutivo e apresenta minerais de sulfetos de calcopiririta (Ccp) com lamelas pirrotita (Po). A pirrotita, sendo o principal mineral condutor e magnético, está presente em grandes quantidades, conferindo à rocha uma alta condutividade elétrica e susceptibilidade magnética (Figura 2.10h). Os sulfetos que compõem a matriz incluem calcopirita, pirrotita, pentlandita, esfalerita e pirita. Pirrotita aparece em cristais/blastos localmente deformados, com alguns exibindo inclusões de calcopirita, esfalerita e pirita. A pirita é encontrada em cristais/blastos, ocasionalmente mostrando exsoluções de pirrotita ou contendo inclusões de calcopirita e pirrotita. A figura 2.11e apresenta uma associação da calcopirita, pirrotita e pirita e filossilicatos. Já na figura 2.11f observa-se uma associação de calcopirita, pirrotita, pentlandita e esfarelita. Alguns cristais blastos de pirrotita exibem lamelas de deformação.

Abaixo apresenta-se uma tabela que integra as amostras que foram selecionadas para análise também escala de lâmina e a integração com os dados petrofísicos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Amostras selecionadas para o estudo petrográfico das porções mineralizadas e respectivas medidas petrofísicas. Minério disseminado (MZ-ds), tipo *string* (M-Mst), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm*).*

Sample	Litotype	Magsus 0.001xSI	Conductivity (S/m)	HF Response (Hz)	Density (g/cc)
OZSL-01	M-MZds	0.38	0.00	0.00	2.65
OZSL-02	M-MZst	0.98	0.00	0.00	2.94
OZSL-03	M-MZbx	0.29	39.00	4.00	2.99
OZSL-04	M-MZsm	3.87	16.50	5.50	3.99
OZSL-05	M-MZm	1.34	283.00	270.00	4.05
OZSL-06	M-MZm	55.70	695.00	295.00	4.15

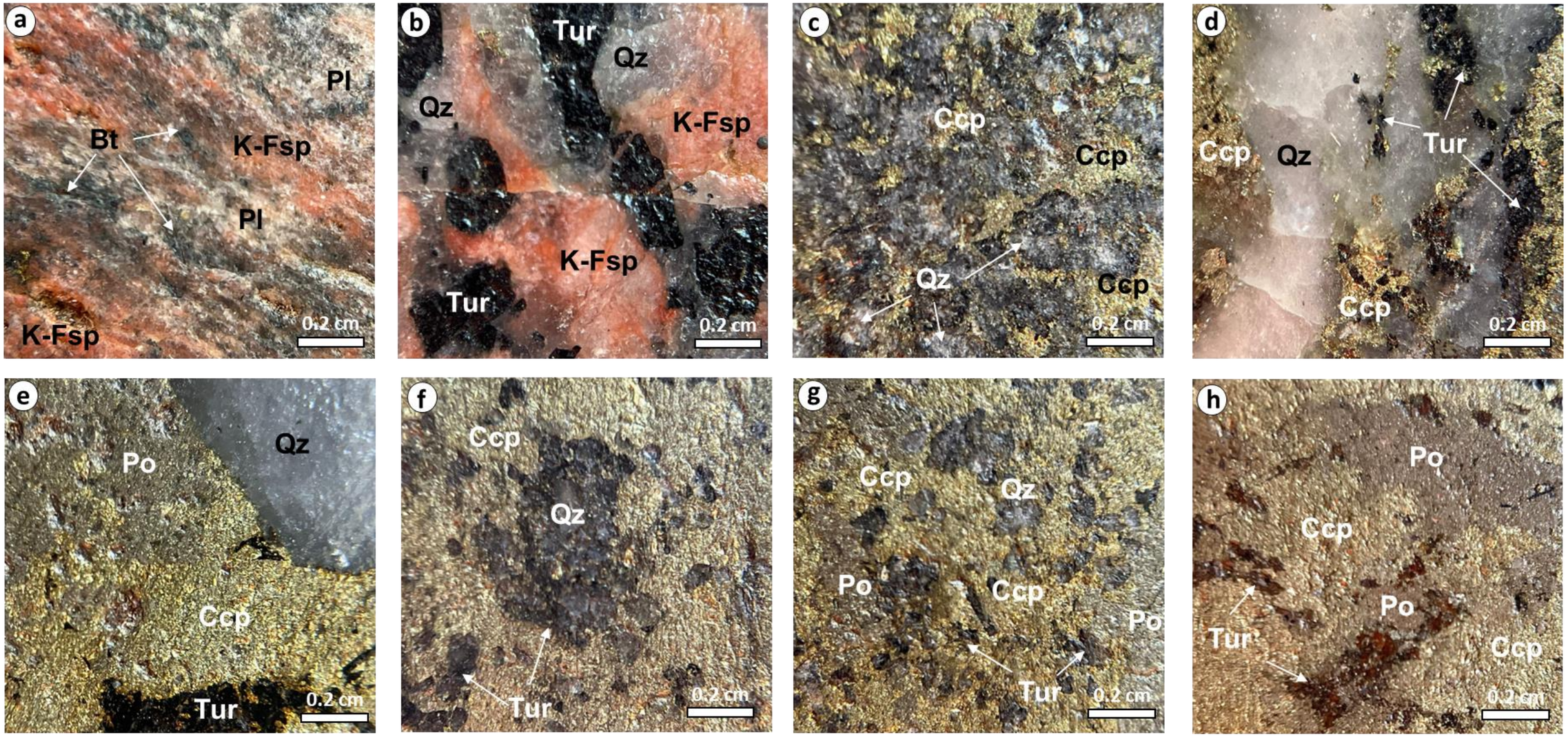


Figura 2.10 – Amostras do testemunho de sondagem mostrando as principais litologias do deposito Santa Lúcia. (a) Rocha sub-vulcânica (V-F-V) alterada por potassificação, (b) Corpo intrusivo de pegmatito (F-PG) alterada por greisenização, (c) Minério disseminado (M-MVZds), (d) Minério disseminado (M-MVZds) e string (M-MVZst) associadas a veios de quartzo, (e) Minério brechado (M-MVZbx), (f) Minério semi-maciço (M-MVZsm), (g) Minério semi-maciço (M-MVZm) com pirrotita e (g) Zona de mineralização maciça (M-MVZm). Abreviações: Bt biotita, Ccp calcopirita, K-Fsp Feldspato Potássico, Pl Plagioclásio, Po pirrotita, Qz quartzo e Tur turmalina.

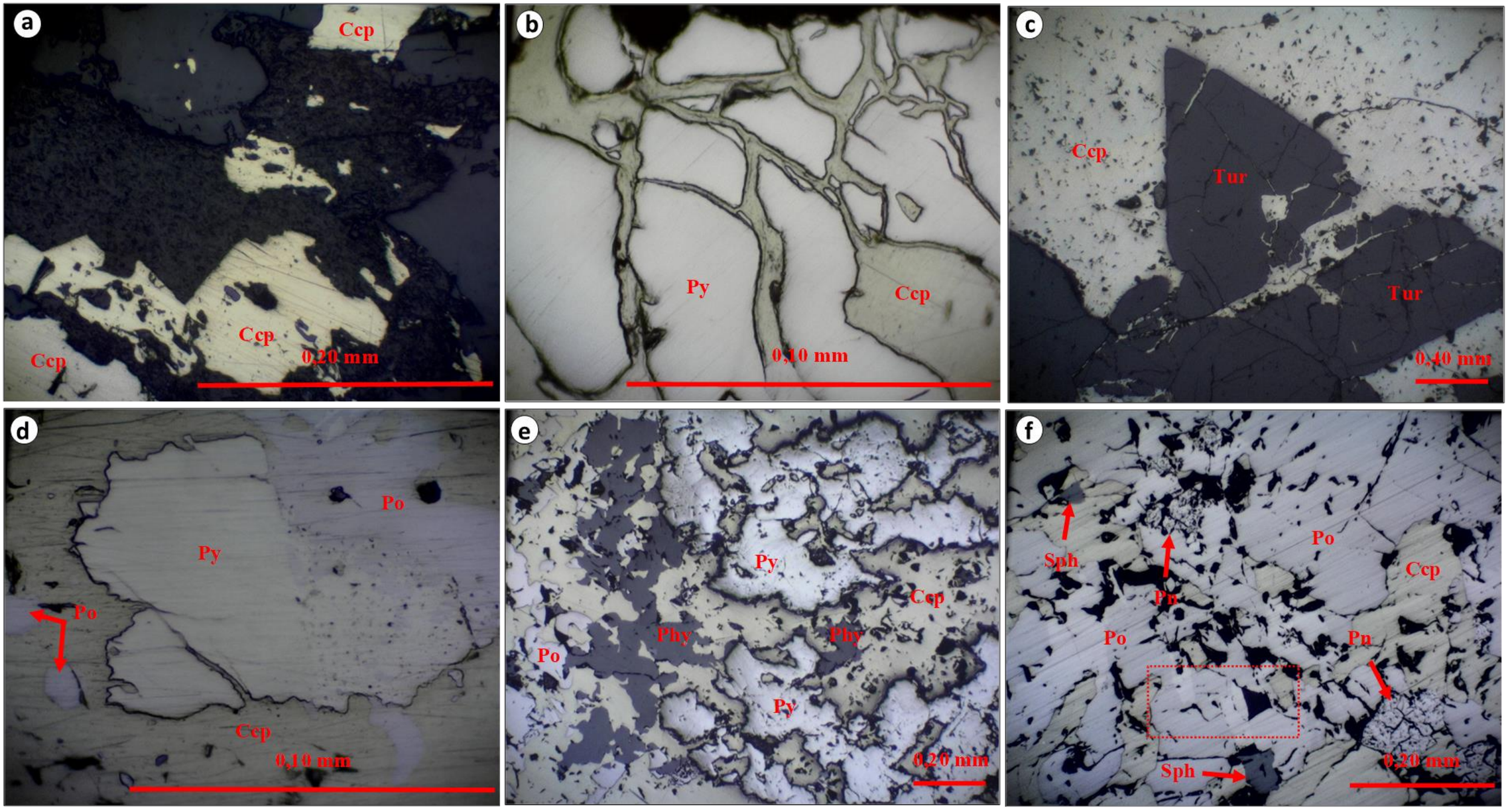


Figura 2.11- Petrografia das amostras dos testemunhos de sondagem do deposito Santa Lúcia. (a) Cristais de calcopirita (Ccp) dispersos na matriz (OZSL-01). (b) Calcopirita (Ccp) infiltrando em cristais fraturados de pirita (Py) (OZSL-02). (c) Clasto de pegmatito constituído de cristais de turmalina (Tur) e matriz composta por uma massa de calcopirita (Ccp) (OZSL-03). (d) Associação de calcopirita (Ccp), pirrotita (Po) e pirita (Py) (OZSL-04). (e) Associação calcopirita (Ccp), pirita (Py) e pirrotita (Po), os transparentes são filossilicatos (Phy) (OZSL-05). (f) Associação calcopirita (Ccp), pirrotita (Po), penlandita (Pn), esfalerita (Sph) e cristais/blastos de pirrotita (Po) exibem lamelas de deformação (área tracejada) (OZSL-06).

2.5. Discussões

No contexto do depósito Cu-Au Santa Lúcia, uma compreensão detalhada das respostas geofísicas e petrofísicas é fundamental para identificar a assinatura que mapeia o depósito, geometria e indicação de prospectividade. As principais respostas observadas na zona mineralizada e como estas se correlacionam com a geologia e mineralogia subjacentes, facilitam a identificação de áreas-alvo para exploração futura.

A modelagem e inversão de dados geofísicos corresponde a um processo computacional usado para obter um modelo petrofísico, o qual descreve a distribuição de uma propriedade física em subsuperfície. A interpretação dos dados petrofísicos adquiridos através da medida direta em rocha é crucial para interpretação dos modelos, uma vez que é a propriedade física das rochas quem governa sua resposta geofísica (Tschirhart & Morris, 2017; Fullagar *et al.*, 2017)

Dentith *et al.*, (2020) apresentam uma nova estrutura conceitual que relaciona as propriedades físicas das rochas às suas características geológicas, identificando três comportamentos extremos (end-members) relacionado aos controles de volume, grão e textura. Esta relação é representada por um diagrama ternário que demonstra como as propriedades físicas das rochas são afetadas por essas características extremas (Figura 2.12).

Segundo Dentith *et al*., (2020) os conceitos relacionados aos três comportamentos extremos (end-members) são dados da seguinte forma: a) Controle de volume são aquelas onde a propriedade da rocha pode ser estimada a partir de uma média volumétrica ponderada das propriedades dos componentes minerais. A densidade de uma rocha é a média das densidades da composição de vários minerais e poros; b) No controle de grãos, as propriedades físicas das rochas são dominadas por um componente minoritário da rocha e influenciadas pelo tamanho, forma e distribuição dos grãos minerais. As propriedades ferromagnéticas dos minerais presentes na rocha são influenciadas por esse controle. As rochas com minerais paramagnéticos mostram um comportamento híbrido entre volume e grão; c) O controle de textura é dominado por um ou mais componentes minoritários da rocha, mas é

mais influenciado pelas relações geométricas entre os grãos menores. A condutividade elétrica depende da formação de redes condutoras contínuas entre os minerais. Neste caso, aplica-se o conceito de conectividade. Entretanto, aglomerados de minerais condutores não conectados podem proporcionar um fluxo de corrente devido à geometria dos poros.

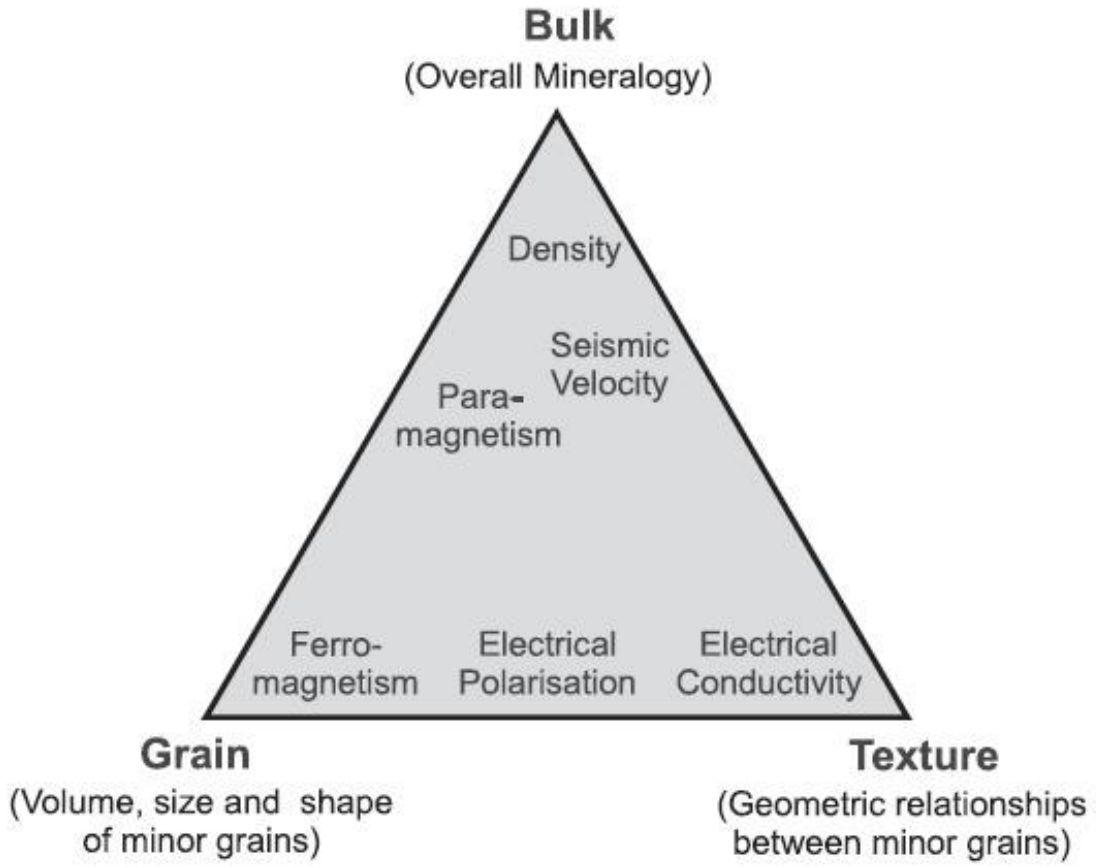


Figura 2.12 – Diagrama da estrutura conceitual que descreve o comportamento de várias propriedades físicas comumente medidas em rochas (Dentith *et al*., 2020).

2.5.1. *Footprint* Geofísico

A caracterização da assinatura geofísica do depósito Santa Lúcia foi determinada a partir da análise dos modelos gerados a partir dos levantamentos geofísicos magnético terrestre, polarização induzida (IP), resistividade e eletromagnético no domínio do tempo (DHTEM), comparando com a zona de

mineralização de baixo teor de cobre que está relacionado as texturas de minério disseminado, tipo *string* e matriz, e a de alto teor cobre com as texturas de minério brechado, semi-maciço e maciço (Figuras 2.13a, 2.13b e 2.13c). A análise e interpretação de cada método geofísico forneceu parâmetros que permitiu avaliar a aplicabilidade para o tipo de mineralização e espessura da mineralização.

A análise do modelo de susceptibilidade magnética utilizando a inversão do Vetor Magnético (MVI) indicou que a mineralização do depósito Santa Lúcia não exibe uma resposta significativa de susceptibilidade magnética, as anomalias presentes na seção estão relacionadas a formação ferrífera (Figura 2.13a). O baixo contraste magnético sugere a ausência de minerais ferromagnético, como a magnetita, na zona de mineralização de baixo e alto teor. Comparativamente, no deposito IOCG Cristalino localizado no contexto geológico da Serra do Rabo, distante 10 km a norte do depósito Cu-Au Santa Lúcia, a anomalia de susceptibilidade magnética está associada principalmente à formação de ferro e ao dique de gabro (Figura 2.2). A formação ferrífera (BIFs) apresenta alta susceptibilidade magnética, enquanto a zona mineralizada, composta por calcopirita, apresenta baixa susceptibilidade (Melo *et al*, 2015). O minério maciço apresenta o maior contraste de susceptibilidade magnética (Figura 2.8c) quando comparamos com outras tipologias de minério. O volume de minerais paramagnéticos presentes na zona mineralizada é superior aos minerais ferromagnéticos, o que influencia na resposta magnética dos levantamentos geofísicos.

O modelo de inversão de cargabilidade mostrou uma correlação positiva com o minério disseminado e tipo *string* (Figura 2.13b). As anomalias de cargabilidade são observadas principalmente nas zonas mais rasas do depósito, sugerindo que esses sulfetos funcionam como capacitores e facilitam o acúmulo de carga elétrica. No entanto, nem todas as zonas de mineralização com alto teor foram detectadas por este método, indicando que a cargabilidade pode ser influenciada pela aglomeração e distribuição dos sulfetos não conectados, bem como pela profundidade da mineralização.

O modelo de inversão de resistividade elétrica apresentou uma forte correlação com a zona mineralizada de baixo e alto teor cobre (Figura 2.13c). Devido à escala de cor invertida, as cores quentes indicam zonas menos resistivas, ou seja, mais condutivas. A inversão dos dados de resistividade elétrica no depósito Cristalino mostrou que a zona de alta condutividade está associada à zona de mineralização maciça (Melo *et al*, 2015). O modelo de resistividade do depósito Santa Lúcia mapeia efetivamente a zona mineralizada como um todo, tornando mais condutivo na zona de minério com alto teor cobre. A forte correlação entre a anomalia de condutividade e a área mineralizada sugere que a presença de sulfetos em diferentes texturas, na presença grãos condutores e espaço poroso, facilita o fluxo de corrente elétrica, que está bem representada neste modelo.

Adicionalmente, as placas modeladas a partir dos dados de *borehole* (DHTEM) são chaves na identificação de zona de mineralização de alto teor de cobre, conforme evidenciado nas três seções da figura 2.13. Os modelos de placa condutoras gerados a partir de dados eletromagnéticos (TDEM) mostram a importância da conectividade entre os grãos de minerais condutores, pois facilitam a formação de redes condutoras continuas. As texturas de minério brechado, semi- maciço e maciço apresentam minerais de sulfetos conectados que facilitam o fluxo de correntes elétricas.

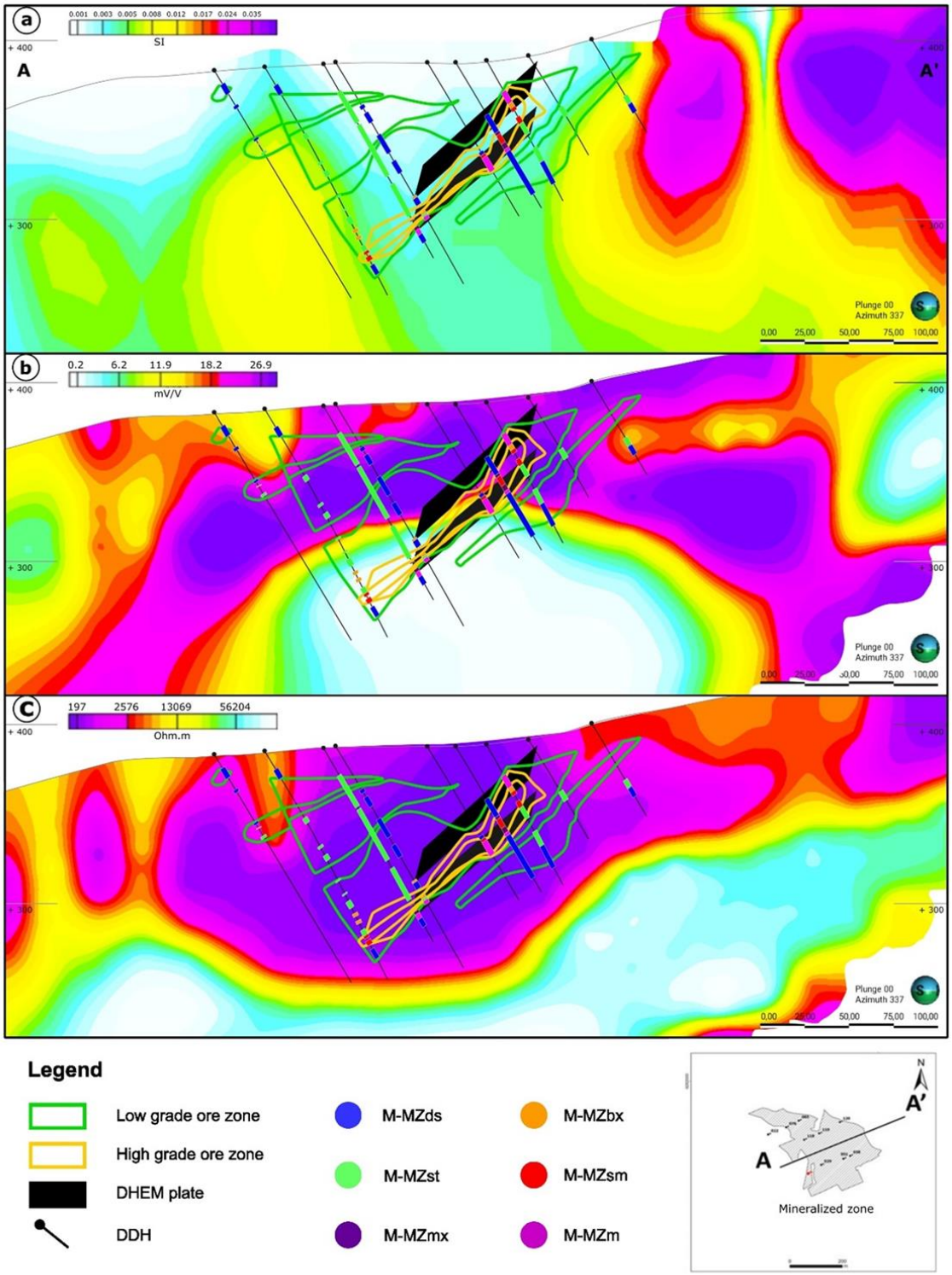


Figura 2.13 – Seção geofísica seccionando a porção central da zona mineralizada. Resultados mostram as anomalias geofísicas onde (a) Modelo de susceptibilidade magnética MVI, (b) Modelo de cargabilidade e (c) Modelo de Resistividade, em relação as zonas de alto e baixo teor de cobre Cu, litologias e placa condutora de DHEM. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), zona de minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-Mst), em matriz (M-Zmx), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm).

