



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DE DADOS PETROFÍSICOS E MINERALÓGICOS DO
DEPÓSITO EPITERMAL DE PB-ZN-(CU-AG) DE SANTA MARIA, RS

Moriá Caroline de Araújo

Dissertação de Mestrado em Geologia

nº 439

Brasília

14 de Junho de 2019



UnB

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DADOS PETROFÍSICOS E MINERALÓGICOS DO
DEPÓSITO EPITERMAL DE PB-ZN-(CU-AG) DE SANTA MARIA, RS**

Moriá Caroline de Araújo

Dissertação de Mestrado em Geologia n°
Área de Concentração: Geologia Econômica e Prospecção Mineral

Orientadora

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Co-Orientadora

Profa. Dra. Paola Ferreira Barbosa (UnB)

Banca Examinadora

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

Prof. Dr. Nilson F. Botelho (UnB)

Prof. Dr. José Carlos Sícóli Seoane (UFRJ)

Brasília

14 de Junho de 2019

“People will only change if they realize that the current state of thing is not convenient anymore and that there is another better pathway at your fingertips”

Kurt Lewin

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família por ter acreditado e me apoiado perante a este desafio. A meus pais, Márcio e Regina, por terem sido o meu sustento, minha fortaleza e meu espelho, ao orientarem e contribuírem nas decisões importantes da minha vida. E ainda a meu irmão Samuel por todo afeto e carinho concedidos.

Agradeço a minha orientadora e co-orientadora, Adalene Moreira e Paola Barbosa, pela compreensão, paciência, auxílio e principalmente por me conduzirem, não apenas na pesquisa, mas também nesta longa jornada de aprendizado.

A todos os meus amigos presentes, ou até mesmo aqueles presentes em coração, devido à distância, que de certa forma proporcionaram acolhimento, atenção e pelas palavras de incentivo durante esses dois anos, estas que tanto me acalmavam nos momentos de aflição e angústia, e não permitiram que eu fraquejasse ou desistisse.

Agradeço à empresa Nexa *Resources* a minha indicação como bolsista e pesquisadora neste projeto único e inovador em parceria com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e ao Instituto Euvaldo Lodi - IEL. Ainda a eles, pela oportunidade de trabalhar com um banco de dados tão amplo que disponibilizava itens, como a petrofísica, que ainda são pouco utilizados no campo da exploração mineral. Em especial aos meus tutores nessa jornada de pesquisa e inovação João Boniatti, Allan Früchting, Samuel Bouças e Ram Betancourt.

RESUMO

O entendimento da assinatura petrofísica em superfície e subsuperfície é de extrema importância na exploração mineral, pois a criação de processos de interpretações a partir do conhecimento avançado do comportamento das propriedades físicas em diferentes rochas, mineralizações e alterações hidrotermais, podem alavancar estudos de novos alvos ou novas abordagens na prospecção, o que se resume em redução de custos e tempo.

O projeto de pesquisa aqui apresentado tem por objeto de estudo mineralizações de Pb-Zn-(Cu-Ag) situadas no distrito de Minas do Camaquã, município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Trata-se geologicamente de sistema hidrotermal distal, com mineralizações controladas por sistemas de falhas em arenitos e conglomerados, que hospedam zonas de alteração hidrotermal que contém illita, clorita e pirita, além dos minerais galena (Gn), esfalerita (Sph), calcopirita (Ccp) e bornita (Bo).

O objetivo principal desta pesquisa foi identificar a assinatura petrofísica das rochas encaixantes, alterações hidrotermais e mineralizações epitermais de Pb-Zn-(Cu-Ag) do Depósito Santa Maria. Para isso, foram analisados dados petrofísicos e mineralógicos de alta resolução, integrados a dados geoquímicos e geofísicos terrestres de magnetometria e polarização induzida.

A metodologia inicial aplicada consiste em análise de dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos em escala de 1:250.000; levantamento de dados de magnetometria e polarização induzida em escala de 1:25.000 e; seleção de amostras de furos de sondagens representativas da litologia predominante, das alterações hidrotermais e mineralizações do depósito. Tais amostras foram submetidas a análises geoquímicas de elementos maiores, traço e terras raras; análises petrofísicas de densidade, susceptibilidade magnética, velocidade de onda P, resistividade, condutividade e cargabilidade; e análises mineralógicas a partir do sistema automatizado de análise de imagem *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy* (QEMScan).

Análises geoquímicas referentes a até 30 cm³ de amostra, possibilitaram a classificação dos arenitos do depósito e suas respectivas proveniências, bem

como a identificação de anomalias e elementos químicos farejadores das mineralizações.

O mapeamento quantitativo mineralógico permitiu quantificar (%), em lâminas delgadas de 2cm, os principais sulfetos que caracterizam o depósito, tais como bornita, galena, esfalerita, calcopirita, e, secundariamente, calcocita e pirita; a classificação do cristal dos sulfetos em fina, média e grossa; a intensidade das alterações hidrotermais em fraca, moderada e forte; e a quantificação (%) de elementos de alteração como mica e carbonatos.

A junção das informações supracitadas permitiu a comparação direta entre elementos químicos e seus sulfetos, e a comprovação que, apesar da amostragem ter uma diferença de 15 cm³ para 2 cm, estas são proporcionais. Tal constatação mostra que em pesquisas *greenfield* as informações geoquímicas podem auxiliar na especulação sobre o terreno em investigação ser prospectivo ou não.

A petrofísica e os resultados de QEMScan permitiram o entendimento da assinatura de cada propriedade física junto a litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações. A densidade foi a propriedade física mais efetiva no mapeamento destes itens, uma vez que altas porcentagens de sulfetos elevaram o valor da densidade da rocha em 0.2 a 0.4 g/cc; a presença de mica e carbonato afetou a porosidade primária da rocha, tornando-a mais densa; e os litotipos apresentaram assinatura distintas onde os arenitos foram os menos densos e os andesitos os mais densos. As propriedades elétricas foram as mais complexas e menos efetivas, pois ficou claro que apenas a alteração hidrotermal elevou a resistividade das amostras.

A magnetometria terrestre delimitou unidades geológicas, contraste andesito e sedimento, e estruturas do Depósito Santa Maria. Este método geofísico e a susceptibilidade magnética da petrofísica no geral apresentaram paridade, mesmo em escalas diferentes, dado que apenas amostras petrofísicas mais profundas mostraram divergência com a inversão. A polarização induzida auxiliou na distinção das mineralizações do depósito e, a cargabilidade em planta e a cargabilidade petrofísica mostraram compatibilidade apenas em algumas regiões, que pode ser justificada pela zona em que as amostras petrofísicas interceptaram.

Apesar dos dados petrofísicos desta pesquisa serem pontuais, notou-se compatibilidade com a geofísica em algumas regiões, do qual podem ser ampliados, quando tratar de anomalias geofísicas homogêneas para um mesmo litotipo. As amostras retiradas de furos de sondagem que cortavam o corpo de minério ou estavam próximas, apresentaram valores de propriedades físicas correspondentes ao esperado, e comprovou que a petrofísica é de grande relevância e vai ajudar na prospecção mineral, uma vez que poderão inferir nos modelos, geometria de corpos geológicos e nos métodos geofísicos mais eficazes para cada tipo de depósito. No caso de depósito epitermais com mineralizações de Pb, Zn e Cu, o método geofísico mais eficaz seria a gravimetria, e os métodos mais abstrusos seriam os elétricos, uma vez que dependem de vários fatores. Finalmente, a petrofísica deve ser utilizada em diversos meios prospectivos, no entendimento do ambientes geológicos, pois reduzirá os gastos com metodologias geofísicas pouco eficazes, acelerarão a pesquisa mineral e reduzirão recursos técnico-financeiros.

Palavras chaves: *Petrofísica, QEMScan, Alteração hidrotermal, Mineralizações, Magnetometria, Polarização Induzida, Minas do Camaquã.*

ABSTRACT

The understanding of the petrophysical signature on surface and subsurface is far reaching in mineral exploration. This allow the creation of interpretations processes of behavior of physical properties in different rocks, mineralization and hydrothermal changes. This process can leverage new target studies or new approaches in prospecting, that results in cost reduction and time.

The study takes a place in Minas do Camaquã, a district of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. The research occurs in a hydrothermal system, classified in epithermal deposit of intermediate sulphidation type. The mineralization is controlled by failure systems in sandstone and conglomerates. The host zones of hydrothermal alteration containing illite, chlorite and pyrite, in addition Galena, Sphalerite, Chalcopyrite and Bornite.

The main objective of this research was to identify the petrophysical signature of lithotypes, hydrothermal alterations and mineralization of Pb-Zn-(Cu-Ag) of the Santa Maria Deposit. The analyze of high-resolution petrophysical and mineralogical data were integrated to geochemical data and ground geophysical data of magnetometry and induced polarization. The methodology consists of the analysis of data of aeromagnetometry and aerogammaspectrometry in a scale of 1: 250.000; acquisition of induced polarization data and magnetometry in scale of 1: 25.000; selection of samples of drilling holes that represent the lithology, hydrothermal alteration and mineralization of the deposit. These samples were subjected to geochemical analyses of major, trace and rare earth elements; petrophysical analysis of density, magnetic susceptibility, acoustic velocity of P wave, resistivity, conductivity and chargeability; and mineralogical analyses by *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy* (QEMScan).

Geochemical analyses sizing approximately 30 cm³, allowed the classification of the sandstones of the deposit and their respective provenance, as well as the identifications of anomalies of geochemical elements. The mineralogical quantitative mapping allowed to quantify (%), in thin section sizing 2 cm, the main sulphides that characterize the deposit, such as bornite, galena, sphalerite, chalcopyrite, and, secondarily, chalcocite and pyrite; the classification of the sulfides matrix in fine, medium and coarse; the intensity of the hydrothermal

alteration in weak, moderate and strong; and quantify (%) the altering elements such as mica, chlorite, illite and carbonates.

The combination of the mentioned information allowed the direct comparison between chemical elements and their sulphides. This evidence proves that although the sampling has a difference of 15 cm³ to 2cm, these are proportional. This ascertainment suggests that in greenfield resources the geochemical information can assist in speculation about the area be prospective or not.

The petrophysics and QEMScan results allowed the understanding of the signature of each physical property in association with lithotypes, hydrothermal alterations and mineralization. Density was the most effective physical property in the mapping of these items. Note that a high percentage of sulphides increased the value of the rock density by 0.2 to 0.4 g / cc; the presence of mica and carbonate affected the primary porosity of the rock, making it denser; and the lithotypes presented a distinct signature, where note that andesites were densest than sandstones. The electrical properties were the most complex and less effective. The hydrothermal alteration was the only item that increased the resistivity of the samples.

The ground magnetometry delimited geological units and structures of Santa Maria Deposit. This geophysical method and the magnetic susceptibility of petrophysics data presented parity, even in different scales. The only divergence was in the deeper petrophysical samples when compared with inversion. The induced polarization assists in distinction mineralization of Santa Maria deposit. The grid of chargeability and chargeability of petrophysical data showed compatibility only in some regions. It can be justified by the area in which the petrophysical samples intercepted, an ore body for example, requiring greater sampling and investigation of the area.

Although the petrophysical data of this research were punctual, it was noted compatibility with the geophysics in some regions. This suggest that anomalies can be extended, when they are homogeneous in a same litotipo. The samples taken from drill holes that cut the ore body or were close, presented values of physical properties corresponding to the expected. The petrophysics is of great relevance and will help in the mineral prospection, since they can infer in the models and geometry of geological bodies. The most effective geophysical methods for epithermal deposit of intermediate sulphidation type is gravimetry,

and the most abstruse methods would be the electrical ones, since they depend on several factors. Finally, petrophysics should be used in several prospective environments, in the understanding of the geological environment. It will reduce expenses with inefficient geophysical methodologies, accelerating mineral research and reducing technical-financial resources.

Keywords: *Petrophysics, QEMScan, Hydrothermal Alteration, Mineralizations, Magnetometry, Induced Polarization, Minas do Camaquã.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE FLUXOGRAMAS.....	XVI
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Localização.....	2
1.3. Materiais e Métodos	3
1.3.1. Dados Aerogeofísicos.....	3
1.3.2. Dados Geofísicos Terrestres	5
1.3.3. Dados Geoquímicos	6
1.3.4. Dados Petrofísicos.....	6
1.3.5. Dados Mineralógicos	9
1.4. Estrutura da Dissertação	9
CAPÍTULO II.....	10
2. LITHOLOGY, HYDROTHERMAL ALTERATION AND ORE MINERALOGICAL SIGNATURES OF PETROPHYSICAL PROPERTIES OF THE Pb-Zn (Cu-Ag) EPITHERMAL DEPOSIT OF SANTA MARIA, RS. 10	
RESUMO.....	10
2.1. Introdução.....	12
2.2. Geologia Regional	13
2.2.1. Geologia, alterações e mineralizações do Depósito Santa Maria.....	17
2.3. Materiais e Métodos	20
2.3.1. Dados Geoquímicos	20
2.3.2. Dados Petrofísicos.....	20
2.3.3. Sistema automatizado de análise de imagem (QEMScan).....	22
2.4. Resultados.....	23
2.4.1. Geoquímica e técnicas analíticas (QEMScan).....	23
2.4.2. Petrofísica e técnicas analíticas (QEMScan).....	25
Densidade	25
Susceptibilidade Magnética.....	28
Velocidade de Onda P.....	29
Resistividade e Condutividade	31

Cargabilidade	32
2.5. Discussões	35
2.5.1. Classificação e proveniência dos arenitos do depósito Santa Maria	35
2.5.2. Integração de dados geoquímicos e técnicas analíticas (QEMScan)	36
2.5.3. Integração de dados petrofísicos e técnicas analíticas (QEMScan)	37
Densidade	38
Susceptibilidade Magnética	41
Velocidade de Onda P	44
Resistividade e Condutividade	45
Cargabilidade	48
2.6. Conclusões	52
ACKNOWLEDGEMENTS	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE I	61
APÊNDICE II	64
APÊNDICE III	69
APÊNDICE IV	72
APÊNDICE V	73
APÊNDICE VI	77
APÊNDICE VII	78
APÊNDICE VIII	79
CAPÍTULO III	80
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
3.1. Resultados de geofísica terrestre	80
3.2. Discussões	81
CAPÍTULO IV	94
4. CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	97
ANEXO I	102
ANEXO II	106
ANEXO III	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, principais municípios e acessos da região.....	3
Figura 1. 2 - Localização do polígono do levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, principais municípios do estado, além da área de estudo.....	4
Figura 1. 3 - a) Mapa de amplitude do sinal analítico e b) Mapa de primeira derivada vertical, ambos produtos do campo magnético anômalo medidos na aerogeofísica; c) Mapa de composição ternária dos elementos K, Th e U provenientes da contagem total da radiação gama emitidos por estes elementos. Modificado de CPRM, (2010).....	7
Figura 1. 4 - a) Mapa de localização da área de estudo e da área onde ocorreram os levantamentos geofísicos terrestres de magnetometria e polarização induzida espectral; b) Mapa de campo anômalo total proveniente do levantamento terrestre de magnetometria; c) Mapa de slices horizontais de resistividade; d) Mapa de slices horizontais de cargabilidade. Ambos os mapas de slices são a uma profundidade de 10m em relação à superfície (ou terreno), resultantes da integração dos levantamentos de IP espectral adquiridos nas 3 fases (2009, 2012 e 2016).....	8
Figura 1. 5 – a) Modelo digital de terreno e localização dos furos de sondagem da área de estudo; b) Modelo digital de terreno e localização dos furos de sondagem da área de estudo em nova perspectiva; c) Furos de sondagem e localização das amostras petrofísicas ao longo dos furos.	20
Figura 2. 1 – a) Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões; b) Domínios tectônicos da Província Mantiqueira; c) Zoom da área de estudo que mostra principais unidades geotectônicas, como Bacia do Camaquã, Terreno São Gabriel, Terreno Taquarembó, Terreno Tijucas e Batólito Pelotas, que são pertencentes ao Escudo Sul-Riograndense, Brasil. Modificado de Philipp et al., (2016).	14
Figura 2. 2 – a) Geologia regional da Bacia do Camaquã que engloba a área de estudo, principais estruturas, cidades próximas e mineralizações do Depósito Santa Maria; b) Geologia local do Depósito Santa Maria. Modificado de NEXA Resources, (2015).....	16
Figura 2. 3 - a) Representação da coluna estratigráfica com breve descrição da composição geológica de cada formação presente no Depósito Santa Maria; b) Fotos dos principais litotipos do depósito. Modificado de NEXA Resources, (2015).	18
Figura 2. 4 - a) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita disseminada; b) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita stringer; c) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita maciça; d) Mineralizações do sistema Cu com calcopirita e calcocita; e) Mineralizações do sistema Cu com calcopirita e bornita.....	19

Figura 2. 5 - Representação dos três plugs que foram serrados das amostras enviada para o laboratório de petrofísica.	21
Figura 2. 6 - a) Gráfico de classificação de arenitos de acordo com Herron (1988), com os 20 arenitos do Depósito Santa Maria; b) Gráfico de proveniência de acordo com Roser and Korsch (1988), com as 38 amostras do Depósito Santa Maria, onde os diferentes símbolos classificam a intensidade de alteração destas. Discriminant Function 1 = (-1.773x TiO ₂ %) + (0.607x ₂ , Al ₂ O ₃ %) + (0.76x Fe ₂ O ₃ %) + (-1.5x MgO %) + (0.616xCaO%) + (0.509x Na ₂ O %) + (-1.22x K ₂ O %) + (-9.09). Discriminant Function 2 = (0.445x TiO ₂ %) + (0.07x ₂ , Al ₂ O ₃ %) + (-0.25x Fe ₂ O ₃ %) + (-1.142x MgO %) + (0.432x Na ₂ O %) + (1.426x K ₂ O %) + (-6.861).	24
Figura 2. 7 – a) Histograma de densidade (g/cc); b) Histograma de susceptibilidade magnética (SI); c) Histograma de velocidade de onda P (m/s); d) Histograma de resistividade (Ohm*m); e) Histograma de condutividade (mS/m); f) Histograma de cargabilidade (mV/V).	26
Figura 2. 8 – a) Amostras SM11C ilustra a baixa porcentagem de sulfeto; b) Amostra SM15B ilustra a alta porcentagem de sulfetos; c) Amostra SM10A representa a rocha pouco alterada; d) Amostra SM19A mostra uma rocha muito alterada; e) Arenito de granulometria fina e com alta porcentagem de sulfeto; f) Arenito de granulometria fina e com baixa porcentagem de sulfeto. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Cb - Carbonatos, Gn – Galena, Bo - Bornita, Kfs – K feldspato, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Sph – Esfalerita e Ilm – Ilmenita.	27
Figura 2. 9 – a) Amostra SM02B representa alta porcentagem de minerais magnéticos com granulação fina; b) Amostra SM06B mostra baixa porcentagem de minerais magnéticos com granulação grossa; c) Arenito pouco alterado, com valores de mica e carbonato inferiores a 14%; d) Arenito muito alterado, com valores de mica e carbonato de 33%. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Gn – Galena, Bo - Bornita, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Sph – Esfalerita e Ilm – Ilmenita.	29
Figura 2. 10 – a) Amostra SM12B ilustra alteração hidrotermal fraca; b) Amostra SM22A ilustra alteração hidrotermal forte; c) Amostra SM33A mostra fraca alteração hidrotermal; d) Amostra SM23C exemplifica a alta alteração quanto a resistividade; e) Amostra SM07C representa a baixa alteração quanto a cargabilidade; f) Amostra SM26B exemplifica alteração hidrotermal forte quanto a cargabilidade. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Cb - Carbonatos, Gn – Galena, Kfs – K feldspato, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Py – Pirita.	34
Figura 2. 11 - a) Gráfico de porcentagem de sulfetos de cobre detectados pelo QEMScan versus parte por milhão de cobre detectados pela geoquímica; b) Gráfico de porcentagem de sulfetos de zinco detectados pelo QEMScan versus parte por milhão	

de zinco detectados pela geoquímica c) Gráfico de porcentagem da soma de sulfetos de chumbo e prata detectados pelo QEMScan versus parte por milhão da soma de chumbo e prata detectados pela geoquímica; d) Gráfico de porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro detectados pelo QEMScan versus porcentagem de hematita detectados pela geoquímica. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal..... 37

