



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ESTRATÉGIAS PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS NA
EXPLORAÇÃO DE MINERALIZAÇÕES DO TIPO NI-CU-PGE: A DESCOBERTA
DO DEPÓSITO DE LIMOEIRO, PE

Allan Früchting

Dissertação de Mestrado em Geologia

n° 391

Brasília

Março de 2017



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ESTRATÉGIAS PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS NA
EXPLORAÇÃO DE MINERALIZAÇÕES DO TIPO NI-CU-PGE: A DESCOBERTA
DO DEPÓSITO DE LIMOEIRO, PE

Allan Früchting

Dissertação de Mestrado em Geologia nº 391

Área de Concentração: Geologia Econômica e Prospecção Mineral

Orientadora

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Banca Examinadora

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR)

Prof. Dr. César Ferreira Filho (UnB)

Brasília

Março de 2017

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. ”

Arthur Schopenhauer

Agradecimentos

Agradeço a compreensão, paciência e amor da minha esposa Kelly Azevedo.

Agradeço aos meus pais Leonardo *Früchting* e Jacira *Früchting* e pelo intenso apoio ao longo da minha existência, orientando e contribuindo nas decisões importantes da vida.

Agradeço o apoio e compreensão de minha orientadora Adalene Moreira Silva que me conduziu nesta pesquisa, e entendeu a necessidade da conciliação entre as atividades desta pesquisa e as demais relacionadas ao trabalho.

Agradeço aos companheiros de trabalho na Votorantim Metais e que contribuíram nesta pesquisa: Paulo Ravacci, Jonas Mota, Manoel Felipe, João Boniatti, Aline, Edgar Sanches, JP, Rafael Freitas, Saulo, Heverson Thiago, Gleydson, Deywid, Fabio Sacerdote, Emmanuel, Robertinho, Mariano, Marreco, Machado, Fú, Inácio, Rafael Mag, Jaqueline, Nenray, Anderson e Duba.

Agradeço também aos geofísicos Stefaans du Plessis e Heather Schijns e aos geólogos Dave Kelley, Richard Hornsey, Katherine Smuk, Lindsay McClenaghan e pelas contribuições na continuidade da pesquisa de Limoeiro.

Não posso deixar de agradecer a Francisco José Fonseca Ferreira e Florivaldo Sena, excelentes geólogos-geofísicos, com grande contribuição a Geociências no Brasil e que me ensinaram muito e que deram a oportunidade para adentrar nesse mundo da exploração mineral.

Agradeço à empresa Votorantim Metais pelo fomento ao desenvolvimento científico de seu corpo técnico e disponibilização das bases de dados. Em especial aos representantes deste Grupo, Jones Belther, Lucio Molinari e Paulo Ravacci que permitem as pesquisas em forma de mestrado e doutorado nos projetos de exploração mineral e que de certa forma contribuem para a pesquisa mineral Brasileira.

Resumo

A descoberta da intrusão ultramáfica de Limoeiro foi guiada por uma anomalia magnética, parcialmente associada a uma anomalia gamaespectrométrica circular com baixos valores de K-eTh-eU. Os primeiros dados de campo para validação das anomalias geofísicas mapearam rochas ultramáficas e exatamente no centro da depleção de K-eTh-eU, foi encontrada o primeiro indício de mineralização sulfetada, representada por um gossan rico em Ni-Cu-PGE. A porção aflorante e parcialmente erodida da intrusão ultramáfica apresenta 800m de diâmetro. Os produtos derivados do campo magnético anômalo mostram a continuidade da intrusão sob os paragnaisses dos Complexo Surubim. Mediante os indicativos desta continuidade e de indícios de mineralização em superfície, optou-se pela aplicação do método geofísico eletromagnético aéreo no domínio do tempo (VTEM). A modelagem e inversão de dados geofísicos multifonte somada a integração de dados geológicos de campo apontaram as primeiras interseções sulfetadas da mineralização de Ni-Cu-PGE. A mineralização associada aos corpos mineralizados intitulados de Piçarra, Retiro e Parnazo da intrusão ultramáfica de Limoeiro é constituída de vários níveis métricos e contínuos de sulfeto maciço (3% do volume do depósito), envelopados por sulfetação disseminada (97% do volume do depósito). Este resultado mostra que a exploração geofísica por métodos magnéticos, eletromagnéticos e elétricos é bastante eficaz para este tipo de mineralização. A assembleia de minerais de minério dos corpos de Limoeiro composta de pirrotita (Po), pentlandita (Pn), calcopirita (Cp) mostra que a mineralização possui uma assinatura magnética, condutiva, densa e polarizável. Os resultados do modelamento e inversão de dados geofísicos, incluindo algoritmo de filamentos Maxwell e inversão de resistividade em profundidade (RDI) para os dados eletromagnéticos, e inversão tipo MVI-Voxi dos dados magnetométricos aéreos e terrestres permitiram caracterizar a potencialidade dos corpos e a geometria do depósito. Após a descoberta dos corpos mineralizados e a validação com sondagem exploratória, o método elétrico da polarização induzida espectral (SIP) e a magnetometria terrestre foram aplicados e são considerados fundamentais na delimitação dos corpos de minério e mapeamento dos condutos magmáticos. Os resultados petrofísicos serviram para validar os modelos e inversões de dados geofísicos, e também permitiram definir que alguns métodos não aplicados anteriormente podem ser empregados na busca de novos corpos de minério, como por exemplo a gravimetria gradiométrica. Os estudos detalhados de todos os dados disponíveis associado ao modelo geológico e tipo de mineralização, permitiu definir uma estratégia de exploração geofísica de sucesso para busca de novos depósitos magmáticos sulfetados como Limoeiro na Província Borborema.

Palavras chaves: Província Borborema; Mineralização Ni-Cu-PGE; Depósito de Limoeiro; VTEM; SIP; Inversão 3D, Petrofísica

Abstract

The discovery of the Limoeiro ultramafic intrusion was guided by a magnetic anomaly that partly overlap a circular gamaspectrometric anomaly with low values of K-eTh-eU. The first field data for validation of the geophysical anomalies mapped the intrusion. In the center of the K-Th-U depletion, there was evidence of sulfide mineralization, represented by a gossan rich in Ni-Cu-PGE. The exposed and partially eroded portion of the ultramafic intrusion has 800 m in diameter. The derivative products of residual magnetic field mapped the extension of this the intrusion under the paragneisses of the Surubim Complex. Because of this continuity and evidence of surface mineralization, the Versatile Time Domain Electromagnetic (VTEM) airborne geophysical method was used, along with modeling and inversion of multi-source geophysical data combined with the integration of field geological data, leading to the first sulfide intersections of the mineralization of Ni-Cu-PGE. The mineralization associated with the Piçarra, Retiro and Parnazo orebodies of the Limoeiro ultramafic intrusion has multiple metric and continuous levels of massive sulfide (3% of the deposit volume), enveloped by disseminated sulfidation (97% of the deposit volume), thus rendering geophysical exploration by magnetic, electromagnetic and electrical methods quite effective. The assemblage of ore minerals of the Limoeiro orebodies, pyrrhotite (Po), pentlandite (Pn), and chalcopyrite (Cpy) makes the mineralization magnetic, conductive, dense and polarizable. Some steps of modeling and inverting geophysical data were applied, including Maxwell filament algorithm and resistivity-depth image (RDI) inversion for electromagnetic data and Magnetic Vector Inversion (MVI)-Voxi inversion of airborne and ground magnetometric data. After discovery of the mineralized orebodies, the electric method of spectral induced polarization (SIP) and ground magnetometry were important for delineating orebodies and mapping magmatic conduits. The petrophysical results validated the geophysical data models and inversions, making it possible to determine that some methodologies not previously applied can be used to search for new orebodies (e.g gradiometric gravimetric method). The detailed study of all available data associated with the geological model and type of mineralization allowed us to define a successful strategy of geophysical exploration in search of new magmatic sulfide deposits such as Limoeiro in Borborema Province.

Key words: *Borborema Province, Ni-Cu-PGE mineralization; Limoeiro Deposit; VTEM; SIP; 3D inversion, Petrophysics*

Sumário

Resumo	III
Abstract.....	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	VIII
1. Introdução.....	1
1.1 Localização	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Materiais e métodos	5
1.3.1 Magnetometria e Gamaespectrometria Regional Aérea.....	5
1.3.2 VTEM (Versatile Time Electromagnetic Time Domain).....	8
1.3.3 Magnetometria terrestre.....	13
1.3.4 Polarização Induzida Espectral (SIP)	15
1.3.5 Petrofísica	16
1.3.6 Sondagem	17
1.3.7 Dados geológicos.....	17
1.3.8 Geoquímica.....	18
1.4 Estrutura da Dissertação	18
2. Geophysics leading the discovery of the Limoeiro Ni-Cu-PGE Deposit - Borborema Province – Northeastern Brazil	19
2.1 Introduction.....	20
2.2 Geological and Geophysical Setting	21
2.2.1 Borborema Province	21
2.2.2 Geology of the Limoeiro Deposit and Mineralization.....	25
2.3 Data and Methods	27
2.3.1 Airborne magnetic and gamma ray spectrometric data.....	27
2.3.2 VTEM (Versatile Time Domain Electromagnetic) survey.....	27

2.3.3	Ground magnetic data.....	28
2.3.4	Induced polarization	28
2.3.5	Petrophysics.....	29
2.4	Mapping Ni-Cu-PGE targets using magnetics and gamma ray spectrometric data in Borborema Province: the Limoeiro ultramafic intrusion	29
2.5	The discovery of Ni-Cu-PGE mineralization and the enhancement of deposit shape and disseminated sulfide orebodies	33
2.5.1	The successful application of Time Domain Electromagnetic Airborne Geophysics	34
2.5.2	Delineating the magmatic conduits and ore bodies with ground geophysics and 3D inversion	42
2.5.3	Enhancing the disseminated sulfide orebodies using SIP	47
2.5.4	Petrophysics –Sulfide Ore, Ultramafic and Country Rocks	51
2.6	Geophysical Exploration Strategy for New Ni-Cu-PGE Sulfide Discoveries.	55
2.7	Discussion and Conclusions	58
2.8	Acknowledgements.....	60
2.9	References.....	61
3.	Discussões e Conclusões	64
4.	Referências Bibliográficas	73

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Localização da área de estudo e do depósito Limoeiro, no estado do Pernambuco e principais municípios da região	3
Figura 1.2 – Sistema eletromagnético domínio do tempo utilizado na prospecção da mineralização sulfetada Ni-Cu-PGE de Limoeiro.....	9
Figura 1.3: Exemplo de processo de seleção de anomalias (picking) em base de eletromagnéticos aéreos VTEM – Exemplo de Limoeiro, PE.	10
Figura 1.4: Captura de tela com o script utilizado para cálculo do TAU para os dados VTEM de Limoeiro.	11
Figura 1.5: Modelamento tipo <i>plate model</i> realizado através do <i>software Maxwell</i> para o corpo mineralizado de Ni-Cu-PGE de Limoeiro.....	12
Figura 1.6: Inversão de Resistividade 2D RDI de dados VTEM sobre mineralização de Ni-Cu-PGE de Limoeiro.....	13
Figura 1.7: Levantamento de magnetometria terrestre, com equipamento NAVMAG Scintrex de vapor de céσιο.	14
Figura 1.8: Susceptibilímetro e condutivímetro GDD MPP Probe.	16
Figure 2.1 - (A). Pre-rift reconstruction of Western Gondwana showing the main cratons and the Brasiliano/Pan-African provinces (B). Sketch showing the main shear zones that limit the domain subdivision of Borborema Province.....	22
Figure 2.2 – Geological Geophysical Context of Borborema Province	24
Figure 2.3 - Local Geology of the Limoeiro Deposit.....	26
Figure 2.4 - High magnetic anomalies and K-Th-U depletion from the Limoeiro ultramafic outcrop and the original anomaly selected for geological follow-up.....	31
Figure 2.5 – Illustration of follow-up results.....	31
Figure 2.6– Schematic longitudinal section of the Limoeiro deposit.....	32
Figure 2.7- VTEM survey planned over the magnetic response and schematic geological map of the Limoeiro intrusion.	35
Figure 2.8- Results of the VTEM survey over the Limoeiro intrusion	36
Figure 2.9 - VTEM survey – magnetic and electromagnetic response of Bofe, Piçarra and Retiro targets.	37
Figure 2.10 - VTEM response of the tie line over the ultramafic intrusion and the orebodies.....	38
Figure 2.11 - Maxwell modeling results for the Retiro and Piçarra orebodies.	40

Figure 2.12 - RDI for Line 10191 illustrating the results for the Retiro target a	41
Figure 2.13 - RDI for Line 10221 illustrating the results for the Piçarra target.....	41
Figure 2.14 - Interpreted magmatic conduit features by ground magnetic data.....	44
Figure 2. 15 - Longitudinal section over the Limoeiro intrusion, the Retiro and Piçarra orebodies and the partly eroded Bofe intrusion.....	46
Figure 2.16 - (A) 3D View of a horizontal slice from INVMAG3D (MVI), the ultramafic rocks including the orebodies showing the excellent correlation with the magnetic features and the main faults. (B) 3D View with the Voxel of INVMAG3D (MVI Type), the ultramafic rocks, the orebodies and the main faults.	46
Figure 2.17 - Induced polarization cross section LT 4500 – Chargeability model and sulfide intersections (in %) from the Piçarra orebody.....	49
Figure 2.18 - Induced Polarization Cross section LT 4500 – Time constant decay, sulfide intersections (in %) from the Piçarra orebody.....	49
Figure 2.19 – Density (g/cm ³) versus Susceptibility (10 ⁻³ SI).....	53

Lista de Tabelas

Table 2.1: Maxwell modeling results of the Retiro and Piçarra orebodies, highlighting the depth of the conductor core and the conductivity and thickness product values (conductance).....	39
Table 2.2: Summary of variation in magnetic susceptibility (SI x 10 ⁻³) for different lithological units of Limoeiro and the massive sulfide.....	51
Table 2.3: Summary of variation in conductivity (Mhos/m equivalent to S/m) for the massive sulfide in the Limoeiro mineralization.	52
Table 2.4 - Summary of variation in density (g/cm ³) for different lithological units and the massive sulfide.	53
Figure 2.19 – Density (g/cm ³) versus Susceptibility (10 ⁻³ SI).....	53
Table 2.5 - Summary of variation in time domain resistivity (ohm*m) and chargeability for different lithological units (measured at constant voltage).....	55
Table 2.6 - Proposed geophysical exploratory strategy for new Ni-Cu-PGE deposits in Borborema Province.	56

ABREVIACÕES

CMY – Cyan, Magenta, Yellow

CPRM – Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais.

CT – Conductivity-thickness

EM – Eletromagnético

EMIT – Electromagnetic Imaging Technology

eU – equivalente urânio em ppm

eTh- equivalente tório em ppm

HTEM – Helicopter time-domain electromagnetics

K (%) – Potássio em percentagem

NIA – unidade de momento dipolo (N-número de voltas do loop; I-corrente; A-área)

MVI – Magnetization vector inversion

Ni-Cu-PGE – Níquel – Cobre – Elementos do Grupo da Platina

Ni-Cu-PGE – Nickel – Copper – Platinum group elements

*Ohm*m - ohms per meter (Unidade de resistividade)*

RDI – Resistivity depth image

RGB – Red, Green, Blue

RTP – Reduction to pole

S/m - Siemens per meter (Unidade de condutividade)

SIP – Spectral induced polarization

SI x 10⁻³ – Unidade de Susceptibilidade

TAU – *Time constant decay*

TEM - Time Electromagnetic

VTEM – Versatile time electromagnetic time-domain

1. Introdução

A Província Borborema abrange uma área de 450.000km² e até pouco tempo atrás era considerada uma área do tipo *grassroots*, devido à ausência de mineralizações importantes na região. Durante os últimos anos, a Província Borborema tem sido alvo de programas de exploração mineral em busca de depósitos de metais base e metais preciosos, o que resultou na descoberta do depósito sulfetado de Ni-Cu-PGE de Limoeiro. O sucesso da descoberta é resultado de um trabalho sistemático e extensivo utilizando ferramentas modernas de prospecção, que incluem o *follow-up* geológico de anomalias geofísicas, o emprego de métodos geofísicos de alta resolução, petrofísica e sondagem exploratória. Esta estratégia inspira o desenvolvimento de projetos avançados em *greenfield*, e a definição dos vetores exploratórios para prospecção de Ni-Cu-PGE.

O *follow-up* geológico inicial que levou a descoberta da intrusão ultramáfica de Limoeiro foi guiada pela seleção de anomalias típicas de intrusões ultramáficas através dos dados aerogeofísicos do Levantamento Borda Leste do Planalto Borborema, proveniente da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2008). A anomalia magnética de Limoeiro é representada por um dipolo e é associada parcialmente a uma zona de empobrecimentos nos radioelementos potássio, tório e urânio. Essa resposta é típica de rochas ultramáficas parcialmente aflorantes, dispostas na direção ENE-WSW, constituída de serpentinitos, ortopiroxenitos e hazburgitos. No centro da zona de baixa contagem de radionuclídeos foi mapeada a porção mais rasa da mineralização na superfície, representada por um gossan rico em Ni-Cu-PGE.

A cartografia geológica de detalhe, a análise estrutural e as relações de contato obtidas em campo, somadas a interpretação de dados aerogeofísicos magnéticos mostrou que as rochas ultramáficas tinham continuidade para oeste, porém não eram aflorantes e que a aplicação de outros métodos geofísicos seria crucial para o avanço da prospecção. A mineralogia do minério de um depósito magmático tipo Ni-Cu-PGE é favorável a aplicação de métodos geofísicos exploratórios, visto que propriedades físicas anômalas da pirrotita, petlandita e calcopirita, associadas aos indícios de mineralização em superfície, são fundamentais para a decisão do investimento, ou não, em um levantamento eletromagnético no domínio do tempo.

O uso do método eletromagnético objetivou a busca de zonas e anomalias condutivas relativas a mineralização preservada em subsuperfície e associadas as rochas ultramáficas mapeadas pela magnetometria aérea. A modelagem e inversão de dados geofísicos multifonte somada a integração de dados geológicos de campo, levaram as primeiras interseções sulfetadas da mineralização de Ni-Cu-PGE.

Após a descoberta dos principais corpos mineralizados e a constatação de que a mineralização sulfetada era constituída de vários níveis métricos e contínuos de sulfeto maciço (3% do volume do depósito) envelopados por sulfetação disseminada (97% do volume do depósito), optou-se pela aplicação do método elétrico da polarização induzida espectral com objetivo de auxiliar na delimitação dos corpos de minério.

Diversos tipos de inversão e modelagem de dados geofísicos foram aplicados para nortear a sondagem exploratória e *infill* e os resultados são comparados nesta pesquisa para definição de uma rotina em busca de novos corpos mineralizados na área de estudo. Foram utilizadas a modelagem de algoritmo de filamentos tipo Maxwell e inversão de resistividade tipo RDI para os dados eletromagnéticos e inversão tipo MVI-Voxi para os dados magnéticos e terrestres.

Os dados petrofísicos foram utilizados para validação dos produtos da modelagem e inversão de dados geofísicos, bem como definir a aplicação de outros métodos não aplicados anteriormente no prospecto. Além dessa validação foi possível comparar as diferenças entre as propriedades físicas estimadas pela modelagem/inversão e os dados obtidos pelas medidas diretas em rochas encaixantes, rochas hospedeiras e minério.

Os estudos detalhados de todos os dados disponíveis associados ao modelo geológico e tipo de mineralização permitiu definir uma estratégia de exploração geofísica de sucesso para busca de novos depósitos magmáticos sulfetados, como Limoeiro na Província Borborema.

A meta central desta pesquisa é apresentar as estratégias que levaram a descoberta do corpo de Limoeiro, bem como, como a partir da descoberta, utilizando da inversão de dados eletromagnéticos no domínio do tempo, associados com dados de polarização induzida foi mapeada a mineralização sulfetada de Ni-Cu-PGE validada com furos de sondagem. Ao final, apresenta-se a assinatura do depósito e um guia prospectivo para mapeamento de alvos similares dentro da Província Borborema.

Ressalta-se que a integração de dados multifonte utilizando dados geofísicos de alta resolução que incluem dados eletromagnéticos aéreos no domínio do tempo, até o presente momento no Brasil, é inédito.

1.1 Localização

A área deste trabalho de pesquisa é situada no estado de Pernambuco nas proximidades do Município de Limoeiro, que dá nome ao depósito magmático tipo Ni-Cu-PGE. O município de Limoeiro está situado a 89km da capital Recife, e o acesso pode ser feito via terrestre por rodovias asfaltadas, passando pelo município de Carpina ou de Vitória do Santo Antão. Do município de Limoeiro até a parte central do depósito, onde estão situados os principais corpos de minério, a distância é de 16km e o acesso é feito por estradas de chão em bom estado de conservação, com algumas dificuldades no período de chuvas (Figura 1.1).

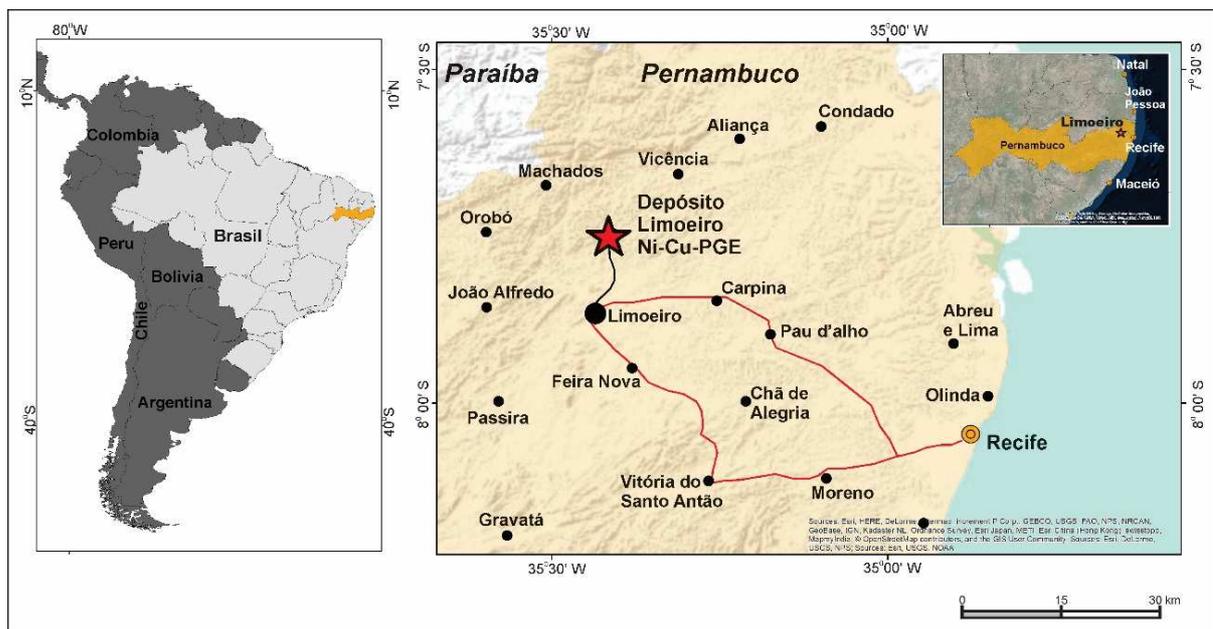


Figura 1.1 - Localização da área de estudo e do depósito Limoeiro, no estado de Pernambuco indicando os principais municípios e acessos da região.

Em linha reta o depósito dista 60km da costa brasileira cuja localização é privilegiada pela proximidade com o Porto de Suape, considerado um dos maiores portos brasileiros.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é estudar a assinatura geofísica da mineralização sulfetada Ni-Cu-PGE de Limoeiro, no estado de Pernambuco, com intuito de gerar parâmetros para definição dos vetores de exploração através da análise e modelagem de dados eletromagnéticos helitransportados, magnéticos aéreos e terrestres, polarização induzida espectral e de propriedades físicas das rochas.

Para atingir esse objetivo central foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar a assinatura magnética e gamaespectrométrica da mineralização aflorante oxidada representada pelo gossan da rocha ultramáfica, hospedeira da mineralização sulfetada em superfície e subsuperfície;
- b) Analisar e interpretar anomalias eletromagnéticas em 1D;
- c) Processar, interpretar e gerar seções de resistividade 2D em profundidade (RDI's);
- d) Efetuar a modelagem e inversão de dados eletromagnéticos aéreos (HTEM – VTEM), a partir do modelo de placas (*Plate Models – Maxwell 2D*), com o intuito de delinear as feições-chaves do depósito;
- e) Analisar e caracterizar as propriedades físicas dos principais tipos de condutores associados à mineralização, dos paragnaisses (encaixantes dos condutos magmáticos), das rochas ultramáficas que hospedam a mineralização e da mineralização de Ni sulfetado;
- f) Comparar os resultados de inversão de dados eletromagnéticos e magnetometria com dados de sondagem que seccionam a mineralização conhecida;
- g) Integrar os dados multifonte e refinar os vetores prospectivos para seleção de alvos para mineralizações de Ni-Cu-PGE na Província Borborema.

1.3 Materiais e métodos

A seguir apresenta-se os materiais e métodos utilizados para elaboração da presente dissertação de mestrado, onde foram empregados dados aerogeofísicos regionais e terrestres de alta resolução. Utilizou-se ainda dados geológicos, geoquímicos e de petrofísica para complementar a análise e integração dos dados.

1.3.1 Magnetometria e Gamaespectrometria Regional Aérea

Os dados magnéticos e radiométricos utilizados na pesquisa são provenientes do Levantamento Borda Leste do Planalto Borborema (CPRM, 2008). Este levantamento cobre parte do extremo nordeste brasileiro compreendendo parcialmente estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas, atravessando parcialmente os domínios norte, central e sul da Província Borborema, ao longo da margem costeira. O levantamento é bastante extenso e tem um total de 122.050 km lineares, em uma área estimada de 57.804 km², com espaçamento entre linhas de voo de 500m (direção NS) e 10.000m para as linhas de controle (direção EW). Esses dados foram utilizados principalmente na seleção de anomalias, definição de arcabouço estrutural magnético, definição de domínios radiométricos e inversão magnética 2D e 3D.

O processamento dos dados pode ser dividido nas seguintes etapas: pré-processamento, processamento (interpolação e micronivelamento) e obtenção de mapas transformados. A etapa de pré-processamento consistiu da organização dos dados dentro do aplicativo Oasis Montaj, versão 9.1 da GEOSOFT TM, com a construção de um banco de dados. A aplicação de testes aos dados magnetométricos mostrou a inexistência de ruídos, em padrões e quantidade, que eventualmente possam comprometer os resultados pretendidos nas etapas de processamento e interpretação dos dados.

A interpolação dos dados (magnetometria e gamaespectrometria) foi realizada em seguida ao pré-processamento. Inicialmente testes de interpolação foram realizados a partir dos métodos da curvatura mínima e bidirecional, de forma a criar uma malha regular para os dados citados. Qualitativamente, observou-se que, para dados magnetométricos, o método bidirecional (*spline* Akima) aparentou melhores resultados, pois ruídos na direção

das linhas de voo foram mais atenuados em relação ao resultado produzido pelo método da curvatura mínima. Já para os dados gamaespectrométricos, a curvatura mínima, quando comparado aquele derivado pelo método bidirecional, mostrou-se superior. Utilizou-se ¼ do espaçamento das linhas de voo, ou seja, uma célula de 125 metros de espaçamento.

Para o tratamento destes dados, utilizou-se técnicas eficientes para a determinação de parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais), profundidades de corpos e feições estruturais, tais como: redução ao polo, amplitude e inclinação do sinal analítico, derivadas vertical e horizontais (X e Y) e amplitude do gradiente horizontal total.

O campo magnético anômalo representa as anomalias situadas na crosta e acima da superfície Curie. É obtido pela remoção do campo magnético terrestre (IGRF) do campo magnético total medido no levantamento. A resposta no campo magnético anômalo pode ser de natureza profunda como, por exemplo, fontes situadas na base da crosta, ou de natureza rasa. Este fato, entre outros, dificulta sua interpretação direta, sendo necessário a geração de outros produtos para interpretação adequada dos dados.

A natureza dipolar do campo magnético associada a um campo induzido não vertical provoca o deslocamento da resposta magnética em relação à fonte causadora, dificultando o posicionamento correto desta. A amplitude do sinal analítico - ASA (Roest *et al.* 1992) é uma função que não depende da direção de magnetização da fonte e das características do campo magnético terrestre. Por possuir estas propriedades e ser uma função simétrica, sua resposta tem seus picos posicionados sobre as bordas do alvo ou feição geológica estudada, facilitando sua interpretação.

Com relação aos produtos derivados do campo magnético anômalo (CMA), a redução ao polo e a amplitude do sinal analítico do CMA foram cruciais para a interpretação das anomalias magnéticas da área de trabalho e que se mostraram potenciais para hospedar depósitos do tipo Ni-Cu-PGE. Se compararmos esses dois produtos e com a evolução do conhecimento atual sobre os limites dos corpos e condutos magmáticos, é possível afirmar que o filtro da redução ao polo para baixas latitudes (com correlação à inclinação do campo magnético) representa melhor geometricamente a geologia conhecida atualmente, onde os limites dos corpos magnéticos são mais estreitos e condizentes com a geologia local, enquanto que a amplitude do sinal analítico por vezes aumenta a dimensão dos corpos ultramáficos. O traçado das estruturas magnéticas foi definido a partir do produto

TDR-RTP (Tilt Derivative from RTP), onde as estruturas são traçadas nas máximas amplitudes das anomalias identificadas.