2.5.2. *Footprint* Petrofísico

O *footrprint* petrofísico no deposito Cu-Au Santa Lúcia está diretamente correlacionado com características dos controles de volume, grão e texturas dos principais minerais de sulfetos, calcopirita, pirrotita e pirita. A tabela 2.4 apresenta os valores de susceptibilidade magnética, condutividade e densidade dos minerais de calcopirita, pirrotita e pirita, com base em King (2007), Airo & Säävuori (2013) e Airo (2015).

Tabela 2.4 – Valores susceptibilidade magnética (10^{-3} SI), condutividade e densidade de minerais relevantes presentes na literatura.

Mineral	MagSus [SI]	Magnetization Type	Conductivity (S/m)	Density (g/cc)
Chalcopyrite	0.3 - 0.4	Paramagnetic	$10.0 – 10^4$	4.2
Pyrrhotite	1-600	Ferrimagnetic	$50.0x10^6$	4.65
Pyrite	-0.006 – 0.1	Paramagnetic	$1.0 - 10^5$	5.02

Fonte: Elaborado com base nos dados de King (2007), Airo & Säävuori (2013) e Airo (2015).

No deposito Santa Lúcia, o sulfeto que apresenta maior condutividade e susceptibilidade magnética é a pirrotita. A pirrotita monoclínica (Fe_7S_8) possui uma alta susceptibilidade magnética devido à sua estrutura ferrimagnética. Embora os valores de susceptibilidade magnética possam variar amplamente, eles são geralmente elevados em comparação com outros minerais sulfetos. Essa variação está fortemente associada à quantidade de ferro presente na estrutura cristalina da pirrotita. As características físicas dos grãos de pirrotita, que podem variar em tamanho de micrométrico a milimétrico, influenciam significativamente suas propriedades magnéticas. Grãos de forma irregular e de maior volume tendem a apresentar maior susceptibilidade magnética devido à menor presença de defeitos estruturais em suas superfícies (Clark, 1984; Clark, 1999).

As interações entres esses sulfetos geram distintas assinaturas e para o melhor entendimento, deve-se correlacionar as propriedades físicas, geoquímica e litologias com ênfase no volume, composição mineral e textura.

A figura 2.14a apresenta o gráfico de correlação entre a densidade e susceptibilidade magnética das medidas realizadas nos testemunhos de sondagem. As cores e o tamanho dos pontos representam as litologias e o teor de cobre em porcentagem, respectivamente. Qualitativamente é possível identificar três grupos no gráfico.

O grupo I inclui as rochas hospedeiras da mineralização com minério em diferentes texturas com valores abaixo de 10% de Cu, tem baixa densidade devido a um menor volume de minerais de sulfetos e baixa susceptibilidade magnética devido a maior presença de minerais paramagnéticos.

O grupo II composto por minério brechado, semi-maciço e maciço, com teor de Cu entre 10% e 30%, com densidade acima de 3.3 g/cc podendo chegar até 4.0 g/cc, sendo significativamente maior que o grupo I, com valores baixos de susceptibilidade magnética. O aumento significativo no volume de minerais de sulfetos controla o aumento de densidade. A interação entre os grãos de minerais sulfetos não favorece o aumento significativo nos valores de susceptibilidade magnética.

O grupo III formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre variando entre 10% e 30% de Cu, apresenta densidade ligeiramente maior que o grupo de II. A susceptibilidade magnética apresentou um maior contraste, possivelmente devido a interação entre os grãos de sulfetos ferromagnéticos. O *boxplot* da densidade na figura 2.14d mostram o aumento no valor de densidade devido ao maior volume de minerais de sulfetos presentes nos sulfetos semi-maciço e maciço. O *boxplot* da figura 2.14e mostram que os maiores valores de susceptibilidade magnética estão presentes no minério maciço, que concorda perfeitamente com a classificação dos grupos identificados na figura 2.14a.

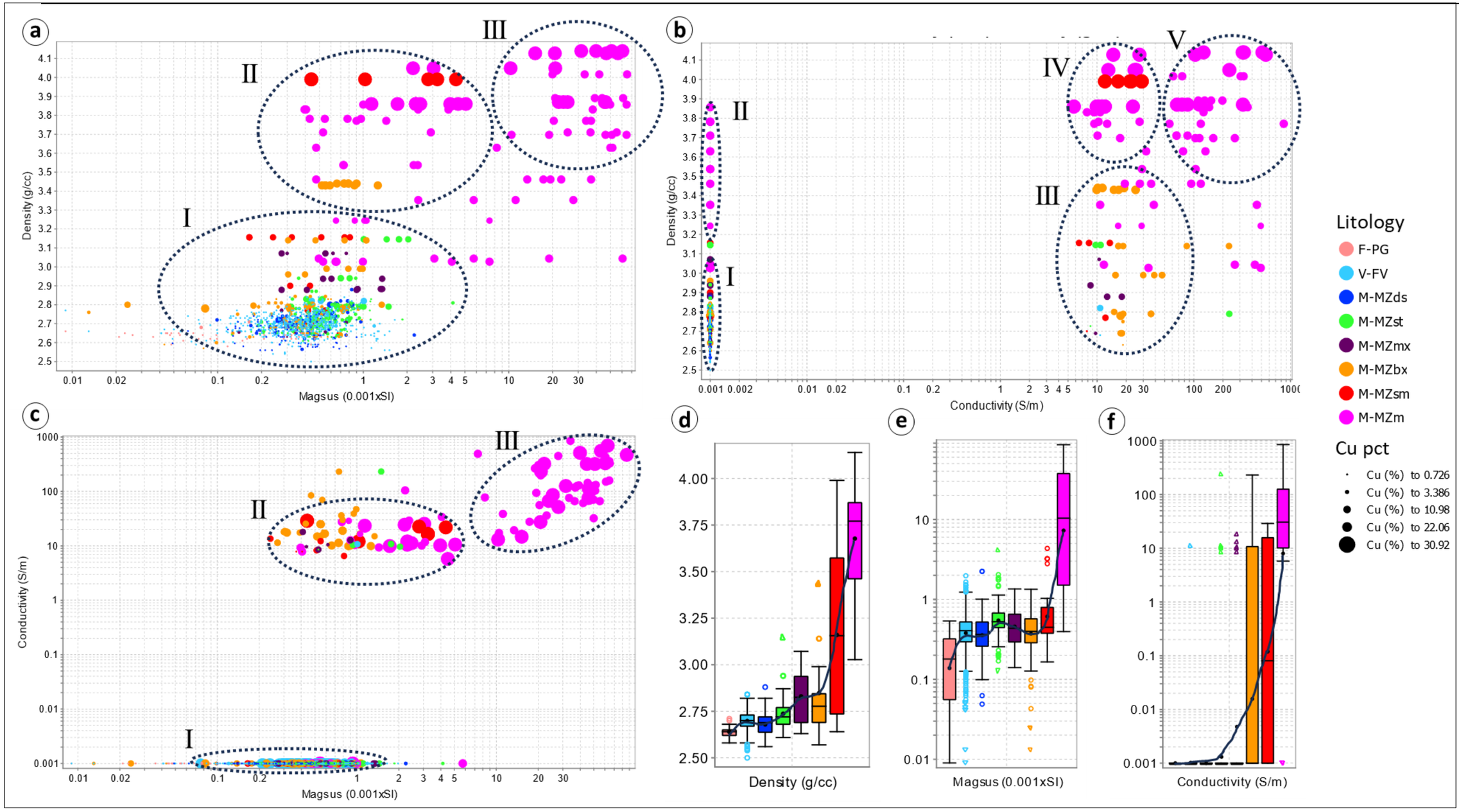


Figura 2.14 - Gráficos de correlação entre propriedades físicas e teor de cobre das amostras dos testemunhos de sondagem no depósito de Santa Lúcia. a) Correlação entre densidade e susceptibilidade magnética. b) Correlação entre densidade e condutividade. c) Correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade. d) Boxplot da densidade. e) Boxplot da susceptibilidade magnética em escala logarítmica. f) Boxplot da condutividade em escala logarítmica. Litologias: Pegmatito (F-PG), vulcânicas félsicas (V-FV), minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-MZst), em matriz (M-Zmx), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm).

A figura 2.14b apresenta o gráfico de correlação entre a densidade e a condutividade. O grupo I inclui as rochas hospedeiras da mineralização e minério em diferentes texturas com menor teor de Cu, com baixa densidade e não tem contraste de condutividade, devido a um menor volume de minerais de sulfetos.

O grupo II é composto por minério maciço, com teor de cobre menor que 10%, com densidade acima de 3.3 g/cc, podendo chegar até 4.0 g/cc. Não foi mapeado um contraste de condutividade e o maior volume de minerais de sulfetos controla aumento de densidade. No entanto, condutividade se mantém baixa devido à falta de conectividade entre os sulfetos.

O grupo III é caracterizado por rochas com densidade variando de 2.8 a 3.4 g/cc, e condutividade baixa a moderada. Esse grupo inclui rochas que têm um teor de Cu abaixo de 10%, com características mistas entre os grupos I e II, representando possivelmente zonas de transição com uma mistura de minerais condutores conectado e não conectados.

O grupo IV inclui rochas com minério semi-maciço e maciço, com a maioria das amostras com teor de cobre acima de 22% e densidade alta. As rochas apresentam condutividade baixa a moderada, indicando a presença de minerais de sulfetos condutores com os grãos conectados e não conectados.

O grupo V é formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre acima de 22%, apresentando a mesma variação de densidade do grupo IV. A condutividade é significativamente mais alta, devido à alta concentração de minerais condutores, possibilitando um maior contraste dessa propriedade, indicando que os grãos minerais condutores estão conectados. O *boxplot* da figura 2.14f mostra que os maiores valores de condutividade estão presentes no minério maciço, que existe um aumento progressivo nas médias de condutividade a partir do minério brechado até o maciço, e isso concorda perfeitamente com a classificação dos grupos identificados na figura 2.13b.

A figura 2.14c apresenta o gráfico de correlação entre a susceptibilidade magnética e a condutividade. Qualitativamente, é possível identificar três grupos no gráfico. O grupo I inclui as rochas hospedeiras da mineralização e minério em diferentes texturas com valores abaixo de 10% de Cu, com baixa susceptibilidade magnética devido a uma menor presença de minerais

ferromagnéticos e sem contraste de condutividade devido à maior presença de minerais não-condutores.

O grupo II é composto majoritariamente por minério brechado, semi-maciço e maciço, com teor de Cu entre 3% e 30%, com baixa susceptibilidade magnética e condutividade baixa a moderada. O aumento no volume e conectividade de minerais de sulfetos controla o aumento de susceptibilidade magnética e condutividade.

O grupo III é formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre variando entre 10% e 30% de Cu, apresentando susceptibilidade magnética e condutividade maior que o grupo II. Nesse grupo conforme aumenta a susceptibilidade magnética, aumenta também condutividade, porém esse aumento não é linear. A figura 2.15 mostra o gráfico de correlação entre a susceptibilidade magnética e a condutividade, ambas em escala linear e somente a medidas realizadas em rochas de minério maciço. As amostras com valores que variam entre 50 e 150 S/m apresenta uma ampla variação de susceptibilidade magnética com valores entre a 5 a 55 × 10^{-3} SI. O mesmo comportamento se repete, por exemplo, para as amostras com condutividade que variam entre 300 e 350 S/m.

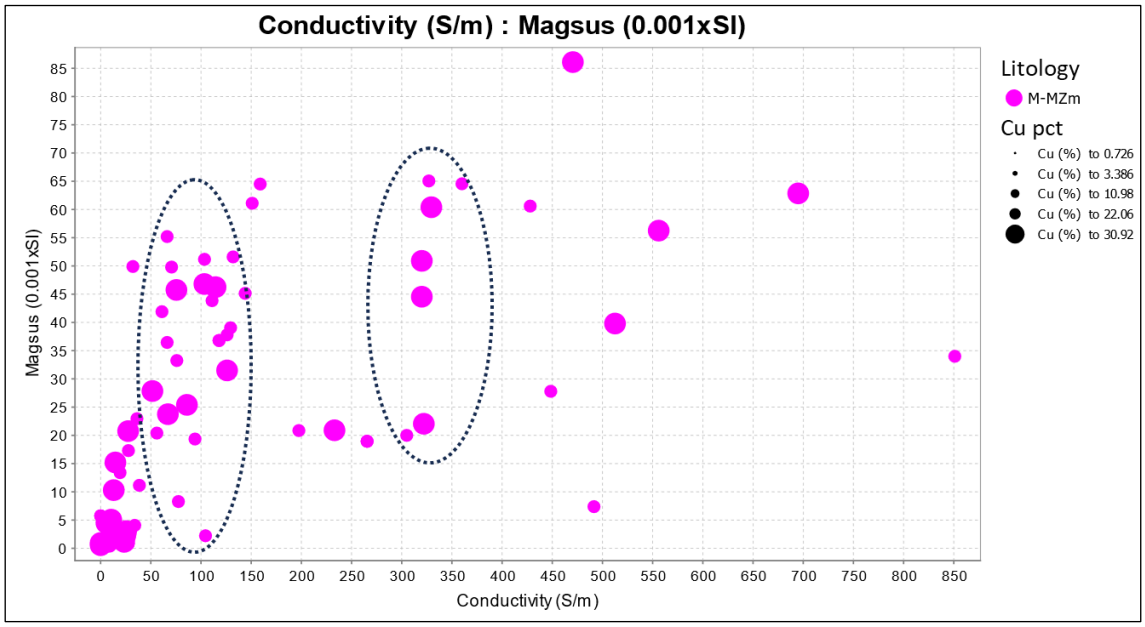


Figura 2.15- Correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade com teor de cobre das amostras de minério maciço dos testemunhos de sondagem no depósito de Santa Lúcia.

End-members volume, grão e textura

Os controles dos end-members volume, grão e textura dos minerais presentes na rocha tornam acessível o entendimento das assinaturas petrofísica do deposito Cu-Au Santa Lúcia (Dentith *et al.*, 2020). As rochas hospedeira da mineralização, vulcânica félsica e pegmatito, são compostas por minerais como biotita, feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e turmalina, e apresentam alta resistividade, baixa susceptibilidade magnética e baixa densidade (Figuras 2.10a e b).

Os sulfetos dispersos na matriz, como apresentado mostram que os grãos de calcopirita ficam isolados, impossibilitando a conectividade entre os grãos e resultando na falta de contraste de condutividade (Figuras 2.10c e 2.11a). O baixo volume de sulfetos dispersos na matriz não causa aumento significativo da densidade, pois a média volumétrica das densidades desses minerais é baixa. A presença de minerais paramagnéticos resulta em uma assinatura de baixa susceptibilidade magnética. Esses fatores determinam as características petrofísicas (Tabela 2.5). Esta tabela apresenta seis amostras com os valores das propriedades físicas e as porcentagens de calcopirita, pirrotita e pirita, calculadas a partir das lâminas petrográficas. A mineralização disseminada (OZSL-01) apresenta baixo contraste em susceptibilidade magnética, condutividade e densidade, com apenas 4% de calcopirita e traços de pirrotita e pirita.

Tabela 2.5 – Amostras selecionada para o estudo petrográfico com as medidas petrofísicas e porcentagem dos minerais. Minério disseminado (MZ-ds), tipo *string* (M-Mst), brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm*).*

Sample	Litotype	Magsus 0.001xSI	Conductivity (S/m)	HF Response (Hz)	Density (g/cc)	Chalcopyrite (%)	Pyrrhotite (%)	Pyrite(%)
OZSL-01	M-MZds	0.38	0.00	0.00	2.65	4	Trace	Trace
OZSL-02	M-MZst	0.98	0.00	0.00	2.94	34	Trace	20
OZSL-03	M-MZbx	0.29	39.00	4.00	2.99	50	Trace	Trace
OZSL-04	M-MZsm	3.87	16.50	5.50	3.99	68	3	10
OZSL-05	M-MZm	1.34	283.00	270.00	4.05	48	20	10
OZSL-06	M-MZm	55.70	695.00	295.00	4.15	56	20	Rare

Os sulfetos que cortam a matriz rochosa preenchendo fraturas e cavidades estão associados ao minério tipo *string* (Figuras 2.10d e 2.11b). A presença de um volume maior de sulfetos na matriz rochosa, em comparação com o minério disseminado, aumenta o valor da densidade. Essa pequena diferença de densidade é visível no *boxplot* (Figura 2.14d) e também no valor de densidade da amostra OZSL-02 (tipo string) quando comparada com a OZSL-01(disseminado). A tabela 2.5 mostra que a mineralização tipo *string* (amostra OZSL-02) tem baixa susceptibilidade magnética e condutividade nula, com 34% de calcopirita, 20% de pirita e traços de pirrotita. Ou seja, para este tipo de minério, existem medidas que apresentam contraste de condutividade e susceptibilidade magnética como exemplificado no grupo II do gráfico de correlação entre a susceptibilidade magnética e condutividade, pois essa textura de minério pode apresentar conectividade (Figura 2.14c).

A anomalia geofísica de cargabilidade, mostrada na figura 2.13b, indica que a calcopirita disseminada, string e matriz possibilitam o fluxo de corrente elétrica e podem funcionar como acumuladores de carga. A possível causa pode ser os espaços porosos em cavidades e fraturas, associados à porosidade secundária com água e à permeabilidade. Recomenda-se uma pesquisa petrofísica com medidas de cargabilidade nessas texturas de minério.

O minério brechado é composto por sulfetos de calcopirita e pirrotita (Figura 2.10e,). A composição mineral nessa textura é variável, com a calcopirita

podendo estar associada ou não com pirrotita e pirita, o que implica diferentes comportamentos de susceptibilidade magnética e condutividade nos gráficos de correlação da figura 2.14. O minério brechado (OZSL-03) tem baixa susceptibilidade magnética, apresenta condutividade moderada e maior valor de densidade. Nas amostras analisadas, observa-se pelo menos 50% de calcopirita e traços de pirrotita e pirita. A massa de calcopirita maciça presente na brecha tem conectividade, porém, devido à sua característica paramagnética, a amostra não apresenta forte contraste de susceptibilidade magnética. A densidade do minério brechado varia bastante, como podemos observar no grupo II (Figura 2.14b).

O minério semi-maciço apresenta calcopirita maciça, associada ou não com pirrotita (figuras 2.10f e 2.10g). A porcentagem de cobre em algumas dessas amostras ultrapassa a média e a mediana do minério maciço como observado no *boxplot* da figura 2.8i. A média e a mediana dos valores de densidade e condutividade do minério semi-maciço superam os valores médios do minério brechado, como mostram os *boxplots* das figuras 2.14d e 2.14f, respectivamente. O minério semi-maciço (OZSL-04) apresenta maior susceptibilidade magnética e densidade, quando comparada com as outras tipologias de minério (OZSL-01, OZSL-02 e OZSL-03). A presença de pirrotita na rocha aumenta a resposta de susceptibilidade magnética. A figura 2.11b mostra que a calcopirita em 68% está associada com pirrotita em 20% e pirita em 10%, conforme descrito na tabela 2.5. O maior volume dos minerais de sulfetos estabelece maior densidade e a textura mineral possibilita a conectividade elétrica entre os grãos; esse comportamento petrofísico pode ser visto no grupo IV da figura 2.14b.

O minério maciço possui calcopirita e, na maioria das vezes, está associado com lamelas de pirrotita (Figura 2.10h). A análise petrográfica mostrou que o minério maciço pode ser classificado e exemplificados na tabela 05, a saber: um tipo com 48% de calcopirita, 20% de pirrotita e 10% de pirita (OZSL-05) e outro com 56% de calcopirita e 20% de pirrotita, sem a presença de pirita (OZSL-06). Os dois tipos possuem densidades com valores similares, próximos

a 4 g/cc, mostrando que o volume desses minerais de sulfetos influencia no valor da densidade (conforme Tabela 2.5).

A mineralização maciça mostra forte condutividade e pertence ao denominado grupo V e ao grupo III das figuras 2.14b e 2.14c, respectivamente, porém a amostra OZSL-06 é mais condutiva. A textura dos grãos de pirrotita apresenta melhor conectividade, facilitando o maior fluxo de corrente elétrica, sendo possível detectar anomalias a partir do levantamento eletromagnético (TDEM) e modelar placas condutoras.