Figura 2. 12 - Diagrama ternário que exemplifica os fatores que influenciam nas propriedades físicas. Modificado de Dentith and Mudge, (2014)..... 38

Figura 2. 13 – a) Gráfico de dispersão com tendência crescente entre densidade e porcentagem de sulfetos; b) Gráfico de dispersão mostra a baixa influência de porcentagem de barita sobre a densidade; c) Gráfico caixa evidencia a tendência crescente para diferentes tipos de alterações hidrotermal; d) Gráfico caixa evidencia a tendência crescente para diferentes litotipos. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito..... 41

Figura 2. 14 – a) Gráfico de dispersão minerais magnéticos versus susceptibilidade que evidencia tendência decrescente; b) Gráfico de dispersão de porcentagem de pirita versus susceptibilidade magnética que evidencia tendência decrescente; c) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética, em grupos de acordo com tamanho do cristal do mineral magnético; d) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética, em grupos de acordo com alteração hidrotermal; e) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética, em grupos de acordo com litotipos. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito..... 43

Figura 2. 15 - a) Gráfico de dispersão mostra relação direta entre valores de densidade e velocidade de todas amostras; b) Gráfico de dispersão de porcentagem de sulfetos versus velocidade; c) Gráfico de dispersão entre porcentagem de pirita versus velocidade; d) Gráfico caixa de ranges de velocidade para diferentes intensidades de alterações hidrotermais; e) Gráfico caixa de ranges de velocidade para grupos de litotipos . Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.... 45

Figura 2. 16 - a) Gráfico de dispersão mostra relação inversamente proporcional entre resistividade e condutividade; b) Gráfico de dispersão sulfetos versus resistividade; c) Gráfico de dispersão entre a soma de mica + carbonatos versus resistividade; d) Gráfico

caixa de ranges de alteração hidrotermal. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal.	48
Figura 2. 17 - a) Gráfico de cargabilidade versus pirita com tendência crescente; b) Gráfico de cargabilidade versus pirita + sulfetos de cobre que mostra que o sulfeto de cobre inibe a resposta da pirita; c) Gráfico de cargabilidade versus pirita + mica com tendência crescente; d) Gráfico de cargabilidade versus pirita + carbonato+ mica com tendência crescente. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.	50
Figura 2. 18 – Gráfico sumariza a efetividade das propriedades físicas para mineralizações, alterações hidrotermais e litotipos do Depósito Santa Maria, e ainda o método geofísico equivalente a resposta petrofísica.....	51
Figura 3. 1 - Resultado do método de realce de anomalias, amplitude do sinal analítico, proveniente do campo magnético anômalo, junto a lineamentos e estruturas da área de estudo; b) Resultado do método de realce de anomalias, amplitude do sinal analítico, proveniente do campo magnético anômalo, junto aos limites de unidades geológicas da área de estudo.....	80
Figura 3. 2 – Exemplo de seção invertida de IP da linha SM74600; b) Exemplo de seção invertida de resistividade da linha SM74600.	81
Figura 3. 3 – a) Modelo 3D dos dados magnetométricos que evidencia anomalias provenientes de fontes profundas e localização de perfil onde a seção foi realizada; b) Seção realizada que corta a anomalia em evidência; c) Slice vertical que mostra profundidade de anomalias e formato planar.	83
Figura 3. 4 – a) Modelo 3D referente à magnetometria terrestre e localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas com os furos de sondagens e amostras petrofísicas, onde nota-se similaridade entre eles.	84
Figura 3. 5 – a) Seções de resistividade do levantamento realizado na área de estudo e localização de furos de sondagem objeto do estudo petrofísico; b) Seção L6574600 pertencente à área I e furos de sondagem que a cortam; c) Seção L6575800 pertencente à área II e furos de sondagem que a cortam; d) Seção L1500NE que corta as áreas I e III, furos de sondagem que a cortam e localização de zoneamento gerado por fratura; e) Seção L1750NE que corta à região III, furos de sondagem que a cortam e localização de zoneamento gerado por fratura.....	86
Figura 3. 6 - a) Modelo 3D referente à resistividade, com localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas com os furos de sondagens e amostras petrofísicas, que mostra incompatibilidade entre estes métodos.	87

Figura 3. 7 – a) Seções de IP com anomalias identificadas; b) Mapa de cargabilidade em planta, resultado do levantamento IP com aplicação de filtro Fraser, zonas anômalas associadas aos corpos de minério e furos de sondagens em evidência.	89
Figura 3. 8 - a) Modelo 3D referente à cargabilidade e localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas, furos de sondagens e amostras petrofísicas, que mostra paridade ou incompatibilidade entre estes métodos.....	90
Figura 3. 9 – a) Mapa de amplitude do sinal analítico, localização dos corpos de minérios e lineamentos da área de estudo; b) Mapa de cargabilidade em planta com aplicação de filtro Fraser, localização dos corpos de minérios e lineamentos da área de estudo; c) Corpos de minério Pb/Zn e Cu em texturas stringers e disseminadas modelados pela NEXA Resources.....	91
Figura 3. 10 – Guideline de caracterização multiescala de dados geológicos com técnicas analíticas, dados petrofísicos, dados geoquímicos e geofísicos integrados que vão de nível microscópico ao modelamento prospectivo.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de velocidade de onda P (m/s) para diferentes texturas dos sulfetos das amostras do depósito Santa Maria.	30
Tabela 2. 2 - Valores mínimos, médios, máximo, desvio padrão e número de unidades de velocidade de onda P (m/s) dos diferentes litotipos das amostras do depósito Santa Maria.	30
Tabela 2. 3 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de resistividade (Ohm*m) dos diferentes litotipos do depósito Santa Maria.	32
Tabela 2. 4 – Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para intervalos de frequência de ocorrência de sulfetos das amostras do depósito Santa Maria.....	32
Tabela 2. 5 – Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para classificação de intensidade de alteração das amostras do depósito Santa Maria.	33
Tabela 2. 6 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para os diferentes litotipos das amostras do depósito Santa Maria.	33
Tabela 2. 7 - Valores de densidade dos principais minerais e minérios (Airo and Säävuori, 2013).	39
Tabela 2. 8 - Range de susceptibilidade magnética (10 – 3 SI) e tipo de magnetização de principais minerais e minérios (Airo, 2015). As susceptibilidades estão em SI.....	42

Tabela 2. 9 - Valores de resistividade e condutividade dos principais minerais e minérios relevantes (King, 2007).....	46
Tabela 2. 10 - Valores de cargabilidade dos principais minerais e minérios relevantes (King, 2007).....	49
Tabela I. 1 - Tabela contendo informações de cada tipo de aeronave utilizada no levantamento executado pela CPRM, informações de cada equipamento utilizado, sistema de navegação e sistema de aquisição.	103
Tabela III. 1 - Tabela com informações gerais sobre a primeira e segunda campanhas realizadas em 2009.	113
Tabela III. 2 - Tabela com informações gerais sobre as campanhas realizadas em 2012 e 2016.	114

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma I. 1 - Diretrizes implementadas para a execução do levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil.....	105
Fluxograma II. 1 - Fluxograma mostra a rotina de controle de qualidade e correções realizadas no levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil.....	107
Fluxograma III. 1 - Informações do levantamento terrestres de IP como o domínio utilizado, período de decaimento, frequência utilizada, amostragem, arranjo, espaçamento e material dos eletrodos.	110
Fluxograma III. 2 - Características implementadas no levantamento magnetométrico e informações do equipamento utilizado.....	111

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A região das Minas do Camaquã, setor centro-oeste do Rio Grande do Sul, polo de extração de cobre entre as décadas de 40 e 90, é conhecida pelas ocorrências minerais de metais base, principalmente cobre (Cu), ouro (Ag), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Um dos prospectos é o depósito de Pb-Zn-(Cu-Ag) conhecido como Santa Maria (Renac et al., 2014).

A mineralização de Pb-Zn-(Cu-Ag) de Santa Maria foi mapeada como um sistema magmático-hidrotermal distal, do tipo epitermal de baixa temperatura (Bongiolo et al., 2011). Esse depósito ocorre na forma disseminada e maciça (stringers) em arenitos vermelhos do tipo *red beds* e conglomerados (minério *stratabound*), controlada por zonas de falhas (em fraturas e/ou brechas) com direção predominantemente N-S. Associadas à mineralização, ocorrem zonas de alteração hidrotermal ilitizadas e, localmente, piritizadas. O minério é formado por galena (Gn) e esfalerita (Sph) com ganga de barita (Brt) e calcita (Cal). A zona inferior do depósito apresenta cloritização, que acompanha os sulfetos calcopirita (Ccp) e bornita (Bo). Também ocorrem mineralizações de calcocita (Cc), bornita e calcopirita, hospedadas em falhas de direção NW-SE, que truncam as mineralizações de Zn-Pb-(Cu-Ag) (Brito et al., 2010).

A importância regional das mineralizações de cobre, ouro, chumbo e zinco, tanto para a macrorregião econômica quanto para os trabalhos de exploração e prospecção mineral, justifica este estudo detalhado. Os métodos empregados incluem caracterização de dados geofísicos (em escala de semi-detalle) e de propriedades físicas de rochas, abordagem até então inédita para essas ocorrências minerais. Assim, com a integração dos resultados obtidos durante o projeto, espera-se mapear a assinatura ou o *footprinting* das mineralizações epitermais de Zn-Pb-(Cu-Ag) do depósito Santa Maria, a partir do processamento de dados petrofísicos quantitativos, associado a dados mineralógicos e geoquímicos.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é identificar a assinatura petrofísica dos litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações epitermais de Pb-Zn-(Cu-Ag) do Depósito Santa Maria através da análise de dados petrofísicos e

mineralógicos de alta resolução. Adicionalmente, integraram-se os dados geoquímicos e geofísicos terrestres com o intuito de mapear o método prospectivo mais efetivo dentro do contexto geológico em apreço.

Para atingir esse objetivo central, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Mapear estruturas, a partir dados aerogeofísicos, para visualização de zonas mineralizadas no contexto regional;
- ii. Processar e interpretar dados geofísicos terrestres de magnetometria e polarização induzida espectral;
- iii. Analisar dados petrofísicos de alta resolução, tais como densidade, susceptibilidade, direção e intensidade de magnetização remanescente, velocidade sísmica de ondas primárias (P), condutividade, resistividade e cargabilidade obtidos em laboratório;
- iv. Desenvolver um banco de dados petrofísicos para identificar e avaliar a assinatura geoquímica da mineralização, de rochas hospedeiras, de alterações hidrotermais, bem como toda a cadeia de *footprints* e *pathfinders* de elementos relevantes;
- v. Integrar dados geofísicos (magnetometria terrestre e polarização induzida espectral) e informações geoquímicas/mineralógicas às propriedades físicas.

1.2. Localização

A área de estudo localiza-se no distrito Minas do Camaquã, que dista aproximadamente 59 km do município de Caçapava do Sul, principal centro urbano da região. O acesso é feito pela BR 392 até o trevo com a BR 153, onde toma-se acesso sinalizado para as Minas do Camaquã, e o restante do percurso é feito pela RS-625 (sem pavimentação) (Figura 1.1).

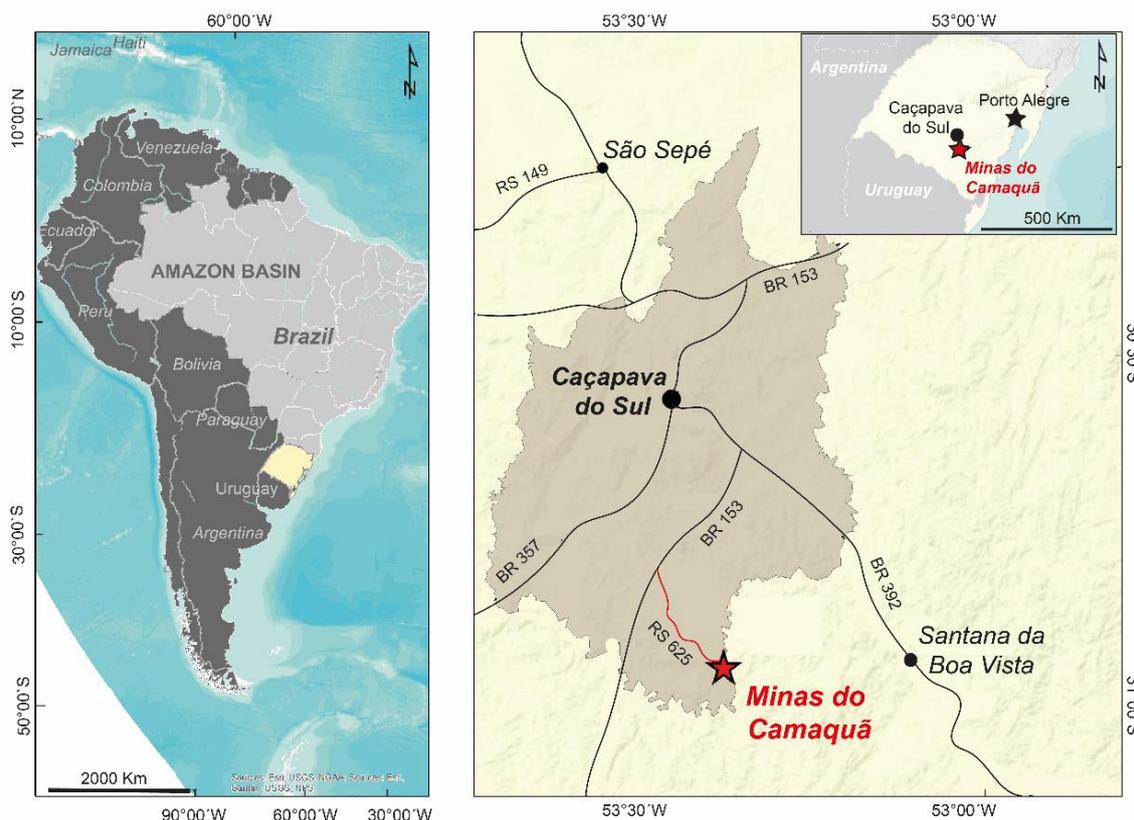


Figura 1. 1 - Localização da área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, principais municípios e acessos da região.

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 e geofísicos terrestres de alta resolução. Utilizaram-se ainda dados geológicos, geoquímicos, petrofísicos e mineralógicos para complementar e integrar aos dados.

1.3.1. Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria utilizados na pesquisa são provenientes do levantamento aerogeofísico do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil em parceria com a *LASA Prospecções S.A.* (CPRM, 2010). Este levantamento ocorreu entre 20 de fevereiro a 10 de agosto de 2010, na porção do extremo sul do Brasil, parte sudeste do estado do Rio Grande do Sul, que inclui a área de estudo, o depósito de Pb-Zn-(Cu-Ag) Santa Maria (Figura 1.2). A área total do levantamento foi de aproximadamente 159.800 km

lineares, com espaçamento entre linhas de voo de 500 m (direção NS) e 10.000 m para as linhas de controle (direção EW). No total, realizaram-se 633 linhas de voo (152.100,66 km) e 34 linhas de controle (7.688,55 km). A altura de voo do aerolevanteamento foi fixada em 100 m (CPRM, 2010).

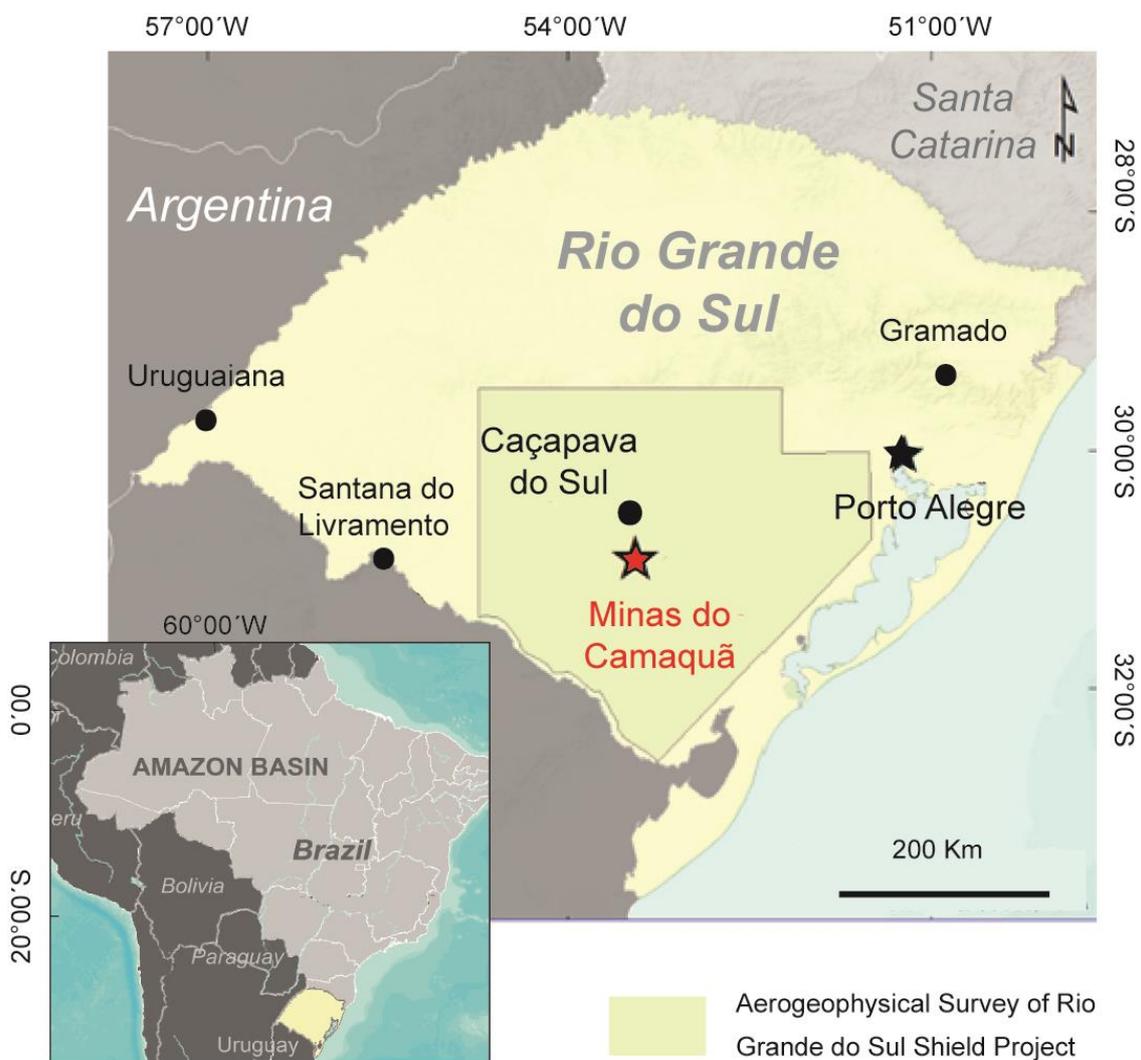


Figura 1.2 - Localização do polígono do levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM, principais municípios do estado, além da área de estudo.