Além dos três produtos citados, a inversão 3D de dados magnéticos tipo Voxi-MVI (Ellis et al., 2012) foi empregada a partir dos grids do campo magnético total, onde é possível ilustrar a geometria das anomalias magnéticas e nesta pesquisa realçar os condutos magmáticos ultramáficos.

Os dados do campo magnético anômalo são sensíveis a propriedade de magnetização das rochas e ao contraste de susceptibilidade de rochas distintas e podem ser modelados em 3D por meio da inversão do vetor de magnetização. Na presença do campo magnético, os domínios magnéticos tendem a se orientar de acordo com número de interações de efeitos magnético como por exemplo indução, remanência, anisotropia e desmagnetização. A inversão pelo vetor de magnetização MVI possibilita a inversão dos dados do campo magnético, recuperando a direção de magnetização e amplitude para cada domínio magnético existente na área do levantamento (Ellis et al., 2012).

Quando se utiliza a inversão comum de susceptibilidade, sem nenhuma outra informação externa, os domínios magnéticos tendem a ficar paralelos ao campo geomagnético da Terra e esta é uma situação irreal quando trabalhamos com domínios distintos de rochas magnetizadas. Por outro lado, a inversão do vetor de magnetização pode obter a susceptibilidade através do cálculo da amplitude de magnetização e normalização pelo campo geomagnético da Terra. (Ellis et al., 2012).

Os dados gamaespectrométricos são obtidos medindo-se a radiação gama emitida por determinados elementos que compõe os diversos tipos de rochas. O valor de radiação gama medido é proporcional à concentração dos elementos. Os dados gamaespectrométricos são complementares ao estudo dos produtos derivados do campo magnético anômalo. Isto por que fontes magnéticas de várias profundidades contribuem para o campo medido enquanto que os dados radiométricos representam apenas os primeiros 30 a 40 centímetros da superfície. Foram geradas imagens a partir dos dados de contagem total corrigida ($\mu\text{R/h}$), bem como dos canais de K (%), eU (ppm), eTh (ppm). A partir destes três últimos canais foram elaboradas composições ternárias, em falsa cor, utilizando os padrões de cores RGB (K, eTh, eU) e CMY (K, eTh, eU).

A composição colorida RGB representa uma das ferramentas mais utilizadas na análise e interpretação de dados gamaespectrométricos, onde tal combinação de cores pode ser

representada geometricamente em um cubo pelas suas coordenadas. Os valores de brilho, ou níveis de cinza de cada componente no sistema de coordenadas RGB, constituem os eixos ortogonais no espaço de cor tridimensional. Nesta técnica de realce digital as informações concernentes a três bandas ou imagens quaisquer são combinadas, assinalando cada uma delas uma das cores fundamentais (vermelho – **R** (*red*), verde – **G** (*green*) e azul – **B** (*blue*)). A imagem resultante obtida pelo processo aditivo destas três cores, produz uma cor branca para a soma das três informações componentes, se estas forem iguais, e cores diferentes para as combinações em pares, nas cores ciano (azul + verde), magenta (azul + vermelho) e amarelo (vermelho + verde). A percentagem de cada cor primária na imagem final indica a contribuição de cada uma das bandas na cena observada.

1.3.2 VTEM (Versatile Time Electromagnetic Time Domain)

Os dados eletromagnéticos utilizados são resultantes de um levantamento VTEM (Versatile Time Electromagnetic Time Domain) efetuado sobre a anomalia magnética mapeada com os dados anteriores e, posteriormente, definida como intrusão de Limoeiro. Os dados foram adquiridos com espaçamento entre linhas de voo e controle com 200m na direção NS e 2000m na direção EW, respectivamente. Desde o primeiro reconhecimento geológico e com a integração de modelagem 2D e 3D de dados magnéticos, permeou-se a ideia de que as rochas ultramáficas intrudiam de forma concordante os paragneisses do Complexo Surubim, e que o método EM aéreo seria capaz de detectar as mineralizações em subsuperfície e blindadas para a geoquímica de solo. O levantamento VTEM consistiu de 5 blocos, totalizando 698.6km lineares e foi realizado em 8 dias, incluindo voos de teste.

O sistema VTEM aplicado na prospecção de Limoeiro (Figura 1.2), é concêntrico, com transmissor e receptor na mesma posição XYZ, o que é ideal para posicionamento dos condutores, sendo a bobina transmissora com 26m de diâmetro, 46m de altura sobre o terreno, 4 voltas, frequência de 30Hz, pico de corrente de 205 A, momento dipolo de 433,233 NIA, duty cycle de 40.2% e pulso de 6.67ms. A bobina receptora tem diâmetro de 1.2m, com 46m de altura sobre o terreno, 100 voltas 113.1m² de área efetiva e intervalo de amostragem de 0.1s.

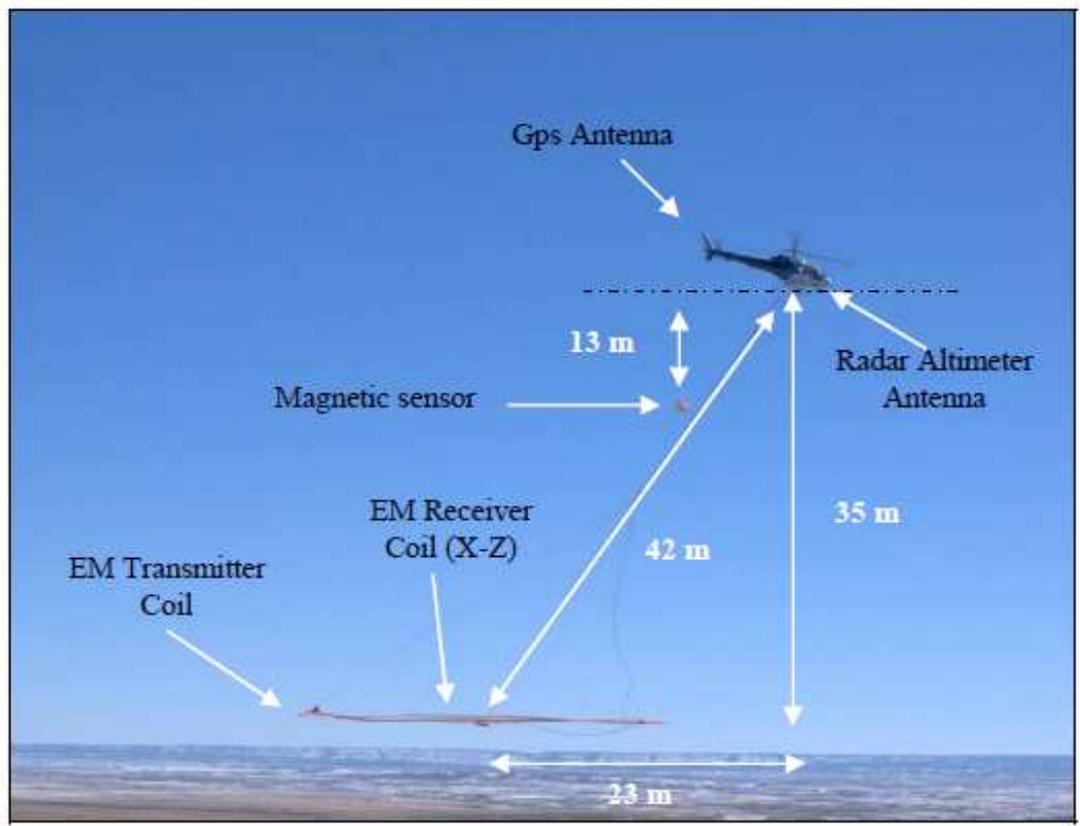


Figura 1.2 – Sistema eletromagnético domínio do tempo utilizado na prospecção da mineralização sulfetada Ni-Cu-PGE de Limoeiro – destaque para o sistema concêntrico com bobina transmissora e receptora na mesma posição XYZ e magnetômetro entre o helicóptero e o sistema eletromagnético.

Após a conclusão do levantamento VTEM em Limoeiro, os dados foram analisados em diversas fases e podemos destacar como principais: o processo de *picking*, cálculo do tau (*time constant decay*), interpolação de malhas, seleção de anomalias, modelamento tipo *Maxwell* e RDI (*Resistivity depth image*).

O processo de *picking* é feito com seleção de anomalias ao longo de cada perfil eletromagnético adquirido, com objetivo de definir o centro do condutor, utilizando comprimento de onda e amplitude no canal de perfis empilhados dB/dT e *Bfield*.

A figura 1.3 ilustra o processo de *picking* sobre uma anomalia selecionada como potencial para mineralizações do tipo níquel sulfetado (exemplo de Limoeiro) e que são indicados pelos seguintes parâmetros: comprimento de onda de 600m, detectada em todos os canais dB/dT e *Bfield*, excelente condutor, pois foi detectado em todos os canais, excelente

shape, alta amplitude, excelente constante de decaimento, rasa, geometria de condutor horizontal, forte coincidência com anomalia magnética.

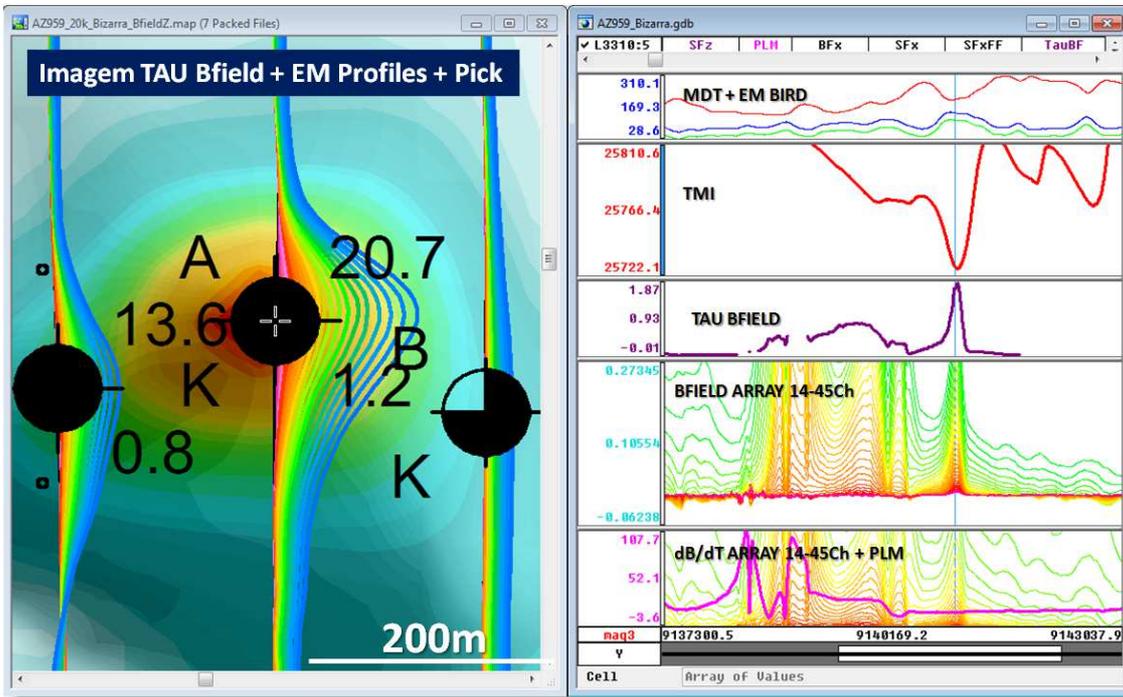


Figura 1.3: Exemplo de processo de seleção de anomalias (picking) com base em dados eletromagnéticos aéreos VTEM em prospecto de Ni-Cu-PGE – Exemplo de Limoeiro, PE.

O cálculo TAU (*time constant decay*) no banco de dados foi realizado por meio de um *script* desenvolvido pela *Geotech Airborne Survey*, onde os maiores tempos de decaimento em milisegundos são considerados os melhores condutores. Neste caso podem ser escolhidos os canais de interesse, valor de ruído, valor de *low pass* para corte e se devem ser considerados valores negativos para o cálculo do parâmetro TAU, (Figura 1.4).

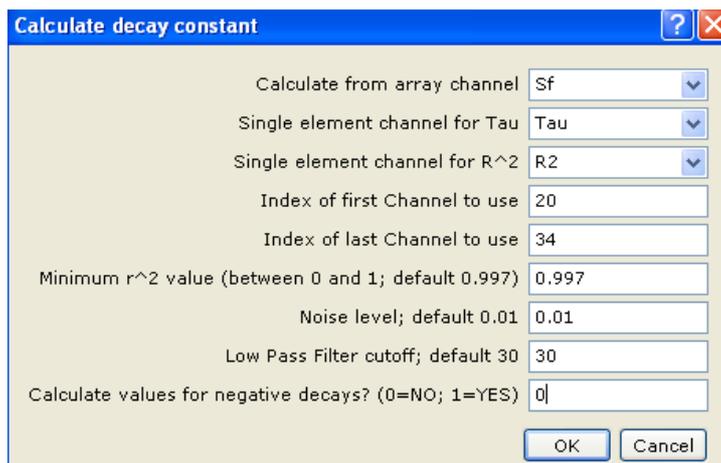


Figura 1.4: Captura de tela com o script utilizado para cálculo do TAU (Time constant decay) para os dados VTEM de Limoeiro.

Após o processo de *picking* podem ser feitas interpretações em 2D com auxílio dos grids interpolados dos dados eletromagnéticos. Desta maneira, é possível definir o tamanho dos condutores e a relação espacial com o contexto geológico local e se podem estar deformados e deslocados por estruturas. Realizada a interpretação 1D e a seleção inicial dos alvos EM deve ser iniciada a interpretação 2D.

O modelamento tipo *Maxwell*, através do algoritmo de filamentos, foi realizado através do *Software Maxwell* da *EMIT Technology*, e permite ajuste do campo eletromagnético observado para um campo eletromagnético modelado, e quando esse ajuste, que pode ser ruim, moderado ou excelente, acontece, podemos extrair informações de comprimento, profundidade, direção de mergulho e condutância de cada condutor, auxiliando na priorização para sondagem exploratória. A Figura 1.5 ilustra o modelamento tipo *Maxwell* para dados do levantamento VTEM de Limoeiro.

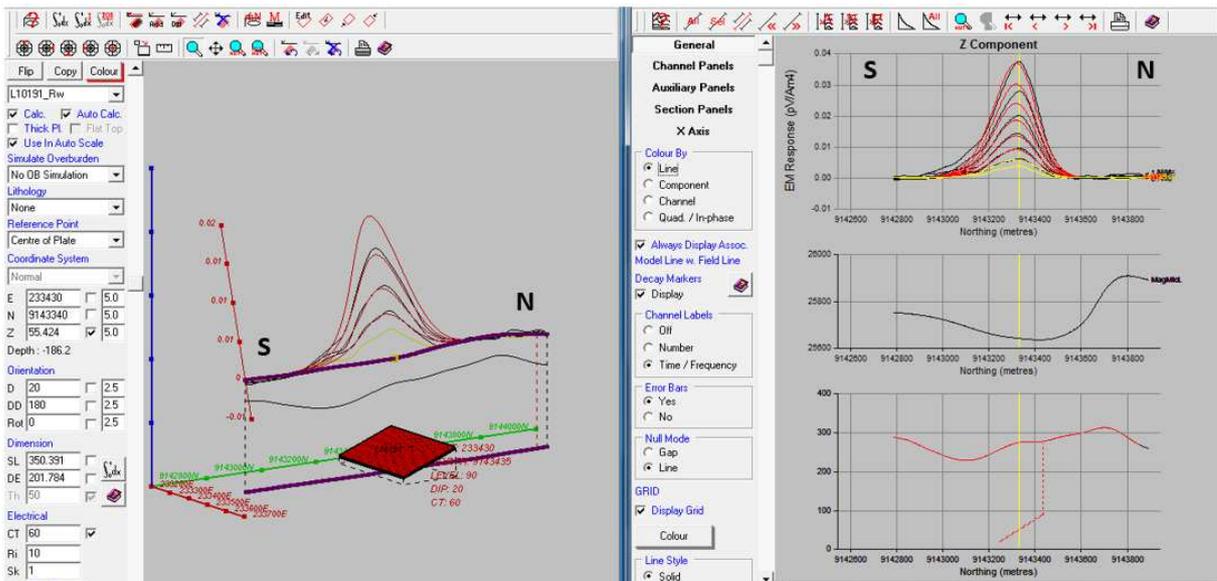


Figura 1.5: Modelamento tipo *plate model* realizado através do *software Maxwell* para o corpo mineralizado de Ni-Cu-PGE de Limoeiro

Ainda para complementar o modelamento tipo Maxwell, foi utilizada a inversão do tipo RDI, que se trata de uma técnica para converter rapidamente o dado de constante de decaimento dos perfis eletromagnéticos em resistividade equivalente, em seções com profundidade, através da deconvolução do dado TEM, por meio do *software* desenvolvido *in-house* pela *Geotech Surveys* (Prihodko, 2000). O algoritmo usado para transformação em resistividade-profundidade é baseado no esquema de transformação da resistividade aparente, usando algoritmo de Maxwell, A. (1998), sendo as estimativas de profundidade baseadas em *forward plate modeling* para a metodologia VTEM. Após essas fases todas as informações são integradas em ambiente GIS 3D para que se possam ser planejadas as sondagens exploratórias.

A figura 1.6 ilustra um exemplo de inversão de resistividade 2D - RDI, representada em um View 3D sobre mineralização de Ni-Cu-PGE, onde tanto as rochas hospedeiras ultramáficas e a mineralização são detectadas através de anomalias de baixa resistividade.

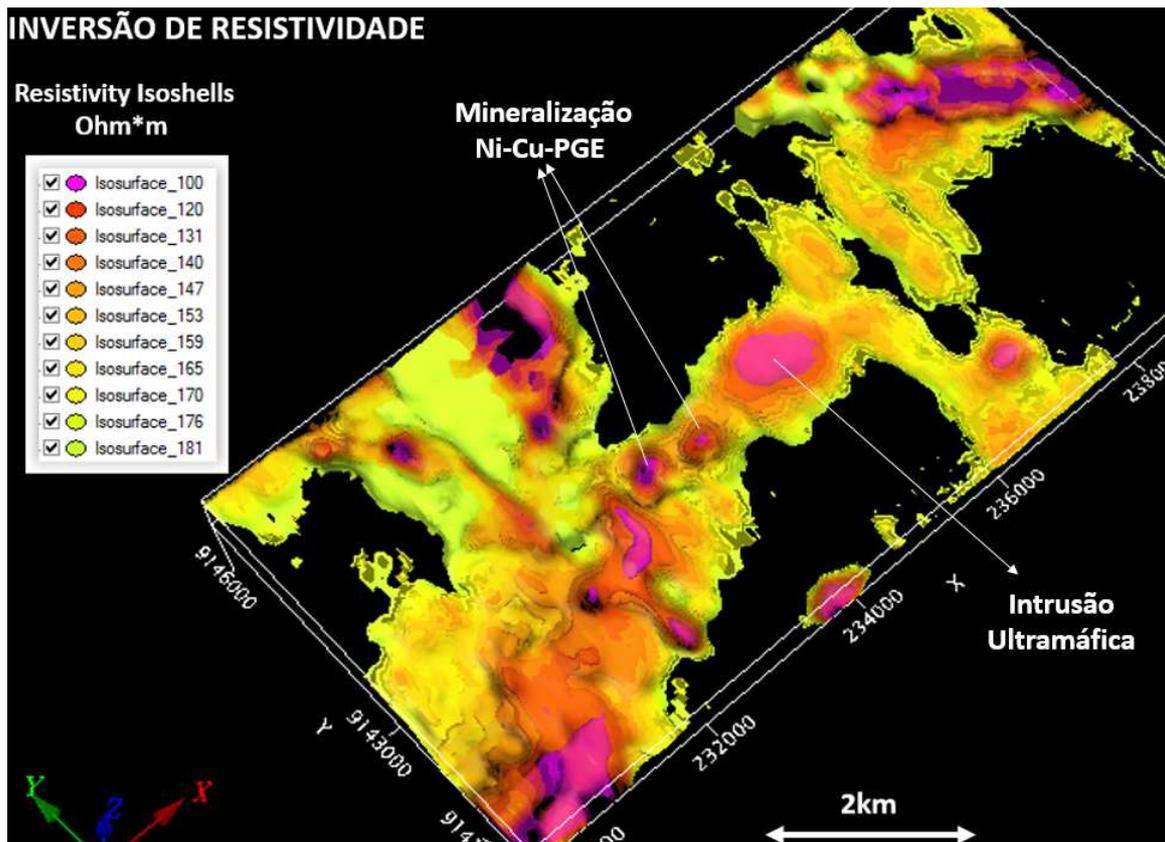


Figura 1.6: Inversão de Resistividade 2D RDI de dados VTEM sobre mineralização de Ni-Cu-PGE de Limoeiro.

1.3.3 Magnetometria terrestre

A magnetometria terrestre foi aplicada para melhor definição das fontes rasas e delimitação tanto dos corpos magnéticos como condutos magmáticos que hospedam as rochas ultramáficas e as mineralizações de Limoeiro. Pode-se afirmar que para Limoeiro, o ganho de sinal com magnetômetro terrestre é 2 a 3 vezes maior que na magnetometria aérea e apesar do dado ser um pouco mais ruidoso do que o aéreo, o levantamento foi planejado (com base no dado aéreo) de maneira a recobrir o comprimento de onda das principais anomalias magnética de interesse. O levantamento teve um total de 1050km lineares, com diversas fases, onde foram utilizados magnetômetros GSM19 de precessão de prótons com efeito *Overhouse* e NAVMAG *Scintrex*, de vapor de césio (Figura 1.7), com espaçamentos variados, entre 50 e 400m sendo mantido melhor resolução nas áreas de maior interesse (Bofe, Piçarra, Retiro).



Figura 1.7: Levantamento de magnetometria terrestre, com equipamento NAVMAG Scintrex de vapor de césio.

O tratamento dos dados magnéticos foi feito em duas fases, sendo a primeira, de controle de qualidade, onde procedeu-se, análise de duração do campo magnético para verificação de tempestades magnéticas (variação maior que 15nT em cinco minutos – pratica da indústria), retirada de valores espúrios (*spikes*), interpolação de dados e suavização da curva através de aplicação de filtros como *low-pass*. A segunda fase, de processamento de dados propriamente dita, consistiu em importação e georreferenciamento de coordenadas, importação da variação diurna, cálculo de IGRF, inclinação e declinação, cálculo do datum magnético, edição dos dados brutos, filtragem do dado editado atrás de *low pass* e *non-linear-filter*, filtragem do magnetômetro base, correção diurna do magnetômetro móvel, nivelamento do dado corrigido, micronivelamento dos dados nivelados, aplicação das transformadas de Fourier para obtenção dos dados da primeira derivada de vertical, sinal analítico e redução total ao polo para baixas latitudes.

Os dados são de alta qualidade e permitiram a definição dos limites dos corpos magnéticos e foram interpretados os condutos magmáticos com maior precisão e auxiliou muito na geração de novos alvos.

É importante citar aqui uma prática adotada durante a pesquisa de Limoeiro. Algumas anomalias magnéticas foram selecionadas para sondagem exploratória e que durante a execução da sondagem foi aplicado um procedimento para saber se a anomalia magnética tinha sido investigada por completa. Consiste na multiplicação da média de susceptibilidade (k) do intervalo magnético, pelo campo magnético total local (H) e se o resultado fosse similar a variação magnética detectada pelo levantamento magnetométrico terrestre para aquela anomalia, significava que a anomalia magnética tinha sido investigada e seccionada por sondagem. Neste caso e para aplicação da fórmula $M=kH$, consideramos magnetização remanente inexistente ou desprezível, e como o campo magnético induzido é linear em relação a magnetização, o valor M poderia determinar se a anomalia tinha sido investigada.

1.3.4 Polarização Induzida Espectral (SIP)

A mineralização de Limoeiro é constituída de minerais de minério condutivos e polarizáveis e o método da polarização induzida espectral é muito bem aplicada.

Ao todo foram realizados 82km lineares de polarização induzida espectral, com Sistema IP da IRIS instruments, composto por 1 receptor *ELRECP* de 10 níveis de investigação, com transmissor VIP 4000 de 1KVA, alimentado por um gerador de 6.5KVA além de eletrodos de potencial do tipo não polarizável (cerâmica) e eletrodos de corrente de aço inoxidável. Para todo o levantamento foi utilizado arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento AB e MN de 50m, sendo a inversão dos dados realizada pelo software *Zonge 2D Inversion - Interpex*, compatível com a plataforma Oasis Montaj. O algoritmo do modelo suavizado de Zonge (*Zonge 2D Inversion*) utiliza o método dos elementos finitos 2-D que incorpora a topografia no modelamento dos dados de resistividade e cargabilidade, assim como o método padrão definido por Rijo (1977). Primeiramente é gerada uma malha retangular de elementos finitos na forma convencional (baseado na profundidade), e, então, deformando-se a malha a ponto de que os nós superficiais se

ajustem ao perfil topográfico. Os nós localizados em maiores profundidades são ajustados com menor rigor que os nós mais superficiais. Com os valores de cargabilidade e resistividade calculados faz-se a comparação entre os dados reais e os dados sintéticos obtidos a partir do modelo, e considera-se o melhor ajuste; ou seja, aquele onde os dados sintéticos estão mais próximos dos dados reais. Os produtos da inversão são seções com a representação dos corpos modelados em profundidades e seus respectivos dados sintéticos, tanto para a cargabilidade quanto para a resistividade aparente. Todos os dados são integrados em seções 2D e ambiente 3D para análise com os demais dados.

1.3.5 Petrofísica

Existem dois tipos de base de dados de petrofísica nesta pesquisa. A base mais robusta e com maior universo amostral é proveniente do levantamento de susceptibilidade ($SI \times 10^{-3}$) e condutividade (Mhos/m equivalente a S/m) por meio do aparelho *MPP Probe - Magnetic Susceptibility and Conductivity Meter*, da *GDD instrumentation* (Figura 1.8). Para a obtenção das médias dos valores de susceptibilidade e condutividade, foram utilizadas 48,339 amostras provenientes deste log dos furos de sondagem diamantada (83 furos) distribuídos na região dos corpos Piçarra, Retiro e Bofe.

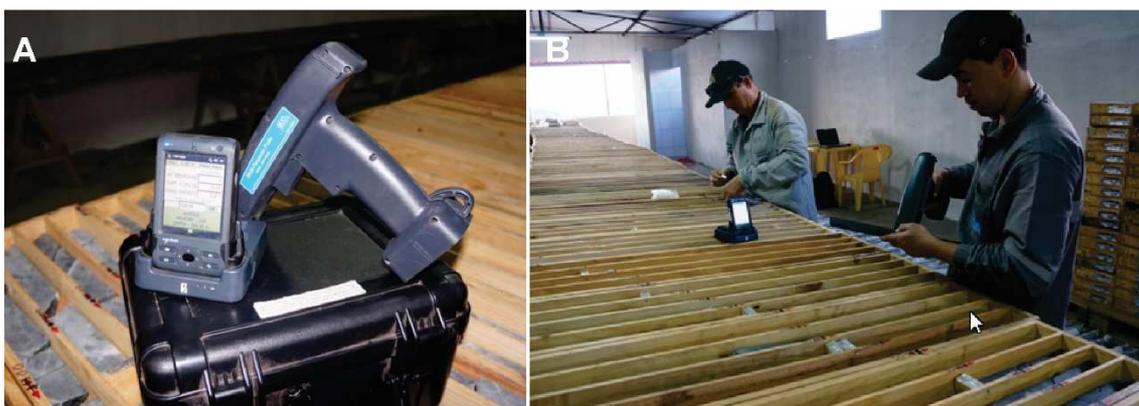


Figura 1.8: (A) Susceptibilímetro e condutivímetro GDD MPP Probe. (B) Levantamento sistemático de susceptibilidade e condutividade ao longo dos testemunhos de rocha dos furos de sondagem diamantada.

Uma segunda base de dados foi considerada na pesquisa, porém com um universo amostral menor, mas com informações distintas e relevantes à pesquisa, pois, além de susceptibilidade foram medidos densidade, cargabilidade e resistividade. Nesta fase de análise petrofísica 14 amostras foram enviadas ao Laboratório do *Council for Geoscience*, na África do Sul para análise. Para cada amostra enviada ao laboratório, foram analisados 3 pequenos cubos de 2x2 cm gerando resultados de 42 amostras.

Os dados foram utilizados para validar as inversões e conduzir a locação de novos furos de sondagem na área do depósito e adjacências.

1.3.6 Sondagem

Durante a pesquisa mineral no depósito Limoeiro, foram realizados 31.481,70 m de sondagem diamantada entre os anos de 2009 e 2012. Os furos exploratórios e de *infill* foram programados com base na integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos. Todos os furos foram descritos e os intervalos de interesse foram coletados e enviados para laboratório da ALS Chemex (Laboratório de Análises Químicas) para análise de 32 elementos.

Toda a base de dados com descrição litológica e resultados químicos estão armazenados na plataforma GEOEXPLO adotada pelo departamento de Exploração Mineral da Votorantim Metais.