O contraste de susceptibilidade presente na amostra OZSL-06 é devido aos grãos de pirrotita, que têm características ferromagnéticas, conforme a tabela 2.4. A amostra OZSL-05 tem em sua composição a presença de pirita, que causa desmagnetização da amostra. A presença de grãos de pirita associados a grãos de pirrotita pode causar desmagnetização devido à interação magnética entre os dois minerais. A pirita, sendo paramagnética, não mantém uma magnetização remanente forte, enquanto a pirrotita, sendo ferrimagnética, possui uma magnetização remanente significativa. Essa interação pode resultar na neutralização parcial das propriedades magnéticas, levando à desmagnetização observada na amostra. Isso explica o gráfico de correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade da figura 2.15, pois as amostras de minério maciço com alta condutividade apresentam ampla variação nos valores de susceptibilidade magnética. Ou seja, fica bem mapeado no depósito Santa Lúcia as diferenças dentro da mineralização maciça.

Segundo Zhabin e Kremenetskiy (1993), quando a pirita (FeS_2), que é um mineral paramagnético, se transforma em pirrotita ($Fe_{1-x}S$), que é um mineral ferrimagnético, ocorre uma significativa alteração nas propriedades magnéticas da amostra. Há uma liberação de enxofre que pode interagir com outros minerais e metais na rocha, criando zonas de anomalias magnéticas que podem ser detectadas em levantamentos geofísicos. No caso do depósito Santa Lúcia, com o processo inverso em que a pirrotita se transforma em pirita, haveria a desmagnetização da zona mineralizada, o que justifica a falta de anomalias magnéticas nos levantamentos geofísicos Figuras 2.4 e 2.13a. A análise petrográfica mostra que os cristais de pirita são formados a partir da pirrotita

(OZSL-04), e onde a pirita é encontrada em cristais/blastos, ocasionalmente mostrando exsoluções de pirrotita (OZSL-05), corroborando a hipótese de uma possível desmagnetização devido à transformação da pirrotita em pirita.

2.6. Conclusões

A caracterização da assinatura geofísica e petrofísica do depósito Cu-Au Santa Lúcia demonstrou ser fundamental para a identificação e delineação das zonas mineralizadas.

A aplicação dos métodos magnetométrico, polarização induzida (IP), resitividade elétrica e eletromagnético no domínio do tempo (TDEM) permitiu a caracterização da assinatura geofísica do Depósito Santa Lúcia como elencado a seguir. Cada método contribuiu com informações únicas, revelando diferentes aspectos da mineralização e suas limitações, facilitando a identificação de áreas-alvo para exploração futura.

- Método Magnetométrico: A análise dos produtos derivados, bem como o modelo de susceptibilidade magnética utilizando a inversão do Vetor Magnético (MVI) da componente de amplitude (Ampl) indicou que a mineralização do depósito Santa Lúcia não apresenta contraste de susceptibilidade magnética. O minério maciço apresenta o maior contraste de susceptibilidade magnética em comparação com outras litologias nas medidas petrofísico, devido a presença da pirrotita, porém volume de minerais paramagnéticos é superior ao de minerais, tornando não detectável em levantamentos magnetométricos.
- Método de Polarização Induzida (IP): O modelo de cargabilidade mostrou uma correlação positiva com a mineralização disseminada e tipo *string*. As anomalias são observadas principalmente nas zonas mais rasas do depósito, sugerindo que os sulfetos disseminados funcionam como capacitores, acumulando carga elétrica. Nem todas as zonas de mineralização maciça foram detectadas, indicando que a cargabilidade

pode ser influenciada pela aglomeração e distribuição dos sulfetos não conectados, bem como pela profundidade da mineralização.

- Método de Resistividade Elétrica: o modelo de inversão de resistividade elétrica apresentou uma forte correlação com zonas de baixo e alto teor de cobre. O modelo de resistividade mapeou efetivamente a zona mineralizada como um todo, sendo mais condutivo na zona de minério com alto teor de cobre. A forte correlação entre a anomalia de condutividade e a área mineralizada sugere que a presença de sulfetos em diferentes texturas, grãos condutores e espaço poroso facilita o fluxo de corrente elétrica.
- Método eletromagnético no domínio do tempo (TDEM): as placas modeladas a partir dos dados de borehole (DHTEM) destacaram-se na identificação de zonas de mineralização de alto teor de cobre. Os modelos de placas necessitam da conectividade entre os grãos de minerais condutores para facilitar a formação de redes condutoras contínuas. Texturas de minério brechado, semi-maciço e maciço apresentam minerais de sulfetos conectados que facilitam o fluxo de corrente elétrica.

Os estudos petrofísicos mostraram que as propriedades físicas das rochas, influenciadas pelos controles de volume, grão e textura, desempenham um papel crítico na determinação das respostas geofísicas.

- Rochas hospedeiras da mineralização: as rochas subvulcânicas e pegmatíticas apresentam alta resistividade, baixa susceptibilidade magnética e baixa densidade.
- Minério disseminado: sulfetos dispersos na matriz mostram grãos de calcopirita isolados, resultando em menor densidade devido ao baixo volume de sulfetos e sem contraste de condutividade. A presença de minerais paramagnéticos resulta em uma assinatura de baixa susceptibilidade magnética.
- Minério *String* e Matriz: a presença de sulfetos que cortam a matriz rochosa aumenta a densidade e pode apresentar conectividade, resultando em pequenos valores de condutividade e susceptibilidade

magnética. Anomalias de cargabilidade indicam que a calcopirita disseminada, *string* e matriz permitem o fluxo de corrente elétrica, funcionando como acumuladores de carga devido aos espaços porosos em cavidades e fraturas.

- Minério Brechado: composto por minerais sulfetos de calcopirita, pirrotita e pirita, com comportamento variável de susceptibilidade magnética e condutividade devido a textura brechada. A densidade varia com o volume de sulfetos presente na rocha.
- Minério semi-maciço: caracteriza-se pela presença de calcopirita, associada ou não com pirrotita e pirita. O valor médio de densidade é 3,2 g/cc acima das outras tipologias de minério. A presença de pirrotita monoclínica aumenta a resposta de susceptibilidade magnética e a conectividade elétrica entre os grãos.
- Minério Maciço: apresenta composição mineral com um percentual de mais 48% ou mais de calcopirita, geralmente associada com lamelas de pirrotita e pirita. As amostras com com pirrotita, ferromagnética, apresentam maior susceptibilidade magnética na ordem de 20×10^{-3} SI e forte condutividade valor médio acima de 100 S/m, com variações dependendo da conectividade entre os grãos desse mineral. Entretanto, a presença de pirita, paramagnética, causa desmagnetização. Na literatura a transformação de pirita em pirrotita altera significativamente as propriedades magnéticas, criando zonas de anomalias magnéticas. No depósito Santa Lúcia, a transformação inversa pode ter causado desmagnetização da zona mineralizada, explicando a falta de anomalias magnéticas nos levantamentos geofísicos magnetométricos em escala regional e em escala de depósito utilizados dentro deste trabalho.

A integração dos dados mostra que o depósito Santa Lúcia pode ser caracterizado, em escala de depósito, como condutivo, polarizável, e fracamente magnético. A densidade provou ser uma propriedade física importante e urge a aquisição de dados gravimétricos gradiométricos e eletromagnéticos em domínio do tempo em escala de distrito, com espaçamento de linhas de voo de 200 ou

125 metros de espaçamento. Além disto, é necessário um estudo mais avançado da petrofísica incluindo a aquisição de dados de velocidade, magnetização remanente e de cargabilidade. Assim poderemos avançar no estudo da variação das zonas mineralizadas e das propriedades magnéticas. A aquisição de dados isotópicos e de magnetotelúrico é chave para entendermos não somente as idades de depósitos polimetálicos de Cu-Au, mas este sistema do ponto de vista geodinâmico dentro do Cinturão Sul do Cobre na Província Mineral de Carajás.

Referências

AIRO, M-L. **Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland**. Espoo: Geological Survey of Finland, 2015. 144 p.

AIRO, M.-L.; SÄÄVUORI, H. **Petrophysical characteristics of Finnish bedrock**: Concise handbook on the physical parameters of bedrock. Espoo: Geological Survey of Finland, 2013. 205 p.

ARAÚJO FILHO, R. C.; NOGUEIRA, A. C. R.; ARAÚJO, R. N. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 102, 2020.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. **Serra dos Carajás: folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000**. Texto explicativo. Departamento Nacional da Produção Mineral/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 164 p., 1991.

AVELAR, V. G.; LAFON, J. M.; CORREIA, F. C. Jr; MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã - Província Mineral De Carajás: Novos resultados geocronológicos. **Rev Bras Geociências**, v. 29, p. 453–460, 1999.

BARROS, C. E. M.; MACAMBIRA, M. J. B.; BARBEY, P.; SCHELLER, T. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico

Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. **Rev Bras Geociências**, v. 34, p. 531–538, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Projeto aerogeofísico Rio Maria: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 2015, v. 1. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21701>. Acesso em: 15 jan. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Projeto aerogeofísico Tucuruí: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Lasa Prospecções, 2010, v. 1. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10938>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CLARK, D. A. **Magnetic properties of pyrrhotite: applications to geology and geophysics**. 1984. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Faculdade de Ciências, Universidade de Sydney, Sydney, 1984.

CLARK, D. A. Magnetic petrology of igneous intrusions: Implications for exploration and magnetic interpretation. **Exploration Geophysics**, v. 30, n. 1, p. 5-16, 1999.

COSTA, U. A. P.; PAULA, R. R.; SILVA, D. P. B. *et al.* **Programa Geologia do Brasil-PGB – Mapa de integração geológico-geofísica da ARIM Carajás. Escala 1:250.000**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2016.

DARDENNE, M. A.; FERREIRA FILHO, C. F.; MEIRELLES, M. R. The role of shoshonitic and calc-alkaline suites in the tectonic evolution of the Carajás District, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 1, p. 363–372, 1988.

DENTITH, M.; ENKIN, R. J.; MORRIS, W.; ADAMS, C.; BOURNE, B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a

new interpretation framework. **Geophysical Prospecting**, v. 68, p. 178-199, 2020. doi: 10.1111/1365-2478.12882.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.** Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 454 p.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *In*: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1988. Belém. **Resumos**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. p. 11–54.

ELLIS, R. G.; MACLEOD, I. N.; OLDENBURG, D. W. Inversion of magnetic data from remanent and induced sources. **Geophysics**, v. 77, n. 1, p. L13-L23, 2012.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L.; MACAMBIRA, M. J. B.; SANTOS, J. O. S.; ALTHOFF, F. J.; SOARES, J. E. B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157–185, 2013.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L. *et al.* Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? **Lithos**, v. 151, p. 57–73, 2012.

FULLAGAR, P. K. *et al.* Petrophysics in Inversion. *In*: Exploration '17 Petrophysics Workshop, 2017, Toronto. **Anais**. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences (DMEC), 2017.

HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K. *et al.* Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In*: I Simpósio de Geologia da Amazônia. 1982, Belém. **Resumos.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, p. 100–110.

HUNGER, R. B. *et al.* The Santa Lúcia Cu-Au deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: a Neoarchean (2.68 Ga) member of the granite-related copper-gold systems of Carajás. **Mineralium Deposita**, p. 1-22, 2021.

HUNH, S. R. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; DALL'AGNOL, R. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. *In*: VI Simpósio de Geologia da Amazônia. 1999. **Resumos.** São Paulo: SBG-Núcleo Norte, p. 463–466, 1999.

INSTRUMENTATION GDD. **MPP EMS2+ User's Guide**. Québec: Instrumentation GDD, 2023.

KING, A. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *In*: MILKEREIT, B. (Ed.). Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration. **Resumos.** Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences, 2007. p. 647-665.

LEÃO-SANTOS, M.; LI, Y.; MORAES, R. **Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil**. Geophysics, v. 80, n. 2, p. B13–B22, 2015.

LESHER, M. *et al*. Integrated Multi-Parameter Exploration Footprints of the Canadian Malartic Disseminated Au, McArthur River-Millennium Unconformity U, and Highland Valley Porphyry Cu Deposits: Preliminary Results from the NSERC-CMIC Mineral Exploration Footprints Research Network. In: SEG Technical Program Expanded, 2017. **Resumos.** Anaheim, CA: Society of Economic Geologists, 2017.

LOBATO, L. M.; ROSIÈRE, C. A.; SILVA, R. C. F. *et al.* **A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás: Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província**. In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (eds). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM/CT-Mineral/ADIMB, Brasília, p. 21–92, 2005.

MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T. E.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329–354, 1991.

MEIRELLES, M. R. **Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás**. 1986. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1986.

MEIRELLES, M. R.; DARDENNE, M. A. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra Dos Carajás - Pará. **Rev Bras Geociências**, v. 21, p. 41–50, 1991.

MELO, A. T.; SUN, J.; LI, Y. Geophysical inversions applied to geological differentiation and deposit characterization: A case study at an IOCG deposit in Carajás Mineral Province, Brazil. *In*: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. **Resumo.** Houston: Society of Exploration Geophysicists, p. 2012–2016, 2015.

MORETO, C. P. N. *et al.* Neoarchean and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajás Province, Brazil, Re-Os and U-Pb geochronological evidence. **Economic Geology**, v. 110, p. 809–835, 2015.

MORETO, C. P. N. *et al.* Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. **Mineral Deposita**, v. 46, p. 789–811, 2011.

NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W.; PINHEIRO, R. V. L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: Redescrição e redefinição litoestratigráfica. Bol do Mus Para Emílio Goeldi - **Série Ciências da Terra**, v. 7, p. 177–277, 1995.

PIDGEON, R. T.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology**, v. 166, p. 159–171, 2000.

PINHEIRO, R. V. L. **Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil**. Tese (Doutorado em Geologia) - Durham University, Durham, 1997.

PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. **Rev Bras Geociências**, v. 30, p. 597–606, 2000.

RODRIGUES, D. S.; OLIVEIRA, D. C.; MACAMBIRA, M. J. B. **Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará – Província Carajás**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais, v. 9, p. 597–633, 2014.

SARDINHA, A. S.; BARROS, C. E. M.; KRYMSKY, R. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenetic Province, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, p. 327–339, 2006.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física**: Mecânica-Hidrodinâmica. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1978.

SEEQUENT. *IRI Focus - Modify IRI Focus Constraint dialog options*. Retrieved from https://help.seequent.com/VOXI/2023.1/Content/ss/voxi/constraints/iterative_reweighting_model.htm. Acessado em 30 de agosto de 2024.

SILVA, M. G. *et al.* **Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento), Carajás**. *In*: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (eds). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM/CT-Mineral/ADIMB, Brasília, p. 94–151, 2005.

SKIRROW, R. G. **Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification**. Ore Geology Reviews, v. 140, p. 104569, 2022

SOUZA, S. R. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; SCHELLER, T. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos

Carajás, PA): implicações estratigráficas. *In*: V Simpósio de Geologia da Amazônia. **Resumo.** SBG, Belém, p. 380–383, 1996.

TALLARICO, F. H. B. *et al.* Geological and SHRIMPII U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. **Mineral Deposita**, v. 39, p. 68–86, 2004.

TALLARICO, F. H. B. **O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

TASSINARI, C. C. G. **O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos**. 1996. 241 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, p. 174–182, 1999.

TAVARES, F. M. *et al*. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: revealing complex structural patterns. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 238–252, 2018.

TEIXEIRA, J. B. G.; LINDENMAYER, Z. G.; SILVA, M. G. **Depósitos de Óxido de Fe, Cu-Au de Carajás**. *In*: BRITO, R. S. C.; SILVA, M. G.; KUYUMJIAN, R. M. (eds). Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo, 1 ed. CPRM, Brasília, p. 15–48, 2010.

TEIXEIRA, J. B. G. **Geochemistry, petrology, and tectonic setting of the Archean basaltic and dioritic rocks from the N4 Iron deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil**. 1994. 320 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Departamento de Geociências, Penn State University, University Park, 1994.

TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. **Precambrian Research**, v. 42, p. 213–227, 1989.

TOLEDO, P. I. F. *et al.* Multistage Evolution of the Neoarchean (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) iron oxide copper-gold deposit, Cinzento shear zone, Carajás Province, Brazil. **Economic Geology**, v. 114, p. 1–34, 2019.

TSCHIRHART, V.; MORRIS, B. Physical Rock Property Constraints and Regional Geophysical Interpretations of the Northeast Thelon Basin, Nunavut. *In*: Exploration ’17 Petrophysics Workshop, 2017, Toronto. **Anais**. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences (DMEC), 2017.

WIRTH, K. R.; GIBBS, A. K.; OLSZEWSKI, W. J. Jr. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará Group and Serra dos Carajás Granites, Pará, Brazil. **Rev Bras Geociências**, v. 16, p. 195–200, 1986.

ZHABIN, A. G.; KREMENETSKIY, A. A. The pyrite-pyrrhotite transformation as an ore-concentrating geochemical barrier. **International Geology Review**, v. 35, n. 4, p. 359-368, 1993.

APÊNDICE A

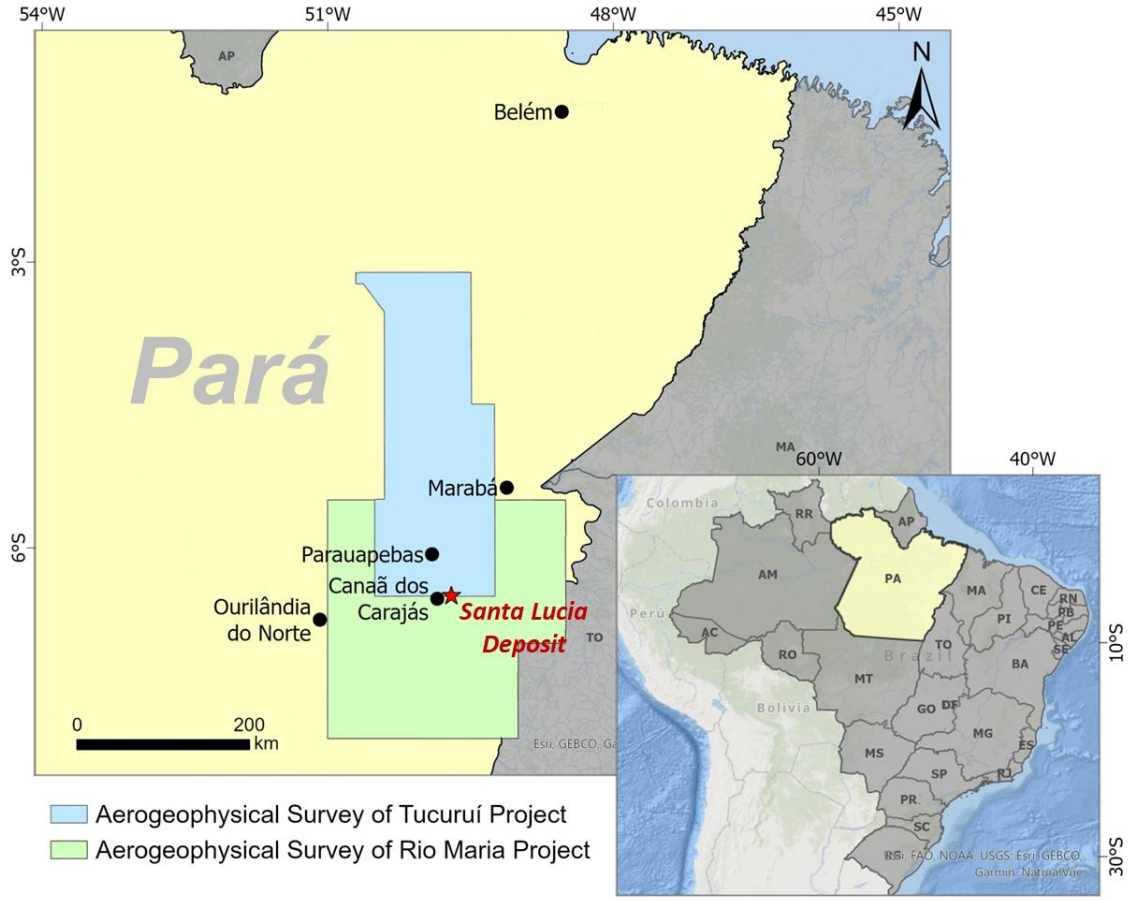


Figura A.1 - Localização dos polígonos dos levantamentos aerogeofísicos do Projeto Tucuruí e do Projeto Rio Maria, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, principais municípios do estado, além da área de estudo.

APÊNDICE B

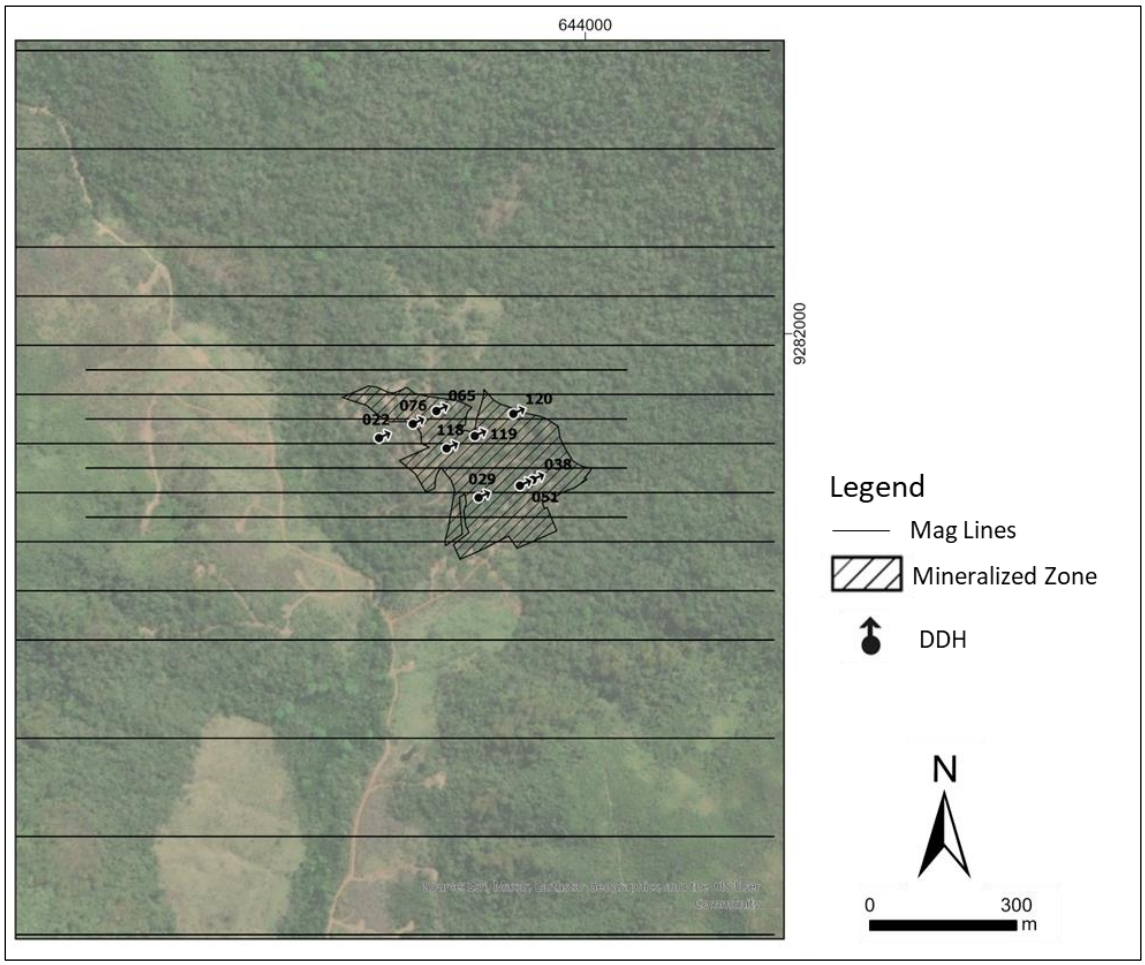


Figura B.1 – Mapa de localização das linhas do levantamento de magnetometria terrestre com zona mineralizada e furos de sondagem (DDH) sobre o depósito Santa Lúcia.