As diretrizes básicas para a execução dos aerolevanteamentos deste projeto seguiram as etapas de seleção da base de operações, localizadas em Santa Maria - RS e Pelotas - RS; obtenção da autorização do Ministério da Defesa; preparação do plano de voo; obtenção dos materiais; ajustes e realização de testes dos equipamentos (diretrizes detalhadas, ANEXO I).

O processamento dos dados realizado pela CPRM envolveu a aplicação das rotinas do *software Oasis Montaj*, versão 7.1.1, correções, utilização de filtros, compilação das informações coletadas e apresentação dos resultados na forma de mapas nas escalas 1:100.000, 1:250.000 e 1:500.000, arquivos de banco de dados e *grids* (processamento detalhado, ANEXO II).

Para o tratamento destes dados, utilizaram-se técnicas para a confirmação de localização de limites (geológicos e estruturais), profundidades de corpos e feições estruturais, tais como os produtos derivados do campo magnético anômalo: amplitude do sinal analítico e derivada vertical, e também produtos derivados dos dados de contagem total da radiação gama emitidos por determinados elementos, bem como dos canais de K (%), eU (ppm), eTh (ppm) e composição ternária dos elementos K, Th e U (Figura 1.3).

1.3.2. Dados Geofísicos Terrestres

Os dados geofísicos terrestres utilizados na pesquisa são provenientes dos levantamentos realizados pela empresa NEXA *Resources*. A magnetometria foi aplicada para melhor definição das fontes rasas, delimitação dos corpos magnéticos e identificação de anomalias magnéticas de possível interesse. O levantamento foi executado pela empresa Geomag, no período de 24 de agosto a 8 de outubro de 2009, onde 74 km lineares foram coletados. O controle das variações diurnas do campo magnético foi realizado com um magnetômetro portátil (precessão de prótons *overhouser*) modelo GSM-19 desenvolvido pela *GEM Systems* em leituras com intervalos de 3 s e uso de um filtro de ruídos de 60 Hz (NEXA *Resources*, 2009a). Ambos os levantamentos recobriram as áreas I, II e III, que possuem as principais zonas mineralizadas identificadas em mapeamento geológico realizado pela NEXA *Resources*.

A polarização induzida espectral foi aplicada com foco nas mineralizações de chumbo, zinco e cobre. Este levantamento também foi executado pela Geomag em diversas etapas entre os anos de 2009, 2012 e 2016. Os equipamentos utilizados durante o levantamento foi um *IP* espectral no domínio do tempo desenvolvido pela *IRIS Instruments*, constituído por um receptor ELREC-Pro, um transmissor de corrente VIP 4000, alimentado por um gerador Honda de 10 kVA (maiores informações ANEXO III) (NEXA *Resources*, 2009b).

Na magnetometria terrestre, foram coletados dados com espaçamento entre linhas de 100 m e entre estações de 5 m. O levantamento geofísico de polarização induzida espectral de 2009 focou na resposta das mineralizações de Pb-Zn. Este adquiriu linhas no sentido E-W, com arranjo dipolo-dipolo de 50 m e, obteve 10 níveis de leitura. Os levantamentos de 2012 e 2016 focaram no sistema Cu, e foram executados com linhas no sentido NE-SW, novamente com arranjo dipolo-dipolo e, obteve 10 níveis de leituras (Figura 1.4) (maiores informações ANEXO III) (NEXA Resources, 2009b)

1.3.3. Dados Geoquímicos

Os dados laboratoriais de geoquímica foram adquiridos pela empresa ALS Brasil Ltda, no qual utilizaram as seguintes técnicas: trinta e oito elementos por fusão com borato de lítio e determinação por ICP-MS (ME-MS81); carbono e enxofre total por forno Leco e Espectroscopia de infra-vermelho (C-IR07 e S-IR08); seis elementos por ICP-M e digestão por água régia (ME-MS42); metais base com digestão por quatro ácidos e determinação por ICP-AES (ME-4ACD81); fusão com metaborato ou tetraborato de lítio e determinação por XRF (ME-XRF26); decomposição térmica por forno (OA-GRA05x); Cu, Pb e Zn com digestão por quatro ácidos (Cu-AA62, Pb-AA62 e Zn-AA62, respectivamente). Todos os resultados foram integrados em um banco de dados e disponibilizados para esta pesquisa.

1.3.4. Dados Petrofísicos

Os dados de petrofísica foram adquiridos no *Petrophysical Laboratory of the Council for Geoscience* na África do Sul. Este laboratório recebeu as contra amostras referentes às enviadas para o laboratório de geoquímica. As propriedades físicas adquiridas foram: densidade, susceptibilidade, direção e intensidade de magnetização remanescente, velocidade sísmica de ondas primárias (P), condutividade, resistividade e cargabilidade. Os equipamentos utilizados foram: balança de precisão Sartorius CP323S (para cálculo de densidade); *Pundit* PL200 da *Proceq* com 150 kHz (para aquisição de velocidade de onda P); Susceptibilímetro modelo MFK1-FA, fabricado pela *AGICO Advanced Geoscience Instruments Company* (para aquisição de susceptibilidade); *GDD Sample Core IP Tester* (aquisição de propriedades elétricas) (Council for Geoscience, 2017).

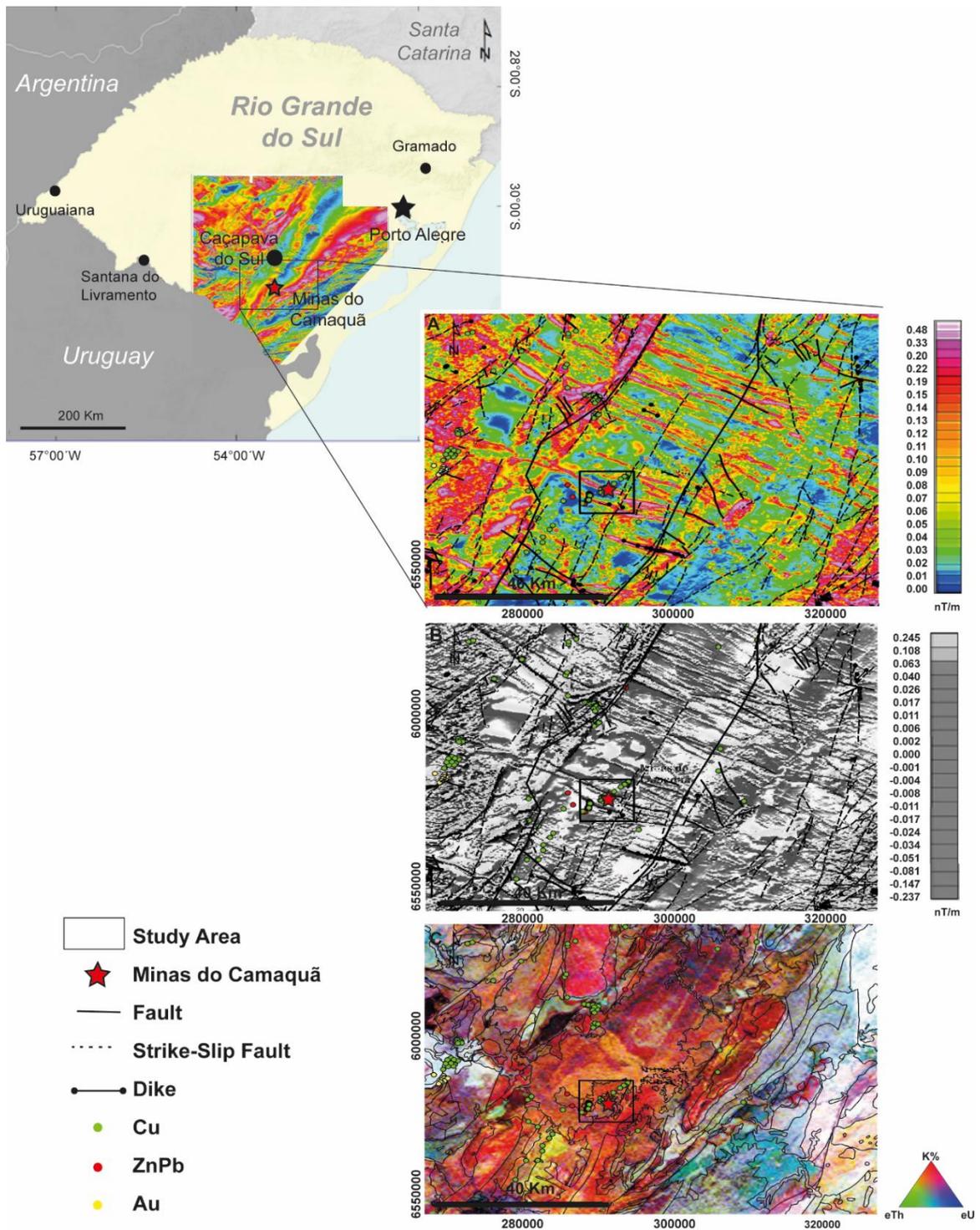


Figura 1.3 - a) Mapa de amplitude do sinal analítico e b) Mapa de primeira derivada vertical, ambos produtos do campo magnético anômalo medidos na aerogeofísica; c) Mapa de composição ternária dos elementos K, Th e U provenientes da contagem total da radiação gama emitidos por estes elementos. Modificado de CPRM, (2010).

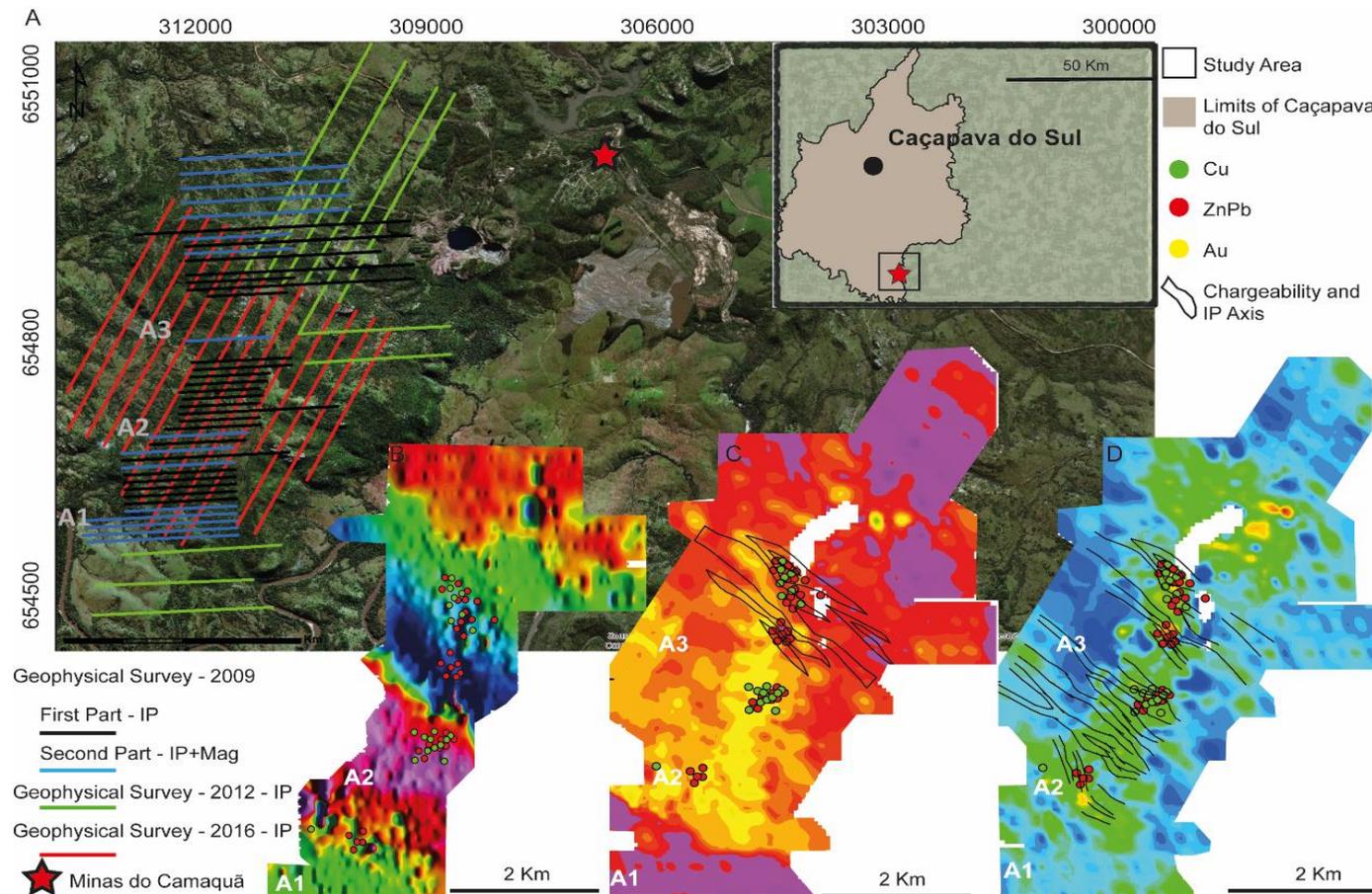


Figura 1. 4 - a) Mapa de localização da área de estudo e da área onde ocorreram os levantamentos geofísicos terrestres; b) Mapa de campo anômalo total; c) Mapa de slices horizontais de resistividade; d) Mapa de slices horizontais de cargabilidade. Ambos os mapas de slices são a uma profundidade de 10m em relação à superfície (ou terreno), resultantes da integração dos levantamentos de IP espectral adquiridos nas 3 fases (2009, 2012 e 2016).

1.3.5. Dados Mineralógicos

Para o estudo mineralógico das rochas, o sistema automatizado de análise de imagem QEMScan, do Laboratório QEMLAB, do Instituto de Geociências (UnB), foi utilizado. Trata-se de um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, modelo FEI Quanta 650, que opera com fonte de tungstênio, modo alto vácuo, 25 kV de aceleração do feixe e 10 nA de corrente na amostra. Acoplado a esse equipamento, há ainda dois espectrômetros por dispersão de energia (EDS) tipo SDD *Bruker XFlash* 5030. Foram adquiridas informações de mineralogia, feições texturais, associações mineralógicas, tamanho e tipo de partículas e grau de liberação mineral.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada no formato artigo. O “Capítulo I” inicia-se com uma breve introdução do trabalho, seguida de objetivos, localização, materiais e métodos e estrutura da dissertação. O “Capítulo II” é composto pelo artigo “Lithology, hydrothermal alteration and ore mineralogical signatures of petrophysical properties of the Pb-Zn (Cu-Ag) Epithermal Deposit of Santa Maria, RS” a ser submetido. O objetivo principal do artigo é mostrar a assinatura petrofísica dos litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações epitermais do depósito em estudo.

O “Capítulo III” consiste em resultados e discussões dos dados de geofísica terrestre, integrados aos produtos e conclusões do artigo. O “Capítulo IV” são as conclusões de todo mestrado. A dissertação visa identificar a resposta de diversas propriedades físicas, para entendimento de origem e trajetória de alterações e mineralizações relacionados do depósito, capazes de reduzir custos na área de prospecção mineral.

CAPÍTULO II

2. Lithology, hydrothermal alteration and ore mineralogical signatures of petrophysical properties of the Pb-Zn (Cu-Ag) Epithermal Deposit of Santa Maria, RS.

Araujo, M. C. ⁽¹⁾; Silva, A. M. ⁽¹⁾; Barbosa, P. F. ⁽¹⁾; Boniatti, J. H. ⁽²⁾; Früchting, A. ⁽²⁾;
Lago, S. B. ⁽²⁾; Betancourt, R. H. ⁽²⁾

Universidade de Brasília ⁽¹⁾

NEXA Resources ⁽²⁾

RESUMO

O entendimento da assinatura petrofísica em superfície e subsuperfície é de extrema importância na exploração mineral, pois a criação de processos de interpretações a partir do conhecimento avançado sobre o comportamento das propriedades físicas em diferentes rochas, alterações hidrotermais e mineralizações podem alavancar estudos de novos alvos ou novas abordagens na prospecção, o que se resume em redução de custos e tempo.

Esta pesquisa tem como alvo o depósito epitermal de Pb-Zn-(Cu-Ag) de Santa Maria, situado no distrito de Minas do Camaquã, município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Trata-se de sistema magmático-hidrotermal distal, com mineralizações controladas por sistemas de falhas em arenitos e conglomerados, que hospedam zonas de alterações hidrotermais que contém illita, clorita e pirita, além dos minerais galena, esfalerita, calcopirita e bornita. O objetivo principal é identificar a assinatura petrofísica das rochas encaixantes, alterações hidrotermais e mineralizações do depósito. Para isso, foram analisados dados petrofísicos e mineralógicos de alta resolução, integrados a dados geoquímicos.

A metodologia inicial aplicada consiste na seleção de amostras de furos de sondagens representativas da litologia predominante, das rochas alteradas e das mineralizações hidrotermais do depósito; submissão das amostras a análises geoquímicas de elementos maiores, traço e terras raras; análises petrofísicas de densidade, susceptibilidade magnética, velocidade de onda primária (P), resistividade, condutividade e cargabilidade; e análises mineralógicas a partir do sistema automatizado de análise de imagem *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy* (QEMScan).

As análises geoquímicas referentes a aproximadamente 15 cm³ de amostra, possibilitaram a classificação dos arenitos do depósito e suas respectivas proveniências, bem como a identificação de anomalias e elementos químicos farejadores das mineralizações.

O mapeamento quantitativo mineralógico permitiu quantificar, em lâminas delgadas de 2 cm, os principais sulfetos que caracterizam o depósito, tais como bornita, galena, esfalerita, calcopirita, e, secundariamente, calcocita e pirita; a classificação do cristal dos sulfetos em fina, média e grossa; a intensidade das alterações hidrotermais em fraca, moderada e forte; e a quantificação de elementos de alteração como mica e carbonatos. A junção das informações supracitadas permitiu a comparação direta entre elementos químicos e seus sulfetos, e a comprovação que apesar do suporte amostral ter uma diferença de 15 cm³ para 2 cm, estas são proporcionais.