1.3.7 Dados geológicos

Os dados geológicos tanto de descrição de pontos geológicos (4240 pontos descritos) e informações de dados estruturais (1282 pontos) estão inseridos na base de dados GEOEXPLO assim como os dados de vetores. O mapa geológico está na escala 1:25.000.

Todos esses dados foram disponibilizados para esta pesquisa e integrados aos dados geofísicos e geoquímicos.

1.3.8 Geoquímica

Durante as diversas etapas de pesquisa em Limoeiro foram coletadas 5606 amostras de solo, 1624 amostras de sedimento de corrente, 324 amostras de rocha. Todas as amostras coletadas foram enviadas para análise laboratorial e analisados para 32 elementos.

Todos os resultados foram disponibilizados para esta pesquisa e integrados com todos os dados disponíveis.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido na Universidade de Brasília sob a orientação da Professora Dra. Adalene Moreira Silva e em cooperação com a empresa Votorantim Metais S/A.

Essa dissertação de mestrado está estruturada em três partes: na primeira parte é apresentado o problema estudado, os objetivos, os materiais e métodos utilizados; a segunda parte está organizada em formato de artigo, em língua inglesa, a ser submetido à *GEOPHYSICS*, periódico do tipo A1 e intitula-se “*Geophysics leading the discovery of the Limoeiro Ni-Cu-PGE Deposit – Borborema Province – Northeastern Brazil*” e na terceira parte encontram-se as discussões e considerações objetivando sumarizar os resultados obtidos, bem como, a aplicação em outras regiões da Província Borborema e do Brasil.

2. Geophysics leading the discovery of the Limoeiro Ni-Cu-PGE Deposit - Borborema Province – Northeastern Brazil

Abstract

The Borborema Province has been the subject of mineral exploration programs looking for deposits of base and precious metals, resulting in the discovery of the Limoeiro Ni-Cu-PGE sulfide deposit. The discovery is the result of a systematic and extensive study that used modern prospective tools, a geological follow-up of geophysical anomalies and exploratory drilling. The discovery of the Limoeiro ultramafic intrusion was guided by geophysical anomalies, specifically the association of a set of magnetic anomalies that is partly associated with a circular anomaly that has low values of K-Th-U in gamma ray spectrometry data. The first field data to validate geophysical anomalies mapped an intrusion. It was precisely at the center of this K-Th-U depletion that we found evidence of sulfide mineralization, represented by a Ni-Cu-PGE rich gossan. Detailed geological mapping showed that only part of the intrusion was outcropping. The anomalous physical properties of minerals of this type of ore deposit led to the application of other geophysical tools like the helicopter time domain electromagnetic method (HTEM), induced polarization and ground magnetometry in search of continuity in the underground mineralization. Modeling and inverting multi-source geophysical data were combined with integrated field geological data to lead to the first sulfide intersections of the Ni-Cu-PGE mineralization. The detailed study of all available data associated with the geological model and type of mineralization enabled us to define a successful geophysical exploration strategy in search of new magmatic sulfide deposits such as that in Limoeiro in Borborema Province.

Key words: *Borborema Province; Ni-Cu-PGE sulfide deposit; helicopter time domain electromagnetic method; induced polarization; 3D-inversion*

2.1 Introduction

Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits generally occur associated with (i) mafic and/or ultramafic intrusions, or (ii) komatiite volcanic rocks (Naldrett, 2004). They form from the segregation and concentration of immiscible sulfide liquid within mafic or ultramafic magma (Naldrett, 1999). The understanding of this ore-forming dynamic is a guide for predicting the most favorable stratigraphic positioning for mineralizations and its dimensions, geometry, geochemical and geophysical characteristics.

In general, Ni-Cu-(PGE) deposits have formed in various ages and tectonic setting throughout geological history (Naldrett, 2004). Small mafic and/or ultramafic intrusions, which are recognized as magmatic conduits, host the largest deposits in Earth. The ore deposition preferably occur in a high-volume flow over a horizontal floor, and this floor may take the form of the base of a channelized sill, tube or blade-shaped dyke (Barnes et al., 2016).

Geophysical exploration can guide exploration for this type of mineralization because such mineralization is highly anomalous in almost every physical property. In contrast, because interference from geological materials with similar responses, the geophysical responses generated are not unique (King, 2007).

Until recently, because of the lack of important mineral discoveries in Borborema Province, the region was considered to be grassroots in nature. The launch of new high-resolution airborne geophysical surveys in the province led to the selection of anomalies with the potential to host deposits of base metals.

The geological follow-up of one of these selected anomalies guided the discovery of the Limoeiro ultramafic intrusion, represented by bodies aligned in the NEE-SWW direction and sectioned by N-S and N-W brittle-ductile fault systems. A magnetic dipole anomaly associated with a circular zone 800 m in diameter with low values of K-eTh-eU was mapped and characterized as part of the exposed ultramafic intrusion, partially eroded and covered by a gossan rich in Ni-Cu-PGEs. Because of this continuity and evidence of mineralization, an airborne Versatile Time Domain Electromagnetic (VTEM) survey was conducted and electromagnetic conductors were identified. Those conductors were tested, resulting in the first mineralized intersections of Ni-Cu-PGEs and the discovery of the

Limoeiro deposit. The Limoeiro ultramafic intrusions are hundreds of meters thick for tens of kilometers (4 km in the prospect core).

The Limoeiro mineralization has multiple metric and continuous levels of massive sulfide (70% Po, 15% Cp, 15% Pn), enveloped by disseminated sulfides, which was characterized from the metallogenetic perspective by Mota e Silva et al., (2013).

The main goal of this paper is to present the strategies that led to the discovery of the Limoeiro orebody and to discuss how after the discovery, using inversion modeling of the electromagnetic time domain data associated with induced polarization data, the sulfide mineralization of Ni-Cu-PGE, validated with drillholes, was characterized. Finally, this article presents the deposit signature and a prospective guide for identify similar targets within Borborema Province.

2.2 Geological and Geophysical Setting

2.2.1 Borborema Province

From a tectonic perspective, the Limoeiro deposit is located in Borborema Province, in the northeastern portion of the South American Platform, bounded by the Parnaíba Basin, the São Francisco Craton and the Coastal Basins (Almeida et al., 1977). In general, it is defined as a mosaic of massifs and folded belts that stretch between the São Francisco-Congo and São Luiz-West Africa cratons (Brito Neves and Cordani, 1991; Jardim de Sá, 1994) or as a result of the superposition of more than one orogeny, with the agglutination of different allochthonous terranes separated by major shear zones (Jardim de Sá, 1994; Santos, 1996; Santos et al., 1999). Currently, Borborema Province is divided into sub-provinces bounded by the Patos and Pernambuco transcontinental scale shear zones; those sub-provinces are referred to as the North, Central (or Transversal Zone) and Southeast domains. The study area is located within the Transversal Zone (Van Schmus et al., 1995; Brito Neves et al., 2000; Jardim de Sá, 2002; Neves and Alcântara, 2010) (Figure 2.1).

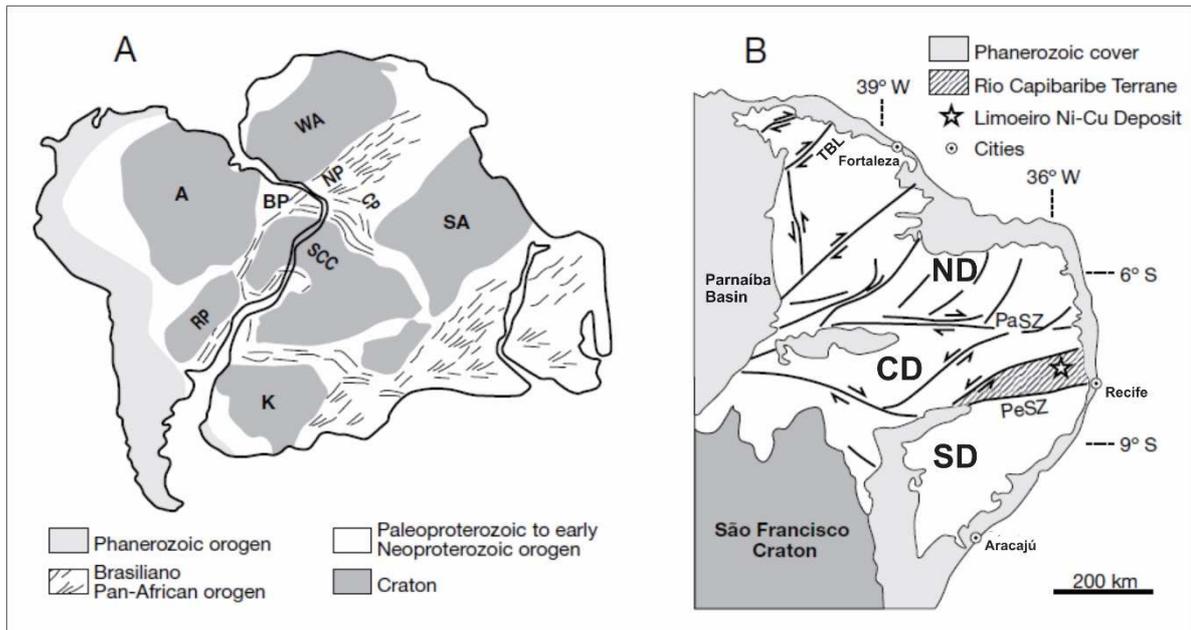


Figure 2.1 - (A). Pre-rift reconstruction of Western Gondwana showing the main cratons and the Brasiliano/Pan-African provinces (modified from Neves and Alcantara, 2010 by Mota e Silva et al., 2013). Abbreviations: A = Amazônia; BP, CP, NP = Borborema, Nigeria, and Cameroon provinces; K = Kalahari; RP = Rio de La Plata; SA = Sahara Metacraton; SCC = São Francisco/Congo; WA = West Africa. (B). Sketch showing the main shear zones that limit the domain subdivision of Borborema Province. Abbreviations: PaSZ = Pato shear zone; PeSZ = Pernambuco shear zone, ND = North domain, CD=Central domain or Transversal Zone and SD = Southern domain. The Limoeiro deposit is located inside the CD domain in the Rio Capibaribe terrain.

The Patos and Pernambuco shear zones are considered complex fault systems and may represent the boundaries of the continental crust. The integration of available magnetic data highlights the transcontinental structures—Patos to the north and Pernambuco to the south—and delimits the main terranes defined by a mosaic resulting from the Cariris Velhos Orogeny (1.1 - 0.95 Ga) and the Brasiliano Orogeny (0.75 - 0.54 Ga). The four terranes, from the Meso- and Neoproterozoic ages, are named Piancó-Alto Brígida (TPB), Alto Pajeú (TAP), Alto Moxotó (TAM) and Rio Capibaribe, which hosts the Limoeiro deposit (Santos e Medeiros, 1999) (Figure 2.2). According to Brito Neves et al. (2005), the Transversal Zone is divided into two different litho-structural and geotectonic domains: to the north and northwest are the Riacho Gravatá (RG; EoNeoproterozoic) and Piancó-Alto Brígida (PAB; Neoproterozoic) terranes and to the south and southeast are the Alto Pajeú terrane (TAP) and its basement, the Alto Moxotó terrane (TAM).

It should be noted that the regional airborne geophysical data provide a more precise map of the structures in previous works and products derived from historical data with low spatial resolution and remote sensors. However, they accurately enhance the domains that have already been presented in the literature associated with the observed contrast in color RGB composition (K-eTh-eU) (Figure 2.2).

The Rio Capibaribe Terrane is located in the south/southeast portion of the Transversal Zone domain (Figures 2.1 and 2.2) and is bounded by the Congo/Cruzeiro do Nordeste shear zones to the north and the Pernambuco lineament to the south (Neves, 2012). This terrane was divided into Surubim Complex and Serra de Taquaritinga, where gabbro-anorthosite and alkali granite complexes are found, from 1.5 to 1.7 Ga, along with Neoproterozoic granites (Jardim de Sá et al., 1997). The boundary between these two terranes is marked by a thrust fault represented by a granite of Paleo-Mesoproterozoic age, tectonically allocated during the Cariris Velhos Orogeny and affected during the Brasiliano Cycle (Figure 2.2).

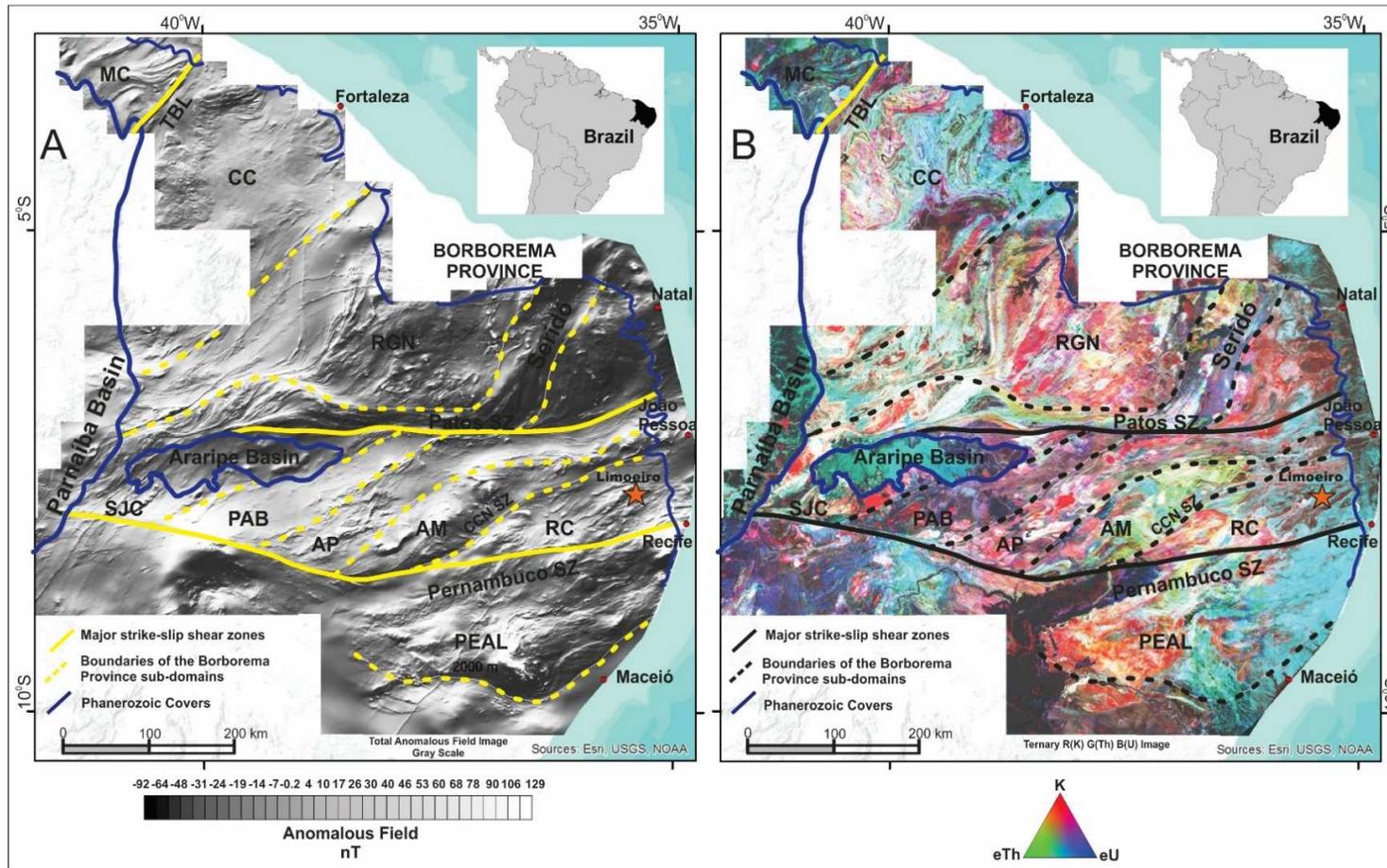


Figure 2.2 – Geological Geophysical Context of Borborema Province (based and adapted from Brito Neves et al., 2005 and Caxito et al., 2016). (A) The anomalous magnetic field in grayscale. (B) The Ternary R (K) G (Th) B (U) Radiometric Image. Both views with the boundaries of Borborema Province sub-domains as follows: PEAL – Pernambuco-Alagoas, RC – Rio Capibaribe, AM – Alto Moxotó, AP – Alto Pajeú, PAB – Piancó-Alto Brígida, SJC – São José do Caiano, RGN – Rio Grande do Norte, CC – Ceará Central. PeSZ = Pernambuco shear zone; PaSZ = Patos shear zone, CCN SZ = Congo Cruzeiro do Nordeste shear zone.

2.2.2 Geology of the Limoeiro Deposit and Mineralization

The Limoeiro deposit, inserted into the Transversal Zone domain, is hosted on the top of an ultramafic tabular intrusion that concordantly intrudes upon the paragneissic rocks of the Surubim Complex. In the Limoeiro region, the rocks of this complex consist of quartz-feldspar schists and gneisses, amphibolites and calc-silicate rocks with mild to moderate foliation, dipping between 10 and 40° south, sometimes disturbed by folds related to subvertical shear zones in the N-S and E-W directions (Mota e Silva et al., 2013) (Figures 2.2 and 2.3).

The ultramafic intrusion is sub-horizontal and concentrically zoned, with hazburgites in the center and orthopyroxenites on the edge, with cross-section dimensions of hundreds of meters and a few kilometers on its longitudinal axis. The Limoeiro mineralization essentially consists of disseminated sulfidation, with 70% pyrrhotite, 15% chalcopyrite and 15% pentlandite, and hosts a few metric levels of massive sulfide at the top of the ultramafic intrusion, formed by at least four main magmatic pulses, called Low Cr, Upper, Transition Zone, and Lower, distinguished in terms of fractionation and mineralization (Mota e Silva et al., 2013). The ultramafic rocks are composed mainly of olivine and orthopyroxene cumulates, along with chromite and sulfides, and were partially altered to a range of metamorphic assemblages. One of those assemblages was of high-grade metamorphism formed by recrystallized orthopyroxenes and olivine, with association of amphiboles, chlorite and phlogopite. The other one was of low-grade metamorphism consisting of talc, chlorite, calcite and magnetite (Mota e Silva et al., 2013).

The tectonics and metamorphism of the Brasiliano Orogeny affect the entire Limoeiro Ultramafic Complex in that the orebodies are disconnected by fault systems and the rocks contain hydrated metamorphic minerals; the edge of the intrusion is more affected where the foliated amphibolites are most evident.

The Limoeiro intrusion is subdivided into four main targets. From east to west is orebody, partially exposed and eroded (Bofe Intrusion), with low values of K, U and Th. Next and toward the west are the Piçarra, Retiro and Parnazo orebodies (Figure 2.3).

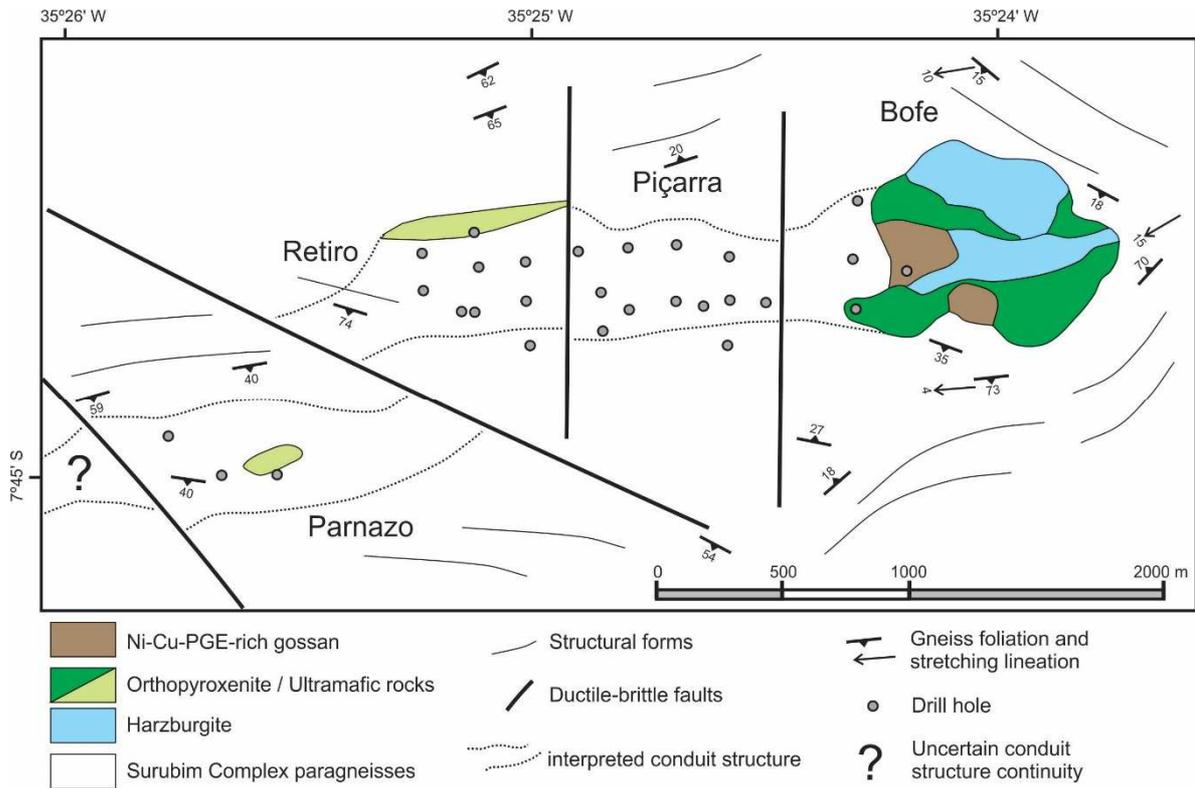


Figure 2.3 - Local geology of the Limoeiro Deposit (Modified from Mota e Silva et al., 2013).

The Limoeiro mineralization is largely hosted within the upper ultramafic sequence and consists of thick packages, sometimes more than 150 m thick, with disseminated sulfides, wrapping metric to sub-metric levels of massive sulfide, except for the Bofe orebody, which is partially eroded. Mota e Silva et al. (2013) outlined three types of orebodies with predominantly disseminated sulfides (97%), massive stringers remobilized into structures, and massive sulfide, which so far represents only 3% of the deposit volume. Both the amount of disseminated sulfide and the continuity of massive sulfide levels increase eastward, toward the orebody. The modal composition sulfides is considered homogeneous, with approximately 70% pyrrhotite, 15% chalcopyrite and 15% pentlandite.

2.3 Data and Methods

2.3.1 Airborne magnetic and gamma ray spectrometric data

The magnetic and radiometric data used in the research come from Borda Leste do Planalto Borborema Survey (CPRM, 2008). The data were acquired with flight and control line spacing of 500 m and 10,000 m in the NS and EW directions, respectively, at a constant height of 100 m. These data were mainly used in the selection of anomalies, the definition of the magnetic structural framework, the definition of radiometric domains and 2D and 3D magnetic inversion.

2.3.2 VTEM (Versatile Time Domain Electromagnetic) survey

The electromagnetic data used are derived from a VTEM (Versatile Time Domain Electromagnetic) survey of the magnetic anomaly mapped with the previous data, later defined as the Limoeiro intrusion. The data were acquired with flight and control line spacing of 200 m in the NS direction and 2,000 m in the EW direction, respectively. The VTEM system used has the following characteristics: a 26 m diameter transmitting coil, with 46 m nominal terrain clearance, 4 turns, a 30 Hz frequency, a 205 Amp peak current, a 433,233 peak dipole moment, a 40.2% duty cycle and 6.67 pulse width, along with a 1.2 m diameter receiving coil, with nominal terrain clearance, MAX 100 turns, a 113.1 m² effective area and a 0.1 s sampling interval.

The EM data were analyzed at various stages, including the process of picking anomalies, the TAU calculation, grid images, targeting, Maxwell modeling and RDIs inversion. The calculation of the TAU (time constant decay) parameter in the database was performed using an algorithm developed by Geotech Airborne Survey in the Geosoft Oasis Montaj software environment.

Part of the data was modeled using the Maxwell software with the filament algorithm, which allowed us to fit the measured anomaly to the modeled anomaly. The greater the similarity between the two fields, the greater the reliability of the model. Once the observed field is fit to the modeled field, it is possible to geometrically understand and calculate the physical property models. The dimensions (plate size), dip direction, depth extent, strike length, conductor center or top depth, conductance and TAU decay constant can be obtained for these models. Using all of this information, a classification can be

applied to the models based on the purpose of the research. RDIs were conducted to convert the decay constant data into equivalent resistivity at depth sections by deconvoluting the TEM data using the software developed by Geotech Surveys (Prihodko, 2000).

2.3.3 Ground magnetic data

An extensive magnetometric ground survey was conducted (1,050 linear km) in the NS direction perpendicular to the geological strike and spacing ranging between 50 and 200 m, with the purpose of detailing the targets indicated by their magnetometry and cartography (Bofe, Piçarra, Retiro). GSM19 (proton precession with Overhauser effect) and NAVMAG Scintrex (cesium vapor) magnetometers were used. The data were preprocessed, quality control was performed, and the data were subsequently processed for the generation of derivative products such as reduction to the pole at low magnetic latitudes (Macleod et al., 1993), with correlation with the inclination of the magnetic field, first vertical derivative and analytical signal amplitude (Nabighian, 1972).

2.3.4 Induced polarization

The SIP survey adds up to 82 linear km in the NS direction, surveyed with an IRIS Instruments IP System composed of an ELREC Pro receiver with 10 investigation levels, a VIP 4000 transmitter (1 kVA) powered by a 6.5 kVA generator, along with non-polarizable potential electrodes (ceramic) and stainless steel current electrodes. A dipole-dipole arrangement was used for the entire survey, with AB and MN spacing of 50 m. Data inversion was performed using Interpex Zonge 2D Inversion software, which is compatible with the Oasis Montaj platform. The algorithm of the Zonge smoothed model (Zonge 2D Inversion) uses both the 2D finite element method (which incorporates the topography into the resistivity and chargeability data modeling) and the standard method defined by Rijo (1977).

2.3.5 Petrophysics

The petrophysical data used are derived from a systematic drill hole survey using the device MPP Probe—Magnetic Susceptibility and Conductivity Meter (GDD Instrumentation). This database provided both susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-3}$) and conductivity (Mhos/m equivalent to S/m) data. To obtain the means of the susceptibility and conductivity values, we used 48,339 samples collected from 83 diamond drill holes distributed on the Piçarra, Retiro and Bofe orebodies. Sampling was carried out every 25 cm in areas where massive sulfide was intersected, every 50 cm in ultramafic rocks and every 1 m within the host rocks. In addition to the susceptibility and conductivity data collected in the drillhole cores, 14 samples (ore and host rock) were sent to the laboratory of the Council for Geoscience in South Africa to determine susceptibility, density, resistivity and chargeability values. For each sample sent to the laboratory, three small 2x2x2 cm cubes were studied, generating 42 analyses for comparison with the data obtained in the MPP Probe survey. The data were used to validate the inversions and to lead to the location of new drill holes in the deposit area and its vicinity.

2.4 Mapping Ni-Cu-PGE targets using magnetics and gamma ray spectrometric data in Borborema Province: the Limoeiro ultramafic intrusion

Borborema Province is large, covering an area of more than 450,000 km², which represents the combination of various deformed and metamorphosed terranes with different ages that until recently was regarded as a grassroots area. The existing geological maps are still on a regional scale and have been undergoing improvements but have not yet revealed the province's true mineral potential. This conjuncture makes geophysical methods essential tools in a mineral exploration program and the search for ultramafic rocks (outcropping or non) that can host Cu-Ni-PGE mineralization that is dependent, even in different phases, on the data from airborne magnetic and radiometric surveys available in the region. The magnetic data reveal features that assist both in understanding and mapping the tectonic structural framework and in defining the boundaries of the

extensive terranes, domains and sub-domains. They can also guide the follow-up on magnetic anomalies of interest that may be related to mineralization. Gamma ray spectrometric is essential in surface geological mapping, the definition of environments related to mineralization, and the position of outcrops or partially outcropped ultramafic rocks.

The magnetic and radiometric data guided the geological follow-up and led to the discovery of the ultramafic rocks that host the Limoeiro Ni-Cu-PGE mineralization. The outcropping part of the intrusion is represented by depleted potassium, thorium and uranium that is approximately 800 meters in diameter and is associated with a magnetic dipole anomaly; both phenomena are caused by the presence of magnetic serpentinites, orthopyroxenites and hazburgites with abundant mafic minerals (Figure 2.4). In addition to the ultramafic intrusion, the geological follow-up led to the discovery of a Ni-Cu-PGE rich gossan, which represents the surface-oxidized mineralization (Figure 2.5). Because of their proximity to the magnetic equator, the magnetic anomalies caused by ultramafic rocks are represented in the anomalous magnetic field profiles by negative anomalies accompanied by small positive poles. This signature makes it difficult to interpret the positioning of the bodies, but the application of filters of reduction to the pole at low latitudes and analytical signal amplitude efficiently delimit the boundaries of the Limoeiro ultramafic orebodies (Figure 2.4). Among the products derived from gamma ray spectrometry data, the R (K) G (eTh) B (eU) ternary composition and the thorium channel provide a very good definition of the boundaries of the ultramafic outcropping orebody (Figure 2.4). In addition to the low values of radionuclides related to the outcropping portion of the intrusion, there is a very subtle relative thorium enrichment associated with the sub-outcropping ultramafic rock, concordant with the host paragneisses.