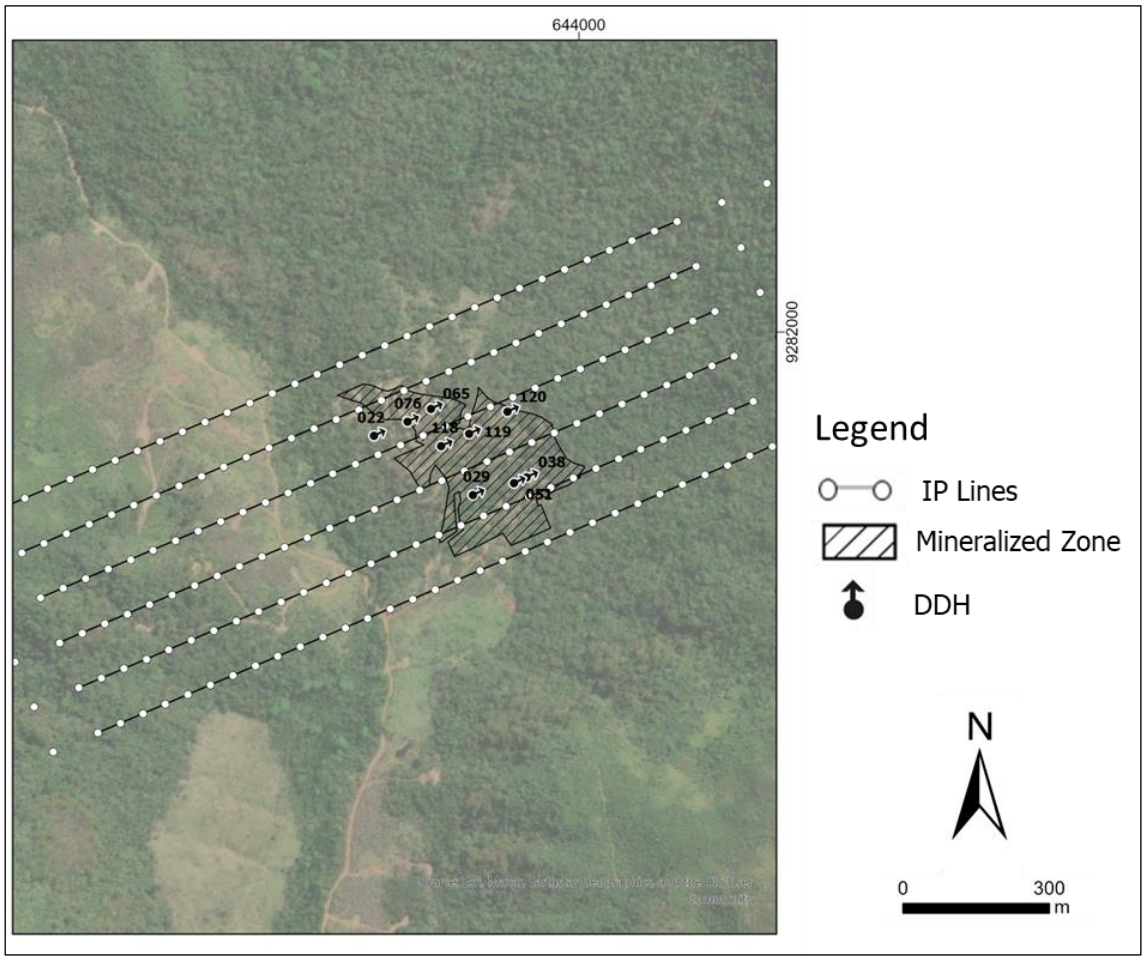


Figura B.2 – Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico de resistividade (DC) e polarização induzida (IP) com zona mineralizada e furos de sondagem (DDH) sobre o depósito Santa Lúcia.

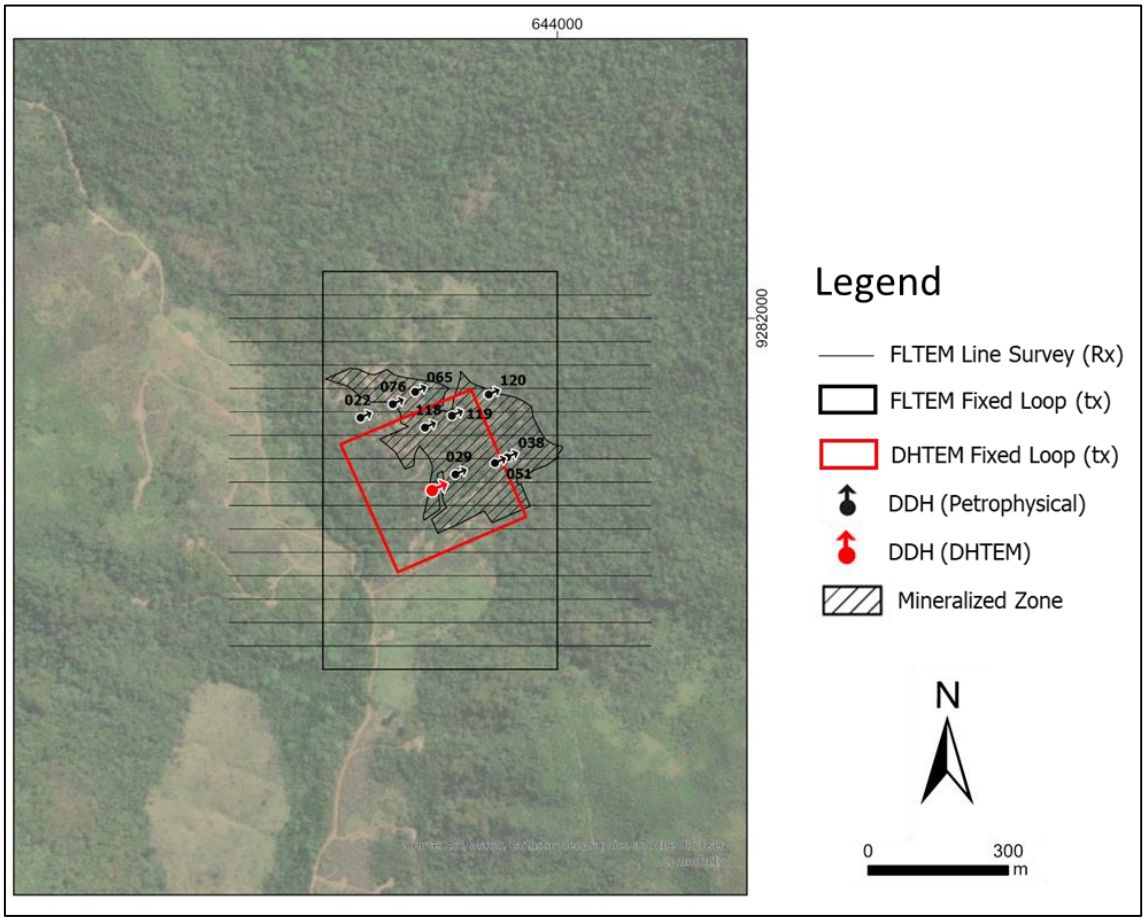


Figura B.3 – Mapa de localização das linhas do levantamento de FLTEM, loops transmissor e furo 094 (DHTEM), zona mineralizada e furos de sondagem (DDH) e o furo 094 sobre o depósito Santa Lúcia.

APÊNDICE C

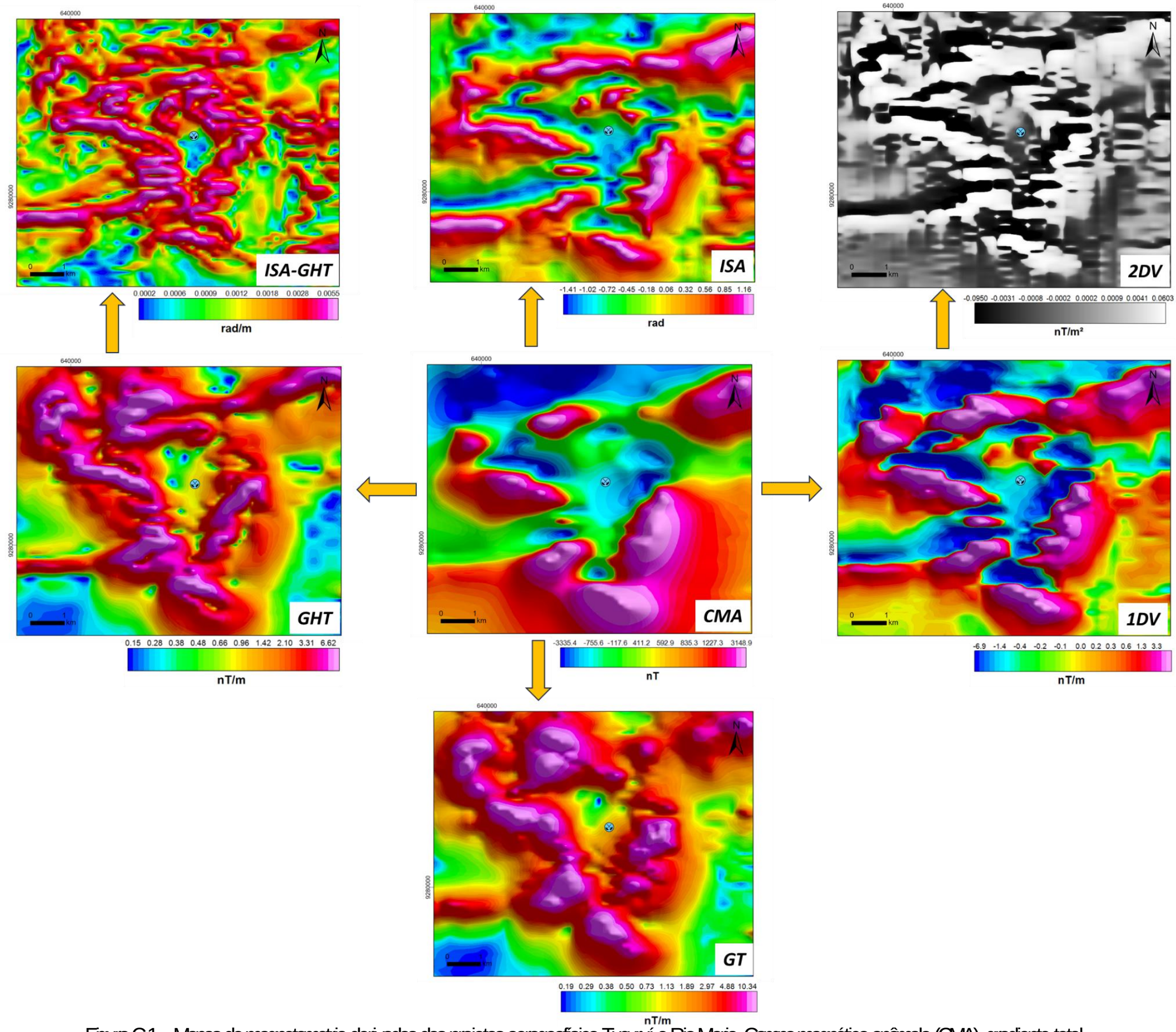


Figura C.1 – Mapas de magnetometria derivados dos projetos aerogeofísico Tucuruí e Rio Maria. Campo magnético anômalo (CMA), gradiente total (GT), 1ª derivada vertical (1DV), 2ª derivada vertical (2DV), gradiente horizontal total (GHT), inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT).

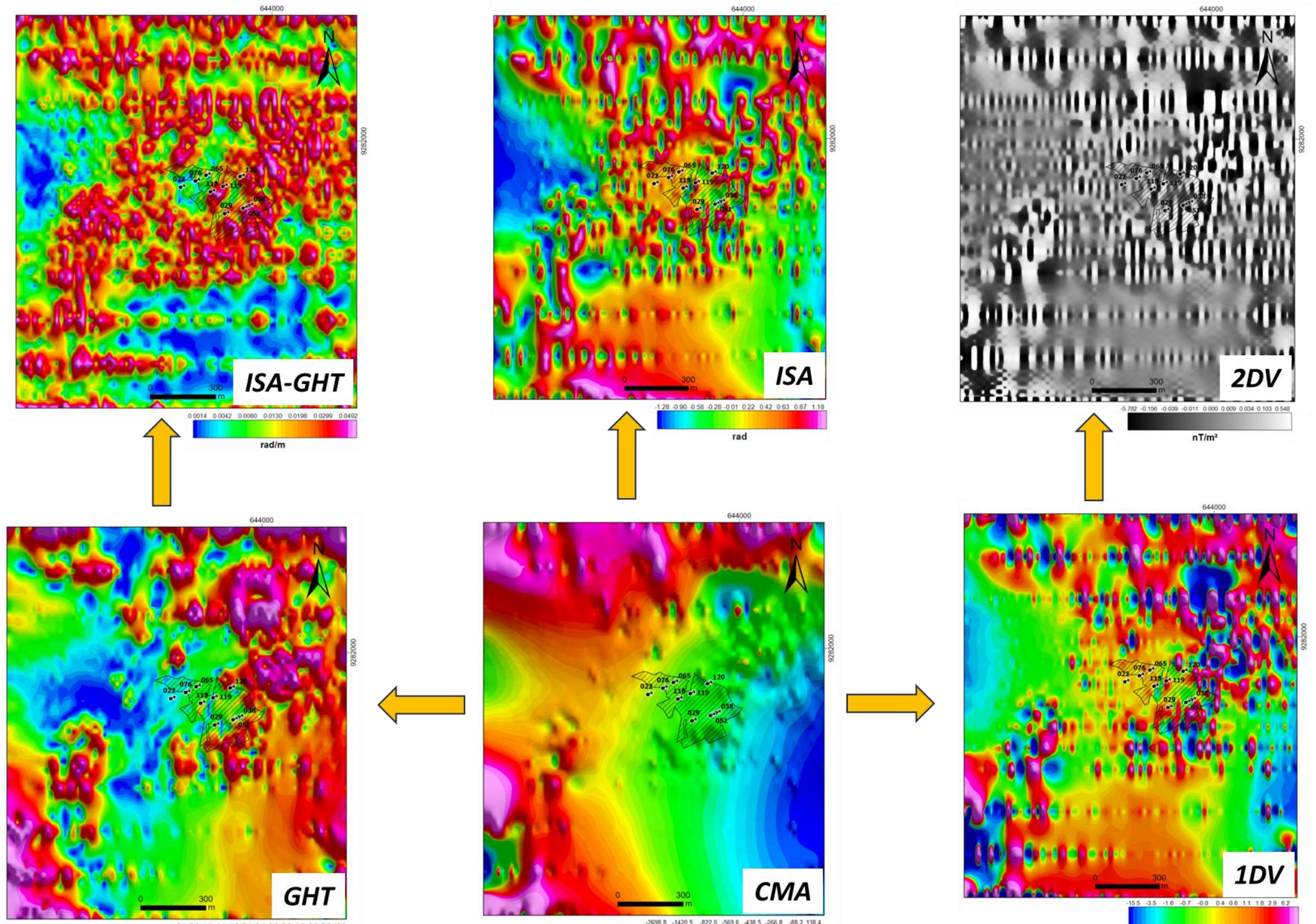


Figura C.2 - Mapas derivados do levantamento magnetometria terrestre. Campo magnético anômalo (CMA), gradiente total (GT), 1ª derivada vertical (1DV), 2ª derivada vertical (2DV), gradiente horizontal total (GHT), inclinação do sinal analítico (ISA) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA-GHT).

APÊNDICE D

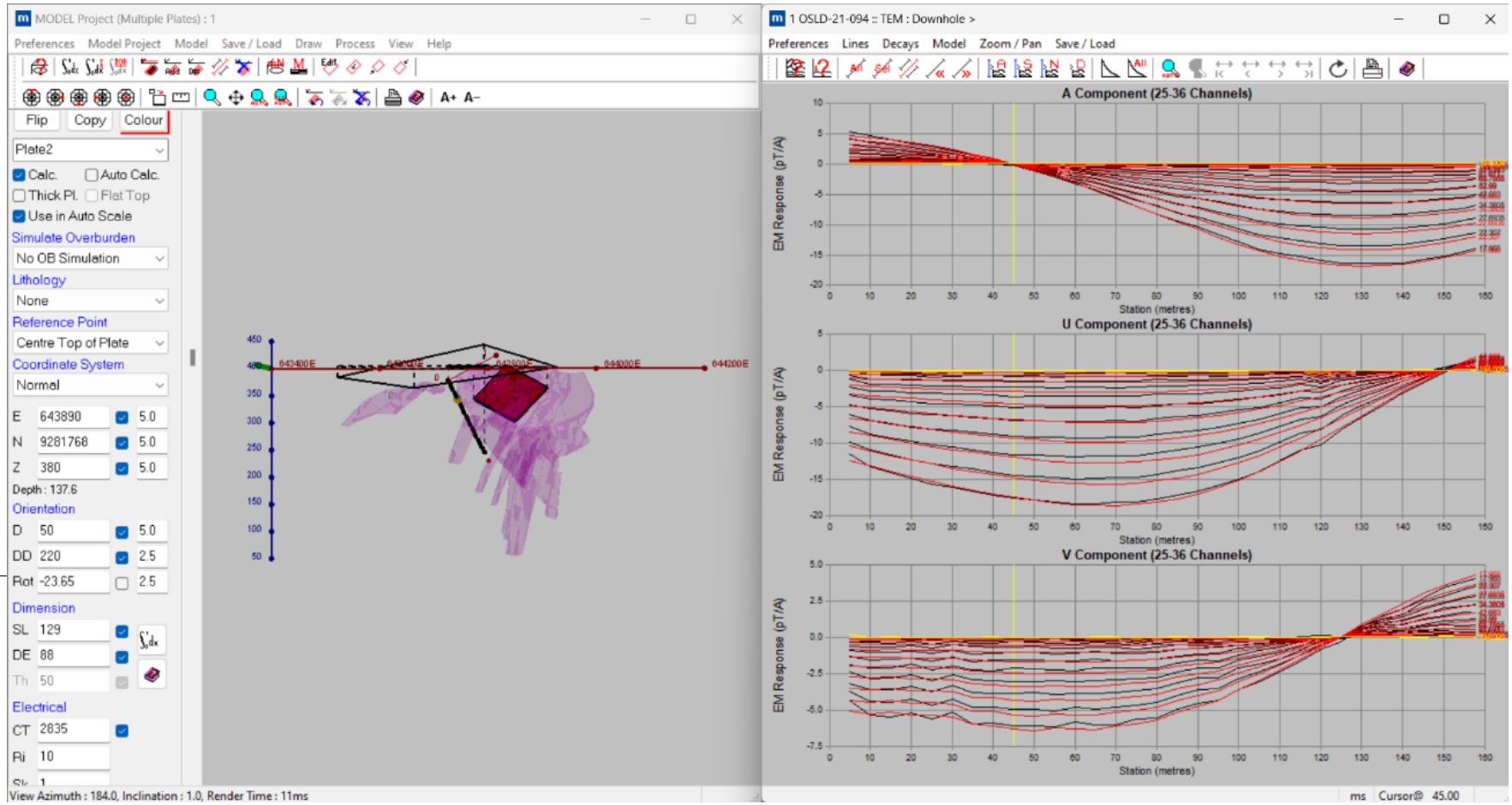


Figura D.1 - Exemplo da modelagem de placas com os dados de DHTEM. Ao lado esquerdo é a visualização 3D da placa condutora com o modelo de minério e no lado esquerdo os perfis dos dados observados (preto) e modelados (vermelho).

APÊNDICE E

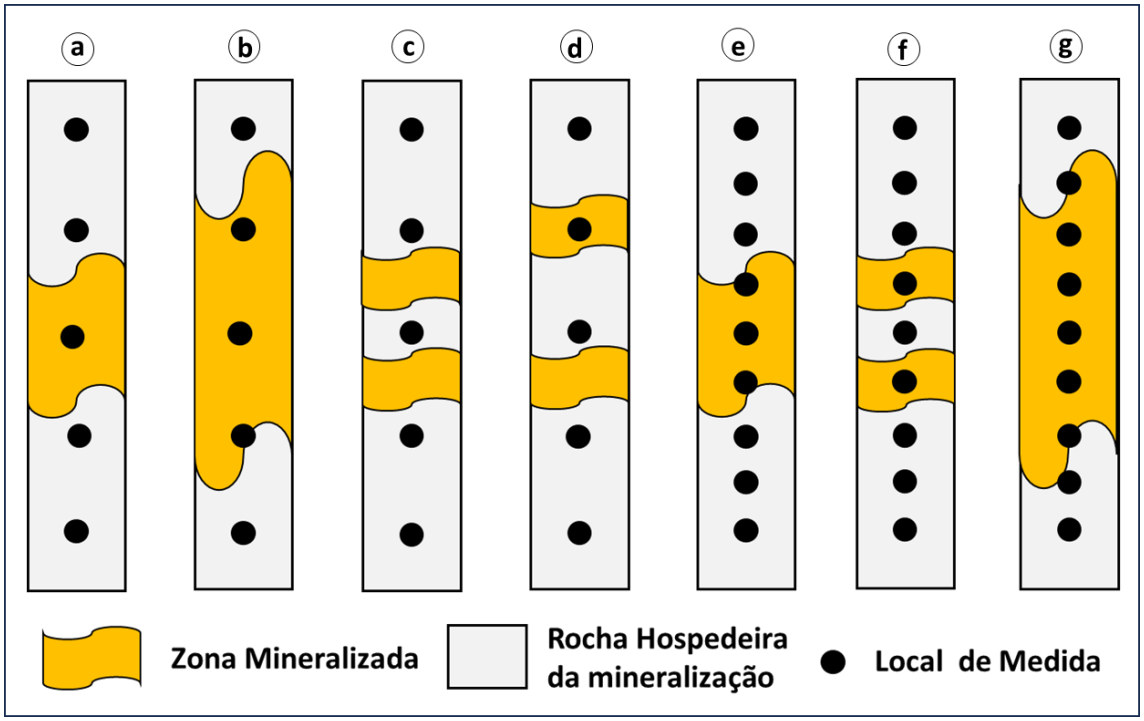


Figura E.1 - Casos hipotéticos a, b, c, d, e, f e g da metodologia aplicada para as medidas petrofísicas em rochas no testemunho de sondagem. A escolha do intervalo de medida é escolhida de acordo com o tamanho da zona mineralizada.