A petrofísica e os resultados de QEMScan permitiram o entendimento da assinatura de cada propriedade física junto a litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações. A densidade foi a propriedade física mais efetiva no mapeamento destes itens e as propriedades elétricas foram as mais complexas e menos efetivas, pois apenas a alteração hidrotermal mostrou-se diretamente mapeável.

O volume de dados petrofísicos permitiu uma caracterização espacial das propriedades dos litotipos, das alterações hidrotermais e das mineralizações. O entendimento das propriedades físicas deste contexto geológico, mostrou que para depósito epitermais com mineralizações de Pb, Zn e Cu, o método geofísico mais eficaz seria a gravimetria, e os métodos mais abstrusos seriam os elétricos, uma vez que dependem de vários fatores. Finalmente, a petrofísica deve ser utilizada em diversos meios prospectivos, na compreensão do ambiente geológico, pois reduzirá os gastos com metodologias geofísicas pouco eficazes, acelerarão a pesquisa mineral e reduzirão recursos técnico-financeiros.

Palavras chaves: *Petrofísica, QEMScan, Alteração hidrotermal, Mineralizações, Minas do Camaquã.*

2.1. Introdução

O depósito de Pb-Zn-(Cu-Ag) conhecido como Santa Maria localiza-se nas Minas do Camaquã, distrito de Caçapava do Sul no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Este é composto por rochas sedimentares siliciclásticas, principalmente arenitos, conglomerados e ritmitos e, eventualmente em menor porção, rochas intrusivas rasas (ou vulcânicas) de composição intermediária. O alvo é marcado por alterações hidrotermais e disseminações de sulfetos de Pb, Zn e Cu (Fambrini et al., 2007).

As alterações hidrotermais associadas aos sistemas Zn/Pb mais importantes são ilitização e cloritização, e apresentam como principais tipos de minério esfalerita e galena. Significativas ocorrências de Cu a partir de brechas hidrotermais apresentam alteração quartzo sericítica, hematitização e carbonatação, com feldspatização subordinada, e tem como principais tipos de minério calcocita, calcopirita e bornita (NEXA Resources, 2015).

A importância regional das mineralizações deste depósito, tanto para a macrorregião econômica quanto para os trabalhos de exploração e prospecção mineral, justifica este estudo detalhado da resposta petrofísica da área. As medidas de parâmetros físicos são aplicadas na exploração mineral com o objetivo de analisar, modelar e gerar alvos de forma mais acurada. De forma geral, os dados de susceptibilidade magnética e densidade são os mais utilizados em projetos exploratórios e, mais raramente, em mapeamentos geológicos (McGladrey et al., 2017; Williams, 2009).

A compreensão e caracterização da assinatura das propriedades físicas das rochas encaixantes, das alterações hidrotermais e mineralizações é essencial para abranger conhecimentos de depósitos como um todo e determinar aplicação de métodos geofísicos apropriados, capazes de reduzir custos e tempo na exploração. Análises mais precisas que utilizam uma gama maior de propriedades físicas tais como remanência, resistividade, condutividade, cargabilidade, porosidade e ondas s, ainda são incipientes. Estudos de caso como o desenvolvido por Bérubé et al., (2018) com integração de dados petrofísicos, mineralógicos e geoquímicos, ainda são raros.

A atual pesquisa integrou a petrofísica à dados geoquímicos e mineralógicos, capazes de auxiliar no entendimento da resposta petrofísica dos litotipos, das alterações hidrotermais e mineralizações do depósito Santa Maria.

2.2. Geologia Regional

O contexto geotectônico ao qual pertence a área de estudo está relacionado ao sistema orogênico Brasileiro - Pan Africano, definido como um conjunto de orógenos neoproterozoicos diacrônicos, do qual faz parte a Província Mantiqueira (Philipp et al., 2016). Esta província surgiu durante a colisão dos crátons Kalahari e Rio de La Plata e engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, que distribuem-se desde o sul do Estado da Bahia até o Estado do Rio Grande do Sul (Borba, 2006) (Figura 2.1a e 2.1b).

O Estado do Rio Grande do Sul localizado na porção sul da Província Mantiqueira denominada Escudo Sul Rio-grandense (ESRG), a qual é composta pelos orógenos Dom Feliciano e São Gabriel (da Silva et al., 2005). A região é proveniente de uma zona de acreção e retrabalhamento crustal, juntamente com magmatismo e sedimentação brasileiros associados, que surgiram em situações pré-colisionais, colisionais e pós-colisionais (Brito Neves and Cordani, 1991). O ESRG divide-se em quatro unidades geotectônicas: Terreno Taquarembó, Arco São Gabriel, Terreno Tijucas e Batólito Pelotas (Philipp et al., 2016) (Figura 2.1c).

Repousam sobre as unidades tectônicas do ESRG as litologias pertencentes à Bacia do Camaquã, as quais compõem de forma dominante a área de estudo do presente trabalho. A bacia recorda quatro pulsos tectônico-vulcano sedimentares consecutivos (Paim et al., 2014), que são vinculados a diferentes ambientes tectônicos com distintas assinaturas vulcânicas, cujos registros são limitados por discordâncias angulares. Logo, adota-se a descrição simplificada da Bacia ser constituída por rochas sedimentares siliciclásticas e vulcanogênicas no geral (Basei et al., 2000).

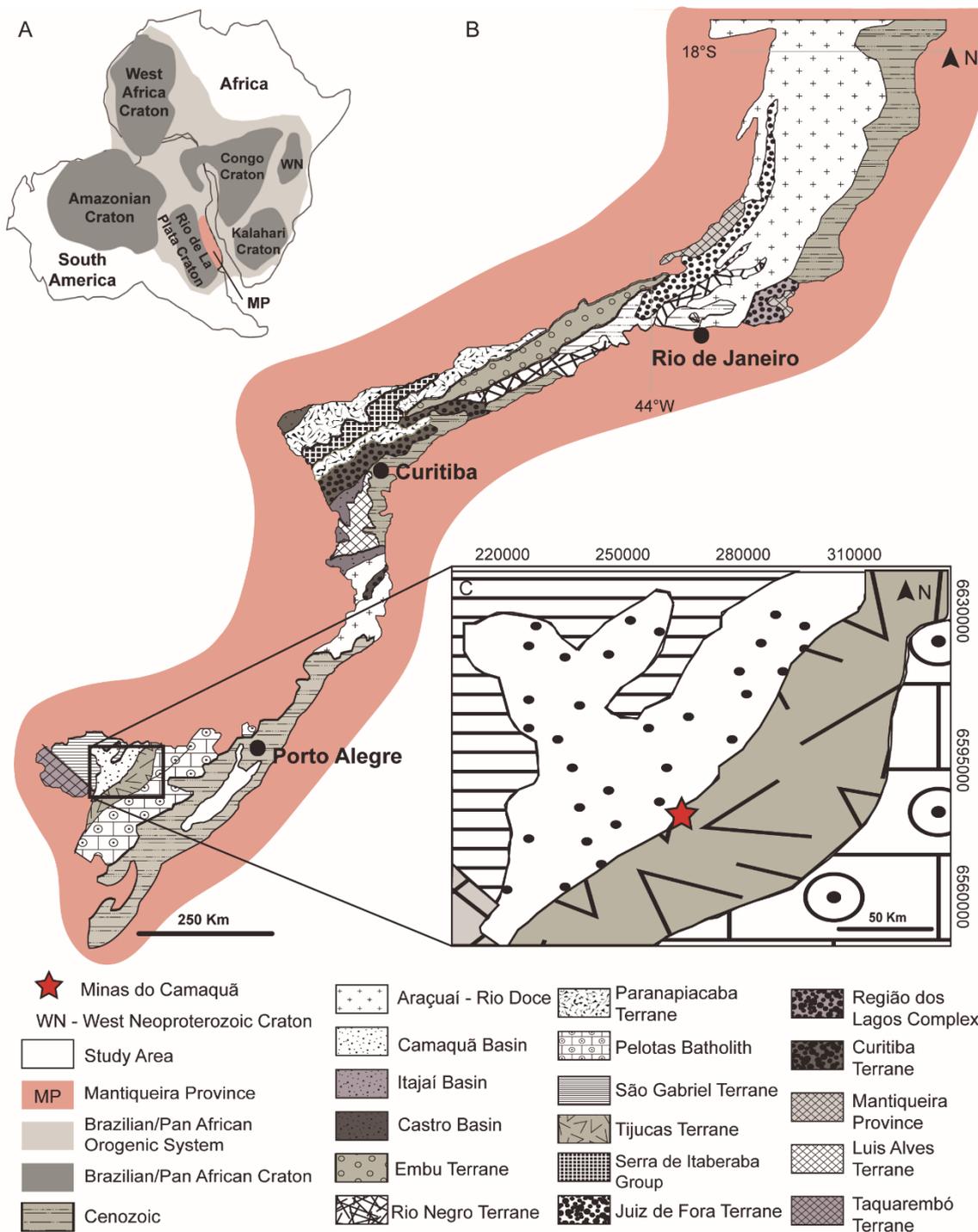


Figura 2. 1 – a) Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões; b) Domínios tectônicos da Província Mantiqueira; c) Zoom da área de estudo que mostra principais unidades geotectônicas, como Bacia do Camaquã, Terreno São Gabriel, Terreno Taquarembó, Terreno Tijuca e Batólito Pelotas, que são pertencentes ao Escudo Sul-Riograndense, Brasil. Modificado de Philipp et al., (2016).

Da base para o topo, a bacia é composta pelas seguintes unidades: Grupo Maricá, Grupo Bom Jardim, Formação Acampamento Velho, Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e Suíte Intrusiva Rodeio Velho (Figura 2.2a). Sua base é marcada pelos distintos sistemas deposicionais do Grupo Maricá, compostos por 2.000 a 2.500 m de arenitos arcoseanos, conglomerados e pelitos (Borba, 2006). O Grupo Bom Jardim tem 4.000 m de espessura e é composto por uma sucessão de rochas sedimentares e rochas extrusivas latíticas, andesíticas e dacíticas, além de tufos grossos ricos em material cristalino e vítreo, lapilli-tufos e brechas. A Formação Acampamento Velho apresenta 700 m de sucessões de rochas extrusivas riolíticas a basálticas, e de rochas piroclásticas geradas em ambientes subaéreos, que incluem tufos, lapilli-tufos e brechas (Fambrini et al., 2007).

O Grupo Santa Bárbara é o principal hospedeiro das mineralizações de Pb, Zn e Cu e, é composto por arenitos, conglomerados e siltitos avermelhados, caracterizado por uma sucessão aluvial a marinha, com a deposição de rochas siliciclásticas em ambientes aluviais, costeiros e deltáicos. O Grupo Guaritas é caracterizado por arenitos, conglomerados e ritmitos areno-pelíticos, organizados em duas sequências deposicionais eólicas e uma sequência de origem fluvial discordante. Intercalados à sua base, são encontrados derrames de rochas basálticas alcalinas, pertencentes à Suíte Intrusiva Rodeio Velho (Fambrini et al., 2007)(Figura 2.2b).

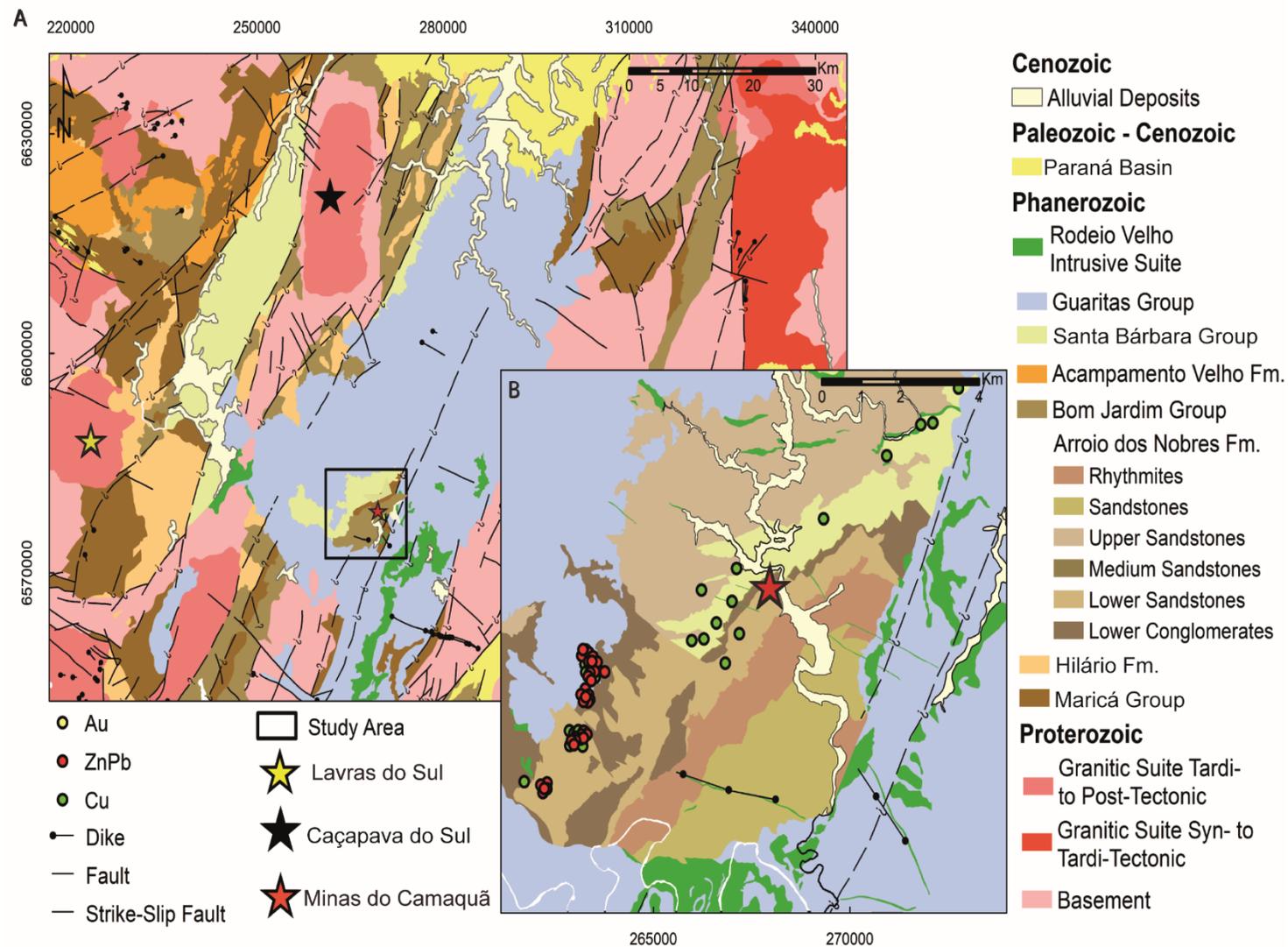


Figura 2. 2 – a) Geologia regional da Bacia do Camaquã que engloba a área de estudo, principais estruturas, cidades próximas e mineralizações do Depósito Santa Maria; b) Geologia local do Depósito Santa Maria. Modificado de NEXA Resources, (2015).

2.2.1. Geologia, alterações e mineralizações do Depósito Santa Maria

O depósito de Pb–Zn–(Cu–Ag) de Santa Maria está localizado na Minas do Camaquã, que destaca rochas hospedeiras do Grupo Santa Bárbara (Fambrini et al., 2007). Segundo Veigel and Dardenne, 1990, o depósito apresenta cinco níveis litológicos bem definidos: arenito inferior, conglomerado inferior, arenito intermediário, conglomerado superior e arenito superior, do qual os conglomerados tem uma granulometria maior, que grada lateralmente para ruditos de granulometria menor, em camadas mais finas e com intercalações arenosas mais desenvolvidas. A figura 2.3a ilustra a coluna estratigráfica das principais formações geológicas da área de estudo, e a figura 2.3b mostra os principais aspectos de cada litotipo presente no depósito.

Biondi, (2015) descreve a mineralização deste depósito como estratiforme, ao qual é controlada pela morfologia dos sedimentos. O minério ocorre na forma disseminada em arenitos de cores claras, ou em filonetes de poucos centímetros de espessura, e tem como paragênese sulfetos como pirita, galena, esfalerita e mais raramente calcopirita, bornita e calcocita, e ainda stephanita, prata nativa e covelita, todas associadas a zonas interpretadas como paleoxidação.

No depósito Santa Maria, as camadas mergulham suavemente, entre 5° e 10° para NW, que contrasta com a forte inclinação de 30° e 45° NW de outro depósito da Minas do Camaquã, o Depósito de Cu–(Au–Ag), nomeado Camaquã. A baixa expressão da fase filoniana, pode ser relacionada à ausência de falhamentos mais efetivos que propiciam a concentração dos sulfetos de Pb e Zn (Veigel and Dardenne, 1990).

A gênese do depósito de Santa Maria é controversa, pois autores consideram três diferentes hipóteses: 1) vulcanogênico distal (Biondi, 2015); 2) diagenética (Veigel and Dardenne, 1990); ou 3) magmática–hidrotermal (Remus et al., 2000). Para esta pesquisa será considerada a gênese magmática–hidrotermal, a mesma adquirida pelos geólogos do Projeto Santa Maria, além do depósito se configurar como epitermal de sulfetação intermediária. O termo sulfetação intermediária (Sillitoe and Hedenquist, 2003) foi recentemente introduzido para descrever a mineralização distal equivalente à porção de temperatura mais baixa e de fluido menos ácido.