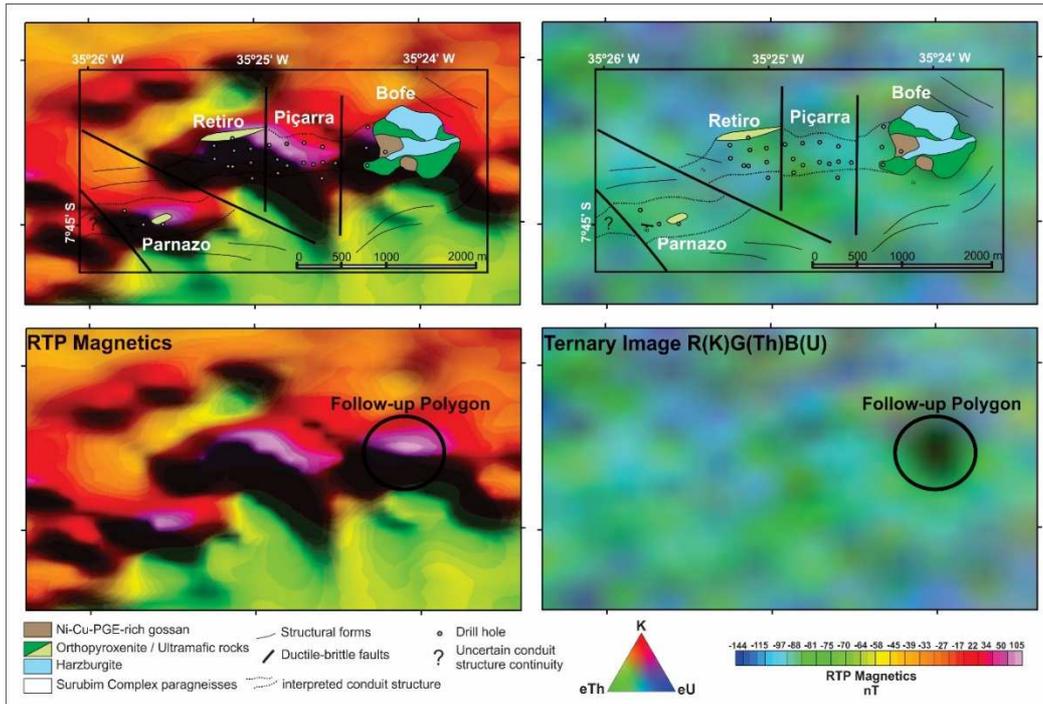


Figure 2.4 - High magnetic anomalies and K-eTh-eU low values represented by dark-circular anomaly of the Limoeiro ultramafic outcrop. The circular polygon represents the original anomaly selected for geological follow-up. This figure shows the continuity of the blind magmatic conduits detected by airborne magnetics.

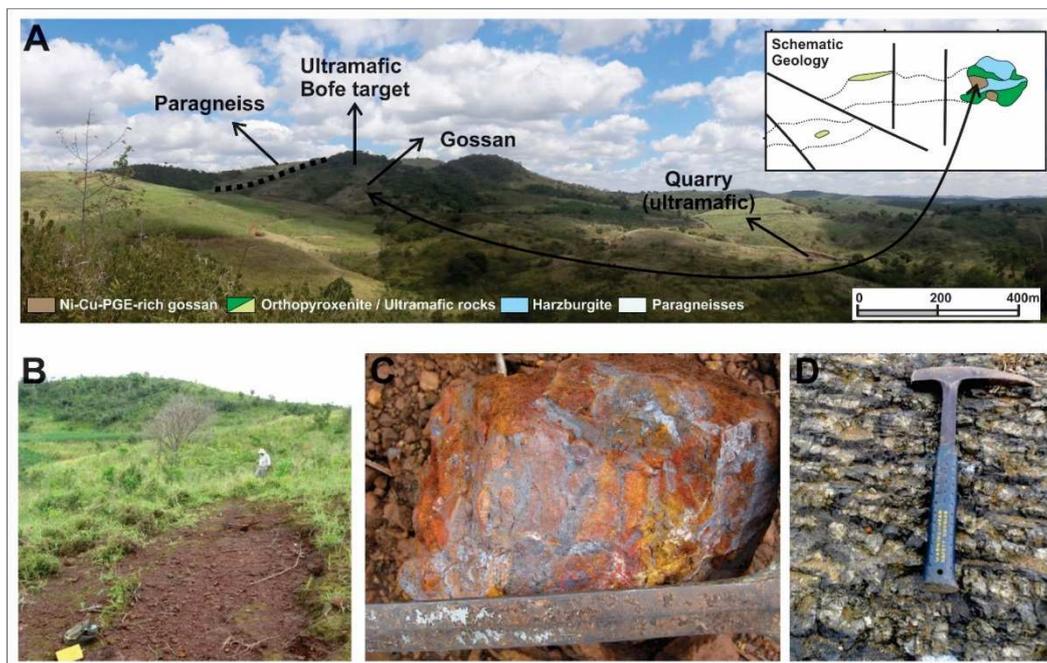


Figure 2.5 – Illustration of follow-up results: (A). Panoramic view of the ultramafic rocks, the geological contact ultramafic/country rocks (paragneisses), the gossan outcrop area and the spatial relation with the geological surface map. (B). The Ni-Cu-PGE rich gossan (dozen-meters-wide) at the surface. (C). A detail of a gossan block. (D). Cumulus olivine and orthopyroxene rhythmic layering in harzburgite (“quarry” outcrop)

the north body, which is more deformed, consists of small parts; the body to the south has a well-defined geometry and contains higher amounts of sulfides.

In the Retiro target (Figure 2.6), only the upper sequence is mineralized, whereas the lower sequence is sterile. According to Mota e Silva et al. (2013), the Retiro ultramafic sequence consists of orthopyroxenites and hazburgites with an outer ring of foliated amphibolites. It is 550 m wide, 250 m thick and extends on a strike of 1 km. In the Retiro orebody, the massive sulfide levels in the lower sequence are more continuous than in the Piçarra and Parnazo bodies and have more than 10% of coarse-grained teardrop sulfide (Figure 2.6).

The Parnazo orebody is 250 m wide and 150 m thick on a trend 1 km in length. The ultramafic sequence in the Parnazo orebody consists of a sterile lower sequence and a mineralized upper sequence, enveloped by a ring of amphibolites and separated by an irregular amphibolite body with an average thickness of 5 m (Mota e Silva et al., 2013) (Figure 2.6).

In the case of Limoeiro, the existence of a sub-horizontal ultramafic intrusion, partially outcropping and concordant with the host rocks (paragneisses), mapped with magnetic data and validated with geological reconnaissance, was sufficient to establish the need to expand the investigation underground. The positive analytical results of the gossan geochemistry showed an association with ore minerals typical of Ni-Cu-PGE mineralization, i.e., conductive and magnetic. These data were decisive for the application of an airborne electromagnetic method in search of conductive zones associated with sulfide mineralization.

2.5 The discovery of Ni-Cu-PGE mineralization and the enhancement of deposit shape and disseminated sulfide orebodies

The magmatic deposits of Ni-Cu-PGE ores usually include, in order of abundance, pyrrhotite (Po), pentlandite (Pn) and chalcopyrite (Cp), all with anomalous physical properties, including conductivity, resistivity, chargeability, density, natural radioactivity and acoustic velocity (King, 2007). This allows geophysical exploration methods such as the helicopter time domain electromagnetic method (HTEM) to be successfully applied to identify conductive geological areas associated with the mineralized system or

conductive bodies and to immediately link them to mineralization such as mineral gangue or ore minerals.

According to King (2007), modern HTEM systems are capable of detecting disseminated interconnected sulfides at a minimum percentage of between 10-30%, but are most effective for detecting very conductive (usually massive) orebodies. The appropriate processing of electromagnetic data from an HTEM survey can provide an accurate estimate of the depth, geometry and spatial position of the conductive bodies. The determination of conductance, conductivity and TAU (time constant decay) values is critical in the prioritization of anomalies; consequently, it can define the sequence in a program of direct investigation by exploration drill holes. Although HTEM data have been used worldwide in recent years, their processing and interpretation have been improved, helping discover new deposits both in new mining frontiers and in known provinces.

Because of this, 680 linear km of time domain electromagnetic data were surveyed with the VTEM system to define conductive zones that could be linked directly to sulfide mineralization associated with the gossan and magnetic anomalies identified by the regional magnetometry survey.

2.5.1 The successful application of Time Domain Electromagnetic Airborne Geophysics

The main block of the aerial survey was positioned over the outcropping intrusion and over the continuity of ultramafic rocks interpreted in the products derived from aeromagnetic data. Figure 2.7 illustrates the position and arrangement of the HTEM survey flight lines superimposing the RTP (reduction the pole) image, along with the position of the targets defined and mapped in phase 1.

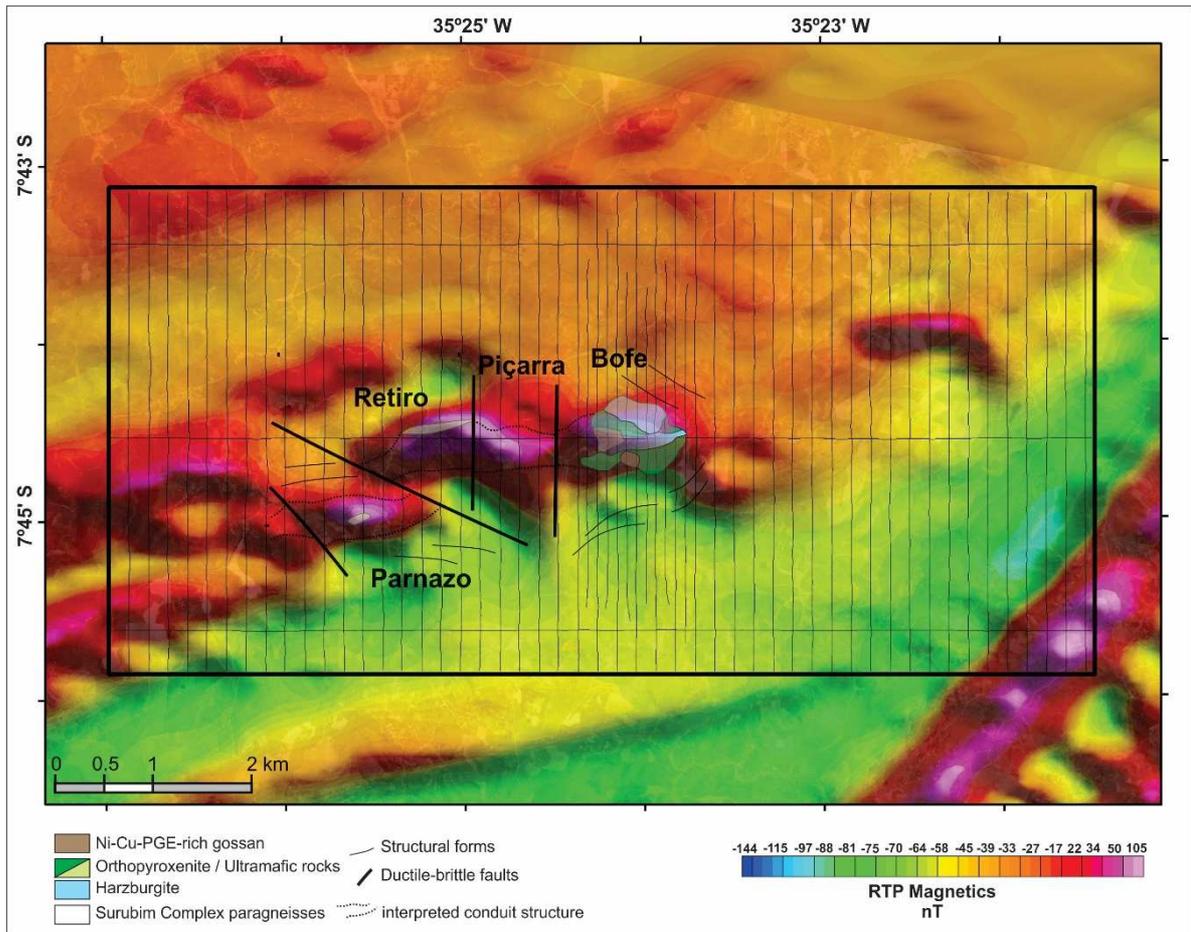


Figure 2.7- VTEM survey planned over the magnetic response (RTP magnetics) and schematic geological map of the Limoeiro intrusion.

The main conductors identified in the Limoeiro intrusion were initially classified by the TAU decay constant (Figure 2.8). This parameter shows the time required for the secondary electromagnetic field to be completely discharged; conductors with higher TAU values are classified as priority conductors. In Limoeiro, conductive and magnetic targets were mapped as keys and interpreted as pyrrhotite associated with magnetite from ultramafic rocks.

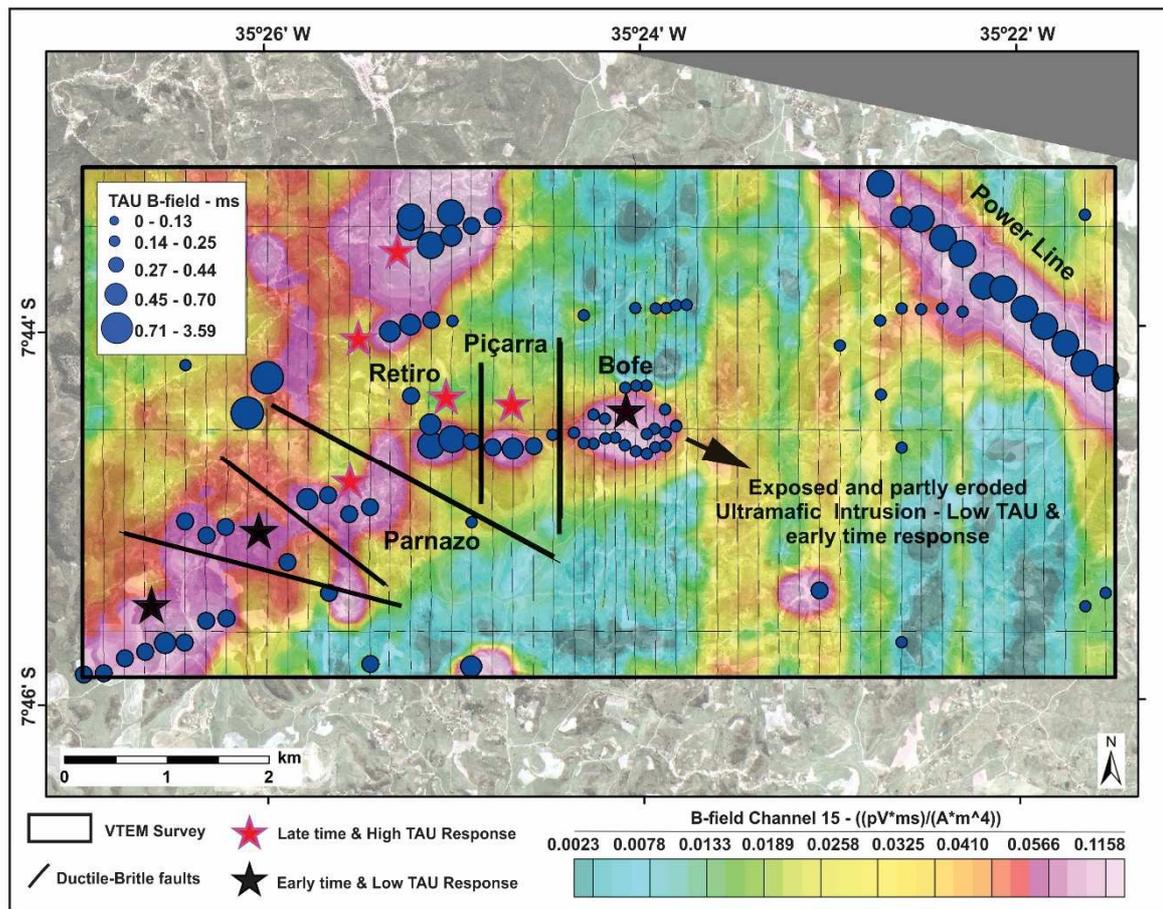


Figure 2.8- Results of the VTEM survey over the Limoeiro intrusion – apparent conductivity of B-field channel 15 and the TAU classification for the electromagnetic pick points.

After discarding false conductors mapped by monitoring power lines (60 Hz filter), only the targets considered as potential or that map major geological information related to mineralization were selected.

Figure 2.8 illustrates the main conductors associated with the Limoeiro intrusion. The Bofe target, reflecting the partly eroded outcropping intrusion and associated with the gossan, is represented by low TAU conductors (0 to 0.44 ms) and has a uniform response. The anomalies related to the Piçarra, Retiro and Parnazo targets stand out with higher values of TAU (0.45 to 3.59 ms) and do not show a uniform response, varying according to the depth and geometry of the orebodies (Figure 2.8).

The Bofe target is represented by an electromagnetic anomaly with an EW direction, 1,000 m long, detected by 10 flight lines (infill of 100 m spacing). In the analysis of the dB/dT and B-field profiles of line 10535, the electromagnetic anomaly has a wavelength of 854 m, detected only in the first 11 channels, and has no response in the late-time channels, thus suggesting the inexistence of massive or interconnected sulfides. This

conductor is associated with a magnetic dipole anomaly with 331 nT magnetic variation and a wavelength of 1620 m (Figure 2.9).

The electromagnetic signature of the Piçarra orebody has a NW, almost EW direction, 600 m in length, detected in 3 flight lines with 200 m spacing. The electromagnetic profile (L10221) identifies a wavelength of 235 m detected in all 25 channels but noisier in the last 7 channels. The electromagnetic anomaly is associated with a magnetic dipole anomaly with magnetic variation of 152 nT and 1545 m wavelength (Figure 2.9).

The Retiro orebody has an EW strike, 600 m in length, with the electromagnetic anomaly detected in line 10181 and a wavelength of 434 m, detected in all 25 channels but noisy in the last 5 channels. The electromagnetic anomaly is associated with a magnetic dipole anomaly, magnetic variation of 319 nT and a 1,668 m wavelength (Figure 2.9).

This wavelength difference between electromagnetic and magnetic anomalies illustrates very well that only part of the Piçarra and Retiro ultramafic bodies are mineralized and conductive (Figure 2.9).

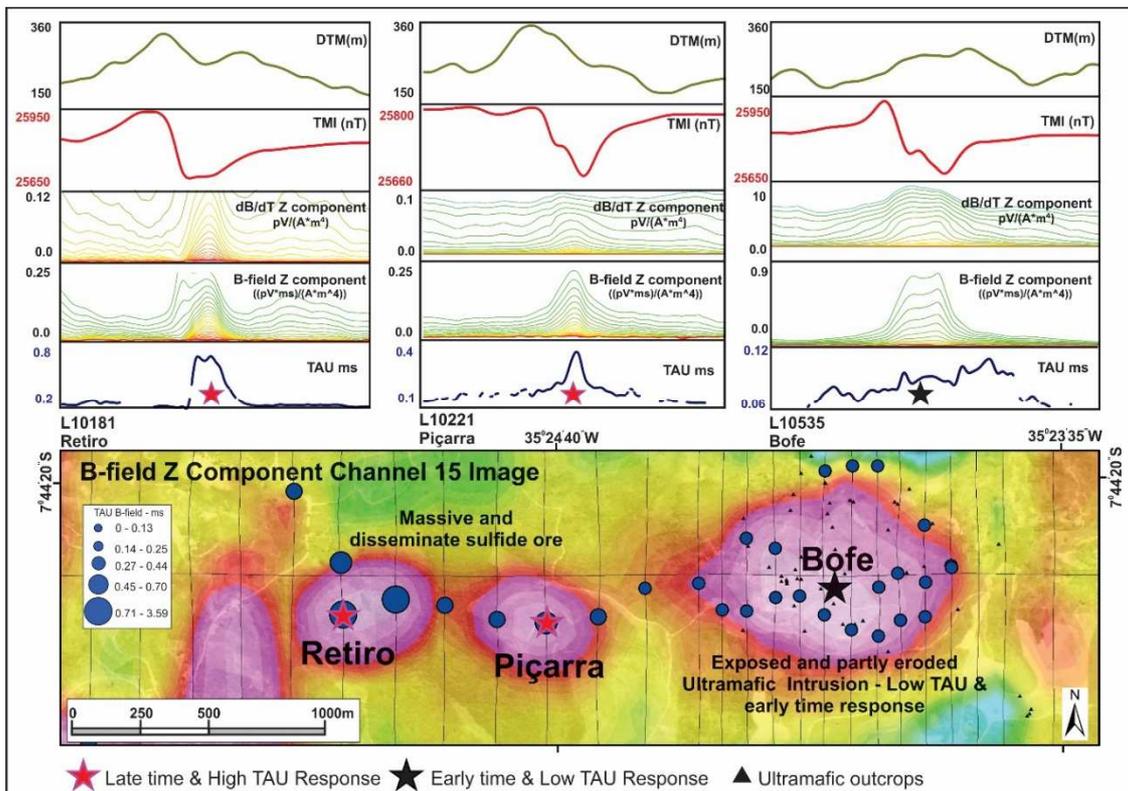


Figure 2.9 - VTEM survey – magnetic and electromagnetic response of Bofe, Piçarra and Retiro targets. The geophysical grid represents the apparent conductivity from B-field channel 15, and the EM pickings are classified by time constant decay. Geophysical profiles: DTM (digital model terrain in meters) - TMI (total magnetic intensity in nT) – dB/dT Z component (array 25 channels) – B-field Z component (array 25 channels)

The geometry and dimensions of the orebodies have a direct relationship with the wavelength of the electromagnetic anomalies, as can be observed in both the profile that longitudinally crosses the Limoeiro ultrabasic complex and the mineralization (Figure 2.10). The Retiro orebody is considered as a plate-like geometry, with an average wavelength of up to 435 m (484 m lengthwise), whereas the Piçarra orebody, which is tube-like, has an average wavelength of 235 m (238 m lengthwise). The outcropping intrusion, Bofe, with conductors detected only in the 11 early-time channels, is probably caused by the presence of a soil/conductive saprolite profile, which is a product of the weathering alteration of ultrabasic rocks. In addition to low conductivity, the wavelength of the electromagnetic anomaly related to the outcropping intrusion is up to 835 m (1440 m lengthwise), consistent with the outcropping core diameter of the ultramafic rocks found on the surface.

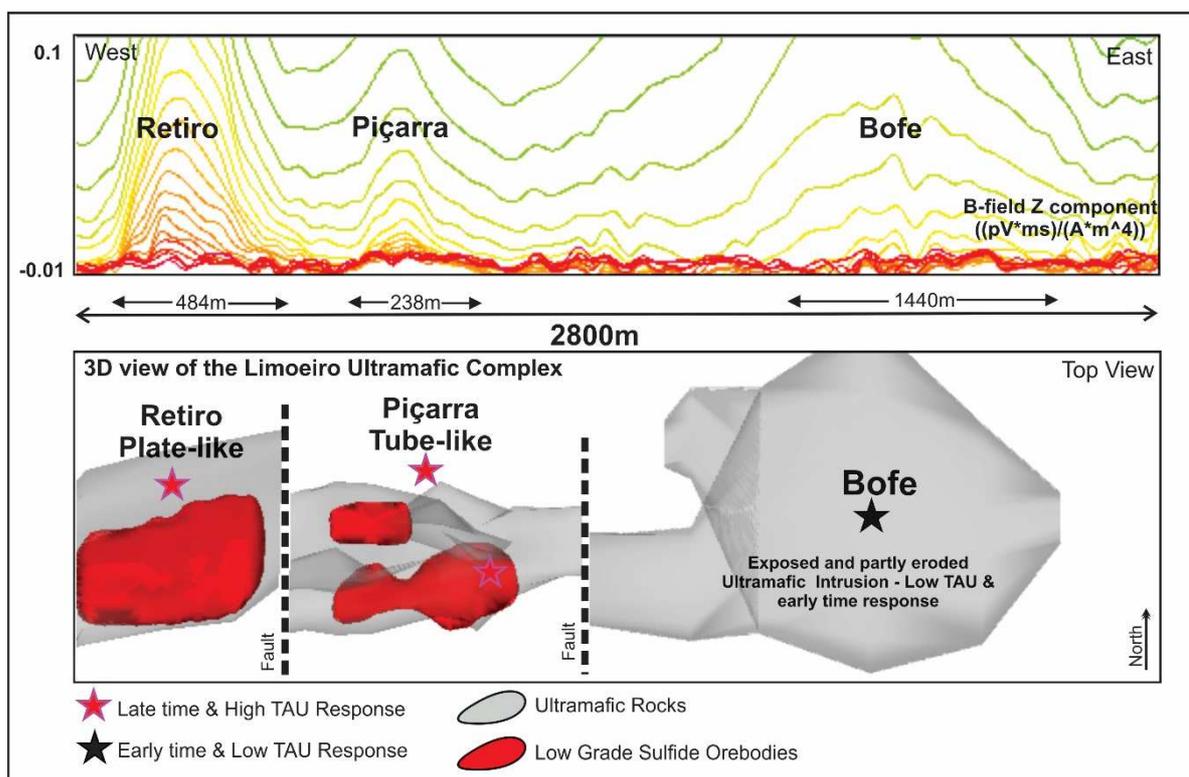


Figure 2.10 - VTEM response of the tie line (longitudinally positioned – Tie Line response) over the ultramafic intrusion and the orebodies. This figure shows the relation between the geometry and dimensions of the orebodies and EM shape anomalies.

The data inversion indicates additional information about the conductors and a selection of potential targets for surveying. Initially, Maxwell plate modeling was performed, using

the filament algorithm through the Maxwell software and subsequently, RDI (Resistivity Depth Image) inversion.

The results of the Maxwell modeling guided the exploratory drilling in Limoeiro and show excellent correlation between the estimated depth and the dip of the conductive bodies (Table 2.1). The sub-horizontal arrangement of the ultramafic intrusion implies better electromagnetic coupling. The association of coupling with quality conductors, as identified in late-time channels, allows the production of plate models with excellent fit between the observed field and the modeled field. For the Limoeiro prospect, several lines were analyzed and modeled, but there are two main lines for each orebody: L10181 and L10191 for the Retiro orebody; and L10211 and L10221 for the Piçarra orebody (Figure 2.9).

Table 2.1 illustrates the main results obtained for the Maxwell modeling of the 4 lines that represent the signatures of the Retiro and Piçarra orebodies.

Table 2.1: Maxwell modeling results of the Retiro and Piçarra orebodies, highlighting the depth of the conductor core and the conductivity and thickness product values (conductance).

Flight Line	dB/dT or B-field	Coincident Magnetics	Strike Length (m)	Dip Direction	Size	Conductance (S)	Depth of Center Plate(m)	Fit Quality	Channels Modeled
Retiro Orebody – Plate-like Geometry - Lines 10181 and 10191									
10181	dB/dT	Strong	550	180/22	302x150	72.92	174	Excellent	20-23
10191	dB/dT	Strong	551	180/17	350x180	53.96	185	Good	20-23
Piçarra Orebody - Tube-like Geometry - Lines 10211 and 10221									
10211	dB/dT	Strong	550	180/20	300x70	74	141	Excellent	20-23
10221	dB/dT	Strong	551	180/20	300x120	80	147	Good	13-23

The electromagnetic conductors related to the Retiro and Piçarra orebodies showed conductance between 53 and 80 Siemens and a decay time constant TAU maximum of 1,306 ms (Figure 2.11). Generally, higher conductance values are expected for plates related to the mineralization of Ni-Cu-PGEs because of the presence of pyrrhotite and pentlandite, which are very conductive. The relatively low conductivity values can be explained by the heterogeneity of physical properties from a geophysical model associated with an essentially disseminated mineralization (10-15% of sulfides) that envelops metric levels of massive sulfides (up to 70%).