APÊNDICE F

Tabela F.1 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores de condutividade medidos em rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Conductivity (S/m)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.00	0.00	0.00	0.00
V-FV	0.00	10.75	0.02	0.00
M-MZds	0.00	0.00	0.00	0.00
M-MZst	0.00	232.50	1.16	0.00
M-MZmx	0.00	18.00	1.98	0.00
M-MZbx	0.00	231.00	7.89	0.00
M-MZsm	0.00	28.90	7.86	3.25
M-MZm	0.00	851.00	111.75	30.63

Tabela F.2 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores da reposta HF medidos em rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	HF Response (Hz)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.0	0.0	0.0	0.0
V-FV	0.0	18.5	0.0	0.0
M-MZds	0.0	1.0	0.0	0.0
M-MZst	0.0	55.0	0.8	0.0
M-MZmx	0.0	16.0	1.6	0.0
M-MZbx	0.0	40.0	2.9	0.0
M-MZsm	0.0	28.0	3.9	2.3
M-MZm	0.0	300.0	104.8	85.0

Tabela F.3 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores de susceptibilidade magnética medidos em rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Magsus (0.001xSI)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.0	0.5	0.2	0.2
V-FV	0.0	2.0	0.4	0.4
M-MZds	0.0	2.2	0.4	0.4
M-MZst	0.1	4.1	0.6	0.5
M-MZmx	0.1	1.4	0.5	0.4
M-MZbx	0.0	1.3	0.5	0.4
M-MZsm	0.2	4.3	1.0	0.4
M-MZm	0.4	86.1	20.2	10.4

Tabela F.4 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores de densidade medidos em rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Density (g/cc)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	2.6	2.7	2.6	2.6
V-FV	2.5	2.8	2.7	2.7
M-MZds	2.6	2.9	2.7	2.7
M-MZst	2.6	3.1	2.7	2.7
M-MZmx	2.6	3.1	2.8	2.8
M-MZbx	2.6	3.4	2.8	2.8
M-MZsm	2.6	4.0	3.2	3.2
M-MZm	3.0	4.1	3.7	3.8

Tabela F.5 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores da concentração geoquímica de ouro das rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Au (ppm)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.0	0.4	0.0	0.0
V-FV	0.0	0.6	0.0	0.0
M-MZds	0.0	2.5	0.1	0.0
M-MZst	0.0	2.4	0.2	0.1
M-MZmx	0.0	4.0	1.2	0.5
M-MZbx	0.0	3.4	0.5	0.4
M-MZsm	0.0	1.6	0.8	1.1
M-MZm	0.2	18.6	1.5	0.4

Tabela F.6 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores da concentração geoquímica de cobre de rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Cu (%)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.0	2.4	0.2	0.1
V-FV	0.0	4.3	0.1	0.1
M-MZds	0.0	7.6	0.7	0.3
M-MZst	0.0	9.3	1.2	0.6
M-MZmx	0.1	10.1	4.1	2.5
M-MZbx	0.2	17.6	5.7	3.5
M-MZsm	0.1	30.8	11.6	10.9
M-MZm	11.0	30.9	19.9	21.3

Tabela F.7 – Mínimo, máximo, média e mediana dos valores da concentração geoquímica de ferro de rochas em nove furos de sondagem diamantada do depósito de Cu-Au Santa Lúcia.

	Fe (%)			
Litology	Minimum	Maximum	Mean	Median
F-PG	0.7	4.2	1.5	1.4
V-FV	0.6	16.0	4.2	4.0
M-MZds	2.4	7.5	4.3	4.2
M-MZst	3.1	14.5	5.3	4.9
M-MZmx	3.3	14.6	7.8	6.3
M-MZbx	1.1	20.2	8.0	6.3
M-MZsm	3.7	23.1	12.5	12.4
M-MZm	15.1	34.6	26.1	27.0

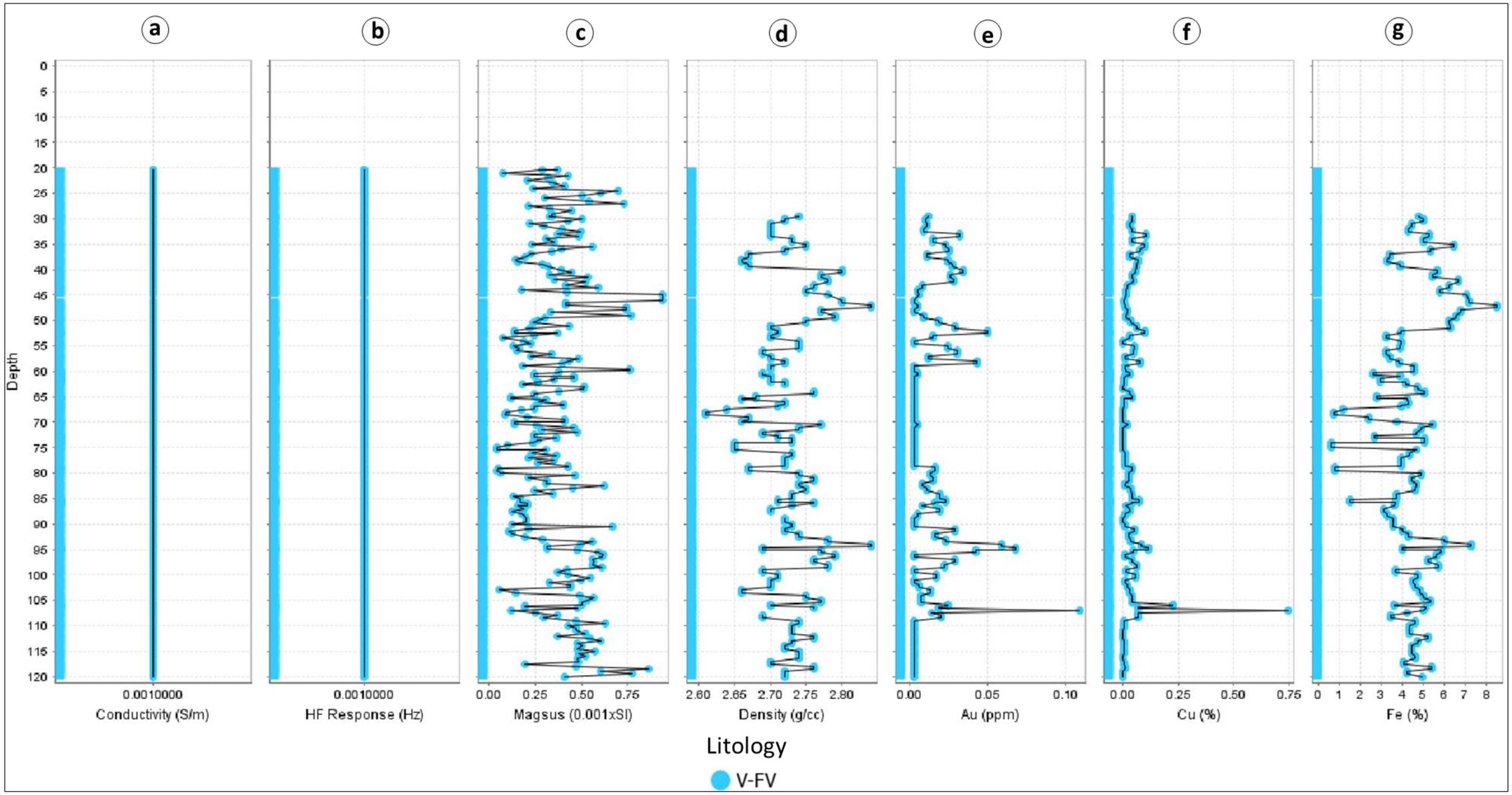


Figura G.1 - Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 022 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologia: vulcânicas félsicas (V-FV).

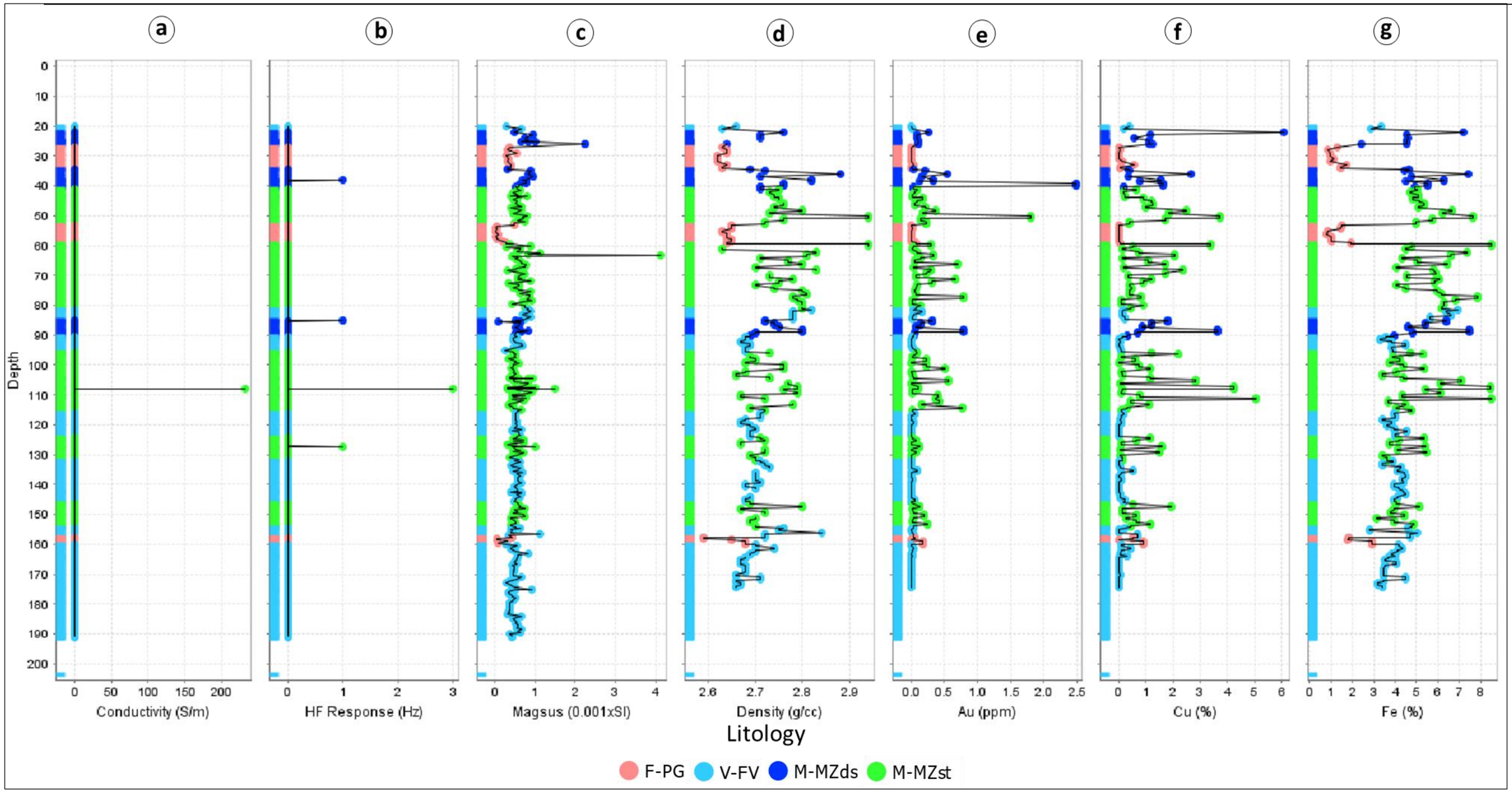


Figura G.2 - Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 029 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), intrusão de pegmatito (F-PG), minério disseminado (MZ-ds) e tipo string (M-Mst).

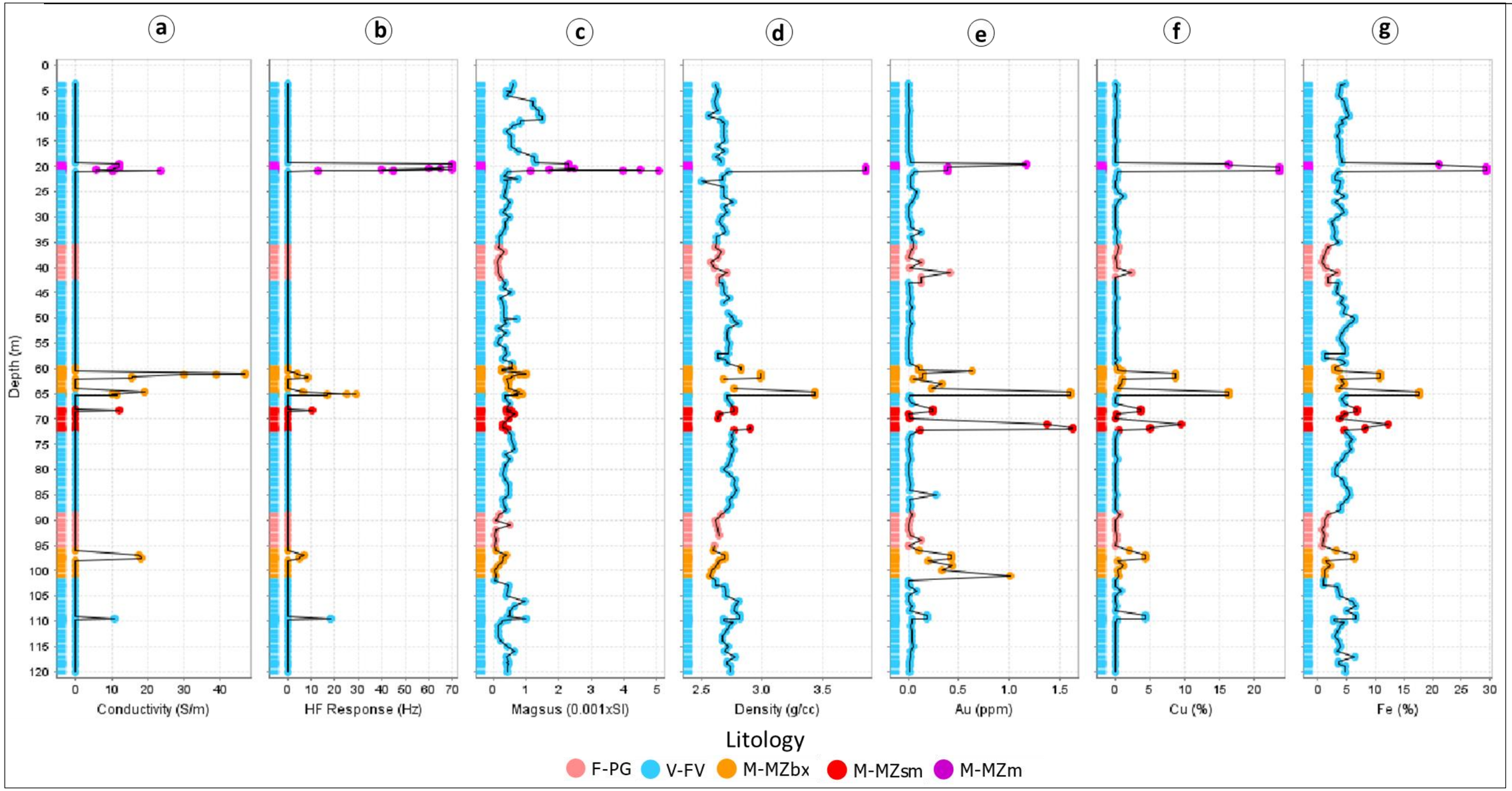


Figura G.3 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 051 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), intrusão de pegmatito (F-PG), minério brechado (M-MZbx), semi-maciço (M-MZsm) e maciço (M-MZm).

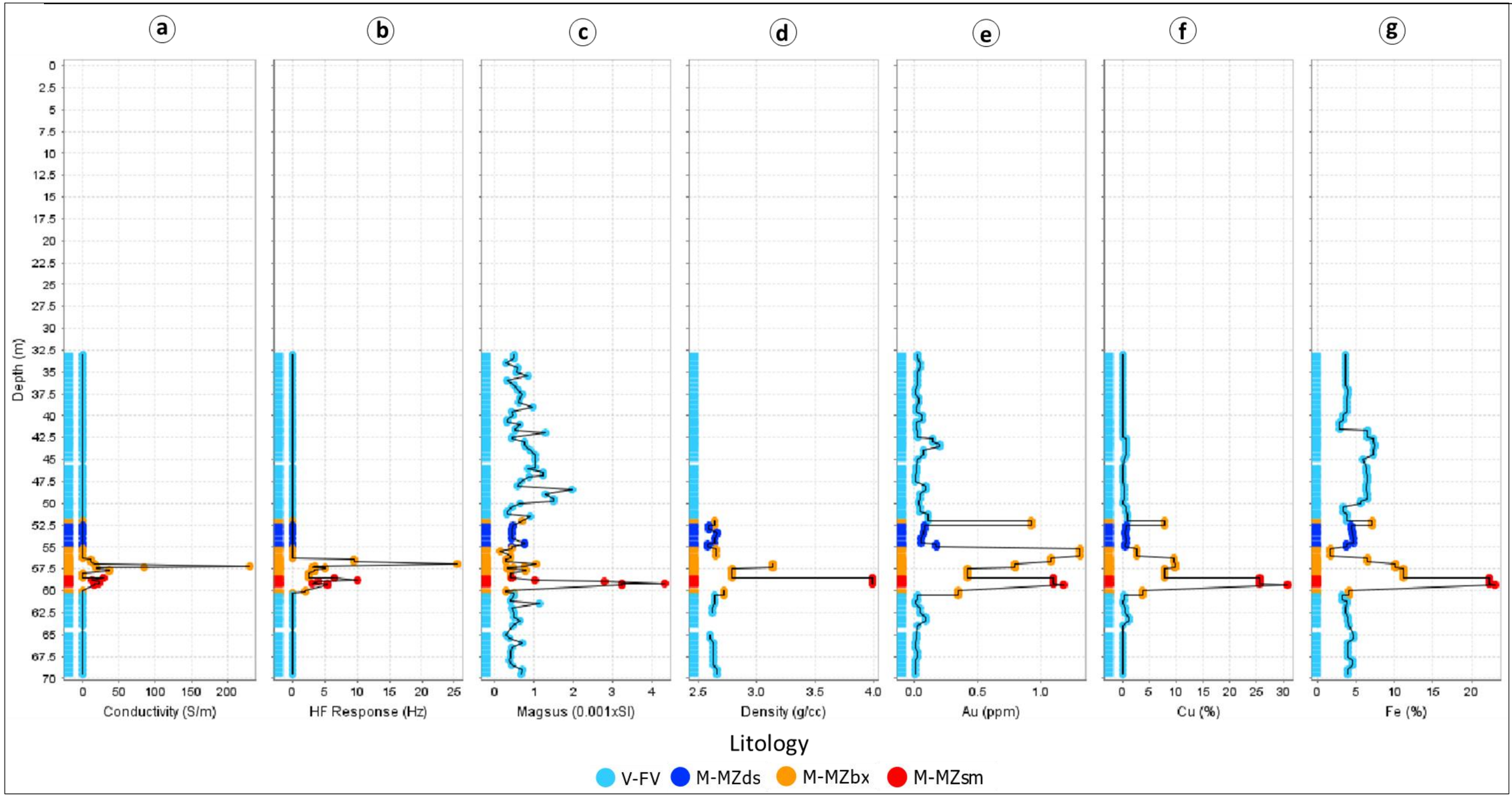


Figura G.4 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 065 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), minério disseminado (MZ-ds), brechado (M-MZbx) e semi-maciço (M-MZsm).