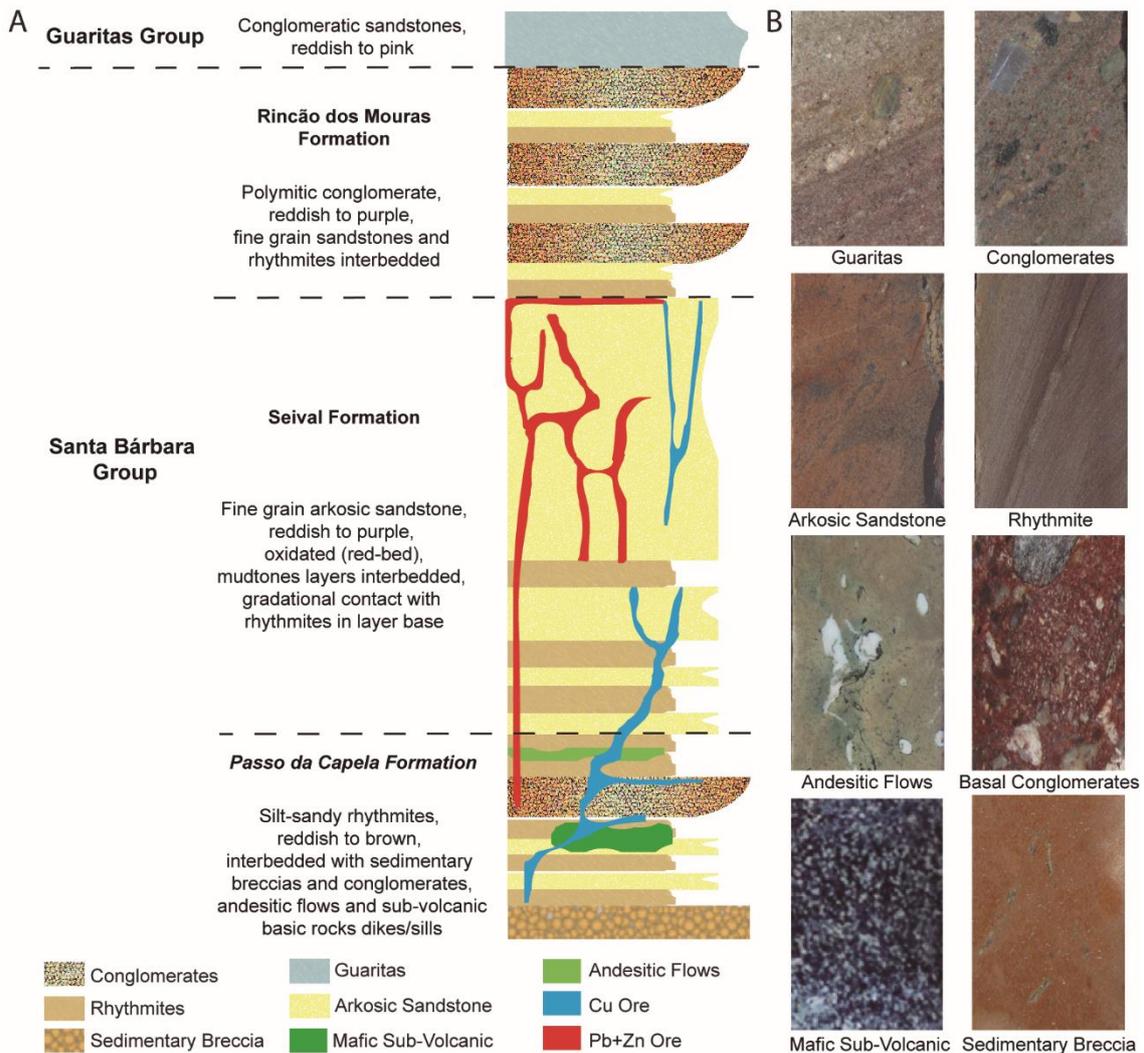


Figura 2. 3 - a) Representação da coluna estratigráfica com breve descrição da composição geológica de cada formação presente no Depósito Santa Maria; b) Fotos dos principais litotipos do depósito. Modificado de NEXA Resources, (2015).

As alterações hidrotermais são fatores que caracterizam o depósito Santa Maria, pois podem ser associadas ao sistema de mineralização de cobre, chumbo, zinco e em alguns momentos prata. Quando associadas aos sistemas Zn/Pb, as alterações mais importantes são ilitização e cloritização, além de, piritização, quartzo-sericitização, carbonatação, baritização e hematitização, que ocorrem de forma secundária (Bongiolo et al., 2011).

A ilitização é utilizada para diferenciar litotipos, pois altera as rochas encaixantes de forma pervasiva seletiva, que proporciona à rocha uma coloração branca à alaranjada. A zona ilitizada apresenta calcopirita+bornita traço e, subordinadamente, esfalerita e galena na porção superior em diferentes texturas (Figura 2.4a, 2.4b e 2.4c). A cloritização ocorre geralmente com aspecto

pervasivo na matriz das rochas e contém calcopirita+bornita traço e, subordinadamente, galena na base do depósito (NEXA Resources, 2015).

Quando a alteração é associada ao sistema Cu, ocorre preferencialmente uma alteração quartzo-sericítica na porção leste da área de estudo e hematitização na porção NW do sistema *faultbound* de trend NW. Em algumas outras regiões, identificam-se alterações quartzo-sericítica e carbonatação, com feldspatização subordinada (Bongiolo et al., 2011).

As alterações quartzo-sericítica e hematitização apresentam calcocita, calcopirita e bornita como principais sulfetos (Figura 2.4d e 2.4e). Quando a alteração quartzo sericítica acompanha a carbonatação, barita está presente. Neste local, o minério apresenta morfologia discordante e com disposição venular (*stringer*) ou em brechas, e também de forma disseminada com predomínio de bornita (Brito et al., 2010).

A disposição do minério é controlada pela porosidade e permeabilidade das rochas hospedeiras. Galena e esfalerita alojam-se em porosidade primária, que proporciona uma típica morfologia *stratabound* e disseminada ao minério. Em contrapartida nas camadas de permeabilidade menor, o minério possui forma venular (*stringer*) e, apresenta sulfetos de Pb e Zn em finas vênulas ou em filonetes maciços (NEXA Resources, 2015).



Figura 2. 4 - a) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita disseminada; b) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita stringer; c) Mineralizações do sistema Zn/Pb com predomínio de esfalerita maciça; d) Mineralizações do sistema Cu com calcopirita e calcocita; e) Mineralizações do sistema Cu com calcopirita e bornita.

2.3. Materiais e Métodos

Foram escolhidas 38 amostras de furos de sondagem (Figura 2.5) em arenitos, ritmitos, conglomerados e andesitos, mineralizados ou não. Cada amostra foi dividida em alíquotas, do qual $\frac{1}{4}$ foi destinado à obtenção de dados geoquímicos, $\frac{1}{4}$ destinado à coleta de dados petrográficos e petrofísicos e $\frac{2}{4}$ reservados.

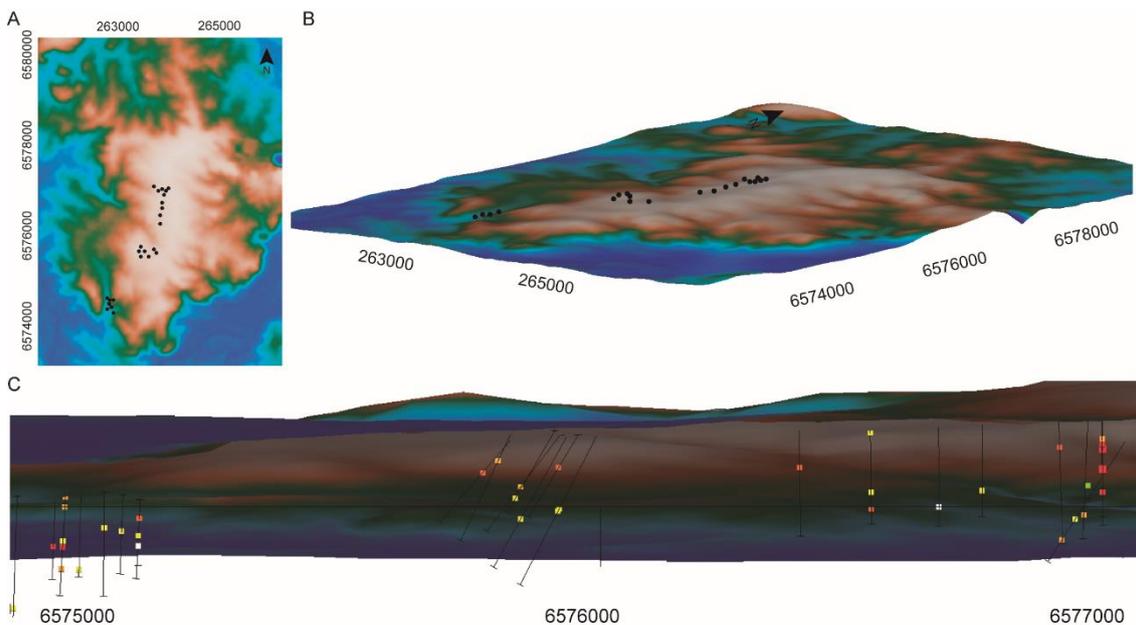


Figura 1. 5 – a) Modelo digital de terreno e localização dos furos de sondagem da área de estudo; b) Modelo digital de terreno e localização dos furos de sondagem da área de estudo em nova perspectiva; c) Furos de sondagem e localização das amostras petrofísicas ao longo dos furos.

2.3.1. Dados Geoquímicos

As análises químicas de rocha foram executadas pela ALS Brasil Ltda em $\frac{1}{4}$ de alíquota de cada amostra. As concentrações de elementos maiores (Apêndice I), traços (Apêndice II), e terras raras (Apêndice III), foram obtidas respectivamente por fluorescência de raios-X, com limite de registro 0.1%, e por espectrometria de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), via fusão de borato de lítio e digestão por quatro ácidos, no caso do Sc.

2.3.2. Dados Petrofísicos

Os dados de densidade, susceptibilidade, velocidade sísmica de ondas primárias (P), condutividade, resistividade e cargabilidade foram adquiridos no

Petrophysical Laboratory of the Council for Geoscience na África do Sul. (Apêndice IV).

Os equipamentos utilizados foram: balança de precisão Sartorius CP323S (para cálculo de densidade); transdutor *Pundit* PL200 da *Proceq* com 150 kHz (para aquisição de velocidade de onda P); susceptímetro MFK1-FA da AGICO (para aquisição de susceptibilidade) e testador *GDD Sample Core IP* (para aquisição de propriedades elétricas (Council for Geoscience, 2017).

Todas amostras destinadas às análises petrofísicas foram fotografadas para registro tanto das orientações espaciais, quanto da eventual presença de mineralização. Posteriormente, foram serradas e divididas em três blocos (A, B e C) com registro de topo e base, para a aquisição das propriedades físicas.

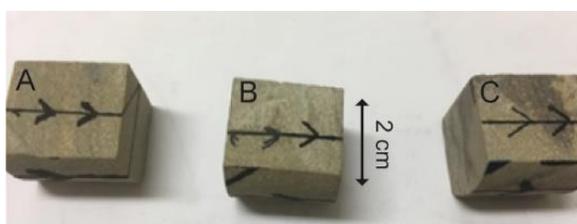


Figura 2. 5 - Representação dos três plugs que foram serrados das amostras enviada para o laboratório de petrofísica.

Os blocos destinados às medidas de densidade foram submetidos a um processo de secagem durante 24 h a 110°C, anterior à pesagem. Para a medida de velocidade de onda P, não houve necessidade de preparos prévios. Para o cálculo de magnetização remanescente, a razão entre susceptibilidade magnética e intensidade magnética, antes e depois da desmagnetização de cada bloco, foi calculada pelo magnetômetro AGICO JR6-A (valores de campo total da Terra foram obtidos no endereço eletrônico da página National Oceanic and Atmospheric Administration, 2007). Este equipamento aplica campos magnéticos alternados sobre uma amostra, que a gira em torno de dois eixos perpendiculares entre si, que resulta em um decaimento linear do campo magnético até zero. O aumento progressivo do campo magnético aplicado na amostra resulta na desmagnetização dos elementos. Para blocos orientados e não orientados, a desmagnetização utilizou incrementos de 2,5 nT a 30 nT (Council for Geoscience, 2017).

Os blocos para a aquisição de propriedades físicas elétricas, como condutividade, resistividade e cargabilidade, inicialmente passaram por um

processo de saturação com água e aplicação de voltagem constante de 12 V. O controle de qualidade realizado no laboratório se baseou na aquisição de dados dos três blocos, A, B e C, do qual para qualquer valor anômalo, o bloco em questão era submetido a uma inspeção visual de mineralizações, fraturas ou demais características que justificassem aquele valor, seguido de uma nova aquisição de dados da propriedade (Council for Geoscience, 2017).

Após o recebimento do banco de dados um novo controle de qualidade foi realizado, onde mínimo, média, máximo, desvio padrão e variância populacional foram analisados. Entre os *plugs* A, B e C de cada amostra, um desses foi escolhido com base em anomalias das propriedades físicas, em relação à média, ou mineralizações e alterações hidrotermais, para representar as amostras no banco de dados.

Gráficos caixas (*boxplot*) foram desenvolvidos para avaliar a distribuição empírica das propriedades físicas em relação a alguma variável, e estes irão apresentar mínimo, máxima, intervalo no qual 50% das amostras estão agrupadas (representado pela “caixa”), mediana (representada pela linha dentro da “caixa”) e a média (representada pelo x). As porcentagens dos demais minerais podem ser conferidas no Apêndice V.

2.3.3. Sistema automatizado de análise de imagem (QEMScan)

Os blocos destinados aos ensaios petrofísicos foram laminados e submetidos à análise petrográfica por microscopia ótica e microscopia eletrônica. Em microscopia eletrônica, as observações se deram com o auxílio de um sistema automatizado de análise de imagem (QEMScan) disponível no Instituto de Geociências (IG-UnB). Trata-se de um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, modelo *Quanta 650F*, e opera com fonte de tungstênio, modo alto vácuo, 25 kV de aceleração do feixe e 10 nA de corrente na amostra; no qual estão acoplados dois espectrômetros por dispersão de energia (EDS) tipo SDD *Bruker XFlash 5030*. Cada lâmina foi completamente escaneada com espaçamento pixel a pixel de 15 μm .

Após a análise, foi disponibilizado um mapa mineral para cada amostra, com 30 minerais identificados e uma tabela com a porcentagem de cada mineral na amostra. A fim de realçar as mineralizações de Pb-Zn e Cu, foi realizado um agrupamento para destacar minerais específicos como: galena, esfalerita,

bornita, ilmenita, carbonatos, illita, k-feldspato e quartzo. Os resultados de todas as lâminas analisadas possuem a mesma escala de cor.

2.4. Resultados

Os grandes litotipos aos quais as amostras estão vinculadas, foram caracterizados de acordo com os dados geoquímicos gerais (*bulk*) das rochas. Por outro lado, de acordo com a ocorrência de grupos minerais indicadores de alteração hidrotermal (principalmente carbonatos e micas), as amostras foram classificadas em fortemente e fracamente alteradas, sempre levando em consideração os intervalos médios entre tais. Essa sistematização foi possível com o uso dos dados de análise mineralógica via QEMScan que também foram úteis na distinção das seguintes texturas de ocorrência de minerais sulfetados: *stringer* ou disseminada e não sulfetados, além da classificação do tamanho da matriz dos cristais de sulfetos. Em algumas situações optou-se pelo realce de minerais como bornita, galena, esfalerita e ilmenita, que são os principais do depósito Santa Maria, a partir da estratégia de colocar os demais minerais identificados na coloração preta. A seguir, serão apresentados os dados de geoquímica, petrofísica e mineralógicos das amostras utilizadas.

2.4.1. Geoquímica e técnicas analíticas (QEMScan)

Dados de elementos maiores (Apêndice VI), traço (Apêndice VII) e terras raras (Apêndice VIII), foram agrupados em busca da assinatura química da rocha, bem como de suas respectivas anomalias para compreensão de perda e ganho dos elementos por amostra.

Das 38 amostras selecionadas para a pesquisa, 20 foram descritas inicialmente como arenitos arcoseanos, pertencentes ao Grupo Guaritas. Com base no diagrama de Herron (1988) alguns amostras foram classificadas como arcoseanos e as demais como litoarenitos e grauvacas (Figura 2.6a). As 38 amostras do depósito foram submetidas ao diagrama de discriminação, que baseia-se em concentrações de elementos maiores fixos e móveis (TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O) (Roser and Korsch, 1988), para decifrar suas proveniências, uma vez que podem ser derivadas de diferentes rochas, desde rochas cristalinas a rochas sedimentares pré existentes (Figura 2.6b).

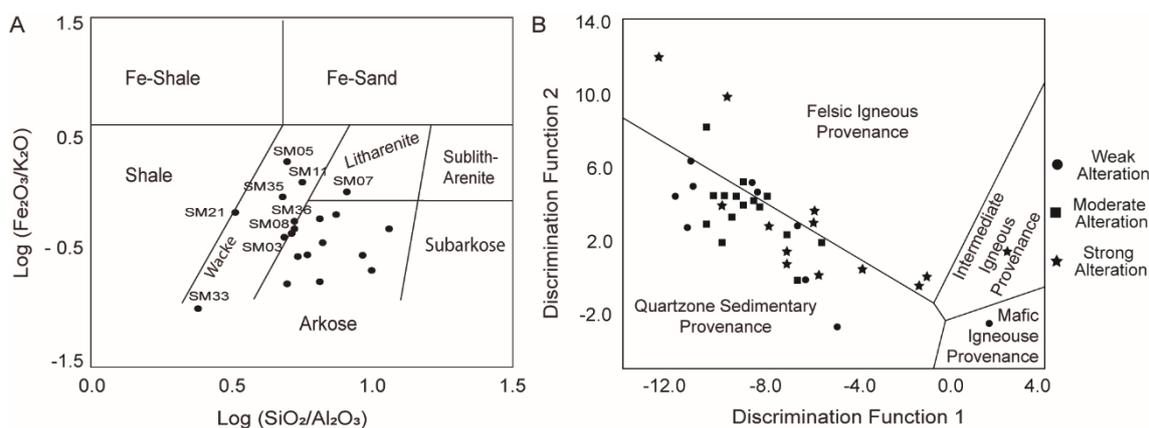


Figura 2. 6 - a) Gráfico de classificação de arenitos de acordo com Herron (1988), com os 20 arenitos do Depósito Santa Maria; b) Gráfico de proveniência de acordo com Roser and Korsch (1988), com as 38 amostras do Depósito Santa Maria, onde os diferentes símbolos classificam a intensidade de alteração destas. Discriminant Function 1 = $(-1.773 \times TiO_2\%) + (0.607 \times Al_2O_3\%) + (0.76 \times Fe_2O_3\%) + (-1.5 \times MgO\%) + (0.616 \times CaO\%) + (0.509 \times Na_2O\%) + (-1.22 \times K_2O\%) + (-9.09)$. Discriminant Function 2 = $(0.445 \times TiO_2\%) + (0.07 \times Al_2O_3\%) + (-0.25 \times Fe_2O_3\%) + (-1.142 \times MgO\%) + (0.432 \times Na_2O\%) + (1.426 \times K_2O\%) + (-6.861)$.

As amostras SM35, SM03 e SM08, localizadas no limite arcóseo/grauvaca, também se encaixam na classificação de arcóseo. Já as amostras SM05, SM11, SM21 e SM34, apesar de inicialmente serem descritas como arcóseo, estão localizadas na região de grauavaca. No QEMScan estas apresentaram valores de 23.5%, 28.9%, 40.3% e 27.5% de quartzo respectivamente, e valores inferiores a 20% de K feldspato, que confirmam a classificação como grauavaca segundo o diagrama, e não de acordo com a descrição inicial.

Como descrito anteriormente o depósito Santa Maria tem paragênese de sulfetos como pirita, galena, esfalerita e mais raramente calcopirita, bornita e calcocita, que podem ser relacionados a assinaturas geoquímicas de Cu, Zn, Pb e Ag. As anomalias de rocha total apresentaram valores máximos de 98.9 ppm, 9370.0 ppm, 7980.0 ppm e 8490.0 ppm, para Ag, Pb, Zn e Cu, respectivamente, enquanto bornita, esfalerita, galena e óxidos de ferro no geral, tiveram valores máximos de < 1%, 25%, 10% e 5%, respectivamente.

2.4.2. Petrofísica e técnicas analíticas (QEMScan)

A fim de identificar a assinatura petrofísica das rochas encaixantes, alterações hidrotermais e mineralizações do depósito Santa Maria, foram integrados resultados de QEMScan a petrofísica.