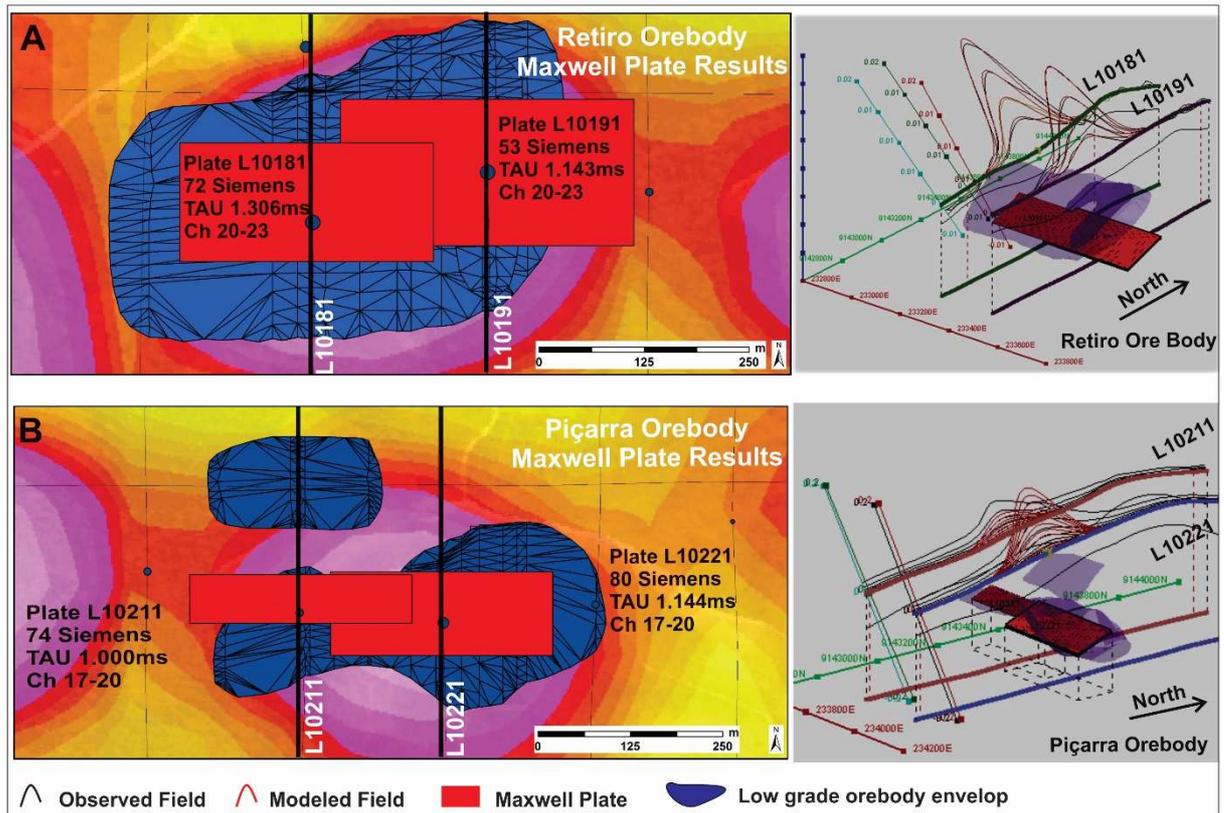


Figure 2.11 - Maxwell modeling results for the Retiro and Piçarra orebodies. (A) Resultant plates for the Retiro models, including the TAU and conductance values. (B) Resultant plates for the Piçarra models, including the TAU and conductance values.

When comparing the predicted depth planned for the conductor intersection with the existing massive sulfide levels, an excellent correlation is observed, such as in drill hole SLM0004 (Figure 2.13). The conductor core center was estimated at 147 m in the model, and in this borehole, four massive sulfide levels were cut, surrounded by next-texture, interstitial and disseminated sulfidation. Thicker levels were 137.26 m and 151.60 m in depth, confirming the good estimate of the plate modeling. In addition to the good depth estimate of the conductor, the dipping data of the plates is consistent with the local geology, with an average dip of 180/20, similar to the average dip of foliations both in the field and in the drillhole cores.

The RDIs provide reasonable indications about the relative depth and vertical extension of the conductors, resistivity, top and base, along with 2D information about the geometry of the layers/conductive structures through the TEM data.

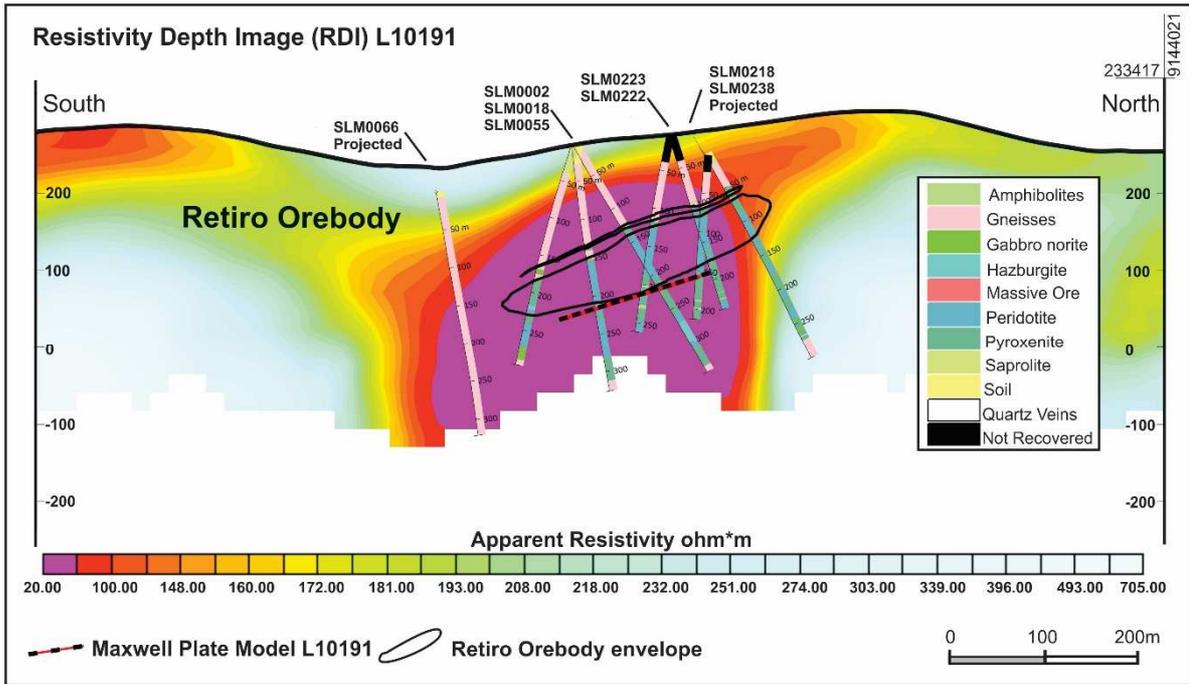


Figure 2.12 - RDI for Line 10191 illustrating the results for the Retiro target and integration with drillholes, low-grade sulfide orebody and Maxwell plates.

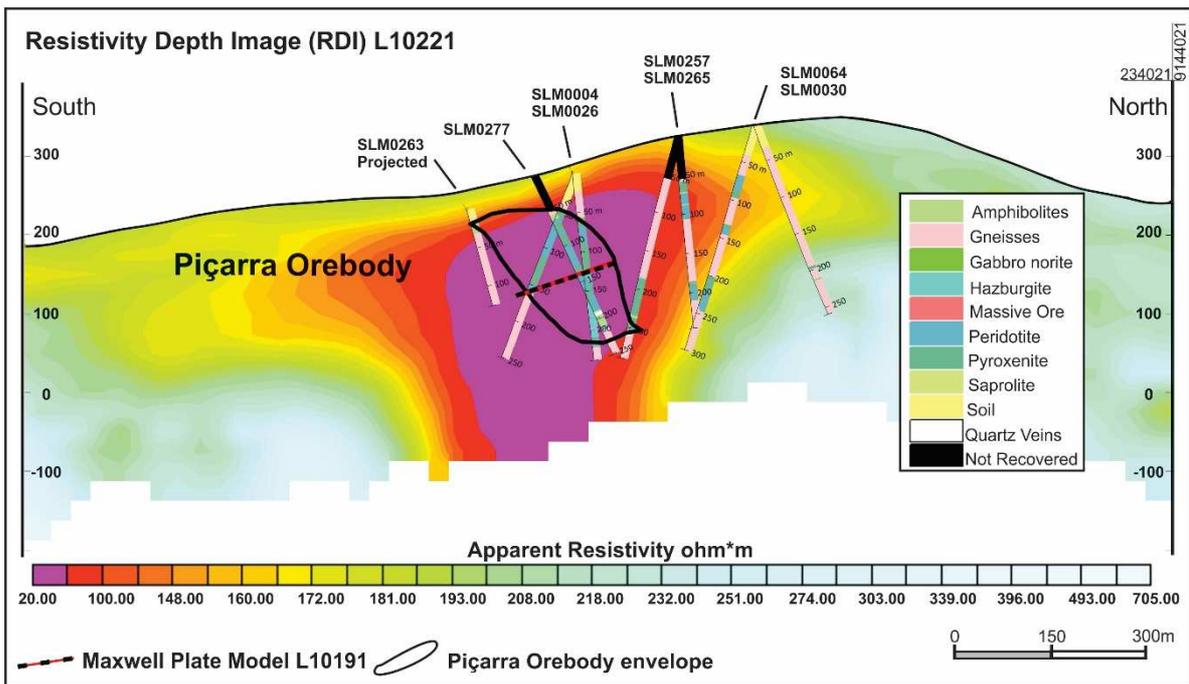


Figure 2.13 - RDI for Line 10221 illustrating the results for the Piçarra target and integration with drillholes, low-grade sulfide orebody and Maxwell plates.

Two cross-sections provide a very good representation of the RDI inversion results for the Limoeiro orebodies. The results of the resistivity inversion for the Retiro and Piçarra

orebodies are excellent, and there is an obvious coincidence between the mineralization envelope with the Maxwell plate results (Figures 2.12 and 2.13).

The RDI inversion for the Retiro target illustrates that the surveys carried out, based on the Maxwell plate results and the low-resistivity anomaly center (between 20 and 50 ohm*m), sectioned the ultramafic rocks and the Ni-Cu-PGE mineralization. Another highlight is the excellent reference to the regional sub-horizontal dip to the South and ore geometry (Figure 2. 12).

In the RDI inversion of L10221, there is also an excellent correlation between the low-grade ore envelope with the low-resistivity anomaly (20 and 50 ohm*m) and the Maxwell modeling plate. The center of the conductive anomalies again presents the best intersections with respect to both the thickness of ultramafic rocks and the levels of Ni-Cu-PGE (Figure 2.13).

The two methods used for the modeling and inversion of electromagnetic data are effective for targeting exploratory drilling when prospecting the Limoeiro mineralization. The RDI inversion identifies a low-resistivity zone, and when the center of this anomaly is tested by drilling, the ores and ultramafic rocks are sectioned while the centers of the Maxwell plates are directly linked to the best intersections of massive sulfide, confirming that the RDI inversion and Maxwell results are complementary.

2.5.2 Delineating the magmatic conduits and ore bodies with ground geophysics and 3D inversion

The ground magnetic data cover the Limoeiro region and vicinity, where we generated a detailed map based on data processing for not only the bodies indicated in the airborne data but also the geometry of the mineralization and its continuity from the regional point of view. In other words, the magnetic features resemble linear and narrow corridors, with some magnetic anomalies that stand out along these structures. These features are interpreted as magmatic conduits of the Limoeiro System (Figure 2.14).

In the initial discovery of the Limoeiro intrusion, the ultramafic system was known to be located along a trend of 4 km between the Bofe and Parnazo region. However, after the execution of ground magnetometry, just over 16 km of magnetic corridors are known,

representing the magmatic conduits in the region that are validated in the field by localized and outcropping ultramafic bodies and by exploratory drilling.

In Limoeiro and in the region of the mineralized intrusions, the inclination of -26° and declination of -22° confirm the low magnetic latitude position, and therefore, some care was taken in the interpretation of magnetic data.

In the case of Limoeiro, the RTP magnetics, conducted with inclination amplitude correction had results that were more consistent with the geology, narrower anomalies directly related to ultramafic bodies and magmatic conduits, whereas the analytical signal causes the anomalies to be greater than reality.

Products derived from aeromagnetic data show the main trends within the mineralized zone, but ground magnetometry and 3D inversion of these data enhance the geometry and position of the features interpreted as magmatic conduits in the Limoeiro region. They are represented by linear magnetic zones, sometimes continuous, and usually either along or at the ends of these structures there are magnetic anomalies that stand out and represent the hidden or outcropping bodies where higher amounts of magma accumulate (Figure 2. 14A).

The map used for RTP for low latitudes enhances the continuity of the conduits (Figure 2. 14A), along with the results derived from VOXI MVI type 3D inversion of the ground magnetic data. Figure 2.14B shows a slice 250 m deep that indicates the best representation of the continuity of the conduits in subsurface. The results have been validated by geological mapping and an exploratory survey, as noted by Mota e Silva (2015).

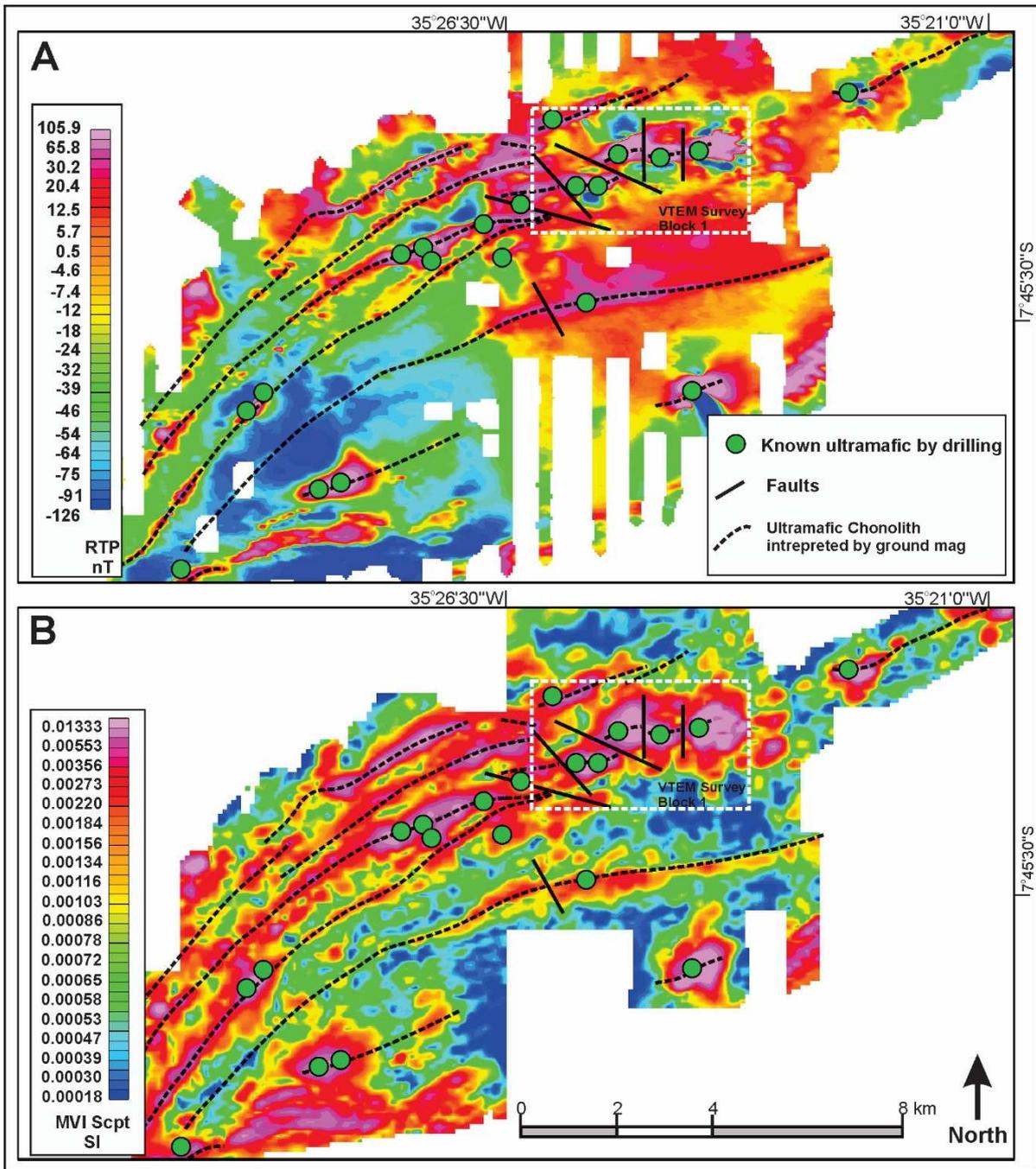


Figure 2.14 - Interpreted magmatic conduit features by ground magnetic data. (A) RTP magnetics, magmatic conduit features interpreted and known ultramafic rocks by drilling. (B) Horizontal slice from voxel of INVMAG3D type MVI at the 60 m level (approximately 250 m in depth), magmatic conduit features interpreted and known ultramafic rocks by drilling. The INVMAG3D MVI matches with the ground magnetics data and improves the delineation of the conduits.

The magnetic method is sensitive to the magnetization property of the rocks and the contrast between different rocks can be mapped and modeled in 3D through the inversion of the magnetization vector. When there is a magnetic field, the magnetic domains tend to orient in a somewhat ordered manner, and this order is controlled according to the number of interactions of magnetic effects, such as induction, remanence, anisotropy and demagnetization. MVI (Geosoft Voxi) allows the inversion of the magnetic field data, retrieving the magnetization direction and amplitude, for each magnetic domain in the survey area (Ellis et al., 2012)

When using joint inversion for susceptibility without any other external information, the magnetic domains tend to be oriented parallel to the Earth's geomagnetic field, and this is an unreal situation when working with different domains of magnetized rocks. However, MVI can provide susceptibility by calculating the amplitude of magnetization and normalization by the Earth's geomagnetic field.

The longitudinal section on the Bofe outcropping ultramafic intrusion, along with the Retiro and Piçarra orebodies, represents a vertical slice from the result of the MVI performed with the ground magnetic data (Figure 2.15). There is good spatial correlation between the MVI-SI susceptibility anomalies, with the intersections of ultramafic rocks of the mentioned orebodies. The tops of the magnetic anomalies are better defined than their base, and there is a conformity of this top with the intersections of the ultramafic rocks in the drillholes.

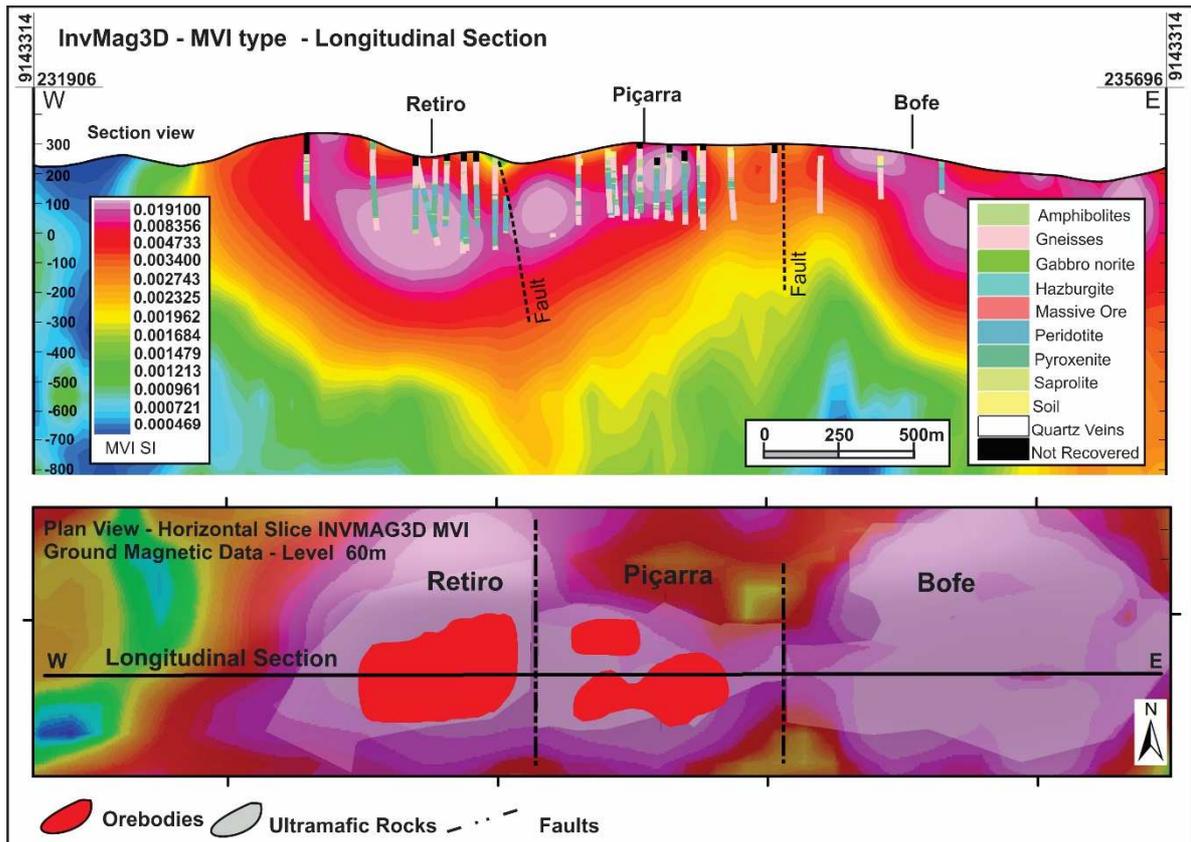


Figure 2. 15 - Longitudinal section over the Limoeiro intrusion, the Retiro and Piçarra orebodies and the partly eroded Bofe intrusion, integrated with the drillholes (projected). There is a strong magnetic coincident with the top of the ultramafic body and the faults that disrupted them. In the plan view, we see the integration between the RTP magnetics, the longitudinal section position and the orebodies.

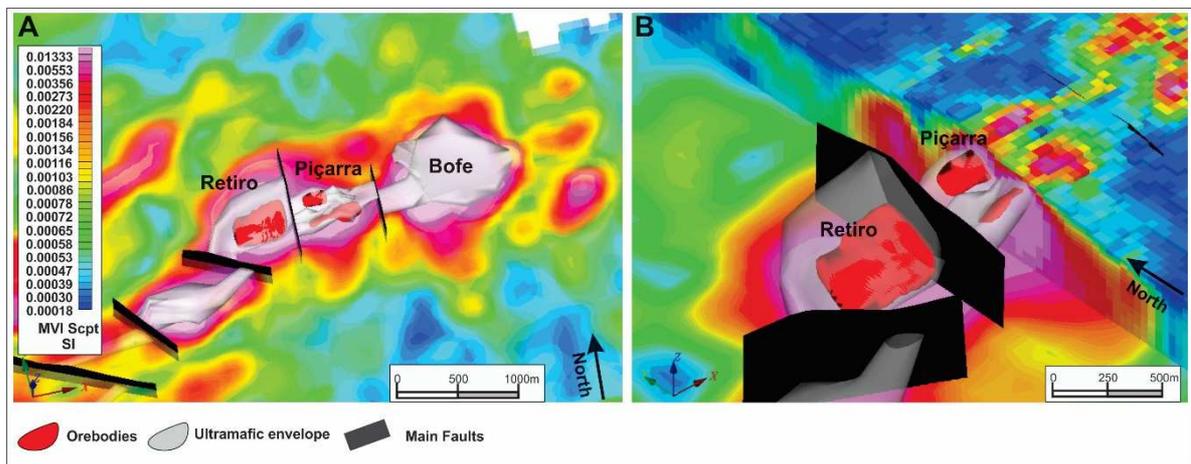


Figure 2.16 - (A) 3D View of a horizontal slice from INVMAG3D (MVI), the ultramafic rocks including the orebodies showing the excellent correlation with the magnetic features and the main faults. (B) 3D View with the Voxel of INVMAG3D (MVI Type), the ultramafic rocks, the orebodies and the main faults.

In exploratory terms, the product of the MVI of 3D magnetic data was decisive in the exploratory drilling arrangement. When there are no electromagnetic and electrical data, these magnetic anomalies can be tested, provided they are in a favorable geological context such as evidence of surface mineralization and the presence of outcropping ultramafic rocks. There is a high likelihood of mineralized intersections in the ultramafic rocks bounded by MAG3D inversion, especially at the core, but this inversion does not allow us to discard electrical and electromagnetic methods, which accurately detail and define the position of the orebodies (Figures 2.15 and 2.16).

The integration of the 3D magnetic inversion product (ground data) with the geological models (Figure 2.16) represents the potential and accuracy of the application of this method during the stages of exploration. The 3D view in Figure 2.16A illustrates the ultramafic bodies and the orebodies integrated with a horizontal slice of the MVI type 3D MAG inversion (250m depth), where the relationship between the lateral boundaries of the anomalies with the ore host rocks is clear. The 3D view in Figure 2.16B demonstrates the relationship between the 3D magnetic anomaly (horizontal slice and 3D Voxel) and the Retiro and Piçarra orebodies, validating the importance of 3D inversion in the mining research stages of a Ni-Cu-PGE type prospect such as Limoeiro.

2.5.3 Enhancing the disseminated sulfide orebodies using SIP

The Ni-Cu-PGE mineralization of Limoeiro is essentially disseminated and envelops massive sulfide levels. Because the Ni-Cu-S ore minerals are highly conductive and metallic, they have high electrical chargeability and good contrast with the ore host rocks (King, 2007)

The application of the spectral induced polarization (SIP) electrical method is appropriate in Ni-Cu-PGE prospects, especially those with a predominance of disseminated sulfides. One point of caution made by King (2007) is that the application of the SIP method in ultramafic intrusions with the presence of magnetite, even if disseminated, causes chargeability anomalies, and could disturb the interpretations. These factors show that the induced polarization method is important in different mineral exploration stages of Ni

sulfides, but the integration with multi-source data such as magnetometry data is necessary, as in Limoeiro.

The SIP method was very useful while prospecting Limoeiro, and the integration with the ground magnetometry results was essential for defining an association of anomalies to be prioritized and drilled. It is possible that the spectral parameters **c** and **Ro** vary little with the type and grade of mineralization, whereas the Time Constant (**τ**) and chargeability are most important and are related to the grade and particle size of the polarizable ore/mineral.

Several types of chargeability anomalies are associated with the positive drill holes, but it is impossible to state that any chargeability anomaly is associated with mineralization, because drillholes where ultramafic rocks without mineralization associated with high CHG were identified. They were caused only by the presence of magnetite. In addition to the ultramafic rocks with high content of magnetite and pervasive sulfides, the paragneisses of the Surubim Complex show sufficient sulfides, such as pyrrhotite and pyrite, to cause chargeability anomalies, as shown in Figure 2.17. A chargeability anomaly associated with borehole SLM0030 is evidence where only sulfide paragneisses were intercepted.

The integrated analysis of induced polarization data with the drilling performed along several sections defines average values of apparent chargeability between 18-20 mV/V for the mineralized intersections, except for boreholes SLM0004 and SLM0026, where there are average values of 21.5 mV/V and 24 mV/V caused by the extensive package of disseminated and massive sulfides at 159 and 107 m, respectively. The inversion of the chargeability data is quite effective and the comparison of the sulfide intervals and high magnetic susceptibility, related to the ultramafic rocks, is quite consistent where the boundaries of the chargeability anomalies coincide with sulfide intervals (Figure 2.17).

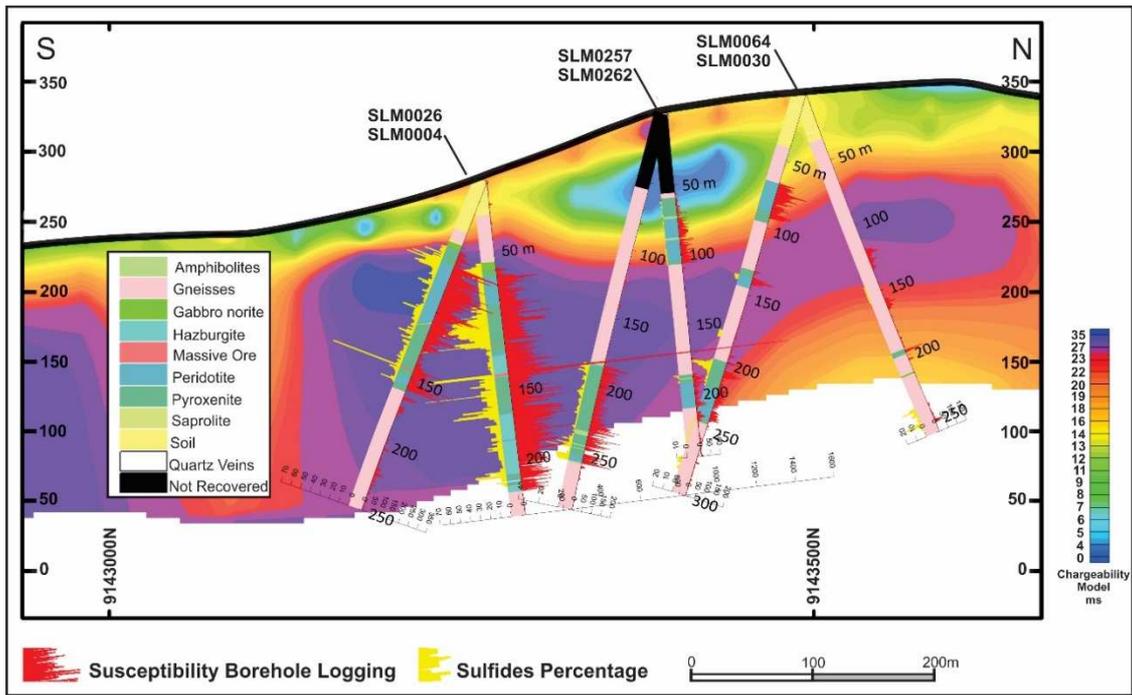


Figure 2.17 - Induced polarization cross section LT 4500 – Chargeability model, sulfide intersections (in %) from the Piçarra orebody. In the best intersection, the limits of the chargeability anomaly present excellent correlation, whereas in the poorest intersection, the limits are not ideal. The red profiles represent susceptibility, and the yellow profiles represent the sulfides percentage.