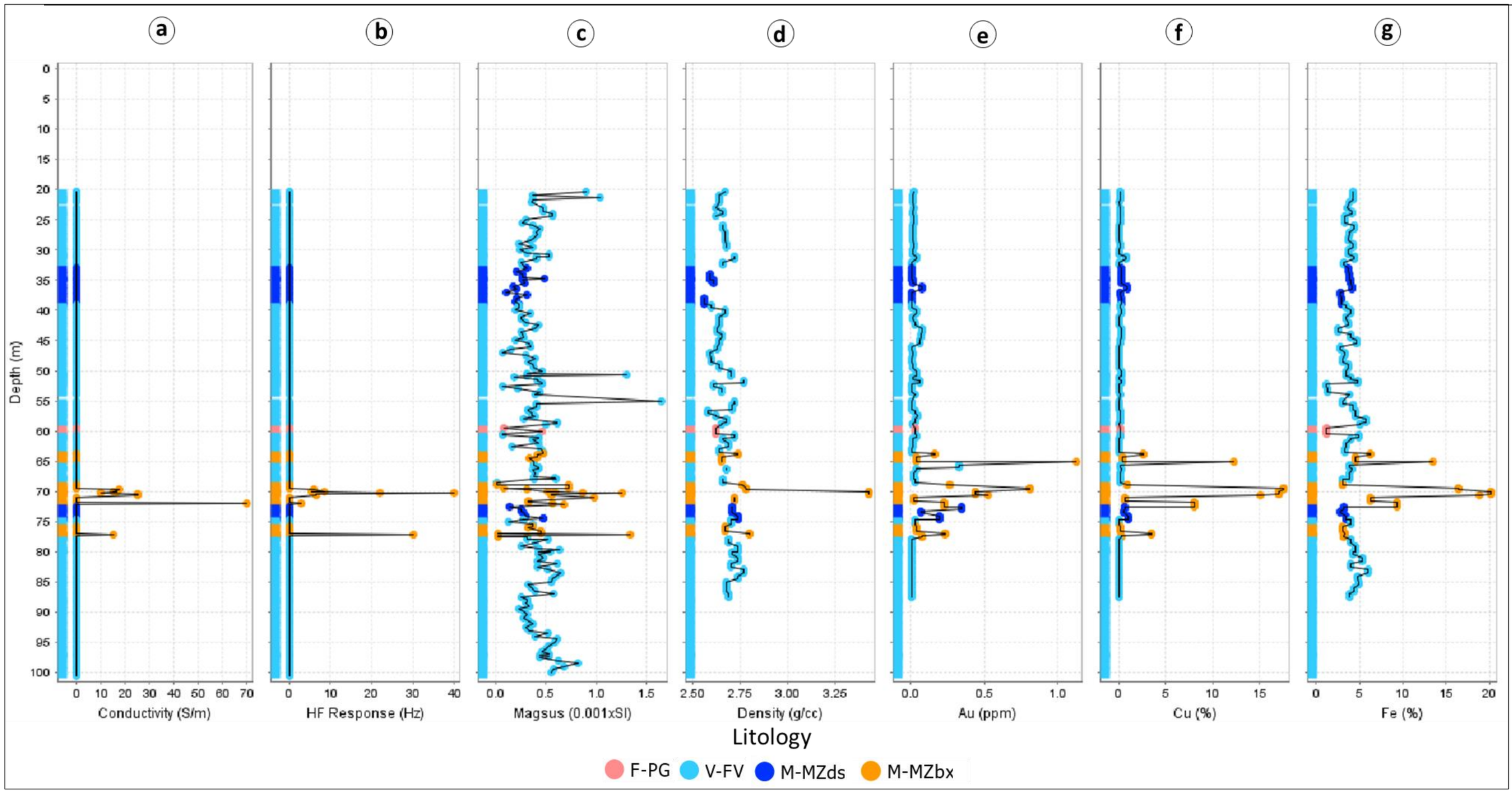


Figura G.5 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 076 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), intrusão de pegmatito (F-PG), minério disseminado (MZ-ds) e brechado (M-MZbx).

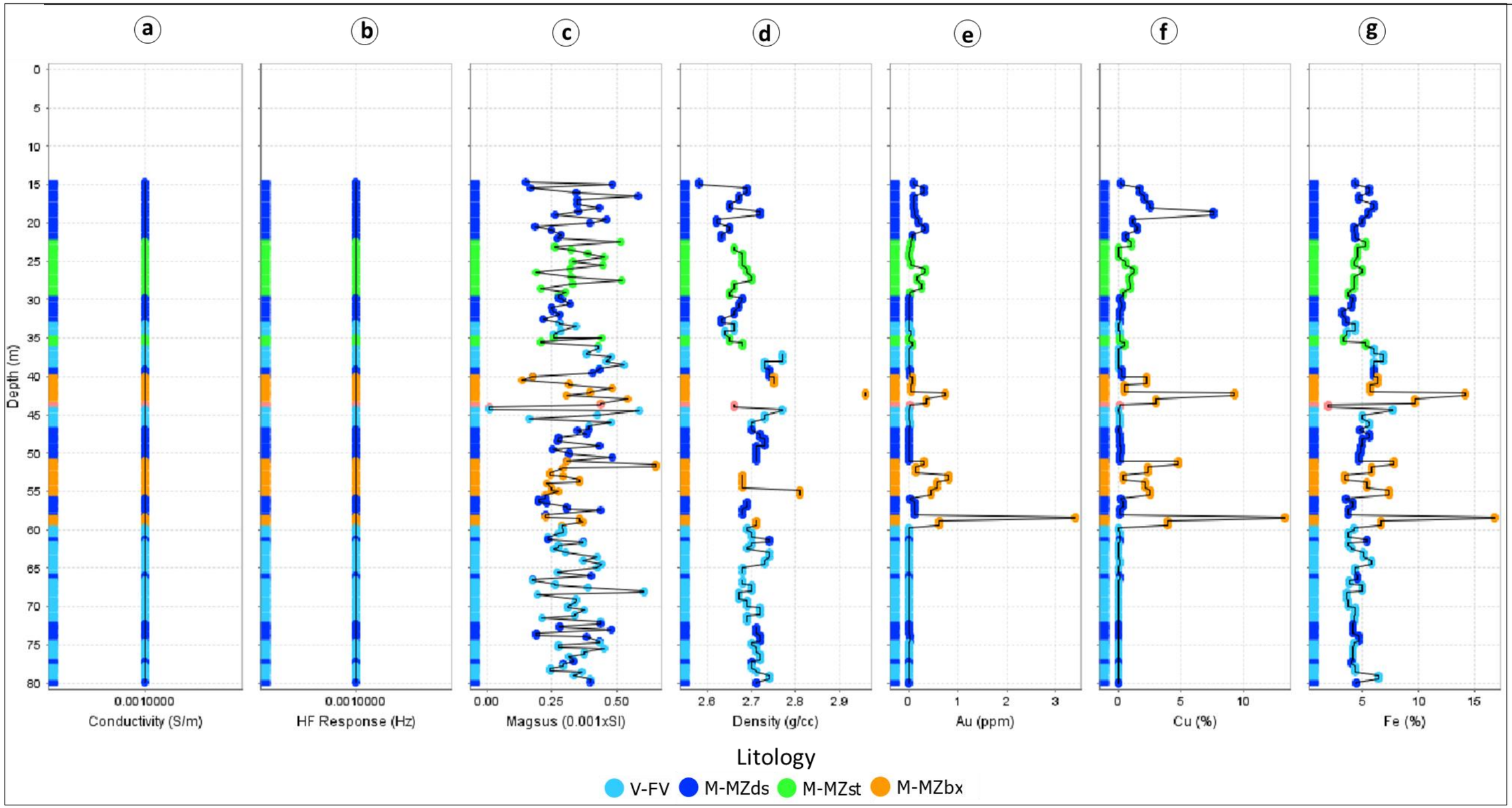


Figura G.6 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 118 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV), minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-MZst) e brechado (M-MZbx).

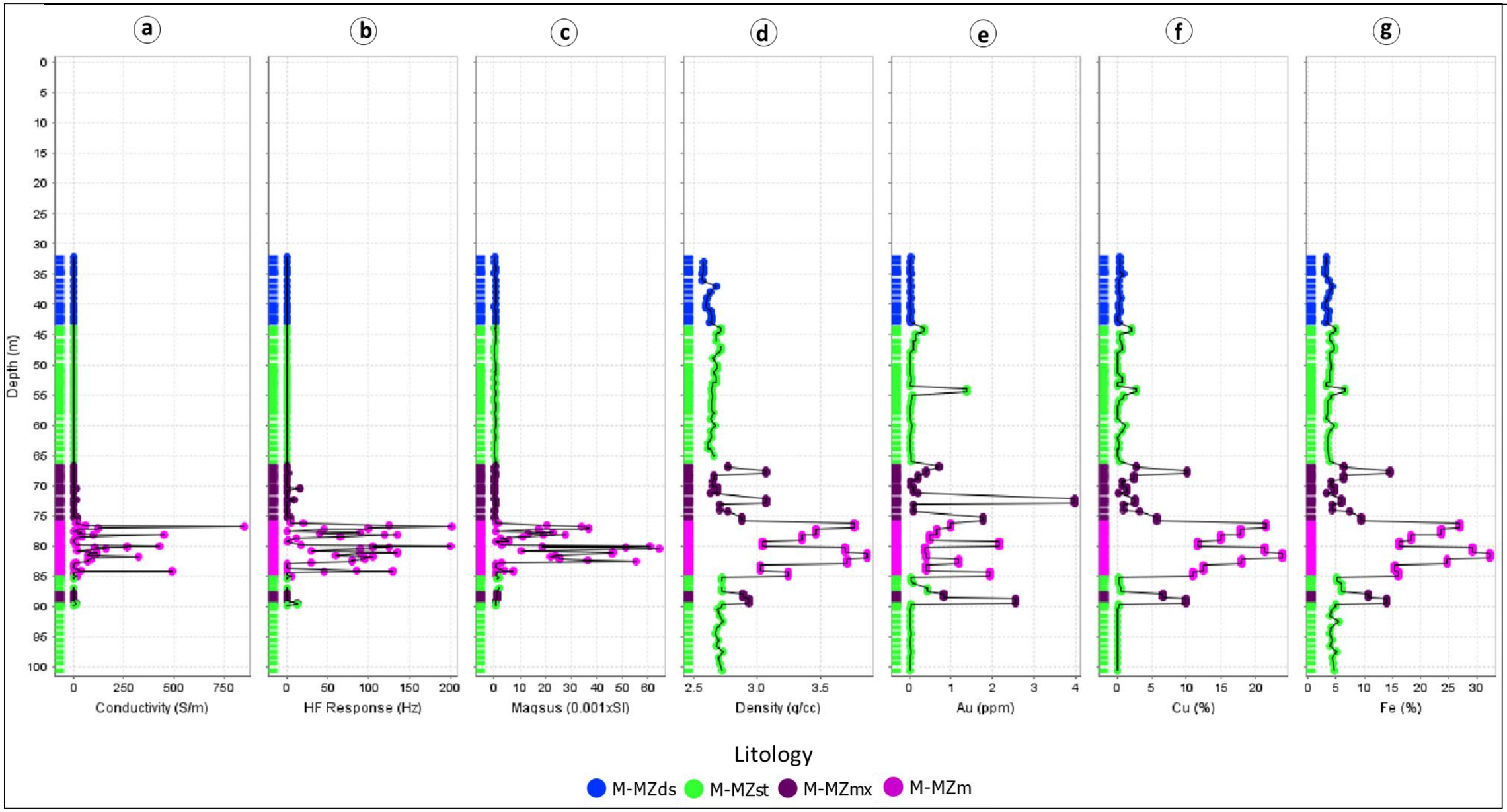


Figura G.7 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 119 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: minério disseminado (MZ-ds), tipo string (M-MZst), em matriz (M-MZmx) e maciço (M-MZm).

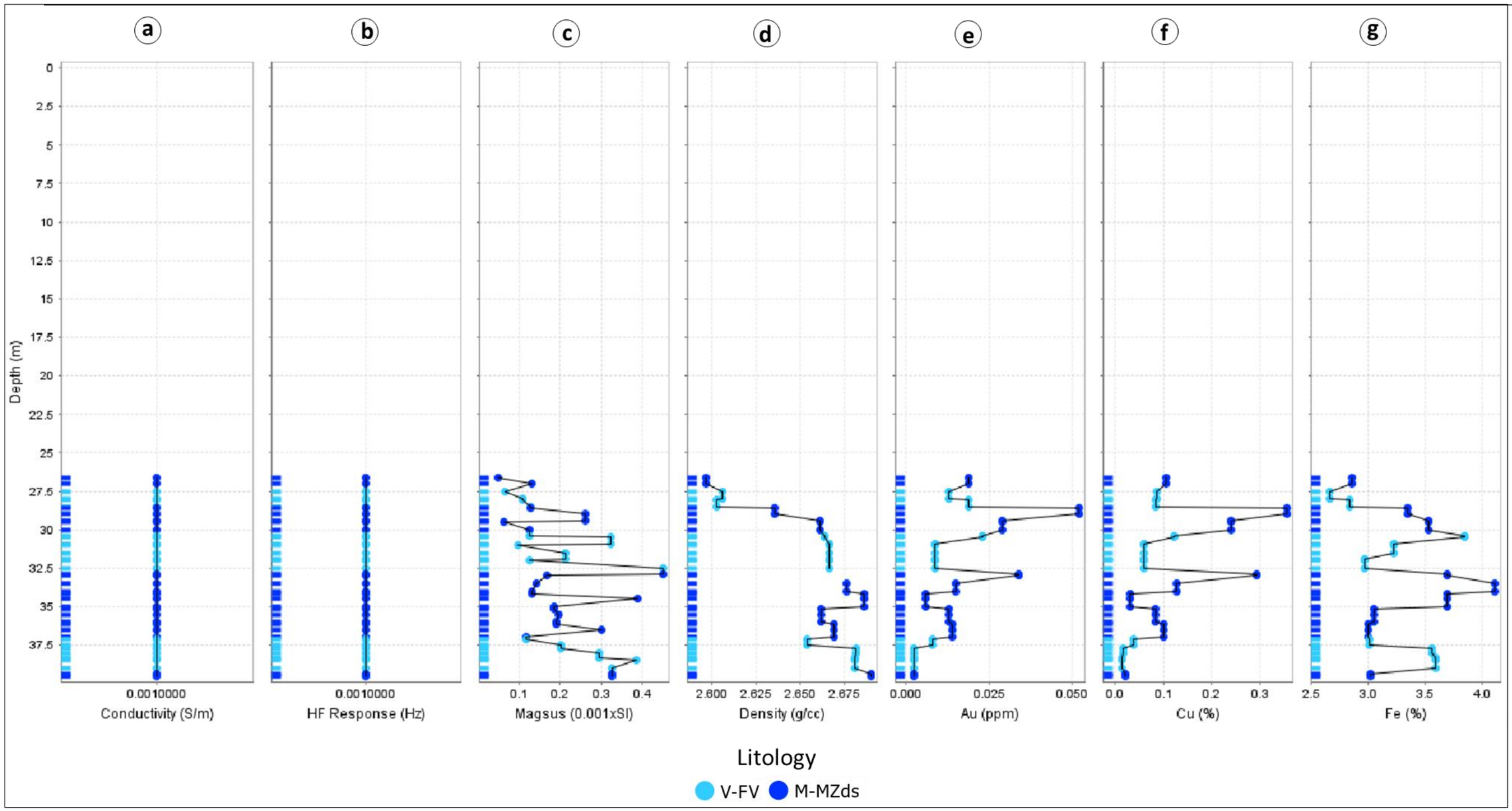


Figura G.8 – Strip logs dos dados lito-geoquímico e petrofísico do furo 120 do depósito Santa Lúcia. (a) Condutividade em S/m, (b) Resposta HF em Hz, (c) Susceptibilidade Magnética em 0.001xSI, (d) Densidade em g/cc, (e) Ouro em ppm, (f) Cobre em porcentagem e (g) Ferro em porcentagem. Litologias: vulcânicas félsicas (V-FV) e zona de minério disseminado.

APÊNDICE H

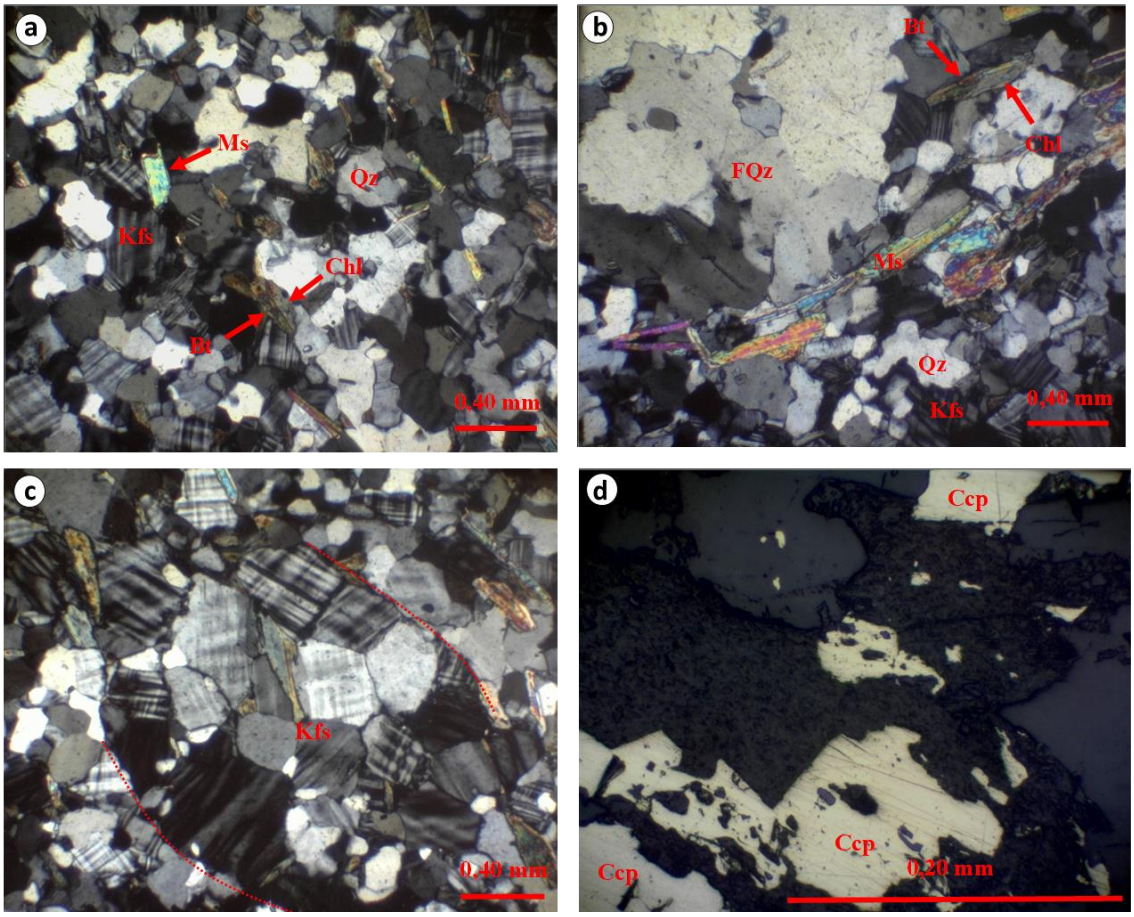


Figura H.1 – Fotomicrografia da amostra OZSL-001. (a) Matriz constituída de agregados recristalizados de K-feldspato (Kfs) + quartzo (Qz) associados aos cristais de biotita (Bt) parcialmente substituídos por clorita (Chl) e cristais de mica branca/sericita (Ms). (b) Fenocristal recristalizado de quartzo (FQz) imerso em uma matriz composta por agregados recristalizados de K-feldspato (Kfs) + quartzo (Qz) associados aos cordões de mica branca/sericita (Ms) e aos cristais de biotita (Bt) parcialmente substituídos por clorita (Chl). (c) Fenocristal (porções parcialmente tracejadas) atualmente representado por agregados recristalizados de K-feldspato (Kfs) possivelmente hidrotermal. (d) Cristais de calcopirita (Ccp) dispersos.

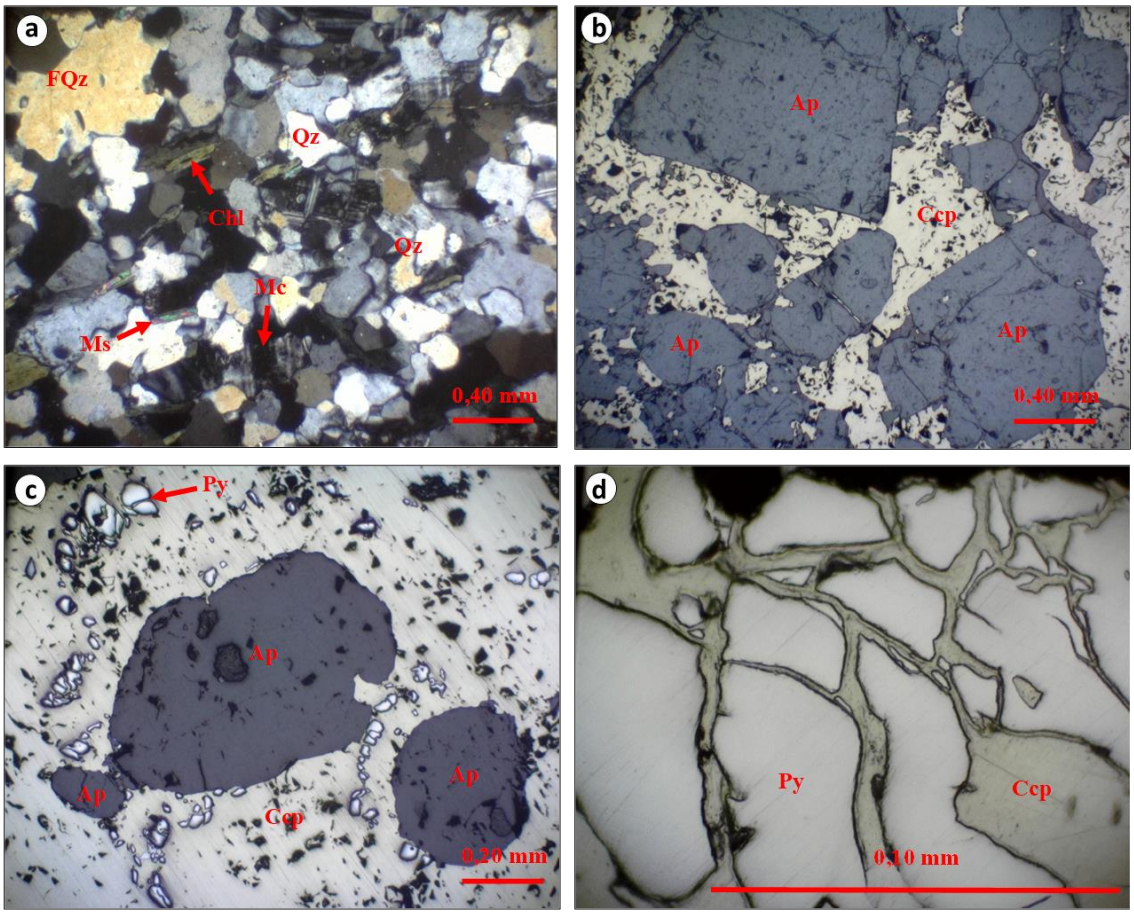


Figura H.2 – Fotomicrografia da amostra OZSL-002. (a) Matriz constituída de agregados recristalizados de microclina (Mc) + quartzo (Qz) associados aos cristais intergranulares de clorita e localmente de mica branca/sericita (Ms). (b) Calcopirita (Ccp) + pirita (Py) e clastos de apatita (Ap). (c) Calcopirita (Ccp) e clastos de apatita (Ap). (d) Calcopirita (Ccp) infiltrando em cristais fraturados de pirita (Py).