Densidade

A média da densidade das amostras é 2.578 g/cc (Figura 2.7a). A amostra SM09B apresentou valor de densidade de 2.119 g/cc, ou seja, abaixo da média e então descartada para controle dos dados estatísticos. Trata-se de um arenito de granulometria fina, com fraca alteração hidrotermal, composto por 42% de K-feldspato, 27% de quartzo, na matriz, e apenas 0.02% de sulfetos, localizada a uma profundidade 148m e próxima a uma falha, que permitiu a associação de sua baixa densidade ao intemperismo dessa zona. As 37 amostras restantes apresentaram valores entre 2.354 e 3.073 g/cc.

A amostra com a menor densidade (2.354 g/cc), SM11C, é descrita como um arenito de granulometria fina, pouco alterado e com apenas 0.1% de sulfetos (Figura 2.8a). A de maior densidade (3.073 g/cc) foi a amostra SM15B, descrita como um ritmito de granulometria fina, pouco alterado e com 12% de sulfetos (Figura 2.8b).

Para mapear a assinatura da densidade quanto à alteração hidrotermal, os dados de 13 amostras com alta porcentagem de sulfetos foram desconsiderados. A alteração hidrotermal foi classificada com base nos mapas de distribuição mineral e nas tabelas de porcentagem de ocorrência mineral de carbonatos e mica. As amostras classificadas como pouco alteradas atingiram um valor máximo de 2.581 g/cc, as moderadamente alteradas, um valor máximo de 2.681 g/cc, e as muito alteradas, valor máximo de 2.791 g/cc.

Duas amostras de conglomerado foram selecionadas como representativas da classificação vinculada à alteração hidrotermal: 1) SM10A (fracamente alterada; densidade de 2.390 g/cc), com 16.2% de mica e menos de 1% de sulfetos (Figura 2.8c); e 2) SM19A (fortemente alterada; densidade de 2.578 g/cc), com 16% mica, 8% carbonatos e sem sulfetos (Figura 2.8d).

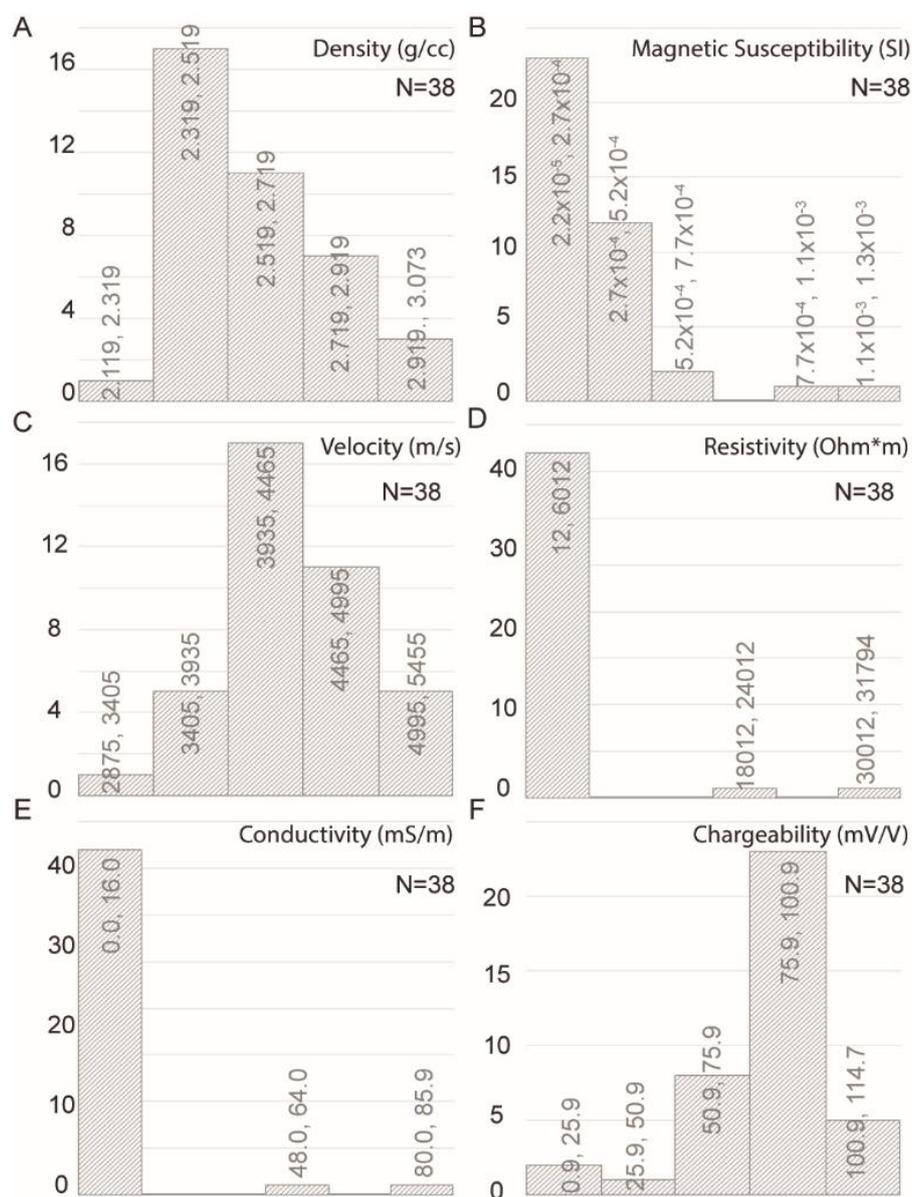


Figura 2. 7 – a) Histograma de densidade (g/cc); b) Histograma de susceptibilidade magnética (SI); c) Histograma de velocidade de onda P (m/s); d) Histograma de resistividade (Ohm*m); e) Histograma de condutividade (mS/m); f) Histograma de cargabilidade (mV/V).

Os valores de densidade quanto a rocha encaixante, como os arenitos, andesitos, conglomerados e ritmitos apresentaram valores máximos de densidade de 2.759 g/cc, 2.791 g/cc, 2.973 g/cc e 3.073 g/cc, respectivamente. As amostras SM14B (2.354 g/cc) (Figura 2.8e) e SM30A (2.640 g/cc) (Figura 2.8f) pertencem ao mesmo litotipo: arenito de granulação fina com fraca alteração hidrotermal. No entanto, exibem teores baixos e altos de sulfetos, respectivamente, que influenciaram diretamente na assinatura de densidade da rocha.

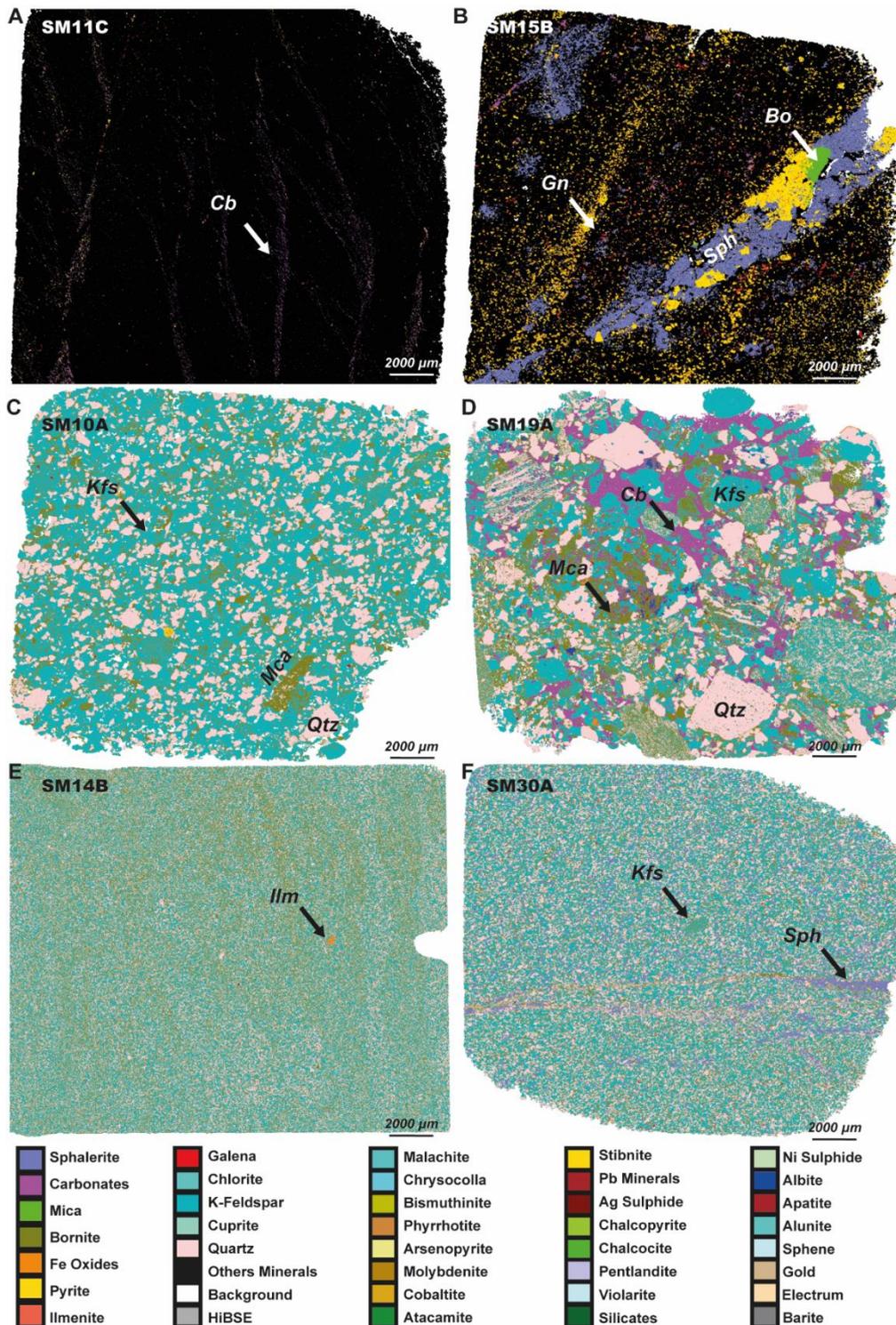


Figura 2. 8 – a) Amostras SM11C ilustra a baixa porcentagem de sulfeto; b) Amostra SM15B ilustra a alta porcentagem de sulfetos; c) Amostra SM10A representa a rocha pouco alterada; d) Amostra SM19A mostra uma rocha muito alterada; e) Arenito de granulometria fina e com alta porcentagem de sulfeto; f) Arenito de granulometria fina e com baixa porcentagem de sulfeto. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Cb - Carbonatos, Gn – Galena, Bo - Bornita, Kfs – K feldspato, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Sph – Esfalerita e Ilm – Ilmenita.

Susceptibilidade Magnética

A média dos dados de susceptibilidade magnética das 38 amostras do depósito Santa Maria apresentou valor de 0.2468×10^{-3} SI (Figura 2.7b). Com os resultados de QEMScan, minerais detectados que têm maior influência magnética sob a rocha (galena, esfalerita, pirrotita, ilmenita e outros) foram agrupados. As amostras com até 3% de minerais magnéticos apresentaram valor máximo de susceptibilidade de 1.2590×10^{-3} SI, enquanto as amostras com 26.1% destes mesmos minerais, um valor de 0.02209×10^{-3} SI. Uma segunda classificação visual foi realizada de acordo com o tamanho do cristal do sulfeto entre: fino, médio e grosso. Amostras com cristais finos apresentaram valor máximo de susceptibilidade magnética de 0.45250×10^{-3} SI, de cristais médios, 0.60360×10^{-3} SI, e de cristais grossos, 1.2590×10^{-3} SI.

Ao analisar a porcentagem de mineral magnético e tamanho do cristal destes, para dois extremos de alteração hidrotermal tem-se: 1) amostra SM02B: ritmito de granulometria fina, fraca alteração hidrotermal, alta porcentagem de sulfeto e cristais de sulfetos finos, apresentou valor de 0.01160×10^{-3} SI (Figura 2.9a); e 2) a amostra SM06B: conglomerado com forte alteração hidrotermal, baixa porcentagem de sulfeto e cristais maiores de sulfetos, um valor de 1.2590×10^{-3} SI. (Figura 2.9b).

Já especificamente, a assinatura da susceptibilidade magnética mostrou valores máximos de 0.41040×10^{-3} SI, 0.45250×10^{-3} SI e 1.2590×10^{-3} , para alterações hidrotermais fraca, moderadas e fortes, respectivamente. A amostra SM01B (0.0221×10^{-3} SI) descrita como um arenito de granulometria fina, composta por 13.5% de mica, sem carbonatos e com poucos sulfetos, é colocada como exemplo de fraca alteração hidrotermal (Figura 2.9c). Para exemplificar alteração hidrotermal intensa, utilizou-se a amostra SM05C, descrita como um arenito, que contém 30.6% mica, 2.61% de carbonatos e apenas 0.3% de sulfetos (Figura 9d).

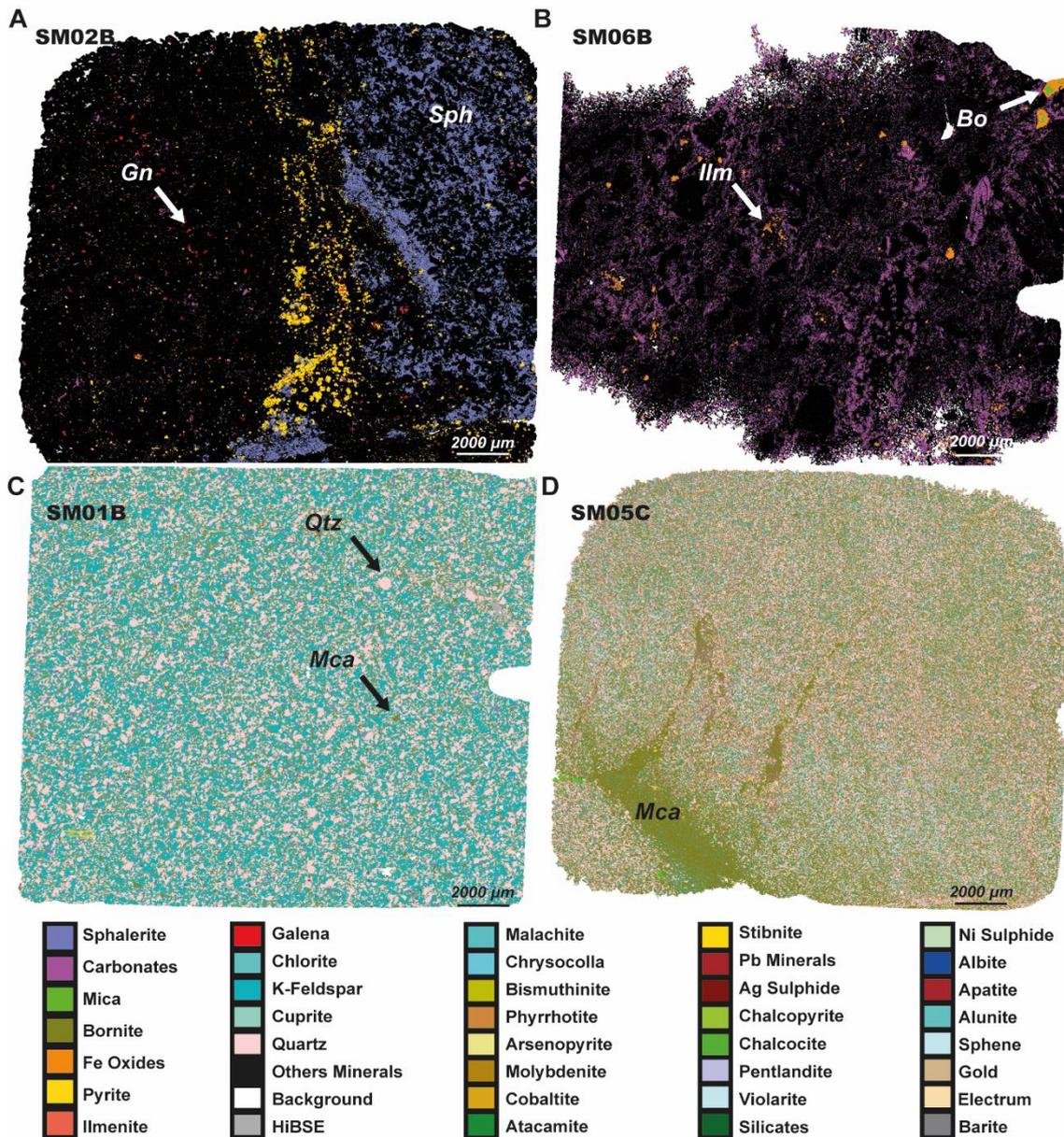


Figura 2. 9 – a) Amostra SM02B representa alta porcentagem de minerais magnéticos com granulação fina; b) Amostra SM06B mostra baixa porcentagem de minerais magnéticos com granulação grossa; c) Arenito pouco alterado, com valores de mica e carbonato inferiores a 14%; d) Arenito muito alterado, com valores de mica e carbonato de 33%. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Gn – Galena, Bo - Bornita, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Sph – Esfalerita e Ilm – Ilmenita.

Velocidade de Onda P

Não há valores de velocidade de onda P fora da média, mas optou-se pela exclusão dos andesitos, uma vez que a diferença no valor de impedância entre o minério e sua rocha hospedeira deve ser significativa o suficiente para resultar em reflexos de alta amplitude, a resultar na identificação do minério (Salisbury,

1996), como os andesitos não continham minério estes não foram considerados (Figura 2.7c). Em geral, as amostras apresentaram valores de velocidade de onda P entre 2875.0 e 5455.0 m/s.

A partir do mapa mineral, classificou-se a textura dos sulfetos como *stringer*, disseminado ou sem sulfeto. A textura *stringer* é pouco amostrada e os valores de velocidade P são distintos (Tabela 2.1).

Tabela 2. 1 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de velocidade de onda P (m/s) para diferentes texturas dos sulfetos das amostras do depósito Santa Maria.

Ore texture	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
No Sulphides	2875.0	4127.0	5111.0	579.6	15
Disseminated	3889.0	4448.0	5455.0	434.0	19
Stringer	4000.0	4347.0	4694.0	490.7	2

Em termos de alteração hidrotermal, a velocidade de onda P teve valores máximos 5106.0 m/s para alteração fraca, 5455.0 m/s para a moderada e 4694.0 m/s para a forte. Para ilustrar a variação de velocidade de onda P *versus* alteração hidrotermal, a amostra SM12B (2875.0 m/s), cuja alteração hidrotermal é fraca, foi selecionada, sendo descrita como um conglomerado, com 22% mica, 0.01% carbonatos e sem sulfetos (Figura 2.10a). Já a amostra SM22A, fortemente alterada, apresenta velocidade de onda P de 4894 m/s). Trata-se de um arenito de granulação média, com 10.4% de mica, 6% carbonatos e 5% de sulfetos (Figura 2.10b).

As rochas encaixantes, arenitos, andesitos, conglomerados e ritmitos apresentaram valores máximos de velocidade de onda P de 5111.0 m/s, 5000.0 m/s, 4694 m/s e 5455 m/s, respectivamente (Tabela 2.2).

Tabela 2. 2 - Valores mínimos, médios, máximo, desvio padrão e número de unidades de velocidade de onda P (m/s) dos diferentes litotipos das amostras do depósito Santa Maria.