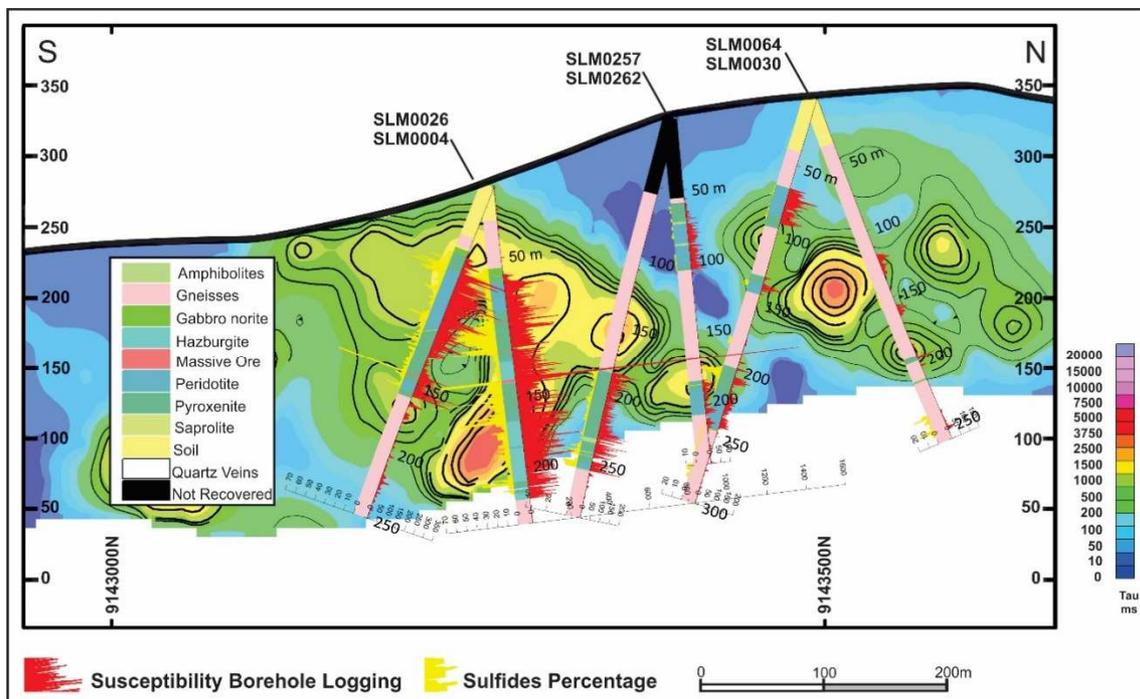


Figure 2.18 - Induced Polarization Cross section LT 4500 – Time constant decay, sulfide intersections (in %) from the Piçarra orebody. The red profiles represent the susceptibility, and the yellow profiles represent the sulfides percentage.

In terms of investigation depth, the applied SIP method with a dipole-dipole arrangement of 50 m is limited, and even with inversion it was possible to reach slightly over 200 m in depth, following the highest topography point (Figures 2.17 and 2.18).

In terms of resistivity, there is no typical signature associated with mineralization, but the data are ideal for mapping structures and faults that break and uplift the ultramafic bodies, whether mineralized or not. These faults are mapped by vertical geoelectrical discontinuities and marked by great resistivity contrasts.

With respect to the Tau parameter (τ), the targets related to sulfide mineralization in Limoeiro range from 15 milliseconds (ms) to values of more than 7 seconds (Figure 2.18) and are directly related to the particle size of the polarizable minerals (Po/Cpy/Pn/Mag). In general, the time constant Tau (τ) is small in fine-grained mineralization, and the opposite is found when the mineralization is coarse. The Tau (τ) variable enables the separation of graphite from disseminated sulfide (Pelton et al., 1978). In the case of Limoeiro, where part of the mineralization has coarse sulfides (droplets of pyrrhotite and pentlandite), in some situations it is possible to distinguish chargeability anomalies caused only by the magnetite in ultramafic rocks from anomalies caused by the association of magnetite added to disseminate sulfides. Most of the drill holes with positive intersections of the Retiro and Piçarra orebodies are associated with zones of high Tau anomalies (up to 1000ms). The data from the decay constant cannot be inverted and for this reason, do not show a perfect relationship in XYZ.

One example is boreholes SLM0004/26/257/262, which sectioned the Tau (τ) decay constant values, between 1,380 and 7,860 ms (milliseconds), corresponding to between 1.38 S and 7.860 S, respectively (Figure 2.18).

In addition to the association of electrical parameters, the integration of ground magnetometry with vertical sections of induced polarization allow the prioritization of some targets. The detailed analysis of the exploratory drilling database shows that anomalous zones with high chargeability, with high values of Tau and associated with a minimum magnetic variation of 150 nT, reflect a higher percentage of magnetic and polarizable sulfides. Although this background value for associated magnetic variation is established, the higher the variation associated with electrical and electromagnetic

anomalies, the greater the chances of identify good intersections because of the presence of pervasive pyrrhotite in mineralization.

2.5.4 Petrophysics –Sulfide Ore, Ultramafic and Country Rocks

The application of petrophysical data enabled the validation of magnetic, electrical and electromagnetic data inversions and assisted in directing various stages of exploratory drilling. It was performed in two stages and with different databases. The first stage defined the average magnetic susceptibility and conductivity for the rocks related to the Limoeiro intrusion and its host rocks and took into account 48,339 samples from the susceptibility and conductivity survey in 83 boreholes in the Piçarra, Retiro and Bofe orebodies. Table 2.2 shows the susceptibility results for the main lithologies of the Limoeiro mineral system, also including average values for the massive sulfide.

Table 2.2: Summary of variation in magnetic susceptibility ($SI \times 10^{-3}$) for different lithological units of Limoeiro and the massive sulfide.

SUSCEPTIBILITY ($SI \times 10^{-3}$)					
Rock Type Code	Rock Type	Number of Samples	Range	Average	STDEV.M
AT	Amphibolite	1968	0.94 - 254	19.51	21.79
GN	Paragneiss	22241	0 - 238	4.35	5
GS	Gossan	10	8.3 - 36.7	19.91	2
PX	Orthopyroxenite	13008	0 - 1010	44.63	71
HZ	Harzburgite	11058	28.25 - 1653.50	68.58	27.26
MS	Massive Sulfide	54	0 - 1449.5	162.62	7

The magnetic anomalies in the study area are caused by the presence of ultramafic rocks and mineralized bodies of disseminated and massive sulfide, consisting of Po-Pn-Cp. The harzburgites has the highest susceptibility values (except the massive sulfides average) whereas the amphibolites are more magnetic than the country rocks. The paragneisses of the Surubim Complex, which host the ultramafic rocks, are very poorly magnetic, and their variations in this physical property are observed when there is the presence of barren sulfides, which are quite common in the region (Table 2.2).

The results of magnetic susceptibility map massive sulfide bodies with low values of $0.0 \text{ SI} \times 10^{-3}$ and a maximum value of $1449.5 \text{ SI} \times 10^{-3}$. The results when compared with field data and drill holes indicate two types of massive ore: a magnetic pyrrhotite (monoclinic) and other non-magnetic pyrrhotite (hexagonal), both described by Mota e Silva et al. (2015). So far, it has not been possible to separate the magnetic massive sulfide from the non-magnetic because it occurs in the same range. The mineralized package shows heterogeneity in deformational and metamorphic terms, which may explain this compositional variation. Further detailed studies may be carried out in the future in an attempt to better monitor this variation. However, it is noteworthy that with this work it was possible to map a second type of massive sulfide and not only the magnetic and conductive solid sulfide. That is, it was possible to define a new target and refine the exploration vectors.

The average conductivity obtained along the boreholes was established through 54 samples. Despite having been collected with the same density of the susceptibility sampling, the values are anomalous only in intervals with massive sulfides. For the conductivity values, the minimum value of 2.4 S/m and maximum value of 31,696 S/m were identified for a mean value of 3,935.46 S/m. These values are compatible with sulfide mineralizations of Ni-Cu-PGE (Table 2.3).

Table 2.3: Summary of variation in conductivity (Mhos/m equivalent to S/m) for the massive sulfide in the Limoeiro mineralization.

CONDUCTIVITY (Mhos/m equivalent to S/m)					
Rock Type Code	Rock Type	Number of Samples	Range	Mean	STDEV.M
MS	Massive Sulfide	54	2.4 – 31,696	3,935.46	98

Subsequently, in a second stage, 14 samples were sent to the laboratory. These samples were split in 3 pieces (2x2x2 cm) resulting in 42 analyses of magnetic susceptibility ($\text{SI} \times 10^{-3}$), density (g/cm^3), chargeability (mV/V) and resistivity ($\text{ohm} \cdot \text{m}$) for different lithotypes.

In general, the data show good density contrast with high values for mineralization. Another important point is the distinction of the gneisses that host the ultramafic rocks, which in turn host the Ni-Cu-PGE mineralization (Table 2.4).

Table 2.4 - Summary of variation in density (g/cm³) for different lithological units and the massive sulfide.

Rock Type	Min	Max	Average	STDEV.P	Range
Amphibolite	2.748	2.955	2.851	0.10	0.207
Gneiss	2.575	3.090	2.719	0.22	0.515
Orthopyroxenite	3.044	3.483	3.245	0.17	0.439
Harzburgite	2.944	2.953	2.949	0.00	0.009
Massive Sulfide	3.933	4.298	4.116	0.18	0.366

Figure 2.19 shows the comparison between the magnetic susceptibility (SIx10⁻³) and density (g/cm³) results for the second stage of petrophysical analysis.

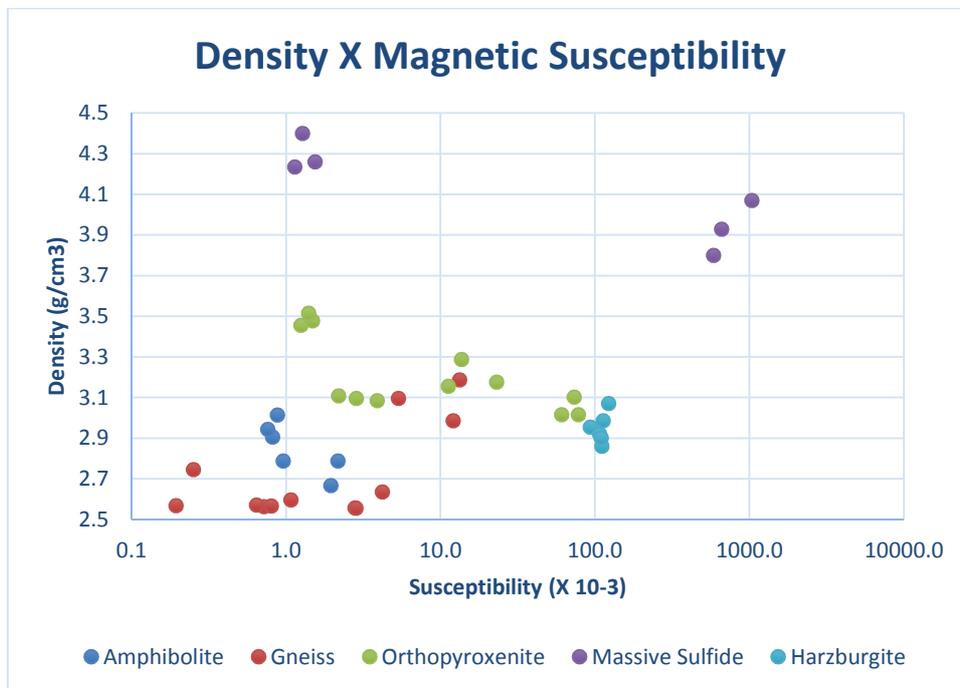


Figure 2.19 – Density (g/cm³) versus Susceptibility (10⁻³ SI). The comparison between the petrophysics results shows the higher density values of the non-magnetic sulfide.

In these petrophysical database only six samples of massive sulfide were analyzed: three magnetic and three either non-magnetic or very poorly magnetic. A highlight when comparing the density versus susceptibility (Figure 2.19) results is that the non-magnetic massive sulfides (1.31 x 10⁻³ SI) have a mean density of 4.298 g/cm³, and corroborate with higher nickel grades (approximately 7% Ni). The magnetic massive sulfides (758.35 X 10⁻³ SI) have a mean density of 3.933 g/cm³ and lower nickel grades (approximately

2% Ni). Again, do not exist a specific mineralogical characterization for each measured massive sulfide sample, but it's possible to do a correlation between lower susceptibility, higher density and higher nickel grades, probably caused by more pentlandite contents in the samples.

In the same figure 2.9, comparing the density versus susceptibility it's possible identify strong variations in the positioning of the orthopyroxenites and hazburgites, certainly caused by percentage of sulfides in each sample. Samples with more sulfide will present higher susceptibility and density.

Measurements of electrical resistivity (constant voltage) in the time domain were conducted in different lithotypes, in addition to analyses obtained for magnetic and non-magnetic mineralization, massive and disseminated (Table 2.5).

The paragneisses have high resistivity, with a minimum value of 2,814 ohm*m and a maximum value of 97,241 ohm*m, averaging 32,809 ohm*m. The paragneisses shows high resistivity because of its quartz-feldspar composition, and sometimes it is silicified. High values of chargeability were found and in this case, they are certainly associated with the presence of polarizable sulfides such as pyrrhotite and pyrite associated with these rocks; however, the percentage and arrangement of the sulfides are insufficient to lower the resistivity and generate conductive anomalies.

The amphibolites are also quite resistive, with an average of 51,047 ohm*m, and show high chargeability values, with an average of 52.17 mV/V, because of the presence of disseminated and barren sulfides in the analyzed rocks.

With the exception of one sample, the evaluated orthopyroxenites contained disseminated sulfide, and sometimes next-texture, which cause the rocks to be conductive and to have low resistivity, averaging 83 ohm*m. Contrary to expectations, the results of the mineralized pyroxenites showed low chargeability values, with an average of 2.48 mV/V, because of the disseminated sulfides present in them. The interconnectivity of the sulfide grains and the next-texture are certainly responsible for the rapid current decay and low chargeability values.

Table 2.5 - Summary of variation in time domain resistivity (ohm*m) and chargeability for different lithological units (measured at constant voltage).

Resistivity ohm*m				
Rock Type	Min	Max	Mean	STDEV.P
Amphibolite	4,854	97,241	51,047	46,193.49
Gneiss	2,814	69,814	32,809	27,971.71
Orthopyroxenite	4	153,979	83	66,639.19
Harzburgite	160	2,384	1,272	1,111.66
Massive sulfide	3	4	4	0.06
Chargeability mV/V				
Rock Type	Min	Max	Mean	STDEV.P
Amphibolite	21.149	83.193	52.171	31.022
Gneiss	36.980	94.618	53.664	23.786
Orthopyroxenite	0.002	9.680	2.482	4.157
Harzburgite	14.056	72.625	43.341	29.285
Massive sulfide	0.002	0.002	0.002	0.000

The mineralized levels with massive sulfides (Po, Pn and Cp) show conductive mineralization with a mean resistivity of 4 ohm*m at constant values for either magnetic or non-magnetic massive sulfide. The chargeability of the massive sulfide is null, with a mean value of 0.002 mV/V, and corroborates with the sulfide connectivity, where the decay is so fast that the value is null.

2.6 Geophysical Exploration Strategy for New Ni-Cu-PGE Sulfide Discoveries

The 2009 discovery of the Limoeiro ultramafic intrusion shows the importance of the application of airborne data for refining geological mapping and selecting potential targets for mineral exploration in Borborema Province and Brazil. An appropriate mineral exploration strategy requires the use of modern geophysical exploratory tools. When integrated with geological data, geochemical prospecting and exploratory drilling, this strategy can guide the discovery of a new prospect or deposit in less time than indicated in the current operating exploration pipelines.

In Borborema Province, the recent coverage of new airborne magnetic and radiometric surveys with 500 m of flight line spacing have enable both our understanding of major

geological-structural domains and the refinement and delineation of new prospective areas. The analysis and interpretation of new data has led to a spatialization of geological and geophysical units, structural detailing and, therefore, the detailing of new vectors for mineral exploration.

The existing regional surveys should be widely used and complemented with other tools and exploration activity. Based on the discovery of Limoeiro, it is possible to define a strategy for geophysical exploration in the search for new Ni-Cu-PGE deposits (Table 2.6).

On the provincial scale, airborne magnetometry and radiometry can considerably decrease the search area for host rocks of this type of mineralization, establishing geophysical-geological domains, magnetic and radiometric domains, a structural magnetic framework (faults and structures), regions with a lower deformation index and even the presence of outcropping and underground ultramafic rocks. At this stage, features are sought that may not be directly related to mineralization processes but that can guide the search for these features.

Table 2.6 - Proposed geophysical exploratory strategy for new Ni-Cu-PGE deposits in Borborema Province.

Initial exploration and targeting in province scale (100s to 1000s km ²) Looking for others features not necessarily directly related to mineralizing process		Targeting in district scale and initial exploration drilling (10s to 100s km ²) Geophysical halos, structures, magnetic anomalies or features directly associated with mineralizing process		Targeting in project scale looking for orebodies and deep targets in the same system (few to 10s km ²) Gangue minerals and ore minerals, immediate mineralized environment	
Methods	Geophysical Features	Methods	Geophysical Features	Methods	Geophysical Features
Magnetics and Radiometrics (500m line spacing)	Geophysical-Geological context, faults and deep structures, radiometric and magnetic domains, magnetic anomalies and radiometric response of ultramafic outcrops	Airborne electromagnetics (250m line spacing), and ground magnetics and radiometrics	Conductive zones, conductive anomalies (for massive sulfide) and magnetic structures possible related to conolitic features	Airborne electromagnetics (100m or line spacing), ground magnetics, spectral induced polarization, borehole EM, deeper EM, audio - magnetotelurics, ground gravity, petrophysics	Conductive anomalies related to massive sulfide, chargeability and TAU IP anomalies related to disseminated sulfide zones, deeper conductive targets related to feeder zones. The petrophysics can guided alternative surveys or combination of surveys

At the district scale, the application of the helicopter electromagnetic method is fundamental and can lead to conductive zones or conductive anomalies related to mineralization. Moreover, it can certainly provide more detailed information about magnetics than existing regional surveys. If mineralization is associated with centimetric to metric packages of massive sulfide, airborne electromagnetic surveys of the time domain allow a direct investigation of the identified anomalies, discarding the follow-up phase using ground geophysical methods. At this stage, the use of ground magnetometry should also be considered because magmatic conduits can be mapped, helping define new targets. Ground gamma ray spectrometry surveying can detail outcropping ultramafic bodies, even if there is chemical weathering common in tropical climates, where the soil from these rocks also shows depletion of radioactive elements.

On the project scale, in areas with a maximum of 10 km², the use of the airborne electromagnetic method remains very important. In this case, the flight line spacing can be reduced in search of vertical bodies with small footprints, detailing the magnetic structural framework and helping search for magmatic conduits. The use of stronger (greater dipole moment) and concentric systems can seek anomalies that regional surveys have not yet identified. The electrical method of spectral induced polarization can assist in the delineation of orebodies and reduce costs with exploratory drilling because it can guide the drilling for disseminated sulfide mineralized zones that have not been perfectly mapped by the electromagnetic method. The use of the electromagnetic borehole method (Borehole EM) may indicate the presence of massive sulfide bodies not sectioned in exploratory drilling and can provide more accurate conductivity data. Some alternative electromagnetic methods, such as Deeper EM and audio-magnetotellurics, which involve arrangements that make it possible to investigate at greater depth, can assist in the selection of targets that may reflect blind mineralization below the investigation limit of previously applied conventional methods. Massive sulfide bodies deep and buried in the Ni-Cu-PGE deposits associated with magmatic conduits are quite common. In addition to being deep, they may have very complex and irregular geometry, with assertiveness of the exploratory drilling being lower and the high cost of this step being offset by appropriate research methods. Still at the project scale and in advanced stages of the research, detailed petrophysical analysis, with an adequate sampling universe, may reveal mineralization peculiarities and guide the selection or combination of new geophysical surveys that can lead to the detection of the type of mineralization identified.

2.7 Discussion and Conclusions

Mineral prospecting in Borborema Province has revealed the regional mineral potential. A mineral exploration strategy that involves extensive and systematic activities is the best way to transform this province into a new Brazilian mineral frontier. The discovery of the Limoeiro deposit associated with an ultramafic intrusion through modern but accessible tools demonstrates that investing in mining research in this province is important and should be continued. The lack of detailed geological mapping, which is common in large regions, may be compensated by the analysis of geophysical data of high information density.

The techniques applied in the prospecting of the Limoeiro deposit were appropriate where the ore minerals have anomalous physical properties and respond well to magnetic, radiometric, electromagnetic and electrical methods.

The magnetic and radiometric data guided the initial discovery of the ultramafic intrusion and mineralization evidence represented by the gossan mapped at the surface. The detailed geological mapping of the intrusion as well as the spatial correlation of magnetic anomalies and surface-oxidized mineralization led to the use of the airborne VTEM method. The results of the time domain electromagnetic survey were essential and can be considered the second fundamental discovery phase, in which the conductors associated with Ni-Cu-PGE sulfide mineralization were identified.

The inversion methodologies applied to the electromagnetic data were assertive and the results are relevant from the standpoint of depth and geometry estimation. Maxwell models are complemented by RDI (Resistivity Depth Image) inversion. The RDI represents a conductive envelope, which itself is represented by a zone of low resistivity (20-50 ohm*m) and is understood as the association of ultramafic rock with the mineralized massive sulfide package enveloped by disseminated sulfides, where the core of the low-resistivity anomaly must be drilled for direct investigation of the anomaly. Maxwell plate models are essential and directly related to the most expressive and continuous bodies of massive sulfide within the mineralized package. The depth estimates of these plate models are excellent compared to the massive sulfide intersections, where the estimate and the actual depth of intersection differ only by a maximum of 15 m in the anomalies pertaining to the main targets.

The resistivity values from laboratory analysis are consistent with the ore minerals, confirming the geophysical-geological model of conductive mineralization hosted in resistive rocks and corroborating the resistivity inversion models (RDI). The values obtained in RDI models for the mineralized zones vary between 20 and 50 ohm*m, whereas the massive sulfide bodies measured in rock vary between 3 and 4 ohm*m.

The conductivity values for the massive sulfide obtained by drillhole survey with the MPP Probe are high, and have a mean of 3,935.46 S/m, whereas the models obtained by the modeling of Maxwell's filament algorithm range between 53 and 80 S/m for the main orebodies.

The difference between the petrophysical results from laboratory and equipment testing and the results obtained by inversion and modeling through the software applied for inversion of electromagnetic data can be explained considering the following premise: the geophysical models are built to represent a conductive horizon of electrical heterogeneity that is representative of the source causing the anomaly, mirrored on local geology and in depth, whereas the petrophysical analysis is performed directly on the sample and ore minerals. These results demonstrate the potential of time domain electromagnetic methods in the search for Ni-Cu-PGE mineralization. Both this method and the modern modeling and inversion tools can delimit electromagnetic anomalies that can be investigated directly by exploratory drilling, discarding ground geophysical follow-up at this stage.

The Voxi MVI 3D magnetic inversion tool works great for delineating the main magnetic bodies associated with ultramafic intrusions, along with the linear structures that represent the magma conduits. The mapping of these conduits is fundamental for the search for new orebodies at depth, making investment in the mineral exploration of the prospect much more attractive and focusing the research on these structures. The horizontal and vertical slices from the 3D inversion of the magnetic data have excellent spatial correlation with the known ultramafic and ore bodies.

The method of induced polarization has been used very successfully in Limoeiro: the disseminated sulfides represents 97% of the deposit volume. The application of this method guided the exploratory and infill drilling survey during the various stages of exploration.

Petrophysical data served to validate the models and geophysical data inversions and made it possible to define some methodologies that were not previously applied. These data can be used in the search for new ore bodies. The analysis of the petrophysical results enabled us to distinguish two types of massive sulfide bodies: one is magnetic, conductive and lower density (mean of 3,933 g/cm³) and the other is non-magnetic, conductive and higher density (mean of 4,298 g/cm³). These results indicate that the integrated use of electromagnetic, magnetic and gravimetric methods can lead to the selection of new targets not yet surveyed in the region.

Despite the use of modern tools in both the acquisition and the processing of geophysical data, the investigation did not exceed 200 m in depth using electrical methods and 400 m using time domain electromagnetic methods. The 3D magnetic inversions show features up to 800 m deep, but with low resolution; this may be considered too ambiguous to support investment in deep exploratory drilling. Therefore, to search for targets at depth that are related to economic mineralization, it is necessary to use alternative geophysical methods such as the magnetotelluric and audio-magnetotelluric method, CSAMT, gravimetry, deeper SIP, seismic and all of which may guide an exploratory survey program with boreholes that reach between 500 and 1,000 m in depth.

2.8 Acknowledgements

The authors acknowledge Votorantim Metais for supporting this research project and the staff for technical discussions and contributions. We are grateful for the special support of Jones Belther, Lucio Molinari and Paulo Ravacci and for their understanding about a research carried in the interface between University and Industry, releasing important data and the time for Allan Früchting work on this contribution. Professor Adalene Moreira Silva thanks CNPq for her research grant (Process 307177/2014-9).

2.9 References

- Allard, M. (2007). On the origin of the HTEM species. In *Proceedings of exploration* (Vol. 7, pp. 355-374).
- Almeida, F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck H.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG-Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8º, Campina Grande, Atas, Boletim 6, p. 363-391.
- Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N., & Saumur, B. M. (2016). The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76, 296-316.
- Brito Neves, B. B., & Cordani, U. G. (1991). Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2), 23-40.
- Brito Neves, B. B., Santos, E. D., & Van Schmus, W. R. (2000). Tectonic history of the Borborema Province. In U. G. Cordani, E. J. Milani, A. Thomaz Filho, & D. D. A. Campos (Eds.), *31 International Geological Congress*.
- Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Kozuch, M., dos Santos, E. J., & Petronilho, L. (2005). A zona tectônica Teixeira Terra Nova-ZTTTN: fundamentos da geologia regional e isotópica. *Geologia USP. Série Científica*, 5(1), 57-80.
- Caxito, F. A., Uhlein, A., Dantas, E. L., Stevenson, R., Salgado, S. S., Dussin, I. A., & da Nóbrega Sial, A. (2016). A complete Wilson Cycle recorded within the Riacho do Pontal Orogen, NE Brazil: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province at the heart of West Gondwana. *Precambrian Research*, 282, 97-120.
- CPRM, (2008). Serviço Geológico do Brasil – Programa Geologia do Brasil (PGB) – Projeto Aerogeofísico Borda Leste do Planalto da Borborema - Relatório final do levantamento e processamento de dados, v.1, 2008.
- Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. In *ASEG Extended Abstracts 2012* (pp. 1-4). Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG).
- Jardim de Sá E.F. (1994). A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 804p.
- King, A. (2007). Review of geophysical technology for Ni-Cu-PGE deposits. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 7, pp. 647-665).
- Meju, M. A. (1998). A simple method of transient electromagnetic data analysis. *Geophysics*, 63(2), 405-410

- Mota-e-Silva, J., Ferreira Filho, C. F., & Della Giustina, M. E. S. (2013). The Limoeiro deposit: Ni-Cu-PGE sulfide mineralization hosted within an Ultramafic tubular magma conduit in the Borborema Province, Northeastern Brazil. *Economic Geology*, *108*(7), 1753-1771
- Mota-e-Silva, J., Prichard, H. M., Ferreira Filho, C. F., Fisher, P. C., & McDonald, I. (2015). Platinum-group minerals in the Limoeiro Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, Brazil: the effect of magmatic and upper amphibolite to granulite metamorphic processes on PGM formation. *Mineralium Deposita*, *50*(8), 1007-1029.
- Macleod, I. N., Vieira, S., & Chaves, A. C. (1993). Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. In *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, *37*(3), 507-517.
- Naldrett, A. J. (2004). *Geology, geochemistry and exploration*.
- Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium deposita*, *34*(3), 227-240.
- Neves, S. P., & Alcantara, V. C. (2010). Geochemistry of orthogneisses and metasedimentary rocks across a proposed terrane boundary in the Central Domain of Borborema Province, NE Brazil: geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, *29*(2), 498-511.
- Neves, S. P., Monié, P., Bruguier, O., & da Silva, J. M. R. (2012). Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, *38*, 129-146.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, *43*(3), 588-609.
- Prikhodko, A. (2000). TEM Resistivity Depth Imaging (RDI) – Appendix D - Internal Report Geotech Airborne Surveys, v.1, 2000
- Rijo, L. (1977). Modeling of electric and electromagnetic data.
- Sá, J. M., Bertrand, J. M., Leterrier, J., & Macedo, M. H. F. (2002). Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the transversal zone, Borborema Province, northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, *14*(8), 851-866.
- Sá, J. M., Leterrier, J., Bertrand, J. M., & Silva, E. D. (1997). Augen gnaisses vs augen gnaisses da Faixa Jaguaribean, NE do Brasil: estratigrafia, geoquímica e idades U-Pb. *Atas do XVII Simpósio de Geologia do Nordeste*, *1*, 113-117.

Santos, E. J. (1996). Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In *39 Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 6). Salvador: SBG

Santos, E. J., & Medeiros, V. C. (1999). Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil.

Silva, J. M. (2015). O depósito sulfetado Ni-Cu-(pge) de Limoeiro: metalogênese, magmatismo máfico e metamorfismo no leste da Província Borborema.

Van Schmus, W. R., de Brito Neves, B. B., Hackspacher, P., & Babinski, M. (1995). UPb and SmNd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 267-288.

3. Discussões e Conclusões

Na exploração mineral no Brasil, o uso da base de dados aerogeofísicos governamentais magnetométricos e radiométricos disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pode assistir e orientar novas descobertas de depósitos minerais e deve ser mais difundida e aplicada em pesquisas regionais. A aplicação do método eletromagnético aéreo helitransportado é crucial para seleção de alvos potenciais para exploração. No caso de Limoeiro foi possível realizar investigação direta de anomalias no que resultou na descoberta de uma nova mineralização tipo Ni-Cu-PGE, desde então desconhecida na Província Borborema.