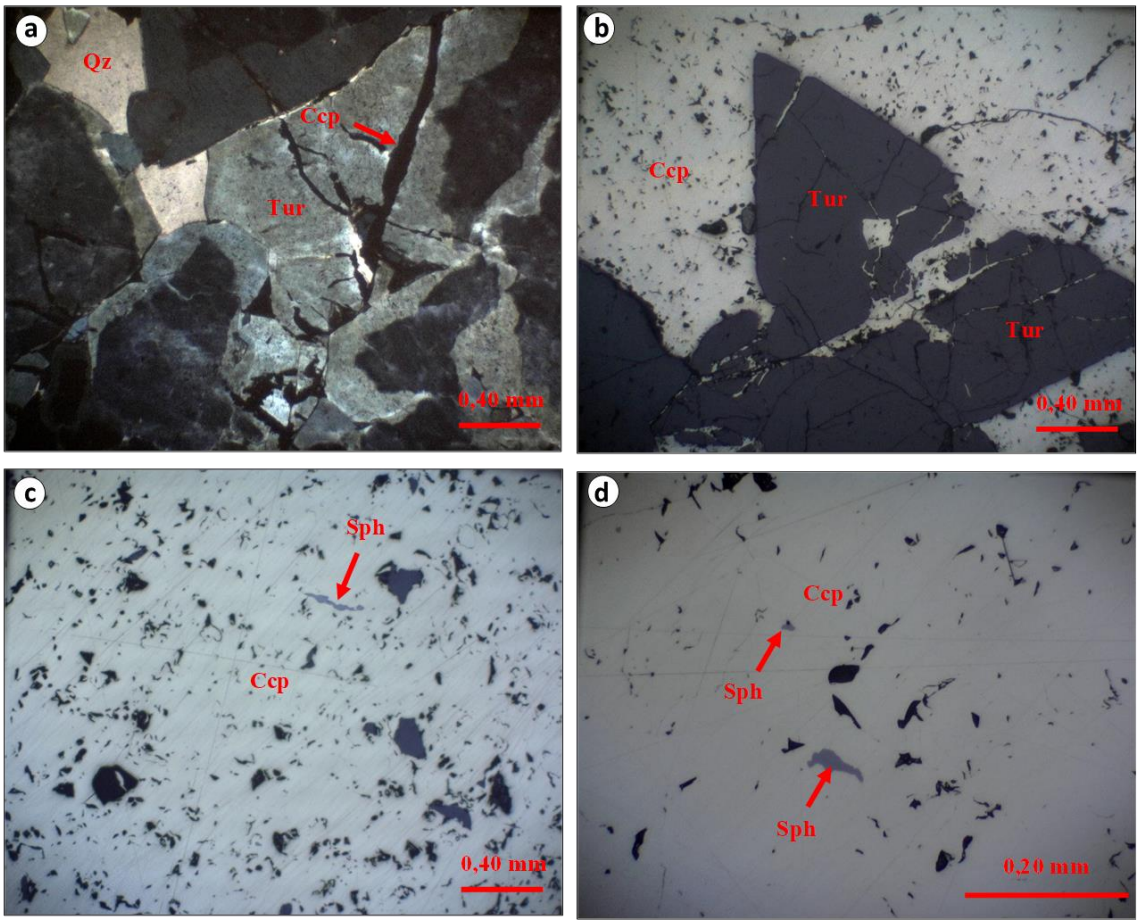


Figura H.3 – Fotomicrografia da amostra OZSL-002. (a) pegmatito constituído de cristais de turmalina (Tur) localmente associados aos cristais de quartzo (Qz), calcopirita (Ccp) em fraturas. (b) pegmatito constituído de cristais de turmalina (Tur) e matriz composta por uma massa de calcopirita (Ccp). (c) e (d) Calcopirita (Ccp) maciça ocasionalmente com inclusões de esfalerita (Sph).

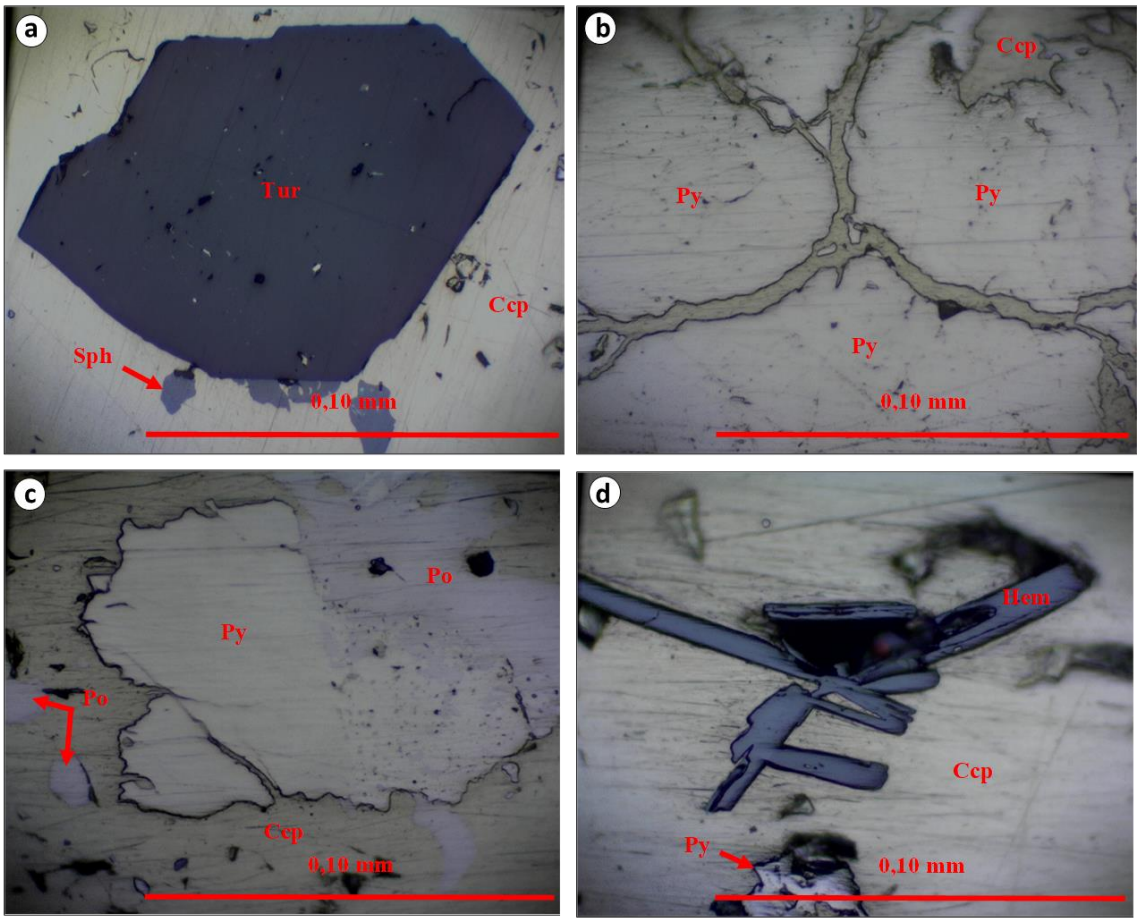


Figura H.4 – Fotomicrografia da amostra OZSL-004.(a) Clasto de turmalina (Tur) e matriz constituída de calcopirita (Ccp) + esfalerita (Sph). (b) Calcopirita (Ccp) preenchendo fraturas em pirita (Py). (c) Associação calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + pirita (Py). Observar formação de pirita (Py) às custas de pirrotita (Po). (d) Associação calcopirita (Ccp) + pirita (Py) + hematita (Hem).

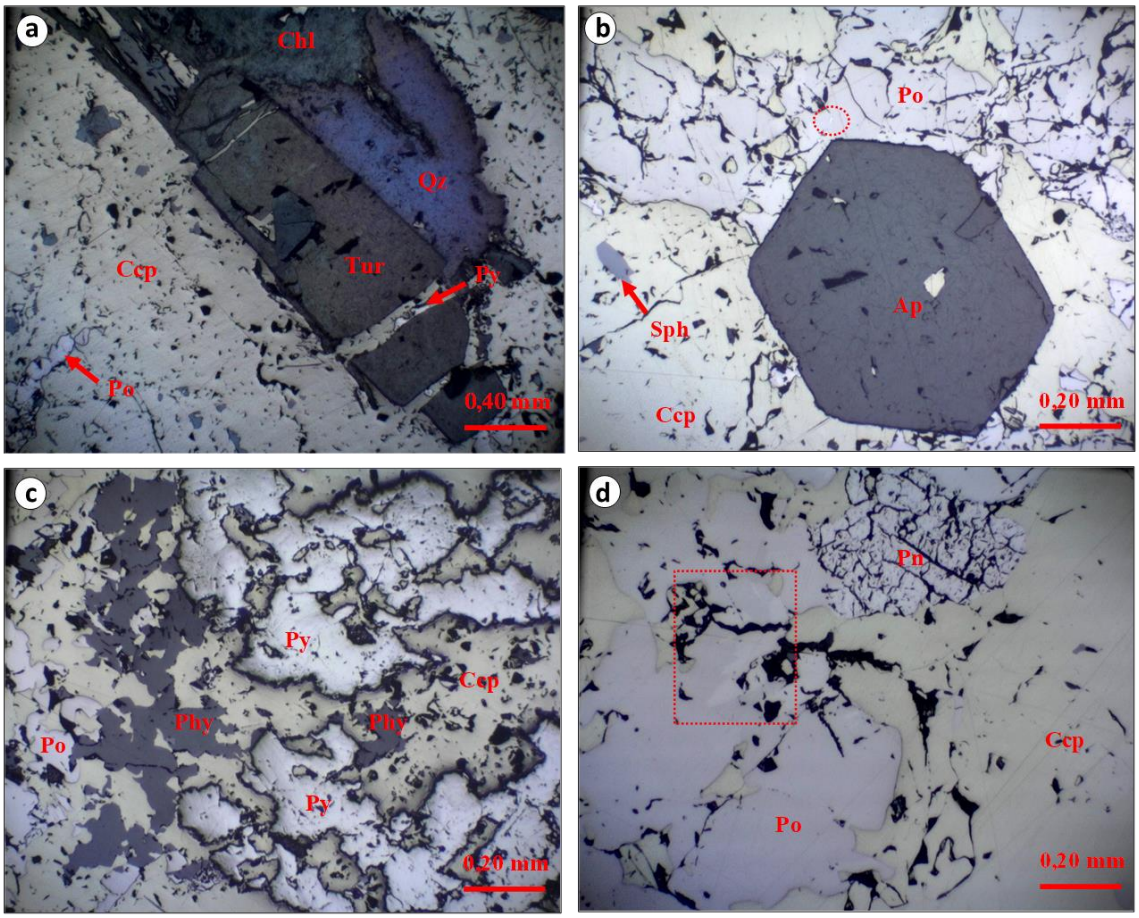


Figura H.5 – Fotomicrografia da amostra OZSL-005. (a) Clasto de pegmatito composto por cristais de turmalina (Tur) + clorita (Chl) + quartzo (Qz) e matriz constituída de calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + pirita (Py). (b) Clasto de apatita (Ap) e matriz constituída de cristais de calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + esfalerita (Sph). Notar pontuação de prata (área circulada) inclusa em pirrotita (Po). (c) Associação calcopirita (Ccp) + pirita (Py) + pirrotita (Po). (d) Calcopirita (Ccp) infiltrando em cristais fraturados de pirita (Py). Os minerais transparentes são filossilicatos (Phy). (d) Associação calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + pentlandita (Pn). Cristais deformados de pirrotita (área tracejada).

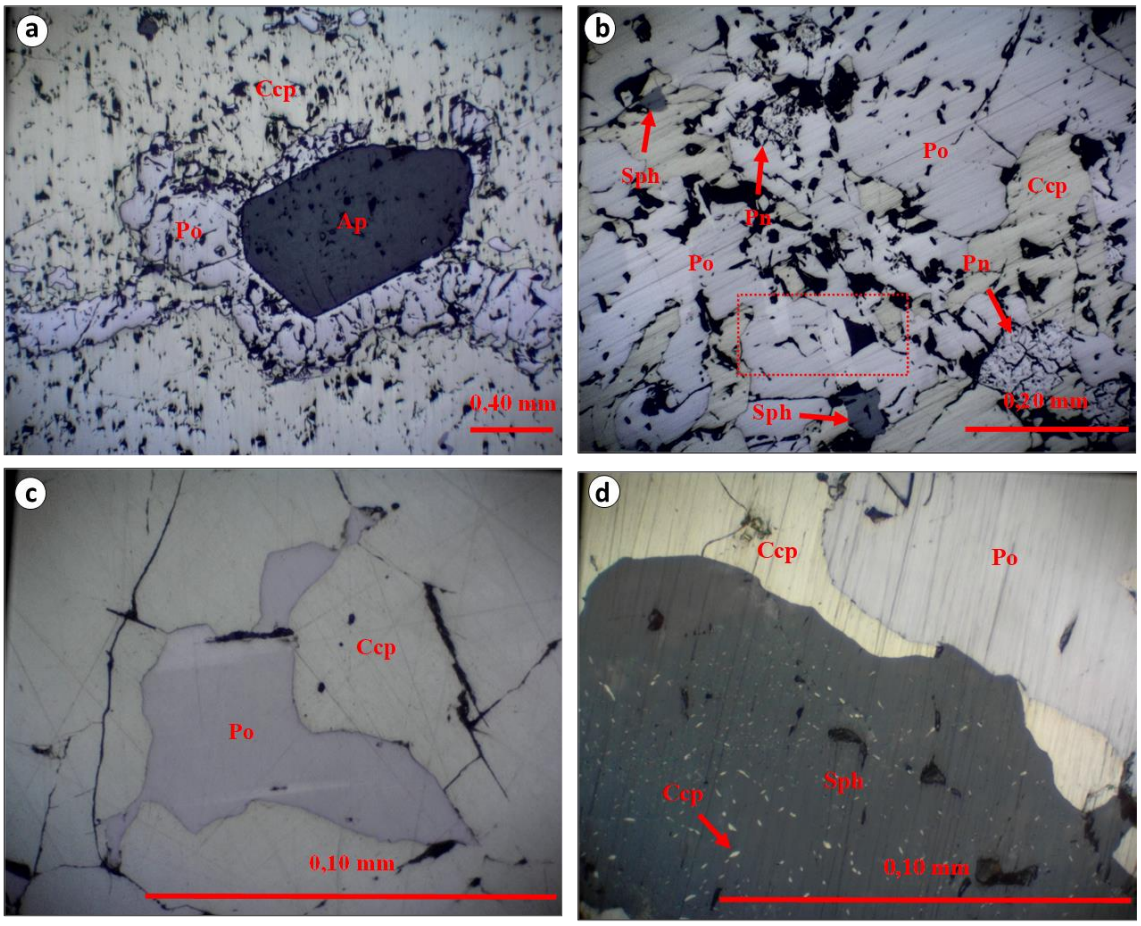


Figura H.6 – Fotomicrografia da amostra OZSL-006. (a) Calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) suportando um clasto de apatita (Ap). (b) Associação calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + pentlandita (Pn) + esfalerita (Sph). (c) Associação calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po). (d) Associação calcopirita (Ccp) + pirrotita (Po) + esfalerita (Sph).

3. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

No contexto do depósito Cu-Au Santa Lúcia, uma compreensão detalhada das respostas geofísicas e petrofísicas é fundamental para identificar a assinatura que mapeia o depósito, geometria e indicação de prospectividade. As principais respostas observadas na zona mineralizada e como estas se correlacionam com a geologia e mineralogia subjacentes, facilitam a identificação de áreas-alvo para exploração futura.

A modelagem e inversão de dados geofísicos correspondem a um processo computacional usado para obter um modelo petrofísico, que descreve a distribuição de uma propriedade física em subsuperfície. A interpretação dos dados petrofísicos adquiridos através da medida direta em rocha é crucial para a interpretação dos modelos, uma vez que é a propriedade física das rochas que governa sua resposta geofísica (Tschirhart; Morris; Jefferson, 2017; Fullagar *et al.*, 2017).

Dentith *et al*., (2020) apresentam uma nova estrutura conceitual que relaciona as propriedades físicas das rochas às suas características geológicas, identificando três comportamentos extremos (end-members) relacionado aos controles de volume, grão e textura. Esta relação é representada por um diagrama ternário que demonstra como as propriedades físicas das rochas são afetadas por essas características extremas e são dados da seguinte forma:

- Controle de volume: são aquelas onde a propriedade da rocha pode ser estimada a partir de uma média volumétrica ponderada das propriedades dos componentes minerais. A densidade de uma rocha é a média das densidades da composição de vários minerais e poros.
- Controle de grãos: as propriedades físicas das rochas são dominadas por um componente minoritário da rocha e influenciadas pelo tamanho, forma e distribuição dos grãos minerais. As propriedades ferromagnéticas dos minerais presentes na rocha são influenciadas por esse controle. As rochas com minerais paramagnéticos mostram um comportamento híbrido entre volume e grão.

- Controle de textura: é dominado por um ou mais componentes minoritários da rocha, mas é mais influenciado pelas relações geométricas entre os grãos menores. A condutividade elétrica depende da formação de redes condutoras contínuas entre os minerais. Neste caso, aplica-se o conceito de conectividade. Entretanto, aglomerados de minerais condutores não conectados podem proporcionar um fluxo de corrente devido à geometria dos poros.

Footprint Geofísico

Os principais footprints geofísicos do depósito Santa Lúcia foram determinados a partir da análise dos modelos gerados a partir dos levantamentos geofísicos magnético terrestre, polarização induzida (IP), resistividade e eletromagnético no domínio do tempo (DHTEM), comparando com a zona de mineralização de baixo teor de cobre que está relacionada às texturas de minério disseminado, string e matriz de alto teor de cobre com as texturas de minério brechado, semi-maciço e maciço. Cada método geofísico forneceu percepções distintas sobre a mineralização do depósito, revelando suas características e limitações. A caracterização da assinatura geofísica do depósito Santa Lúcia foi determinada a partir da análise dos modelos gerados a partir dos levantamentos geofísicos magnético terrestre, polarização induzida (IP), resistividade e eletromagnético no domínio do tempo (DHTEM), comparando com a zona de mineralização de baixo teor de cobre que está relacionado as texturas de minério disseminado, *string* e matriz, e a de alto teor cobre com as texturas de minério brechado, semi-maciço e maciço. A análise e interpretação de ada método geofísico forneceu parâmetros que permitiu avaliar a aplicabilidade para o tipo de mineralização e espessura da mineralização.

- Método magnetométrico: a análise do modelo de susceptibilidade magnética utilizando a inversão do vetor magnético (MVI) indicou que a mineralização do depósito Santa Lúcia não apresenta contraste de susceptibilidade magnética, e as anomalias presentes na seção estão relacionadas à formação ferrífera. O baixo contraste magnético sugere a

ausência de minerais ferromagnéticos. O minério maciço apresenta o maior contraste de susceptibilidade magnética quando comparado com as outras litologias em relação às texturas de minério. O volume de minerais paramagnéticos presentes na zona mineralizada é superior aos minerais ferromagnéticos, o que influencia na resposta magnética dos levantamentos geofísicos.

- Método polarização induzida (IP): O modelo de inversão de cargabilidade mostrou uma correlação positiva com o minério disseminado e tipo *string*. As anomalias de cargabilidade são observadas principalmente nas zonas mais rasas do depósito, sugerindo que esses sulfetos funcionam como capacitores e facilitam o acúmulo de carga elétrica. No entanto, nem todas as zonas de mineralização com alto teor foram detectadas por este método, indicando que a cargabilidade pode ser influenciada pela aglomeração e distribuição dos sulfetos não conectados, bem como pela profundidade da mineralização.
- Método resistividade elétrica: o modelo de inversão de resistividade elétrica apresentou uma forte correlação com a zona mineralizada de baixo e alto teor de cobre. O modelo de resistividade do depósito Santa Lúcia conseguiu mapear efetivamente a zona mineralizada como um todo, tornando-se mais condutivo na zona de minério com alto teor de cobre. A forte correlação entre a anomalia de condutividade e a área mineralizada sugere que a presença de sulfetos em diferentes texturas, na presença de grãos condutores e espaço poroso, facilita o fluxo de corrente elétrica, que está bem representado neste modelo.
- Método eletromagnético: o método eletromagnético no domínio do tempo (TDEM), as placas modeladas a partir dos dados de borehole (DHTEM) destacaram-se na identificação de zonas de mineralização de alto teor de cobre. Os modelos de placas condutoras gerados a partir de dados eletromagnéticos (TDEM) necessitam da conectividade entre os grãos de minerais condutores, pois facilitam a formação de redes condutoras contínuas. As texturas de minério brechado, semi-maciço e maciço

apresentam minerais de sulfetos conectados que facilitam o fluxo de correntes elétricas.

Footprint Petrofísico

O footprint petrofísico no depósito Cu-Au Santa Lúcia está diretamente correlacionado com características dos controles de volume, grão e textura dos principais minerais de sulfetos, como calcopirita, pirrotita e pirita.

No depósito Santa Lúcia, o mineral de sulfeto que apresenta maior condutividade e susceptibilidade magnética é a pirrotita. A pirrotita monoclínica (Fe_7S_8) possui uma alta susceptibilidade magnética devido à sua estrutura ferrimagnética. Embora os valores de susceptibilidade magnética possam variar amplamente, eles são geralmente elevados em comparação com outros minerais sulfetos. Essa variação está fortemente associada à quantidade de ferro presente na estrutura cristalina da pirrotita. As características físicas dos grãos de pirrotita, que podem variar em tamanho de micrométrico a milimétrico, influenciam significativamente suas propriedades magnéticas. Grãos de forma irregular e de maior volume tendem a apresentar maior susceptibilidade magnética devido à menor presença de defeitos estruturais em suas superfícies (Clark, 1984; Clark, 1999).

Principais correlações petrofísicas:

1. A correlação entre densidade e susceptibilidade magnética das medidas realizadas nos testemunhos de sondagem revelou três grupos principais:

- Grupo I: Inclui as rochas hospedeiras da mineralização com minério em diferentes texturas com valores abaixo de 10% de Cu. Estas rochas têm menor densidade devido ao menor volume de minerais de sulfetos e baixa susceptibilidade magnética devido à maior presença de minerais paramagnéticos.
- Grupo II: Composto por minério brechado, semi-maciço e maciço, com teor de Cu entre 10% e 30%, apresentando densidade significativamente maior que o grupo I, com valores baixos de susceptibilidade magnética. O aumento significativo no volume de minerais de sulfetos controla o

aumento de densidade. A interação entre os grãos de minerais sulfetos não favorece um aumento significativo nos valores de susceptibilidade magnética.