Litotype	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
Conglomerate	2875.0	3857.0	4694.0	734.3	5
Rhytmite	3607.0	4304.0	5455.0	527.7	11
Sandstone	3651.0	4425.0	5111.0	395.7	20
Andesite	4107.0	4554.0	5000.0	631.4	2

Resistividade e Condutividade

Para as propriedades elétricas das 38 amostras do depósito Santa Maria, observou-se uma variação entre 11.63 Ohm*m e 31793.76 Ohm*m de resistividade; e 0.03 mS/m e 85.93 mS/m de condutividade (Figura 2.7d e 2.7e)

As amostras SM18C e SM23C apresentaram altos valores de resistividade (18191.0 Ohm*m e 31794.0 Ohm*m) e baixos valores de condutividade (0.05 mS/m e 0.03 mS/m). Já as amostras SM31B e SM03C apresentaram baixos valores de resistividade (11.63 Ohm*m e 20.42 Ohm*m) e altos valores de condutividade (85.9 mS/m e 48.9 mS/m). Estas amostras foram escolhidas em função de valores anômalos de propriedades elétricas. Assim, inicialmente, seus dados foram analisados em grupo e depois separadamente em busca de variáveis em comum (sulfetos, textura de minério, litotipo, alteração e outros) que justificassem os valores anômalos.

Resistividade e condutividade são, por definição, opostas, portanto, apenas a resistividade será discutida a fim de sumarizar as informações. A variação da resistividade quanto à intensidade da alteração hidrotermal foi de 5089.16 Ohm*m, 1318.96 Ohm*m e 3968.03 Ohm*m, para alteração fraca, moderada e forte, respectivamente. A média de resistividade dos arenitos não alterados do depósito é 764.51 Ohm*m e o valor máximo dos alterados é de 3968.03 Ohm*m.

A fim de ilustrar a resistividade de amostras muito alteradas e pouco alteradas, foram escolhidas as: 1) SM33A (655.38 Ohm*m) descrita como um ritmito de granulometria média, fraca alteração hidrotermal, com 12.5% mica, 0.17% carbonatos e 22% sulfetos (Figura 2.10c); e 2) SM23C (31793.76 Ohm*m) descrita também como um ritmito muito alterado, com 18% mica, 8% carbonatos e 1.6% sulfetos (Figura 2.10d). Quando analisados em grupos de litotipos, os ritmitos não alterados apresentam um valor médio de resistividade de 641.24 Ohm*m e os ritmitos alterados, um valor máximo de 31793.76 Ohm*m. Os conglomerados têm uma média de resistividade no valor de 381.35 Ohm*m. Já os conglomerados hidrotermalmente alterados exibem um valor máximo de resistividade de 3056.74 Ohm*m (Tabela 2.3).

Tabela 2. 3 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de resistividade ($\text{Ohm}\cdot\text{m}$) dos diferentes litotipos do depósito Santa Maria.

Litotype	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
Conglomerate	270.00	969.72	3056.74	1189.7	5
Rhythmite	11.63	3416.05	31793.00	9419.2	11
Sandstone	20.42	2334.56	18190.93	4001.0	20
Andesite	1930.07	2111.07	2292.07	255.9	2

Cargabilidade

As amostras do depósito Santa Maria apresentaram um valor mínimo de cargabilidade de 0.9 mV/V, média 75.2 mV/V e máximo 114.6 mV/V (Figura 2.7f). Descrita como um ritmito, a amostra SM31B, com fraca alteração hidrotermal, porcentagens de 14% de mica, 0.38% de carbonatos e 1.8% de sulfetos, apresentou cargabilidade destoante com as demais, no valor de 0.9 mV/V, optou-se então por sua exclusão. As 37 amostras restantes têm valor mínimo de 12.8 mV/V e o valor máximo 114.7 mV/V. Os valores de cargabilidade foram analisados para diferentes intervalos de porcentagens de sulfetos (Tabela 2.4).

Tabela 2. 4 – Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para intervalos de frequência de ocorrência de sulfetos das amostras do depósito Santa Maria.

Sulphides (%)	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
0 – 0.588	12.7	81.2	108.1	20.3	20
0.80 – 1.89	28.2	63.7	88.8	29.7	4
2.36 – 21.43	51.1	78.1	114.7	27.4	12

Em termo de intensidade de alteração hidrotermal, obtiveram-se valores máximos de 114.7, 90.7 e 91.5 mV/V, para alteração fraca, moderada e forte, respectivamente (Tabela 2.5).

Tabela 2. 5 – Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para classificação de intensidade de alteração das amostras do depósito Santa Maria.

Hydrothermal Alteration	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
Weak	12.8	80.8	114.7	23.6	21
Moderate	80.6	84.1	90.7	17.6	5
Strong	28.2	69.9	91.5	4.5	10

A amostra SM07C, descrita como arenito de granulometria fina pouco alterado (13.5% mica, 1.1% carbonatos, 23% K-Feldspato, 39% de quartzo e 0.2% de sulfetos, onde apenas 0.01% seria pirita), apresenta cargabilidade acima de média, no valor de 79.3 mV/V (Figura 2.10e). A amostra SM26B, descrita como um andesito muito alterado, (26.5% de mica + carbonato e 0.01% de pirita), apresenta cargabilidade mais baixa, no valor de 58.6 mV/V, abaixo da média (Figura 2.10f).

Ao analisar a cargabilidade quanto à rocha encaixante (Tabela 2.6), os litotipos arenitos, andesitos, conglomerados e ritmitos apresentaram valores máximos de 81.4 mV/V, 114.7 mV/V, 106.6 mV/V e 90.7 mV/V, respectivamente.

Tabela 2. 6 - Valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e número de unidades de cargabilidade (mV/V) para os diferentes litotipos das amostras do depósito Santa Maria.

Litotype	Minimum	Average	Maximum	Standard Deviation	Number of Samples
Andesite	58.6	69.9	81.4	16.1	2
Sandstone	12.8	77.0	114.7	22.5	20
Conglomerate	78.5	90.7	106.6	12.3	5
Rhythmite	28.2	74.1	90.7	20.5	10

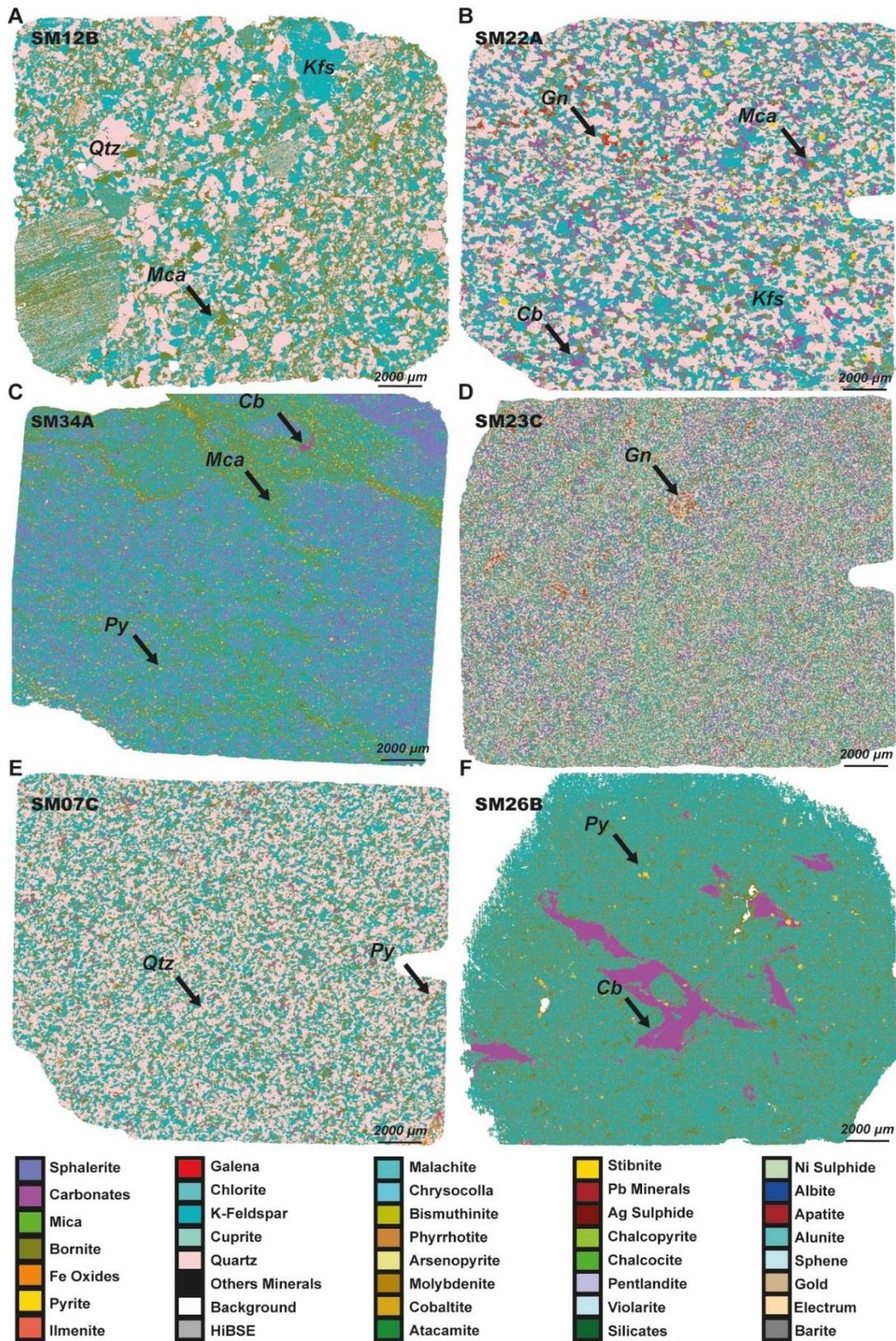


Figura 2. 10 – a) Amostra SM12B ilustra alteração hidrotermal fraca; b) Amostra SM22A ilustra alteração hidrotermal forte; c) Amostra SM33A mostra fraca alteração hidrotermal; d) Amostra SM23C exemplifica a alta alteração quanto a resistividade; e) Amostra SM07C representa a baixa alteração quanto a cargabilidade; f) Amostra SM26B

exemplifica alteração hidrotermal forte quanto a cargabilidade. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Cb - Carbonatos, Gn – Galena, Kfs – K feldspato, Mca – Mica, Qtz – Quartzo, Py – Pirita.

2.5. Discussões

2.5.1. Classificação e proveniência dos arenitos do depósito Santa Maria

A geoquímica é utilizada na exploração mineral como ferramenta auxiliar na vetorização de depósitos, principalmente pelo baixo custo e versatilidade analítica que fornece dados de concentração elementar em ppm de rochas ou de minerais recuperados em sedimentos de corrente, solos, amostras de rochas de afloramentos e sondagem (Winterburn et al., 2017).

A mineralogia e geoquímica das rochas sedimentares são controladas por diversos fatores, como por exemplo: composição do protólito, duração e tipo de intemperismo, mecanismos de transporte de sedimentos, origem do depósito e processos pós-deposicionais (Hayashi et al., 1997).

As porcentagens de K-feldspato e quartzo obtidas no QEMScan são bastante compatíveis tanto com a classificação macroscópica feita inicialmente, quanto com àquela sugerida pelo diagrama de Herron (1988). As amostras plotadas no campo arcóseo deste digrama possuem mais de 25% de K-feldspato em sua composição principal. A discrepância eventual de classificação visual durante a escolha dos blocos é esperada pela dificuldade de identificação dos grupos minerais feldspáticos em amostras de mão.

Rochas sedimentares normalmente retém parte dos constituintes minerais da fonte, e preserva a assinatura da proveniência e das condições de intemperismo (Garver and Scott, 1995). Muitos estudos mostram que a mineralogia e química das rochas sedimentares estão relacionadas diretamente com sua origem (e.g. Roser & Korsch, 1988; Asiedu, Hegner, Rocholl, & Atta-Peters, 2005).

Ambientes sedimentares com diferentes componentes detríticos e diferentes litotipos, como por exemplo, arenitos, folhelhos, ritmitos e siltitos, podem ser derivados de diferentes rochas, desde cristalinas, metamórficas a sedimentares pré-existentes. O diagrama de proveniência de Roser & Korsch, (1988) mostra que essa variação se dá entre rochas tipicamente ígneas félsicas a sedimentares quartzosas. As amostras plotadas no campo *Quartzone Sedimentary*, podem ser associadas ao Grupo Santa Bárbara, localmente

coberto por sedimentos de sistemas deposicionais de leques aluviais, fluviais e eólico do Grupo Guaritas. As amostras plotadas no campo *Felsic Igneous* são muito ou moderadamente alteradas, o que justifica estarem nesta área do diagrama, uma vez que a mobilidade dos elementos pode influenciar na proveniência da rocha.

2.5.2. Integração de dados geoquímicos e técnicas analíticas (QEMScan)

Inicialmente, questionou se os resultados geoquímicos poderiam ser comparados ou associados aos do QEMScan, devido à diferença metodológica de amostragem entre ambos, uma vez que as amostras geoquímicas são volumétricas e variam entre 10 cm³ e 30 cm³, enquanto as lâminas fornecem amostragem areal e representam, em média, apenas 2x4 cm de um bloco. Os gráficos de dispersão elemento químico, obtido por geoquímica de rocha total, *versus* sulfetos do mesmo elemento químico, obtidos por QEMScan, apresentaram baixos coeficientes de determinação (R²) que podem ser justificados pela alta dispersão dos minerais em valores inferiores a 0.5%. Quando superior a 0.5%, nota-se tendência crescente e proporcional, no qual apenas o gráfico de sulfetos de Zn *versus* o elemento Zn mostrou pouca variação (Figura 2.11). É possível que os minerais de Zn, representados principalmente pela esfalerita, encontrem-se fortemente dispersos na rocha, com granulação inferior àquele limite para a identificação via QEMScan. Embora a metodologia de amostragem seja distinta, tanto a geoquímica quanto as análises mineralógicas via QEMScan podem ser importantes ferramentas para a identificação de elementos químicos farejadores.

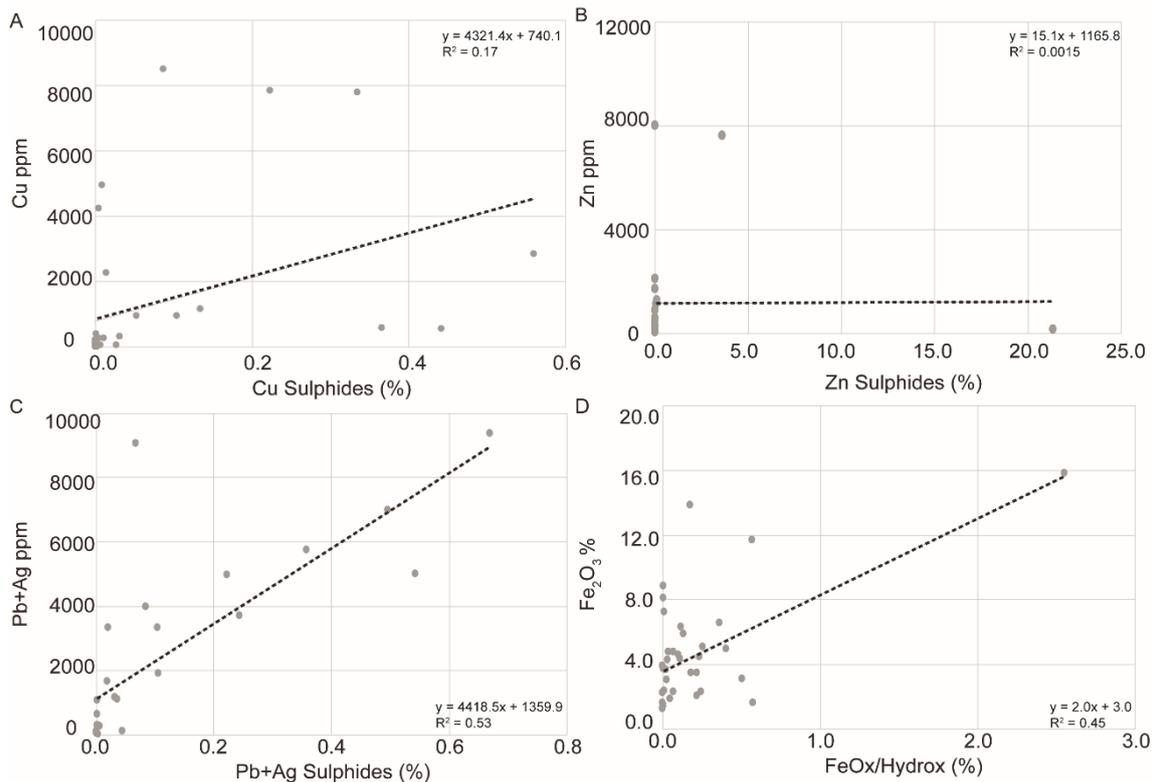


Figura 2. 11 - a) Gráfico de porcentagem de sulfetos de cobre detectados pelo QEMScan versus parte por milhão de cobre detectados pela geoquímica; b) Gráfico de porcentagem de sulfetos de zinco detectados pelo QEMScan versus parte por milhão de zinco detectados pela geoquímica c) Gráfico de porcentagem da soma de sulfetos de chumbo e prata detectados pelo QEMScan versus parte por milhão da soma de chumbo e prata detectados pela geoquímica; d) Gráfico de porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro detectados pelo QEMScan versus porcentagem de hematita detectados pela geoquímica. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal.

2.5.3. Integração de dados petrofísicos e técnicas analíticas (QEMScan)

As propriedades físicas segundo Dentith and Mudge, (2014) são influenciadas pelos seguintes fatores: grão, textura e amostra total (comumente intitulada *bulk*) da rocha (Figura 2.12). O fator “grão” refere-se à forma e ao tamanho do cristal do mineral, e tem como exemplo de propriedade física fortemente controlada pelo grão a susceptibilidade magnética. A “textura” é um fator correlacionado à presença de água ou espaços vazios na rocha, bem como à distribuição volumétrica de fases minerais, que influenciam diretamente em propriedades elétricas. A amostra total é um fator de alta influência na resposta das propriedades físicas, pois esta é dependente da composição mineralógica,

e tem como exemplo de propriedades físicas vinculadas a densidade e a velocidade de onda primária, consideradas propriedades em massa (Dentith and Mudge, 2014).