A dissertação de mestrado atingiu os objetivos por meio da aplicação das técnicas e dos planos propostos. Foi possível definir a assinatura geofísica do depósito de Limoeiro, definir vetores de exploração e uma estratégia para exploração mineral de corpos mineralizados tipo Ni-Cu-PGE na Província Borborema.

Podemos apontar as seguintes conclusões:

Sobre a Província Borborema e prospecção mineral em escala regional

- A descoberta do depósito tipo Ni-Cu-PGE de Limoeiro foi guiada por produtos derivados de dados aerogeofísicos regionais, onde a aplicação do filtro da redução ao polo para baixas latitudes magnéticas mostrou-se eficiente quando comparado com a amplitude do sinal analítico do CMA;
- A cobertura geofísica regional permite o refinamento da cartografia geológica, domínio tectônicos, estruturas de primeira, segunda e terceira ordem, apoia a interpretação e é fundamental para acelerar e orientar novas descobertas minerais;
- A definição do arcabouço magnético-estrutural é fundamental para auxiliar o entendimento do sistema mineral Ni-Cu-PGE e mapeamento do ambiente mineralizado;
- A aquisição de dados gravimétricos regionais com a resolução semelhante trará novos parâmetros no entendimento da combinação dos processos geológicos envolvidos desde a formação até a preservação de um depósito mineral em várias suas escalas.

Sobre *follow-up* geológico de anomalias geofísicas e a descoberta da intrusão de Limoeiro

- A descoberta da intrusão de Limoeiro foi guiada por associação de anomalia magnética dipolar com depleção de K – eTh e eU, que representam a parte aflorante e erodida da rocha ultramáfica e mineralização;
- A redução ao polo gerada para área de trabalho mapeia a intrusão ultramáfica aflorante, sua continuidade em sub-superfície, bem como a relação de contato com os paragneisses (rochas encaixantes);
- A interpretação conjunta de dados gamaespectrométricos possibilita o refinamento de anomalias magnéticas com baixos teores de radioelementos e evita a seleção de anomalias magnéticas associadas com as rochas encaixantes da intrusão ultramáfica e sem apelo prospectivo;
- O reconhecimento do centro da anomalia de baixos valores para K, eTh e eU levou diretamente a intrusão parcialmente aflorante e ao gossan rico em Ni-Cu-PGE;

Sobre os resultados da aplicação de um método eletromagnético helitransportado no domínio do tempo

- O Brasil possui poucos exemplos publicados sobre a aplicação de dados eletromagnéticos para exploração mineral. Alguns deles, como nos trabalhos de Silva (1999) e Silva (2012), mostram bons resultados utilizando dados no domínio da frequência com pouca penetratividade e dados EM terrestres respectivamente. Os resultados apresentados nesta pesquisa mostram que o método eletromagnético do domínio do tempo helitransportado foi eficiente para mapear a mineralização sulfetada tipo Ni-Cu-PGE da Província Borborema e sua aplicação deve expandida e testada em outros ambientes metalogenéticos;
- O método VTEM (Versatile Time Domain Electromagnetic), escolhido para este estudo de caso, com momento de dipolo da ordem de 433,233 NIA, é efetivo, pois os produtos analisados mostram que o sistema possui boa razão sinal/ruído e capacidade para mapear até níveis centimétricos de sulfeto condutivo e em sub-superfície;

- A definição do espaçamento e direção das linhas de voo é extremamente estratégica e para a área de trabalho, considerando a anomalia radiométrica de origem da descoberta, mapeada com dados espaçados de 500 metros, ou seja, na mapeável escala 1:50.000, o levantamento eletromagnético foi espaçado de 200m na direção NS e uma escala aproximada 1:20.000;
- A mudança de escala e o mapeamento de novos parâmetros permite o refinamento do sistema mineral e a indicação de novos vetores para este estágio da exploração;
- O processamento, análise e interpretação dos dados eletromagnéticos no domínio do tempo permite que as anomalias sejam investigadas por sondagem exploratória programada diretamente a partir dos dados aéreos, descartando o *follow-up* de geofísica terrestre nas etapas iniciais da pesquisa;
- A configuração do sistema HTEM e a potência do momento dipolo (NIA) são importantes para melhor penetrabilidade do método, entretanto a resistividade média do terreno é fundamental, ou seja, quanto maior o contraste entre um alvo condutivo e uma encaixante resistiva, maior a profundidade de investigação. Os dados gerados pela aquisição utilizando o sistema VTEM na região de Limoeiro mapeou alvos com cerca de 400m de profundidade;
- A mineralização do depósito Limoeiro é essencialmente disseminada, entretanto a envelope níveis contínuos de sulfeto maciço (70% pirrotita, 15% calcopirita, 15% petlandita) e é detectada pelos dados obtidos no levantamento eletromagnético aéreo.
- Os perfis eletromagnéticos tanto no campo dB/dT como Bfield fornecem informações relevantes sobre os corpos mineralizados. A amplitude e comprimento de onda dos perfis são diretamente relacionados a geometria e profundidade do corpo;
- Uma linha longitudinal seccionando o corpo mineralizado fornece informações sobre a geometria, mergulho, profundidade e cobertura lateral, facilitando a locação de um furo durante a sondagem exploratória;
- Junto com o sistema eletromagnético está associado um sistema magnetométrico e os dados obtidos são cruciais para a seleção e priorização de alvos neste caso. Cabe ressaltar que a rocha encaixante mostra sulfetos estéreis, condutivos e pouco magnéticos;

Sobre os resultados do método elétrico da polarização induzida (SIP)

- O método da polarização induzida espectral foi aplicado com objetivo de refinar corpos essencialmente disseminados, delineando seus limites laterais;
- Como apontado anteriormente, os corpos mineralizados de Limoeiro são essencialmente disseminados e perfazem 97% do volume do depósito, o que torna um alvo excelente para aplicação de SIP durante o follow-up de detalhe;
- A mineralização mapeada por anomalias de cargabilidade mostram intervalos entre 18 e 20mV/V e anomalias de alto TAU, por vezes superiores a 7 segundos;
- Algumas anomalias de cargabilidade são causadas somente pela presença de magnetita das rochas ultramáficas, entretanto a integração com a magnetometria permite a priorização das anomalias;
- É importante observar que a cargabilidade aumenta quando são mapeadas rochas ultramáficas ricas em magnetita e associadas com pirrotita, ou seja, corpos desta natureza que apresentam maiores valores de susceptibilidade magnética;
- Um dos vetores exploratórios que podemos considerar inédito neste tipo de pesquisa são as anomalias de alto TAU relacionadas a mineralização sulfetada com conteúdo metálico. Atribui-se os altos valores de parâmetro TAU as mineralizações com gotas (droplets) de petlandita e pirrotita, ou seja, a maior granulação dos minerais de minério, impactam diretamente nos valores de TAU e também podem diferenciar anomalias de cargabilidade causadas somente por magnetita.

Sobre os produtos das modelagens e inversões de dados geofísicos

- Assim como citado por outros autores, os produtos da modelagem e inversão de dados geofísicos representam a maior inovação nos últimos dez anos no que se refere a geofísica aplicada a exploração mineral;
- O modelamento do algoritmo de filamentos Maxwell é excelente no que se refere a estimativa de profundidade dos níveis de sulfeto maciço, na geometria dos corpos mineralizados e de seu posicionamento no espaço. O erro estimado e validado com furos de sondagem não ultrapassa os 15m;
- O modelamento de placas utilizando o software Maxwell mostrou resultados robustos e que caracterizaram a condutividade da mineralização de Limoeiro. As

placas resultantes dos corpos Piçarra e Retiro mostram valores de condutividade-espessura entre 53 e 80 Siemens. Cabe ressaltar que os valores são considerados abaixo do esperado para uma mineralização tipo Ni-Cu-PGE no contexto mundial e nos alerta a procurar nossos próprios parâmetros. Esses valores baixos certamente são resposta de uma mineralização essencialmente disseminada que envelopa níveis de sulfeto maciço, que causa heterogeneidade de propriedades elétricas, distribuída ao longo de um modelo, que representa um corpo condutivo em profundidade e com inclinação. Representa um estudo de caso inédito, cuja assinatura nos revela parâmetros, ou seja, vetores para exploração de Ni-Cu PGE;

- Uma condicionante importante para o bom resultado das modelagens e inversões é a qualidade dos condutores: se anomalia for causada por quantidade significativa de sulfeto condutivo, como no caso de Limoeiro, a pirrotita, os resultados da modelagem são melhores. Ou seja, depósitos com maior percentagem de pirrotita tendem a gerar um maior contraste nos produtos derivados de métodos elétricos e eletromagnéticos;
- A disposição sub-horizontal dos condutores relacionados a Limoeiro é outro fator importante e gera acoplamento eletromagnético ideal, onde as curvas equipotenciais do campo eletromagnético aplicado, cortam de maneira perpendicular o corpo fonte da anomalia eletromagnética. Os sistemas modernos HTEM são capazes de identificar corpos verticais, mas o sinal é mais tênue. Quanto mais profundo estiver um corpo vertical menor a chance de ele ser detectado pelo sistema do tipo HTEM.
- A inversão do Tipo RDI (Resistivity depth image) foi aplicada nesta pesquisa de forma inédita e revela excelentes resultados e deve ser estimulada dentro dos trabalhos de exploração de Ni-Cu-PGE. Ela fornece informações relevantes sobre os corpos condutivos no que se refere a geometria, dimensões e mergulho dos corpos mineralizados e é complementar ao modelamento de placas tipo Maxwell;
- No caso de Limoeiro a mineralização sulfetada é representada por uma envoltória condutiva, com valores baixos de resistividade, entre 20 e 50ohm*m. A integração da sondagem exploratória com as inversões RDI mostram que esse tipo de inversão gera uma envoltória condutiva que mapeia a associação de rocha ultramáfica, mineralização disseminada e maciça. No caso de uma pesquisa inicial para Ni-Cu-PGE, o centro da envoltória condutiva deve ser sondado, sempre

respeitando a foliação medida em campo para posicionar a sondagem e direção do furo de sondagem;

- Os resultados da inversão tipo MVI para dados magnéticos aéreos e terrestres mapearam em 3D os corpos ultramáficos, aonde o topo da anomalia é condizente com dados geológicos. No entanto mostram, ainda, ambiguidade na base dos corpos e um aumento da incerteza;
- A magnetometria terrestre mapeou com detalhe os condutos magmáticos sob a forma de corredores estreitos e alinhados, o que forneceu informação geométrica e do potencial do prospecto. Além dos produtos derivados dos dados magnéticos terrestres, como redução total ao polo para baixas latitudes e amplitude sinal analítico, o produto da inversão tipo MVI confirma a posição dos condutos em profundidade e validadas com sondagem exploratória que seccionaram rochas ultramáficas. As anomalias magnéticas distribuídas ao longo dessas feições que representam os condutos magmáticos são consideradas alvos prioritários e devem ser investigadas;
- A inversão dos dados de polarização induzida espectral mostra os limites dos corpos com sulfetação disseminada através das anomalias de cargabilidade, entretanto devem ser integrados a dados multifonte como magnetometria terrestre para descartar anomalias causadas por magnetita e que se mostram com baixo potencial. A inversão de resistividade não mostra uma assinatura típica para a mineralização e para a presença de rochas ultramáficas, entretanto mapeiam estruturas e falhas que rompem os corpos mineralizados, bem como os perfis da saprolitização.
- A investigação em profundidade não ultrapassou os 200m no que se refere aos métodos elétricos e 400m por meio do método eletromagnético do domínio do tempo. As inversões magnéticas 3D mostram corpos potenciais até 800m de profundidade, mas com baixa resolução e que podem ser consideradas ambíguas para investimento em sondagem exploratória profunda. Sendo assim para busca de alvos em profundidade e que possam estar relacionadas mineralizações econômicas, se faz necessário, o uso complementar de métodos geofísicos alternativos profundos, como o método magnetotelúrico e audio-magnetotelúrico, CSAMT, gravimetria, IP profundo, sísmica e outros que possam nortear um

programa de sondagem exploratória com furos que atinjam entre 500 e 1000 m de profundidade.

Sobre os resultados da petrofísica e correlação com os modelos geofísicos

- Os dados petrofísicos serviram para validar os modelos e inversões de dados geofísicos, caracterizar a mineralização do ponto de vista de propriedades físicas e definir que algumas metodologias não aplicadas anteriormente, podem ser empregadas na busca de novos corpos de minério, como a gravimetria e/ou gravimetria gradiométrica;
- As anomalias magnéticas na área de estudo são causadas pela presença das rochas ultramáficas e pelos corpos mineralizados com sulfetação disseminada e maciça, constituída de Po-Pn-Cp;
- Os paragneisses encaixantes da intrusão ultramáfica são resistivos com média de 32.809 ohm*m, positivo para penetração de investigação do método eletromagnético no domínio do tempo;
- A presença de sulfetos disseminados estéreis ou não, resultam em uma baixa resistividade das amostras como observado de forma qualitativa e atestada em laboratório petrofísica gerando um dado de alta resolução;
- A mineralização sulfetada de Limoeiro é condutiva, magnética, densa e polarizável pela presença de pirrotita, petlandita e calcopirita e esta definição reflete a assinatura do depósito quando mapeado em detalhe, ou seja, na escala de prospecto. Define ainda quais os métodos geofísicos devem ser aplicados.
- O sulfeto maciço (70% de pirrotita, 15% de calcopirita e 15% de petlandita) possui um contraste de susceptibilidade acentuado que varia de zero a $1449.5 \text{ SI} \times 10^{-3}$, e mostra que existem dois tipos de sulfeto maciço: um magnético e condutivo e outro não magnético e condutivo. Não foi possível neste estágio estudar a magnetização remanente. No entanto, os resultados sugerem a existência de pirrotita monoclinica (magnética) e pirrotita hexagonal (não magnética) como já caracterizado por outros autores.
- As análises de condutividade do sulfeto maciço retornaram valor mínimo de 2.4 S/m e valor máximo de 31696 S/m, com valor médio de 3935.46 S/m;

- As análises de resistividade do sulfeto maciço mostraram valores baixos de resistividade como esperado, com valor médio de 4 ohm*m. Nesse caso da resistividade os valores de análises laboratoriais são compatíveis com as inversões do tipo RDI, com envoltória condutiva entre 20 e 50ohm*m, para a região das mineralizações conhecidas e validam os resultados obtidos anteriormente;
- Quando comparados os resultados de densidade e susceptibilidade, os sulfetos maciços não magnéticos (1.31×10^{-3} SI) têm densidade média de 4,298 g/cm³, enquanto que os sulfetos maciços magnéticos ($758,35 \times 10^{-3}$ SI) apresentam densidade média de 3,933 g/cm³. Os sulfetos maciços não-magnéticos são sutilmente mais densos que os sulfetos magnéticos. Esses resultados indicam que o uso integrado dos métodos magnético, eletromagnético e gravimétrico gradiométrico pode levar a seleção de novos alvos ainda não pesquisados na região;
- A cargabilidade do sulfeto maciço é nula, com valores médios de 0,002 mV/V e corrobora com a conectividade do sulfeto como esperado, onde o decaimento é tão rápido neste caso que os valores são nulos. Mesmo assim, o método da polarização induzida pode mapear o corpo de sulfeto maciço pela associação com sulfetação disseminada;
- Existe diferença entre os resultados de petrofísica e dos valores para propriedades físicas obtidos pela modelagem e inversão dos dados. Esta diferença pode ser explicada pelo fato de que os modelos geofísicos são construídos para representar um horizonte ou um corpo, de heterogeneidade de propriedades físicas, representativo da fonte causadora da anomalia, espelhada na geologia local e em profundidade, enquanto que a análise petrofísica é realizada diretamente na amostra e sobre os minerais de minério. Um deve servir de base ao outro e devem ser feitas correlações relativas.

Sobre a estratégia de exploração geofísica para busca de novos corpos mineralizados tipo Ni-Cu-PGE.

- O uso de ferramentas modernas deve ser aplicado em todos os estágios da exploração mineral, entretanto a decisão em investimento é facilitada com o avanço do projeto e com indicativos de um depósito econômico;

- A geofísica exploratória deve ser aplicada desde o estágio inicial de pesquisa em escala de província até escala de projeto. O método eletromagnético acelera, quando o modelo metalogenético-exploratório refinado com dados aerogeofísicos magnéticos, gamaespectrométricos e gravimétricos indica um potencial para mapear mineralizações associadas com zonas condutivas ou corpos condutivos;
- A aplicação e integração dos resultados de métodos eletromagnéticos, magnéticos e gravimétricos gradiométricos de alta resolução podem mapear porções potenciais de um sistema mineral e revelar corpos desconhecidos na Província Borborema e mesmo em outras regiões do Brasil;
- O grande desafio no estágio atual de conhecimento referente ao Depósito Limoeiro, em busca de viabilidade econômica é a investigação em profundidade por métodos alternativos, que suportem um programa de sondagem exploratória com cerca de 1000m de profundidade em busca de novos corpos de sulfeto maciço.

4. Referências Bibliográficas

Allard, M. (2007). On the origin of the HTEM species. In *Proceedings of exploration* (Vol. 7, pp. 355-374).

Almeida, F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck H.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SBG-Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8º, Campina Grande, Atas, Boletim 6, p. 363-391.

Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N., & Saumur, B. M. (2016). The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76, 296-316.

Brito Neves, B. B., & Cordani, U. G. (1991). Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53(1-2), 23-40.

Brito Neves, B. B., Santos, E. D., & Van Schmus, W. R. (2000). Tectonic history of the Borborema Province. In U. G. Cordani, E. J. Milani, A. Thomaz Filho, & D. D. A. Campos (Eds.), *31 International Geological Congress*.

Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Kozuch, M., dos Santos, E. J., & Petronilho, L. (2005). A zona tectônica Teixeira Terra Nova-ZTTTN: fundamentos da geologia regional e isotópica. *Geologia USP. Série Científica*, 5(1), 57-80.

Caxito, F. A., Uhlein, A., Dantas, E. L., Stevenson, R., Salgado, S. S., Dussin, I. A., & da Nóbrega Sial, A. (2016). A complete Wilson Cycle recorded within the Riacho do Pontal Orogen, NE Brazil: Implications for the Neoproterozoic evolution of the Borborema Province at the heart of West Gondwana. *Precambrian Research*, 282, 97-120.

CPRM, (2008). Serviço Geológico do Brasil – Programa Geologia do Brasil (PGB) – Projeto Aerogeofísico Borda Leste do Planalto da Borborema - Relatório final do levantamento e processamento de dados, v.1.

Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. In *ASEG Extended Abstracts 2012* (pp. 1-4). Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG).

Geotech., (2009) - Survey and logistics report on a helicopter borne versatile time domain electromagnetic (Vtem) survey – Limoeiro Project – Pernambuco State – For Votorantim Metais, v1, p.27.

Jardim de Sá E.F. (1994). A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 804p.

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

- Meju, M. A. (1998). A simple method of transient electromagnetic data analysis. *Geophysics*, 63(2), 405-410
- Mota-e-Silva, J., Ferreira Filho, C. F., & Della Giustina, M. E. S. (2013). The Limoeiro deposit: Ni-Cu-PGE sulfide mineralization hosted within an Ultramafic tubular magma conduit in the Borborema Province, Northeastern Brazil. *Economic Geology*, 108(7), 1753-1771
- Mota-e-Silva, J., Prichard, H. M., Ferreira Filho, C. F., Fisher, P. C., & McDonald, I. (2015). Platinum-group minerals in the Limoeiro Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Brazil: the effect of magmatic and upper amphibolite to granulite metamorphic processes on PGM formation. *Mineralium Deposita*, 50(8), 1007-1029.
- Macleod, I. N., Vieira, S., & Chaves, A. C. (1993). Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. In *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- Naldrett, A. J. (2004). *Geology, geochemistry and exploration*.
- Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium deposita*, 34(3), 227-240.
- Neves, S. P., & Alcantara, V. C. (2010). Geochemistry of orthogneisses and metasedimentary rocks across a proposed terrane boundary in the Central Domain of Borborema Province, NE Brazil: geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 498-511.
- Neves, S. P., Monié, P., Bruguier, O., & da Silva, J. M. R. (2012). Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 38, 129-146.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- Prikhodko, A. (2000). TEM Resistivity Depth Imaging (RDI) – Appendix D - Internal Report Geotech Airborne Surveys, v.1, 2000
- Rijo, L. (1977). Modeling of electric and electromagnetic data.
- Sá, J. M., Bertrand, J. M., Leterrier, J., & Macedo, M. H. F. (2002). Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the transversal zone, Borborema Province, northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(8), 851-866.

Sá, J. M., Leterrier, J., Bertrand, J. M., & Silva, E. D. (1997). Augen gnaisses vs augen gnaisses da Faixa Jaguaribeana, NE do Brasil: estratigrafia, geoquímica e idades U-Pb. *Atas do XVII Simpósio de Geologia do Nordeste, 1*, 113-117.

Santos, E. J. (1996). Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In *39 Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 6). Salvador: SBG

Santos, E. J., & Medeiros, V. C. (1999). Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil.

Silva, J. M. (2015). O depósito sulfetado Ni-Cu-(pge) de Limoeiro: metalogênese, magmatismo máfico e metamorfismo no leste da Província Borborema.

Silva, A. M. (1999). Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero.

Silva, A. T. M. C. (2012). Resposta eletromagnética e magnética do Depósito IOCG (Iron Oxide Copper Gold) Cristalino, Província Mineral de Carajás, Pará, Brasil

Van Schmus, W. R., de Brito Neves, B. B., Hackspacher, P., & Babinski, M. (1995). UPb and SmNd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 267-288.

Watts, A. (1997). Exploring for nickel in the 90s, or 'til depth us do part'. In *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration* (pp. 1003-1014). Prospectors and Developers Association of Canada

APENDICE 1

A1 - Eletromagnetismo e o Método Eletromagnético Domínio do Tempo

O eletromagnetismo é a interação entre eletricidade e magnetismo baseado no conceito de campo eletromagnético. A compreensão dos princípios de eletromagnetismo para levantamentos geofísicos pode ser adequadamente entendido por uma descrição qualitativa.

O princípio do eletromagnetismo diz que quando cargas elétricas se movem, ou seja, quando uma corrente elétrica está fluindo, um campo magnético se forma em torno das cargas elétricas e a intensidade deste campo é proporcional a magnitude desta corrente. Para exemplificar, a figura A1.1 a, ilustra um fluxo de corrente através de um fio linear, onde o campo magnético é descrito como linhas de campo circulares concêntricas à corrente. A figura A1.1 b ilustra quando um fluxo de corrente é feito através de um fio em forma de “loop” ou “bobina” onde direção do campo magnético depende da direção do fluxo da corrente (Dentith et al., 2014).

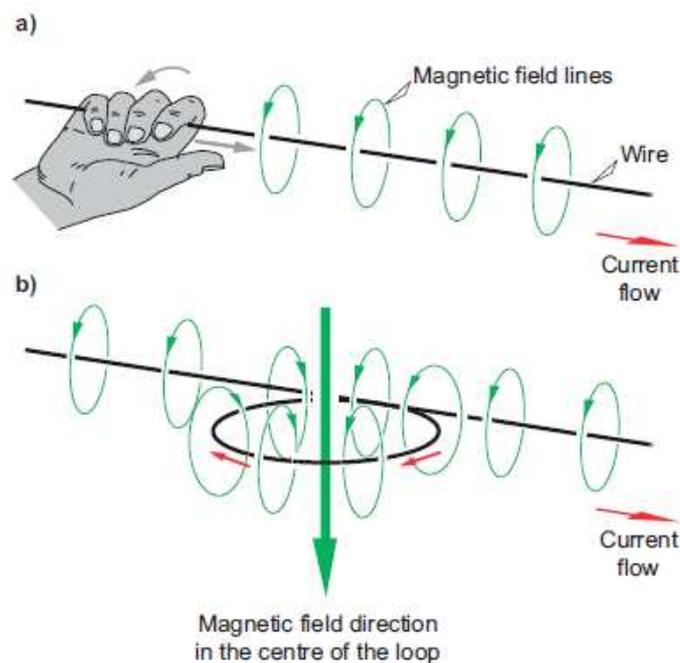


Figura A1.1 - Campo Magnético de uma corrente Elétrica. (a) Fluxo de corrente através de um segmento de fio linear descrito pela regra da mão direita onde a ponta do polegar mostra do sentido do Fluxo da Corrente e os demais dedos apontam na direção das linhas circulares do campo magnético. (b) fluxo de corrente através de um loop circular (Dentith et al 2014).

O método eletromagnético (EM) faz uso da resposta do solo e rocha através da propagação de campos eletromagnéticos, que são compostos por uma intensidade elétrica alternada e por uma força de magnetização. Os campos eletromagnéticos primários podem ser gerados pela passagem de uma corrente elétrica alternada através de uma bobina composta de várias voltas de fio ou através de um grande anel de cabo elétrico (Geotech, 2009).

Quando zonas geológicas condutoras são detectadas, campos eletromagnéticos secundários são gerados, sendo que estes campos resultantes podem ser detectados pelas correntes alternadas que eles induzem ao fluir numa bobina receptora pelo processo de indução magnética.

O campo eletromagnético primário propaga-se da bobina transmissora para a bobina receptora via trajetórias tanto acima quanto abaixo da superfície. Onde a subsuperfície é homogênea, não há diferença entre os campos se propagando acima da superfície e através do solo, que não seja uma leve redução em amplitude do último pulso com respeito ao primeiro. Por outro lado, na presença de um corpo condutor, a componente magnética do campo eletromagnético que penetra o solo induz correntes alternadas ou correntes parasitas (eddy currents) a fluir no condutor. As correntes parasitas geram seus próprios campos eletromagnéticos secundários, que se propagam até o receptor. O receptor então responde a resultante da chegada dos campos primários e secundários, de forma que a resposta difere em fase e amplitude da resposta do campo primário somente. Essas diferenças entre os campos eletromagnéticos transmitidos e recebidos revelam a presença do condutor e fornecem informações sobre a sua geometria e suas propriedades elétricas (Geotech 2009).

A1.1 Propriedades Elétricas de minerais e minerais de minério e controles geológicos na condutividade.

A condutividade elétrica representa a facilidade com que correntes elétricas fluem em subsuperfície, enquanto a resistividade (inverso da condutividade), representa a dificuldade com que as correntes fluem em subsuperfície. Em rochas porosas, as propriedades elétricas são muitas vezes controladas pelos fluidos que ocupam os espaços porosos, que não podem ser retirados durante a amostragem ou devidamente reproduzidos durante as medições. Além disso, as propriedades podem ser altamente heterogêneas ou homogêneas dependendo da escala em que trabalhamos.

Um bom exemplo são fraturas ou veios mineralizados que na maioria das vezes oferecem caminho para corrente elétrica, porém amostras específicas nesses veios/fraturas não vão ser representativas da rocha encaixante. A condutividade elétrica varia muito mais do que qualquer outra propriedade em prospecção geofísica. Mesmo em minerais/cristais individuais a variação é tão acentuada como em um tipo rochoso, onde temos conjuntos de minerais. As unidades para estas grandezas são condutividade em S/m e resistividade em $\text{ohm}\cdot\text{m}$.

Em termos de prospecção geofísica algumas generalizações são importantes para mapeamento geológico e definição de alvos através de dados eletromagnéticos, principalmente para prospecção de níquel sulfetado e metais associados. Podemos destacar entre elas:

- A maioria dos materiais em ambientes geológicos são semi-condutores a exceção de metais nativos com alta condutividade. Como eles ocorrem em pequenas quantidades exercem pequena variação sobre a resposta geofísica;
- Silicatos comuns e carbonatos geralmente são isolantes, embora a serpentina seja relativamente mais condutiva;
- Sulfetos são condutivos, porém com grande variação entre eles. A única exceção é a esfalerita (não condutiva) e nesse caso impurezas no sistema cristalino do mineral podem acrescer sua condutividade;
- Óxidos metálicos são normalmente menos condutivos que os sulfetos. Magnetita é o mais condutivo dentre eles, enquanto hematita é muito pouco condutiva. Processos de alteração hidrotermal que transformam magnetita em hematita reduzem a condutividade;
- Petlandita é condutiva, mas não é magnética;
- Pirrotita monoclinica é condutiva (2x mais que a pirrotita hexagonal) e magnética;
- Pirrotita hexagonal é menos condutiva (se comparado a monoclinica) e não é magnética;
- Pirita e calcopirita são muito menos condutivas e magnéticas do Pirrotita;
- Magnetita é menos condutiva que pirrotita, porém muito mais magnética. Apesar de ser condutiva, o habito mineral da magnetita não permite que se conectem bem eletricamente em rochas intrusivas inalteradas, o que pode não gerar anomalias EM;

- Magnetita é bem menos condutiva que petlandita;
- A condutividade de mineralizações maciças tende a ser muito maior do que aquelas constituídas por minerais condutivos disseminados, pois a massa concentrada de minerais condutivos vai ser sempre maior;
- Grafita é condutiva e é uma importante fonte de condutividade. A presença de grafita aumenta a condutividade de rochas como folhelhos grafitosos e pode fornecer condutividades comparáveis a mineralizações de sulfeto maciço. A grafita possui propriedades elétricas altamente anisotrópicas, isto é, dependem da direção do fluxo de corrente, onde condutividade medida paralelamente a clivagem é muito maior do que a medida perpendicularmente a clivagem;
- Rochas sedimentares são geralmente mais condutivas que rochas ígneas devido a porosidade e umidade;
- Rochas metamórficas tem maior variedade de condutividade/resistividade, pois possuem uma gama de valores de porosidade, desde similares a rochas sedimentares até a impermeabilidade de rochas cristalinas;
- Materiais e rochas ricas em minerais de argila como saprolitos e rochas pelíticas são os tipos mais condutivos. As argilas se tornam muito condutivas quando umedecidas e sua presença nos poros das rochas aumentam as condutividades das rochas.