- Grupo III: Formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre variando entre 10% e 30% de Cu, apresentando densidade ligeiramente maior que o grupo II. A susceptibilidade magnética apresentou um maior contraste, possivelmente devido à interação entre os grãos de sulfetos ferromagnéticos. Os maiores valores de susceptibilidade magnética estão presentes no minério maciço, que concorda perfeitamente com a classificação dos grupos identificados.

2. A correlação entre densidade e condutividade revelou cinco grupos principais:

- Grupo I: Inclui as rochas hospedeiras da mineralização e minério em diferentes texturas com menor teor de Cu, com baixa densidade devido a um menor volume de minerais de sulfetos e condutividade nula devido à falta de minerais condutores.
- Grupo II: Composto por minério maciço, com teor de Cu menor que 10%, com densidade elevada. A condutividade desse grupo não apresenta contraste, pois a conectividade entre os grãos desses minerais é insuficiente para conduzir eletricidade.
- Grupo III: Caracterizado por rochas com densidade variando de 2,8 a 3,4 g/cc e condutividade baixa a moderada. Este grupo inclui rochas que têm um teor de Cu abaixo de 10%, representando possivelmente zonas de transição com uma mistura de minerais condutores conectados e não conectados.
- Grupo IV: Inclui rochas com minério semi-maciço e maciço, com a maioria das amostras com teor de cobre acima de 22% e densidade alta. As rochas apresentam condutividade baixa a moderada, indicando a presença de minerais de sulfetos condutores com os grãos conectados e não conectados.

- Grupo V: Formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre acima de 22%, apresentando a mesma variação de densidade do grupo IV. A condutividade é significativamente mais alta, devido à alta concentração de minerais condutores, possibilitando um maior contraste dessa propriedade, indicando que os grãos minerais condutores estão conectados.

3. A correlação entre susceptibilidade magnética e condutividade revelou três grupos principais:

- Grupo I: Inclui as rochas hospedeiras da mineralização e minério em diferentes texturas com valores abaixo de 10% de Cu, com baixa susceptibilidade magnética devido a uma menor presença de minerais ferromagnéticos e sem contraste de condutividade devido à maior presença de minerais não-condutores.
- Grupo II: Composto majoritariamente por minério brechado, semi-maciço e maciço, com teor de Cu entre 3% e 30%, com baixa susceptibilidade magnética e condutividade baixa a moderada. O aumento no volume e conectividade de minerais de sulfetos controla o aumento de susceptibilidade magnética e condutividade.
- Grupo III: é formado exclusivamente por minério maciço, com teor de cobre variando entre 10% e 30% de Cu, apresentando susceptibilidade magnética e condutividade maior que o grupo II. Nesse grupo conforme aumenta a susceptibilidade magnética, aumenta também condutividade, porém esse aumento não é linear. O minério maciço com valores que variam entre 50 e 150 S/m apresenta uma ampla variação de susceptibilidade magnética com valores entre a 5 a 55 × 10^{-3} SI. O mesmo comportamento se repete, por exemplo, para as amostras com condutividade que variam entre 300 e 350 S/m.

End-members volume, grão e textura

Os controles de volume, grão e textura dos minerais presentes na rocha, propostos por Dentith *et al.* (2019), tornam acessível o entendimento das assinaturas petrofísicas do depósito Cu-Au Santa Lúcia.

- Rochas hospedeiras da mineralização: as rochas vulcânica félsica e pegmatito, são compostas por minerais como biotita, feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e turmalina, e apresentam alta resistividade, baixa susceptibilidade magnética e baixa densidade
- Minério disseminado: os sulfetos dispersos na matriz, como apresentado mostram que os grãos de calcopirita ficam isolados, impossibilitando a conectividade entre os grãos e resultando na falta de contraste de condutividade. O baixo volume de sulfetos dispersos na matriz não causa aumento significativo da densidade. A presença de minerais paramagnéticos resulta em uma assinatura de baixa susceptibilidade magnética. Esses fatores determinam as características petrofísicas, como baixo contraste em susceptibilidade magnética, condutividade e densidade.
- Minério tipo *string* e matriz: os sulfetos que cortam a matriz rochosa preenchendo fraturas e cavidades estão associados ao minério tipo *string*. A presença de um volume maior de sulfetos na matriz rochosa, em comparação com o minério disseminado, aumenta o valor da densidade. Esta textura de minério pode apresentar conectividade, resultando em pequenos valores de condutividade e susceptibilidade magnética. A anomalia geofísica de cargabilidade indica que a calcopirita disseminada, *string* e matriz possibilitam o fluxo de corrente elétrica e podem funcionar como acumuladores de carga. A possível causa pode ser os espaços porosos em cavidades e fraturas. Recomenda-se uma pesquisa petrofísica com medidas de cargabilidade nessas texturas de minério.
- Minério brechado: o minério brechado é composto por sulfetos de calcopirita e pirrotita. A composição mineral nessa textura é variável, com calcopirita podendo estar associada ou não com pirrotita e pirita, o que implica diferentes comportamentos de susceptibilidade magnética e

condutividade. A massa de calcopirita maciça presente na brecha tem conectividade, porém, devido à sua característica paramagnética, a amostra não apresenta forte contraste de susceptibilidade magnética. A densidade varia bastante devido os diferentes volumes dos sulfetos presente na rocha.

- Minério semi-maciço: apresenta calcopirita maciça, associada ou não com pirrotita. A porcentagem de cobre em algumas dessas amostras ultrapassa a média e mediana do minério maciço. A média e mediana dos valores de densidade e condutividade do minério semi-maciço superam os valores médios do minério brechado. A presença da pirrotita na rocha aumenta a resposta de susceptibilidade magnética. O maior volume de minerais de sulfetos estabelece maior densidade e a textura mineral possibilita a conectividade elétrica entre os grãos.
- Minério Maciço: O minério maciço possui calcopirita e, na maioria das vezes, está associado com lamelas de pirrotita. A análise petrográfica mostrou que o minério maciço apresenta dois tipos de composição de minerais de sulfetos: uma amostra com calcopirita, pirrotita e pirita, e outra com calcopirita e pirrotita, sem a presença de pirita. Os dois tipos possuem densidades com valores similares, próximos a 4 g/cc, mostrando que o volume desses minerais de sulfetos influencia no valor da densidade. Ambas as amostras apresentam forte condutividade, porém uma é mais condutiva devido à melhor conectividade dos grãos de pirrotita. A textura dos grãos de pirrotita apresenta melhor conectividade, facilitando o maior fluxo de corrente elétrica, sendo possível detectar anomalias a partir do levantamento eletromagnético (TDEM) e modelar placas condutoras. A amostra maior susceptibilidade magnética é composta por grãos de pirrotita com características ferromagnéticas A presença de grãos de pirita associados a grãos de pirrotita pode causar desmagnetização devido à interação magnética entre os dois minerais. A pirita, sendo paramagnética, não mantém uma magnetização remanente forte, enquanto a pirrotita, sendo ferrimagnética, possui uma magnetização remanente significativa. Essa interação pode resultar na

neutralização parcial das propriedades magnéticas, levando à desmagnetização da rocha. Isso explica a ampla variação de susceptibilidade magnética em amostras de minério maciço com forte condutividade. Segundo Zhabin e Kremenetskiy (1993), quando a pirita (FeS_2), que é um mineral paramagnético, se transforma em pirrotita ($Fe_{1-x}S$), que é um mineral ferrimagnético, ocorre uma significativa alteração nas propriedades magnéticas da amostra. Há uma liberação de enxofre que pode interagir com outros minerais e metais na rocha, criando zonas de anomalias magnéticas que podem ser detectadas em levantamentos geofísicos. No caso do depósito Santa Lúcia, com o processo inverso em que a pirrotita se transforma em pirita, haveria a desmagnetização da zona mineralizada (?), o que justifica a falta de anomalias magnéticas nos levantamentos geofísicos. A análise petrográfica mostra que os cristais de pirita são formados a partir da pirrotita, onde a pirita é encontrada em cristais/blastos, ocasionalmente mostrando exsoluções de pirrotita, corroborando a hipótese de uma possível desmagnetização devido à transformação da pirrotita em pirita.

A integração dos dados mostra que o depósito Santa Lúcia pode ser caracterizado, em escala de depósito, como condutivo, polarizável, e fracamente magnético. A densidade provou ser uma propriedade física importante e urge a aquisição de dados gravimétricos gradiométricos e eletromagnéticos em domínio do tempo em escala de distrito, com espaçamento de linhas de voo de 200 ou 125 metros de espaçamento. Além disto, é necessário um estudo mais avançado da petrofísica incluindo a aquisição de dados de velocidade, magnetização remanente e de cargabilidade. Assim poderemos avançar no estudo da variação das zonas mineralizadas e das propriedades magnéticas. A aquisição de dados isotópicos e de magnetotelúrico é chave para entendermos não somente as idades de depósitos polimetálicos de Cu-Au, mas este sistema do ponto de vista geodinâmico dentro do Cinturão Sul do Cobre na Província Mineral de Carajás.

4. REFERÊNCIAS

AIRO, M-L. **Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland**. Espoo: Geological Survey of Finland, 2015. 144 p.

AIRO, M.-L.; SÄÄVUORI, H. **Petrophysical characteristics of Finnish bedrock**: Concise handbook on the physical parameters of bedrock. Espoo: Geological Survey of Finland, 2013. 205 p.

ARAÚJO FILHO, R. C.; NOGUEIRA, A. C. R.; ARAÚJO, R. N. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 102, 2020.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. **Serra dos Carajás: folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000**. Texto explicativo. Departamento Nacional da Produção Mineral/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 164 p., 1991.

AVELAR, V. G.; LAFON, J. M.; CORREIA, F. C. Jr; MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã - Província Mineral De Carajás: Novos resultados geocronológicos. **Rev Bras Geociências**, v. 29, p. 453–460, 1999.

BARROS, C. E. M.; MACAMBIRA, M. J. B.; BARBEY, P.; SCHELLER, T. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. **Rev Bras Geociências**, v. 34, p. 531–538, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Projeto aerogeofísico Rio Maria: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 2015, v. 1. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21701>. Acesso em: 15 jan. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Projeto aerogeofísico Tucuruí: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Lasa Prospecções, 2010, v. 1. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10938>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CLARK, D. A. **Magnetic properties of pyrrhotite: applications to geology and geophysics**. 1984. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Faculdade de Ciências, Universidade de Sydney, Sydney, 1984.

CLARK, D. A. Magnetic petrology of igneous intrusions: Implications for exploration and magnetic interpretation. **Exploration Geophysics**, v. 30, n. 1, p. 5-16, 1999.

COSTA, U. A. P.; PAULA, R. R.; SILVA, D. P. B. *et al.* **Programa Geologia do Brasil-PGB – Mapa de integração geológico-geofísica da ARIM Carajás. Escala 1:250.000**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2016.

DARDENNE, M. A.; FERREIRA FILHO, C. F.; MEIRELLES, M. R. The role of shoshonitic and calc-alkaline suites in the tectonic evolution of the Carajás District, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 1, p. 363–372, 1988.

DENTITH, M.; ENKIN, R. J.; MORRIS, W.; ADAMS, C.; BOURNE, B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework. **Geophysical Prospecting**, v. 68, p. 178-199, 2020. doi: 10.1111/1365-2478.12882.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.** Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 454 p.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *In*: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1988. Belém. **Resumos**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. p. 11–54.

ELLIS, R. G.; MACLEOD, I. N.; OLDENBURG, D. W. Inversion of magnetic data from remanent and induced sources. **Geophysics**, v. 77, n. 1, p. L13-L23, 2012.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L.; MACAMBIRA, M. J. B.; SANTOS, J. O. S.; ALTHOFF, F. J.; SOARES, J. E. B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157–185, 2013.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L. *et al.* Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? **Lithos**, v. 151, p. 57–73, 2012.

FULLAGAR, P. K. *et al.* Petrophysics in Inversion. *In*: Exploration '17 Petrophysics Workshop, 2017, Toronto. **Anais**. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences (DMEC), 2017.

HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K. *et al.* Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In*: I Simpósio de Geologia da Amazônia. 1982, Belém. **Resumos.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, p. 100–110.

HUNGER, R. B. *et al.* The Santa Lúcia Cu-Au deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: a Neoarchean (2.68 Ga) member of the granite-related copper-gold systems of Carajás. **Mineralium Deposita**, p. 1-22, 2021.

HUNH, S. R. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; DALL'AGNOL, R. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. *In*: VI Simpósio de Geologia da Amazônia. 1999. **Resumos.** São Paulo: SBG-Núcleo Norte, p. 463–466, 1999.

INSTRUMENTATION GDD. **MPP EMS2+ User's Guide**. Québec: Instrumentation GDD, 2023.

KING, A. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *In*: MILKEREIT, B. (Ed.). Exploration 07: Fifth Decennial International

Conference on Mineral Exploration. **Resumos.** Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences, 2007. p. 647-665.

LEÃO-SANTOS, M.; LI, Y.; MORAES, R. **Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil**. Geophysics, v. 80, n. 2, p. B13–B22, 2015.

LESHER, M. *et al*. Integrated Multi-Parameter Exploration Footprints of the Canadian Malartic Disseminated Au, McArthur River-Millennium Unconformity U, and Highland Valley Porphyry Cu Deposits: Preliminary Results from the NSERC-CMIC Mineral Exploration Footprints Research Network. In: SEG Technical Program Expanded, 2017. **Resumos.** Anaheim, CA: Society of Economic Geologists, 2017.

LOBATO, L. M.; ROSIÈRE, C. A.; SILVA, R. C. F. *et al.* **A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás: Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província**. In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (eds). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM/CT-Mineral/ADIMB, Brasília, p. 21–92, 2005.

MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T. E.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329–354, 1991.

MEIRELLES, M. R. **Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás**. 1986. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1986.

MEIRELLES, M. R.; DARDENNE, M. A. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra Dos Carajás - Pará. **Rev Bras Geociências**, v. 21, p. 41–50, 1991.

MELO, A. T.; SUN, J.; LI, Y. Geophysical inversions applied to geological differentiation and deposit characterization: A case study at an IOCG deposit in Carajás Mineral Province, Brazil. *In*: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. **Resumo.** Houston: Society of Exploration Geophysicists, p. 2012–2016, 2015.

MORETO, C. P. N. *et al.* Neoarchean and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajás Province, Brazil, Re-Os and U-Pb geochronological evidence. **Economic Geology**, v. 110, p. 809–835, 2015.

MORETO, C. P. N. *et al.* Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. **Mineral Deposita**, v. 46, p. 789–811, 2011.

NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W.; PINHEIRO, R. V. L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: Redescrição e redefinição litoestratigráfica. Bol do Mus Para Emílio Goeldi - **Série Ciências da Terra**, v. 7, p. 177–277, 1995.

PIDGEON, R. T.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology**, v. 166, p. 159–171, 2000.

PINHEIRO, R. V. L. **Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil**. Tese (Doutorado em Geologia) - Durham University, Durham, 1997.

PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. **Rev Bras Geociências**, v. 30, p. 597–606, 2000.

RODRIGUES, D. S.; OLIVEIRA, D. C.; MACAMBIRA, M. J. B. **Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará – Província Carajás**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais, v. 9, p. 597–633, 2014.

SARDINHA, A. S.; BARROS, C. E. M.; KRYMSKY, R. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenetic Province, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, p. 327–339, 2006.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física**: Mecânica-Hidrodinâmica. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1978.

SEEQUENT. *IRI Focus - Modify IRI Focus Constraint dialog options*. Retrieved from https://help.seequent.com/VOXI/2023.1/Content/ss/voxi/constraints/iterative_reweighting_model.htm. Acessado em 30 de agosto de 2024.

SILVA, M. G. *et al.* **Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento), Carajás**. *In*: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (eds). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM/CT-Mineral/ADIMB, Brasília, p. 94–151, 2005.

SKIRROW, R. G. **Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification**. Ore Geology Reviews, v. 140, p. 104569, 2022

SOUZA, S. R. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; SCHELLER, T. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA): implicações estratigráficas. *In*: V Simpósio de Geologia da Amazônia. **Resumo.** SBG, Belém, p. 380–383, 1996.

TALLARICO, F. H. B. *et al.* Geological and SHRIMPII U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. **Mineral Deposita**, v. 39, p. 68–86, 2004.

TALLARICO, F. H. B. **O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

TASSINARI, C. C. G. **O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos**. 1996. 241 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, p. 174–182, 1999.

TAVARES, F. M. *et al*. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: revealing complex structural patterns. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 238–252, 2018.

TEIXEIRA, J. B. G.; LINDENMAYER, Z. G.; SILVA, M. G. **Depósitos de Óxido de Fe, Cu-Au de Carajás**. *In*: BRITO, R. S. C.; SILVA, M. G.; KUYUMJIAN, R. M. (eds). Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo, 1 ed. CPRM, Brasília, p. 15–48, 2010.

TEIXEIRA, J. B. G. **Geochemistry, petrology, and tectonic setting of the Archean basaltic and dioritic rocks from the N4 Iron deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil**. 1994. 320 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Departamento de Geociências, Penn State University, University Park, 1994.

TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. **Precambrian Research**, v. 42, p. 213–227, 1989.

TOLEDO, P. I. F. *et al.* Multistage Evolution of the Neoarchean (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) iron oxide copper-gold deposit, Cinzento shear zone, Carajás Province, Brazil. **Economic Geology**, v. 114, p. 1–34, 2019.

TSCHIRHART, V.; MORRIS, B. Physical Rock Property Constraints and Regional Geophysical Interpretations of the Northeast Thelon Basin,

Nunavut. *In*: Exploration ’17 Petrophysics Workshop, 2017, Toronto. **Anais**. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences (DMEC), 2017.

WIRTH, K. R.; GIBBS, A. K.; OLSZEWSKI, W. J. Jr. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará Group and Serra dos Carajás Granites, Pará, Brazil. **Rev Bras Geociências**, v. 16, p. 195–200, 1986.

ZHABIN, A. G.; KREMENETSKIY, A. A. The pyrite-pyrrhotite transformation as an ore-concentrating geochemical barrier. **International Geology Review**, v. 35, n. 4, p. 359-368, 1993.

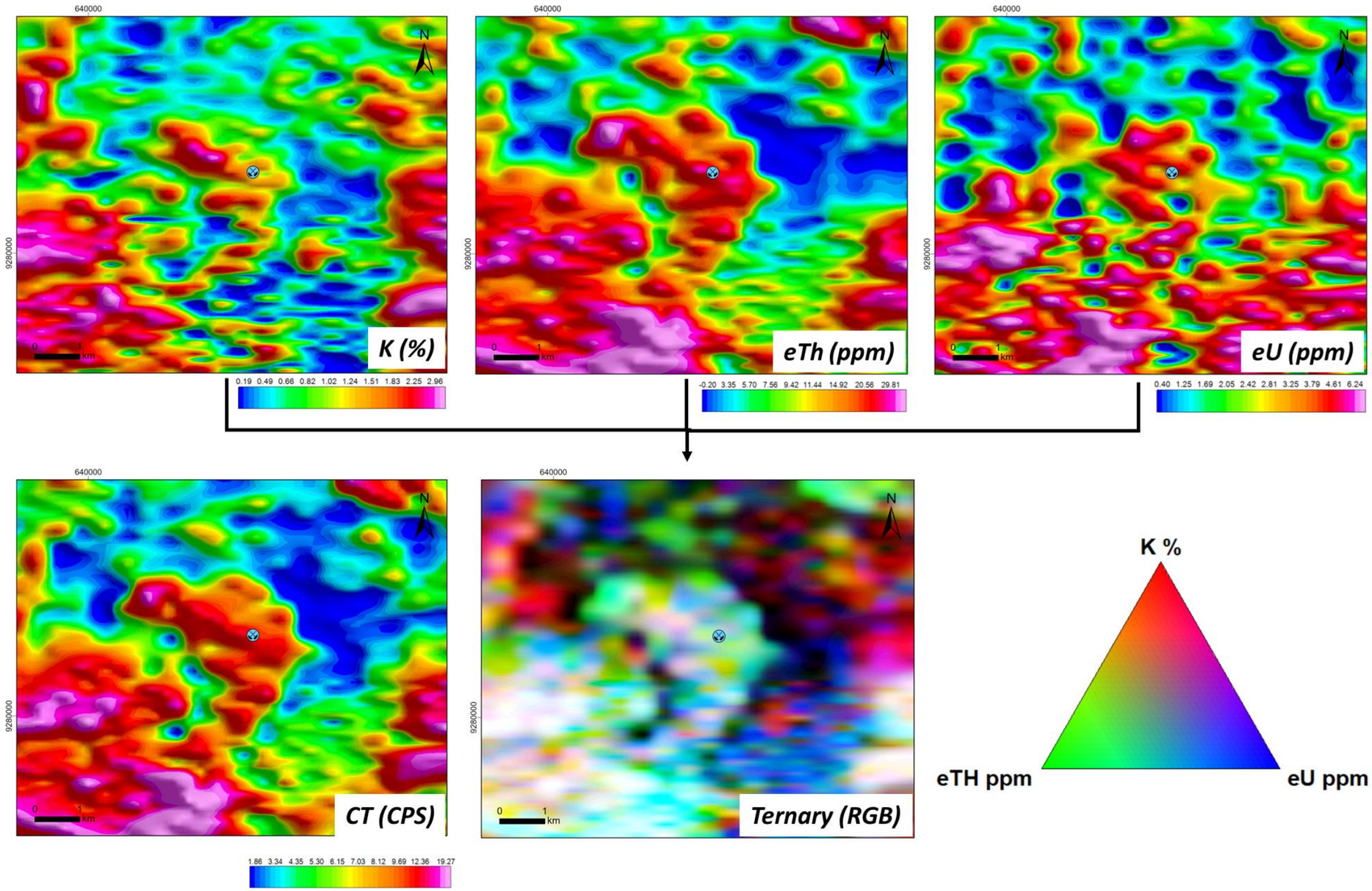


Figura A.1 - Produtos derivados de dados gamaespectrometricos dos projetos aerogeofísico Tucuruí e Rio Maria. A saber: mapa de potássio, em (%); Mapa de tório equivalente em (ppm); Mapa de urânio equivalente em (ppm); Mapa da contagem total em (cps); Mapa ternário RGB, K% (vermelho – Red), eU (verde – Green) e eTh (azul – Blue).