As propriedades elétricas das rochas podem ser compreendidas através de duas formas básicas de condução elétrica: através da matriz da rocha que requerem minerais condutivos interligados ou da condução iônica através dos fluidos no espaço que requer conectividade entre os poros. Especificamente, para prospecção mineral de Ni-Cu-PGE podemos resumir as principais propriedades físicas de alguns minerais de minério através da tabela 1.1.

Tabela A1.1: Propriedades Físicas dos Principais Minerais de Minério de Mineralizações Tipo Ni-Cu-PGE – Compilação de vários autores e também sumarizadas, parcialmente, em Dendith & Mudge (2014).

Rocha/Mineral	Densidade g/cc	Susceptibilidade (10⁻³SI)	Condutividade (kS/m)	Observação
Ultramáfica	3.0-3.3	20-150	0-0.01	
Magnetita	5.2	300-1600	0.1-10	Muito Magnética e menos condutiva que Po e Pn
Pirrotita (monoclínica)	4.5	20-150	20-200	Magnética e 2x mais condutiva que Po Hexagonal
Pirrotita (hexagonal)	4.5	0	10-100	Não-Magnética e Muito Condutiva
Petlandita	4.9	0	50-100	Não-Magnética e Muito Condutiva
Calcopirita	4.2	0.1	1--2	Pouco Magnética e Pouco Condutiva
Pirita	4.5	0.1	0.01-1	Pouco Magnética e Muito Pouco Condutiva
Grafite	2.1	0	10-200	Muito Condutivo e Não-Magnético

A1.2 Os sistemas eletromagnéticos aéreos do domínio do tempo

O método HTEM permite mapear a condutividade ou a resistividade da superfície e subsuperfície da terra. Desde 2002, uma nova geração de sistemas helitransportados potentes estão disponíveis no mercado e a tecnologia vem se aprimorando. A principal vantagem destes levantamentos HTEM refere-se ao fato de serem executados em curto espaço de tempo e são ideais para situações que exigem exploração profunda em terrenos acidentados (Allard 2007).

Os sistemas HTEM foram produzidos e configurados de maneira que tivessem excelente relação sinal-ruído, capacidade de discriminação e mapeamento de maiores variações de resistividade e condutividade, resolução, densidade de informação, compreensão de condutores com geometria complexa e boa profundidade de investigação. Além de serem muito potentes, com momento dipolo entre 425.000 até 2.000.000 NIA, a maioria deles adotaram configuração entre as bobinas transmissoras e receptoras de forma concêntricas e de loop central. Ou seja, onde a bobina receptora está dentro ou muito próxima da bobina transmissora, geralmente entre 35 e 65m acima da superfície do terreno.

Essa configuração associada a uma velocidade média de 80km/h durante a aquisição permitem que tenhamos um excelente posicionamento XYZ da fonte causadora da anomalia eletromagnética.

Atualmente existem alguns sistemas HTEM disponíveis no mercado e dentre eles podemos destacar EXPLORHEM, HOISTEM, THEM, NEWTEM, AEROTEM, HELITEM, HELIGEOTEM, VTEM, SKYTEM, HELI C. O sistema de posicionamento das anomalias é muito bom devido a configuração de loops concêntricos e sistemas digitais de GPS. O processamento adequado dos dados e o uso de ferramentas adequadas de modelamento e inversão das anomalias é possível testar as anomalias diretamente dos dados aéreos através da sondagem, dispensando a fase de *follow-up* por geofísica terrestre em determinadas fases.

A1.3 Método VTEM aplicado na prospecção do Depósito Limoeiro Ni-Cu-PGE

Os dados eletromagnéticos utilizados são resultantes de um Levantamento VTEM (Versatile Time Electromagnetic Time Domain) efetuado sobre a anomalia magnética mapeada com os dados anteriores e, posteriormente, definida como intrusão de Limoeiro. Os dados foram adquiridos com espaçamento entre linhas de voo e controle com 200m na direção NS e 2000m na direção EW, respectivamente. Desde o primeiro reconhecimento geológico e com a integração de modelagem 2D-3D de dados magnéticos, permeou-se a ideia de que as rochas ultramáficas intrudiam de forma concordante os paragneisses do Complexo Surubim, e que o método EM aéreo era capaz de detectar as mineralizações enterradas e blindadas para a geoquímica de solo. O levantamento VTEM consistiu de 5 blocos, totalizando 698.6km lineares e foi realizado em 8 dias, incluindo voos de teste. Os blocos foram realizados com espaçamento entre linhas de voo de 200m (direção NS) e linhas de controle com espaçamento de 2000m (direção EW).

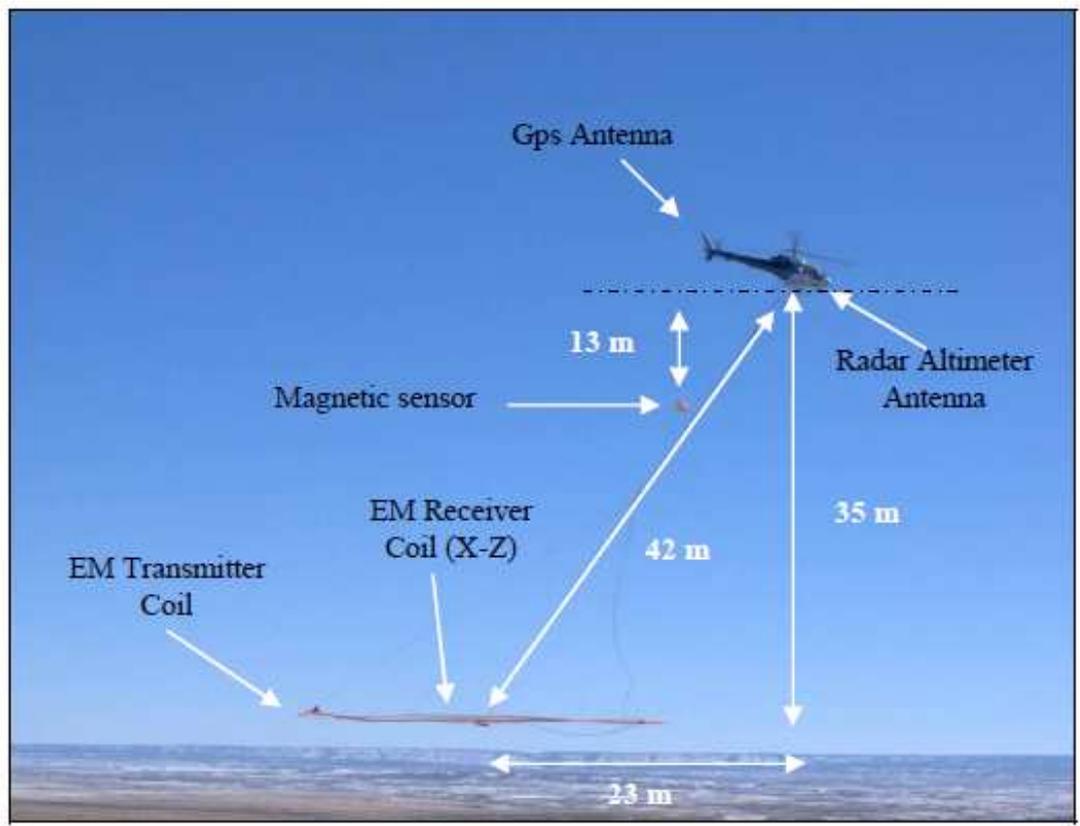


Figura A1.2 – Sistema eletromagnético domínio do tempo utilizado na prospecção da mineralização sulfetada Ni-Cu-PGE de Limoeiro – destaque para o sistema concêntrico com bobina transmissora e receptora na mesma posição XYZ e magnetômetro entre o helicóptero e o sistema eletromagnético.

O sistema VTEM aplicado na prospecção de Limoeiro (Figura A1.2), é concêntrico, com transmissor e receptor na mesma posição XYZ, o que é ideal para posicionamento dos condutores, sendo a bobina transmissora com 26m de diâmetro, 46m de altura sobre o terreno, 4 voltas, frequência de 30Hz, pico de corrente de 205 A, momento dipolo de 433,233 NIA, duty cycle de 40.2% e pulso de 6.67ms. A bobina receptora tem diâmetro de 1.2m, com 46m de altura sobre o terreno, 100 voltas 113.1m² de área efetiva e intervalo de amostragem de 0.1s.

A1.4 Interpretação de Dados Eletromagnéticos aplicado a prospecção de mineralização tipo Ni-Cu-PGE

A exploração geofísica pode auxiliar muito na prospecção de depósitos magmáticos Ni-Cu-PGE devido a mineralização estar sempre associadas a sulfetos condutivos e magnéticos. Geralmente a ocorrência de pirrotita >> petlandita > calcopirita associado ao corpo de minério torna a rocha aproximadamente 50% mais densa e 10×10^4 mais condutiva que sua encaixante máfica – ultramáfica (Waats, 1997). Nesses termos, os métodos HTEM podem identificar diretamente corpos mineralizados nos ambientes geológicos de depósitos magmáticos. A disposição das linhas nos levantamentos deve ser sempre perpendicular ao *strike* geológico, para acoplamento magnético ideal. O espaçamento entre as linhas de voo também deve ser adequado para o “alvo mínimo” a ser mapeado. As linhas devem ser dimensionadas para que passem sobre o possível corpo de minério dentro do sistema magmático. Para a seleção dos melhores alvos em busca mineralizações Ni-Cu-PGE a seguir são descritas as melhores práticas e procedimentos para interpretação de dados HTEM.

Após a conclusão do levantamento VTEM em Limoeiro, os dados EM foram analisados em diversas fases e podemos destacar como principais o processo de picking, cálculo do tau (time constant decay), interpolação de malhas, seleção de anomalias, modelamento tipo maxwell e RDI (Resistivity depth image). O processo de picking é feito com seleção de anomalias ao longo de cada perfil eletromagnético por voo, na tentativa de interpretar o centro do condutor, utilizando comprimento de onda e amplitude no canal de perfis empilhados dB/dT e BField. O cálculo TAU (time constant decay) no banco de dados foi realizado por meio de um script desenvolvido pela Geotech Airborne Survey, onde os maiores tempos de decaimento em milisegundos são considerados os melhores condutores. Após picking e cálculo do TAU feito linha a linha, os alvos são selecionados e então partimos para fases mais avançadas de modelamento e inversão onde é possível definir as características de cada condutor. O modelamento tipo Maxwell, através do algoritmo de filamentos, permite ajuste do campo eletromagnético observado para um campo eletromagnético modelado, e quando esse ajuste, que pode ser ruim, moderado ou excelente, acontece, podemos extrair informações de comprimento, profundidade, direção de mergulho, e condutância de cada condutor, auxiliando na priorização para

sondagem exploratória. Ainda para complementar o modelamento tipo Maxwell, foi utilizada a inversão do tipo RDI, que se trata de uma técnica para converter rapidamente o dado de constante de decaimento dos perfis eletromagnéticos em resistividade equivalente, em seções com profundidade, através da deconvolução do dado TEM, por meio do software desenvolvido *in-house* pela Geotech Surveys (Prikhodko, 2000). O algoritmo usado para transformação em resistividade-profundidade baseado no esquema de transformação da resistividade aparente, usando algoritmo de Maxwell, A. (1998), sendo as estimativas de profundidade baseadas em *forward plate modeling* para a metodologia VTEM. Após essas fases todas as informações são integradas em ambiente GIS 3D para que se possam ser planejadas as sondagens exploratórias.

A1.4.1 - Análise e Interpretação 1D

A análise dos dados e interpretação 1D é feita diretamente no banco de dados eletromagnéticos através do processo de “*picking*”. Este procedimento consiste em definir a posição do corpo condutivo ao longo de cada perfil levantado, definido por um ponto onde podemos obter informações sobre atitudes do corpo condutivo, profundidade relativa, amplitude, dimensões do corpo, constante de decaimento TAU.

Geralmente corpos mineralizados de NiS apresentam anomalias bastante condutivas, detectadas em todos os canais e com constante de decaimento (TAU) lenta proveniente de bons condutores.

Para a interpretação de dados HTEM, condutores fracos (*poor conductor*) são representados por capacitores ruins e descarregam-se rapidamente após o corte da corrente. Os bons condutores (*good conductor*) têm um decaimento mais lento após a interrupção da corrente e são detectados em todos os canais (Allard, 2007). A figura A1.3 ilustra princípios básicos do comportamento de condutores detectados por levantamento HTEM.

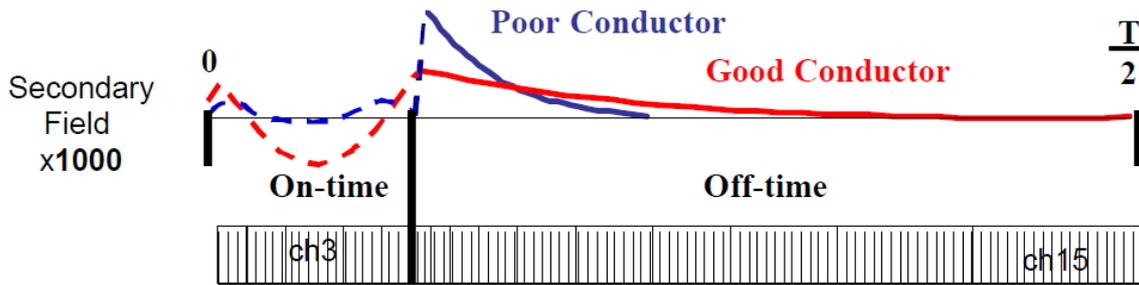


Figura A1.3: Princípio básico do sistema HTEM para identificação de condutores bons e fracos (Allard, 2007)

A figura A1.4 ilustra o processo de *picking* sobre uma anomalia selecionada como potencial para mineralizações do tipo níquel sulfetado e que são indicados pelos seguintes parâmetros: direção de 600m, detectada em todos os canais dB/dT e BField, resposta de um bom condutor quando detectado em todos os canais, excelente shape, alta amplitude, excelente constante de decaimento, rasa, geometria de condutor horizontal, forte coincidência com anomalia magnética.

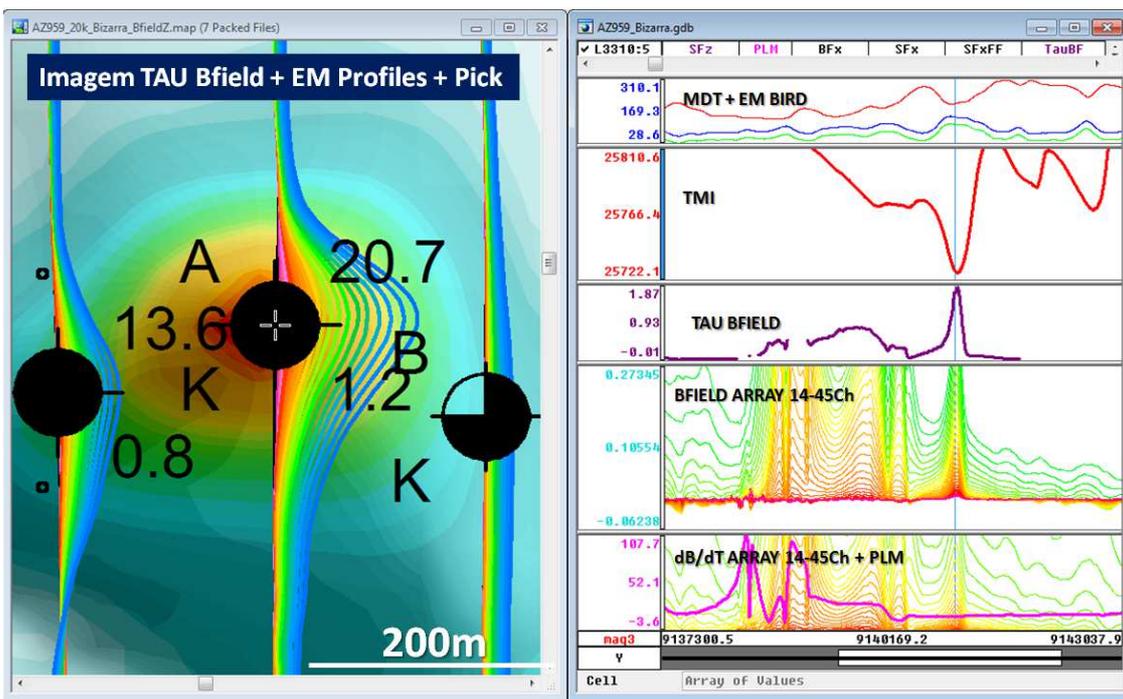


Figura A1.4: Exemplo de processo de seleção de anomalias (*picking*) em base de eletromagnéticos aéreos VTEM em prospecto de Ni-Cu-PGE – Exemplo de Limoeiro, PE.

Após o processo de *picking* podem ser feitas interpretações em 2D com auxílio dos grids interpolados dos dados eletromagnéticos. Desta maneira, é possível definir o tamanho dos

condutores e a relação espacial com o contexto geológico local e se podem estar deformados e deslocados por estruturas. Realizada a interpretação 1D e a seleção inicial dos alvos EM deve ser iniciada a interpretação 2D.

A1.4.2 - Análise e Interpretação 2D

A análise e interpretação em 2D pode ser realizada através de modelamentos de placas (algoritmo de filamentos) em softwares específicos. Esse modelamento do tipo placas é realizado através do ajuste do campo observado até um campo modelado, que representem a fonte da anomalia eletromagnética em subsuperfície. Como complemento a inversão de resistividade (RDI), permite analisar a subsuperfície, em busca de anomalias de baixas resistividade, típicos de mineralizações do tipo NiS. Essas inversões funcionam de acordo com a configuração do sistema EM, e geralmente os métodos modernos atingem com boa precisão condutores até os 400m de profundidade.

A1.4.3 Exemplo de Modelamento MAXWELL EM Software (*Plate Models*)

Uma vez ajustado o campo observado com o modelado é possível entender geometricamente os condutores e calcular propriedades físicas para eles. Podemos obter através destes modelos as dimensões (*plate size*), o mergulho (*dip-direction*), a profundidade do centro ou do topo do condutor, a condutância e a constante de decaimento TAU, permitindo a priorização dos condutores a serem testados. A figura A1.5 ilustra o modelamento 2D EM tipo *Plate Models* realizado através do software Maxwell EM.

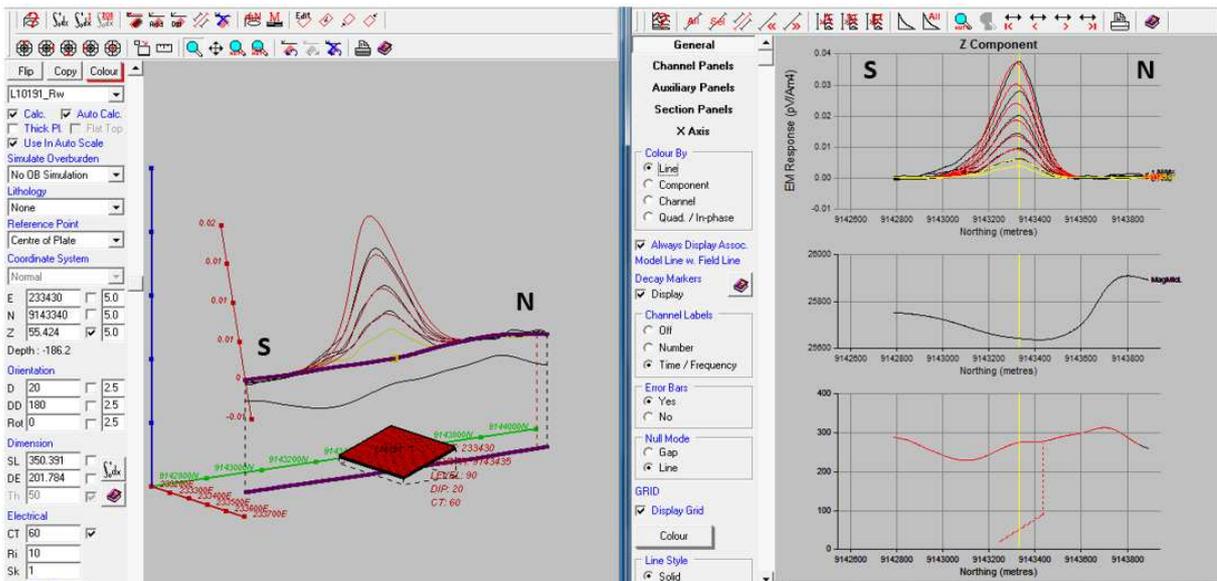


Figura A1.5: Exemplo de modelamento tipo Plate Models realizado através do *Software Maxwell EM* para um corpo mineralizado de Ni-Cu-PGE.

A.1.4.4 - Exemplo de Resistividade em Profundidade (RDI) de uma anomalia causada por sulfeto maciço

A inversão de resistividade em profundidade (RDI) é uma técnica para converter rapidamente o dado de constante de decaimento dos perfis eletromagnéticos em resistividade equivalente, em seções com profundidade, através da deconvolução do dado TEM. O algoritmo usado para transformação em Resistividade-Profundidade é baseado no esquema transformação da resistividade aparente (Maxwell 1998). As RDIs fornecem indicações razoáveis sobre a profundidade relativa e extensão vertical dos condutores, resistividade eficaz, topo e base, além de informação 2D sobre a geometria das camadas/estruturas condutivas através dos dados TEM.

A figura 1.7 ilustra um exemplo de inversão de resistividade 2D - RDI, representada em um View 3D sobre mineralização de Ni-Cu-PGE, onde tanto as rochas hospedeiras ultramáficas e a mineralização são detectadas através de anomalias de baixa resistividade.

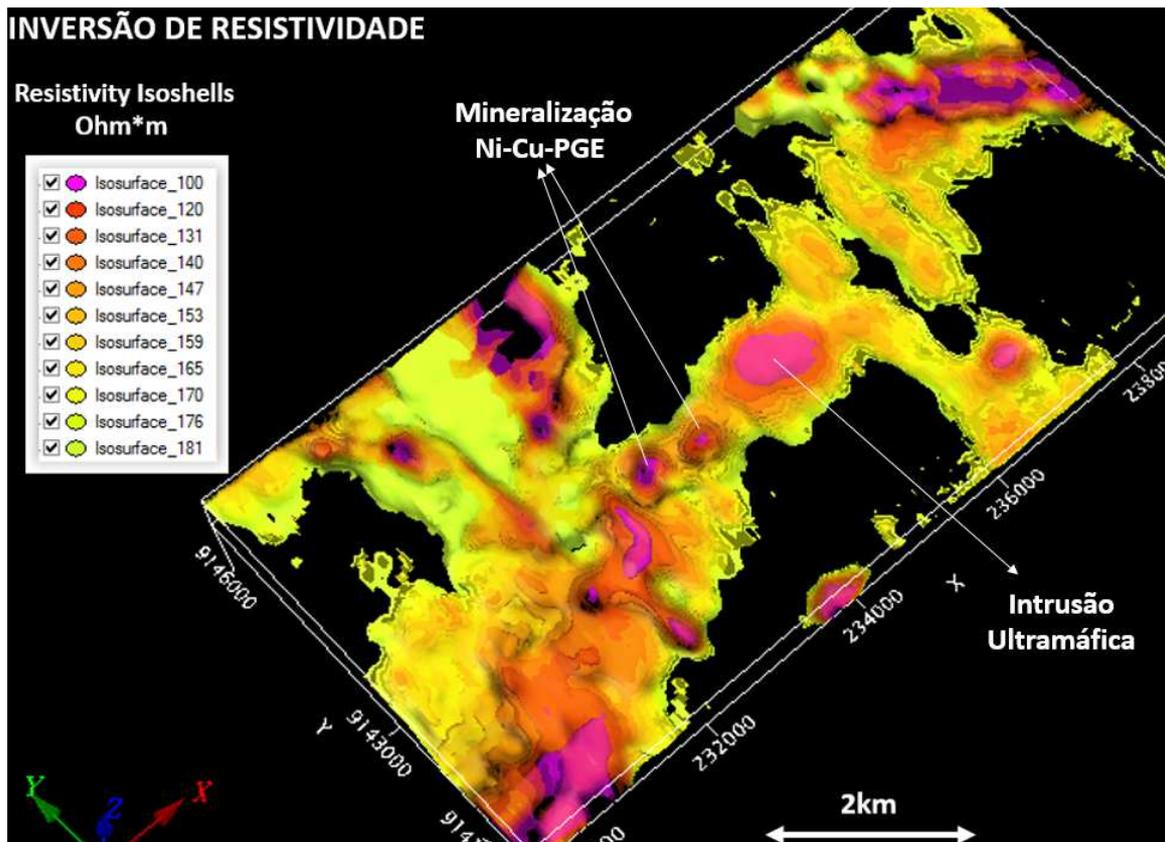


Figura A1.6 : Exemplo de Inversão de Resistividade 2D RDI de dados VTEM sobre mineralização de Ni-Cu-PGE.

A1.4.5 Análise e Interpretação 3D

Toda inversão de dados eletromagnéticos tem o objetivo de definir um modelo geoeletrico que satisfaça o dado eletromagnético medido e observado. A vantagem da Inversão 3D sobre inversões 1D e 2D é que este tipo de inversão considera a geometria total dos condutores e do dado EM, que permite definir melhor o posicionamento e as atitudes dos condutores. Enquanto em uma inversão 1D e 2D são utilizados os pontos ao longo de uma linha levantada, a Inversão 3D nos mostra a resposta conjunta de mais linhas que representem o condutor. A inversão 3D além de fornecer informações gerais sobre a resistividade do terreno, pode mostrar a geometria dos corpos condutivos e se estão abertos em profundidade. A figura 1.8 ilustra um exemplo de inversão 3D para um levantamento VTEM sobre prospecto de Ni-Cu-PGE.

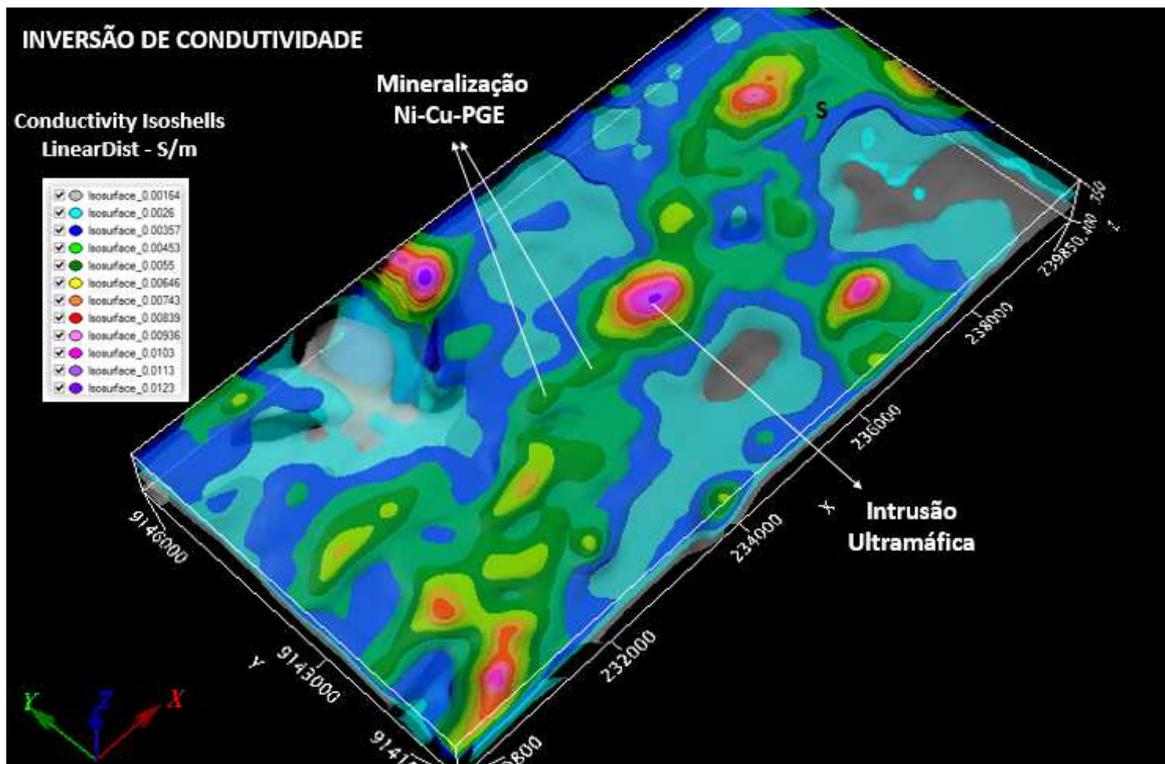


Figura A1.7: Exemplo de Inversão de Condutividade 3D de dados VTEM sobre mineralização de Ni-Cu-PGE.