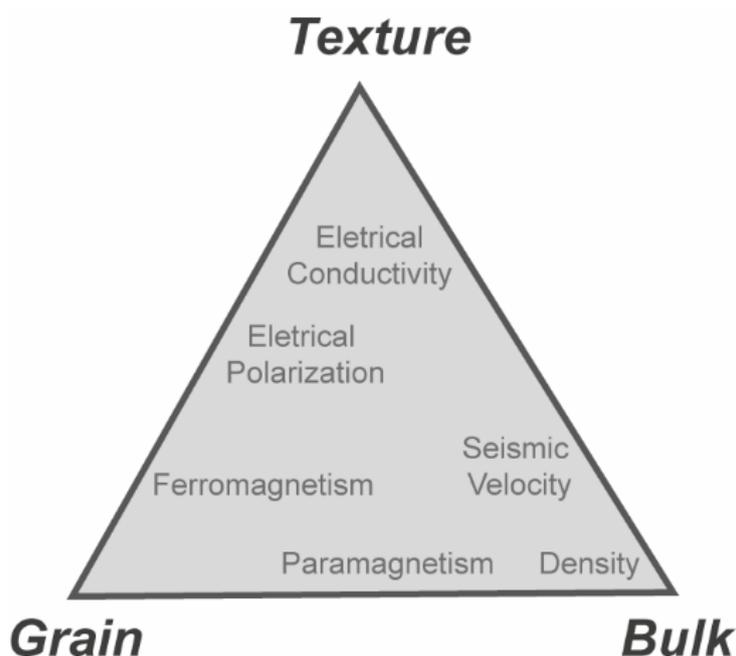


Figura 2. 12 - Diagrama ternário que exemplifica os fatores que influenciam nas propriedades físicas. Modificado de Dentith and Mudge, (2014).

Todos os dados petrofísicos devem ser considerados no contexto de escala e amostragem, especialmente o magnetismo e a condutividade elétrica, pois são extremamente variáveis mesmo em centímetros, logo poucas medidas em uma área relativamente média ou grande, podem não ser representativos (Dentith and Mudge, 2014).

Densidade

A densidade de rochas é uma propriedade física que depende, principalmente, da presença de minerais densos e da ocorrência de espaços vazios no arcabouço da rocha. Fe e Mg são dois elementos químicos abundantes em minerais máficos formadores de rocha, que confere aos mesmos maior densidade (Dentith and Mudge, 2014). Portanto, em termos gerais, estima-se que exista uma correlação direta entre maior porcentagem de minerais máficos e maior densidade da rocha. Alguns minerais-minério mais comuns apresentam valores acima de 4.0 g/cc, que afeta diretamente a densidade da rocha (Tabela 2.7) (Airo and Säävuori, 2013).

Tabela 2. 7 - Valores de densidade dos principais minerais e minérios (Airo and Säävuori, 2013).

Mineral	Density (g/cc)
Sulfides/Oxides	Average
Galena	7.50
Chalcopyrite	4.20
Pentlandite	4.80
Pyrite	5.02
Pyrrhotite	4.65
Sphalerite	4.00
Magnetite	5.18
Hematite	5.26
Felsic Igneous	2.61
Mafic Igneous	2.79
Ultramafic Rocks	3.15

Entre os minerais com altos valores de densidade, a galena, a pirita, a pirrotita e a esfalerita, foram encontradas nas amostras desta pesquisa. Estes minerais apresentaram porcentagem média de ocorrência de 1.90% de galena, 0.06% pirita, 0.08% pirrotita e 8.59% de esfalerita, excluindo valores nulos, e tem valores médios de densidade das amostras com estes minerais de 2.58 g/cc, 2.57 g/cc, 2.60 g/cc e 2.57 g/cc respectivamente.

Individualmente, os valores de porcentagem de ocorrência de galena, pirita, pirrotita e esfalerita são irrisórios e mostraram não influenciar diretamente na densidade das amostras, pois seus valores permaneceram no mesmo *range* da média de densidade de todas as amostras do depósito Santa Maria (aproximadamente 2.5 g/cc). No entanto, quando somados, apresentam média de 8.76%, que aumenta o valor de densidade para 2.72 g/cc. Ao considerar todos os sulfetos, para valores acima de 10% de ocorrência, são descritas densidades superiores a 3.0 g/cc, que mostra que a presença de sulfetos é um fator que afeta esta propriedade física diretamente (Figura 2.13a). Devido a barita ser um mineral de alta densidade e também ser comum em veios de estágio finais de alterações em zonas de alteração argílica (Biondi, 2015), um gráfico de dispersão barita *versus* densidade, mostrou que para o depósito Santa Maria, este mineral não influencia na densidade (Figura 2.13b).

A classificação da alteração hidrotermal foi realizada com base no mapa mineral e também, a partir da porcentagem de mica e carbonatos disponibilizados pela tabela de ocorrência mineral do QEMScan. Como a porcentagem de sulfetos mostrou-se um fator importante e que afeta diretamente a densidade, nesta segunda etapa, foram utilizadas apenas amostras com baixas porcentagens de sulfetos. A amostra menos alterada apresenta valores de 19.7% de mica e 0% carbonatos; a moderadamente alterada, valores de 22.2% e 1.78%; e as mais alteradas 34.1% e 10.7%. As densidades dessas amostras são 2.581 g/cc, 2.681 g/cc e 2.791 g/cc, para valores de 19.7%, 27.9% e 44.9%, respectivamente (soma de mica + carbonato). Portanto, no gráfico caixa (Figura 2.13c) nota-se um aumento crescente da propriedade física em relação a intensidade da alteração, e também a partir dos valores de porcentagens de mica + carbonato.

Para analisar a resposta da densidade quanto ao litotipo, todas as amostras foram consideradas, exceto a excluída inicialmente SM09B. Os litotipos ritmitos, conglomerados, andesitos e arenitos, apresentaram valores máximos com disposição crescente (Figura 2.13d). O mesmo teste estatístico sobre a influência dos sulfetos foi realizado nas rochas encaixantes, com a mesma intensidade de alteração. Em todos os litotipos, notou-se que os sulfetos podem aumentar de 0.2 a 0.4 g/cc a densidade.

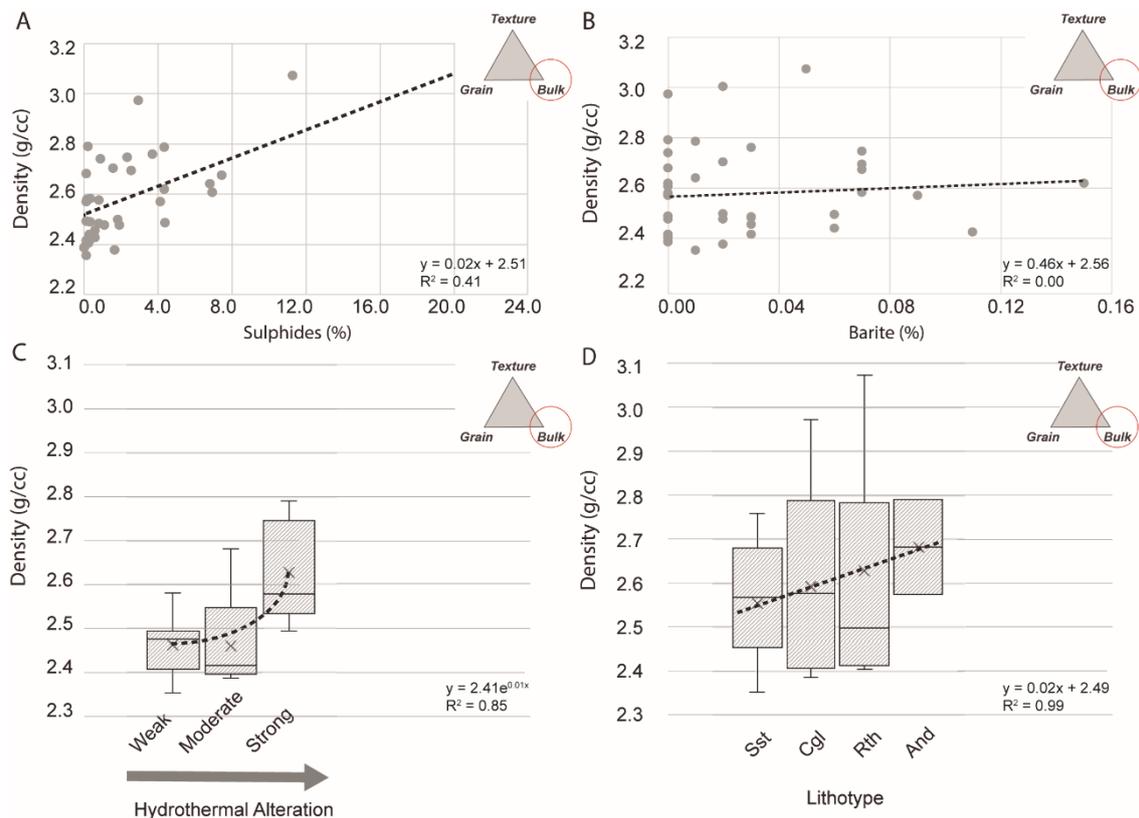


Figura 2. 13 – a) Gráfico de dispersão com tendência crescente entre densidade e porcentagem de sulfetos; b) Gráfico de dispersão mostra a baixa influência de porcentagem de barita sobre a densidade; c) Gráfico caixa evidencia a tendência crescente para diferentes tipos de alterações hidrotermal; d) Gráfico caixa evidencia a tendência crescente para diferentes litotipos. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.

Susceptibilidade Magnética

A susceptibilidade magnética (SI) depende, em geral, dos minerais formadores de rocha máficos e félsicos e da quantidade de ferro ligado aos minerais magnéticos, como por exemplo, magnetita, pirrotita, hematita, ilmenita/titanohematita e maghemita. A pirita também é considerada, pois apesar de não ser magnético, quando metamorfozada, pode se converter em pirrotita e magnetita (Clark, 2014). Esta propriedade é utilizada no entendimento de diferentes contextos geológicos, localização de depósitos de minerais metálicos com maior interesse prospectivo, mapeamento de estruturas e litologias, sendo útil, por exemplo, ao estudo e entendimento de alteração hidrotermal associada a mineralizações (Bérubé et al., 2018; McGladrey et al., 2017).

A susceptibilidade dos materiais depende do tipo de magnetização dos minerais presentes neles. Quando os minerais são ferrimagnéticos, eles dependem da presença e da quantidade de minerais magnéticos; do campo magnético terrestre; da temperatura de formação do mineral; do tamanho do cristal do mineral magnético; e da presença de minerais de Fe. Galena, esfalerita (diamagnéticos) e pirita (paramagnética) apresentam baixa susceptibilidade (Tabela 2.8) e, quando presentes, tendem a diminuir a susceptibilidade das rochas (Airo, 2015).

Tabela 2. 8 - Range de susceptibilidade magnética (10^{-3} SI) e tipo de magnetização de principais minerais e minérios (Airo, 2015). As susceptibilidades estão em SI.

Magnetic Susceptibility [SI]					
Minerals	Range	Magnetization Type	Minerals	Range	Magnetization Type
Chalcopyrite	0.3 – 0.4	Paramagnetic	Muscovite	0.03 – 0.7	Paramagnetic
Pyrite	- 0.006 – 0.1	Paramagnetic	Biotite	0.8 – 3.0	Paramagnetic
Pyrrhotite	---	Ferrimagnetic	Pyroxenes	0.5 – 5.0	Paramagnetic
Sphalerite	-0.015 – 2.0	Diamagnetic	Olivine	0.1 – 4.0	Paramagnetic
Magnetite	1000.0 – 15000.0	Ferrimagnetic	Amphibole	0.6 – 5.0	Paramagnetic
Hematite	1.3 – 7.0	Antiferromagnetic	Quartz	- 0.015	Diamagnetic
Galena	-0.033 – 0.009	Diamagnetic	Garnet	0.5 – 6.0	Paramagnetic

A soma dos minerais de maior ocorrência no depósito Santa Maria, galena e esfalerita, quando comparada a susceptibilidade, mostraram tendência decrescente e correspondente ao esperado, uma vez que esses minerais diamagnéticos tendem a diminuir a susceptibilidade na rocha (Figura 2.14a). Ao verificar se a resposta de susceptibilidade em amostras com ocorrência de pirita também correspondia ao esperado, tendência crescente, um gráfico de dispersão foi realizado e uma tendência decrescente foi constatada. Essa resposta oposta pode ser justificada pela baixa ocorrência deste mineral nas amostras, valor máximo de 0.3%, que mostra que neste caso são outros fatores que influenciam na susceptibilidade magnética da rocha (Figura 2.14b).

Ao analisar o valor de susceptibilidade quanto ao tamanho do cristal do mineral magnético, apesar de apresentar um desvio padrão alto, notou-se uma

tendência geral de maior cristal, maior susceptibilidade. Para a amostragem realizada, é possível observar que o tamanho do cristal do sulfeto influencia mais a susceptibilidade da rocha do que necessariamente sua maior quantidade (Figura 2.14c).

Quando analisado a variação em relação a alteração hidrotermal, quando mais intensa a alteração, maior a susceptibilidade (Figura 2.14d). Ao analisar a resposta em relação ao litotipo, conglomerados apresentam maior susceptibilidade, enquanto ritmitos apresentam menores susceptibilidades, com diferença de apenas 1.24×10^{-3} SI entre eles (Figura 2.14e). A fim de entender, mapear e quantificar o quanto a alteração influencia na resposta de susceptibilidade magnética da rocha, litotipos com intensidades de alteração diferentes, foram comparados e notou-se que alteração aumenta o valor de susceptibilidade até 0.5×10^{-3} SI, em todos os litotipos.

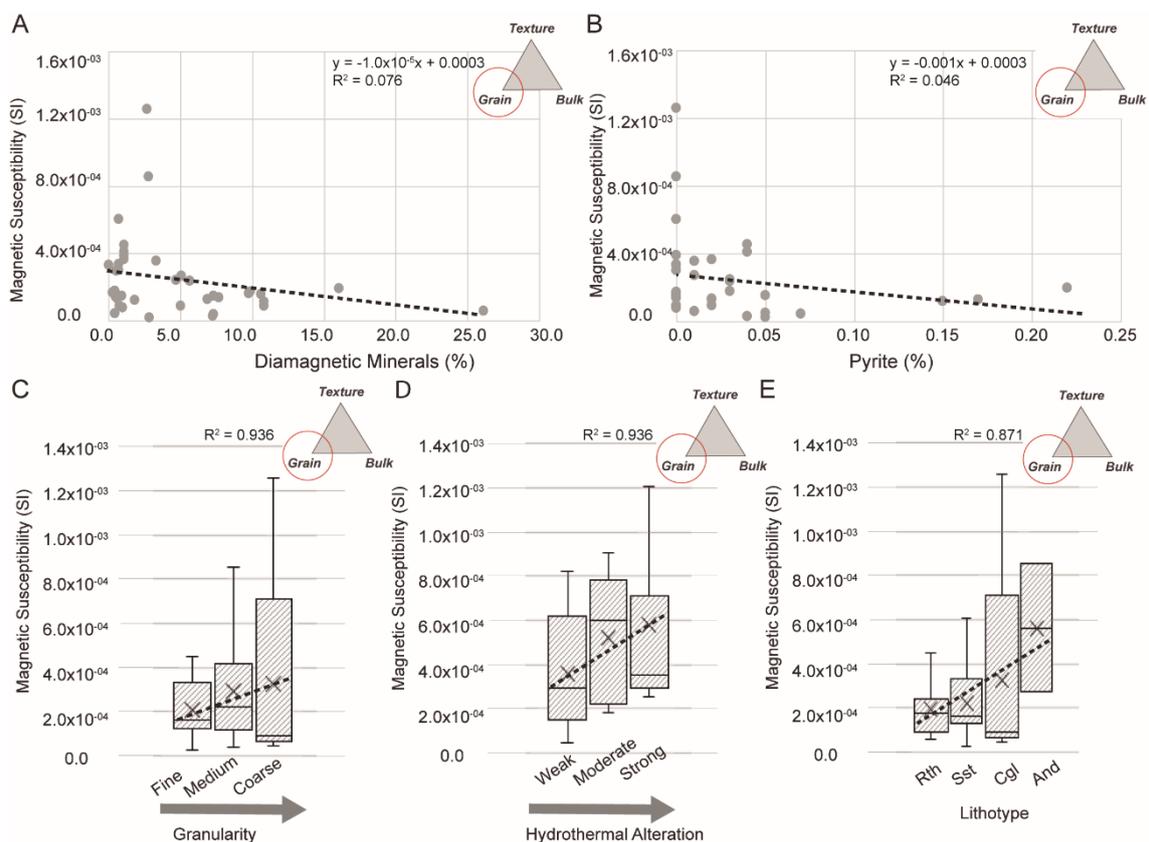


Figura 2. 14 – a) Gráfico de dispersão minerais magnéticos versus susceptibilidade que evidencia tendência decrescente; b) Gráfico de dispersão de porcentagem de pirita versus susceptibilidade magnética que evidencia tendência decrescente; c) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética, em grupos de acordo com tamanho do cristal do mineral magnético; d) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética,

em grupos de acordo com alteração hidrotermal; e) Gráfico caixa de ranges da susceptibilidade magnética, em grupos de acordo com litotipos. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst - Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.

Velocidade de Onda P

A velocidade com que a onda se propaga por um material depende não só das propriedades elásticas, mas também da sua densidade. Os fatores que mais afetam a velocidade de onda P são a porosidade e a composição mineral. Para rochas cristalinas que apresentam, por definição, a baixa porosidade, a mineralogia é o fator dominante no controle de velocidade. Já para rochas sedimentares, diversos fatores como: mineralogia, porosidade, alteração, entre outros vinculam-se às variações de velocidade de onda P (Dentith and Mudge, 2014; Milkereit et al., 2000). No geral, sulfetos que estão presentes no depósito Santa Maria como, esfalerita, calcopirita e pirrotita, além de apresentarem baixa e uniforme velocidade de onda, estes tendem a diminuir a velocidade de propagação na rocha. A pirita é um mineral que apresenta alta velocidade de propagação de onda P (Saruwatari et al., 2001).

Há uma relação proporcional entre densidade e velocidade, mas as amostras com maiores valores de densidade, não correspondem as com maiores velocidades, e o mesmo ocorre para os menores valores (Figura 2.15a). Nota-se também uma leve tendência crescente entre porcentagem de sulfetos e velocidade (Figura 2.15b), mas esta não é conclusiva devido ao baixo coeficiente de determinação. A presença de pirita nas amostras exibe uma tendência oposta, portanto decrescente ainda que sutil (quando superior a 2.5%), também não conclusiva (Figura 2.15c). Esta discordância pode ocorrer tanto pelo alto grau de dispersão dos valores de velocidade, quanto por apresentar baixos valores de pirita detectada em área de amostra analisada, máximo de 0.22% (Figura 2.15d).

A textura do minério, que nem sempre se distribui de forma homogênea, afeta a velocidade de onda, em função dos contrastes de impedância e densidade. Dessa forma, é importante que a textura seja também avaliada qualitativamente durante as estimativas de variação de velocidades de onda. Os valores mínimos de velocidade de onda são condizentes com o esperado, uma

vez que a ganga possui a menor velocidade (2875 m/s), a disseminada (3889 m/s) valor intermediário e a *stringer* o maior valor (4000 m/s).

A fim de entender a assinatura hidrotermal, os valores máximos e médias foram desconsiderados. Após exclusão, notou-se disposição crescente da velocidade, quando comparada a intensidade de alteração. A resposta desta propriedade física em litotipos é muito distinta, pois apresenta diferença entre 100 m/s a 500 m/s, além de mostrar que os valores de velocidade de propagação da onda dos conglomerados é maior que a dos ritmitos, que é maior que a dos arenitos, que é maior que a dos andesitos.

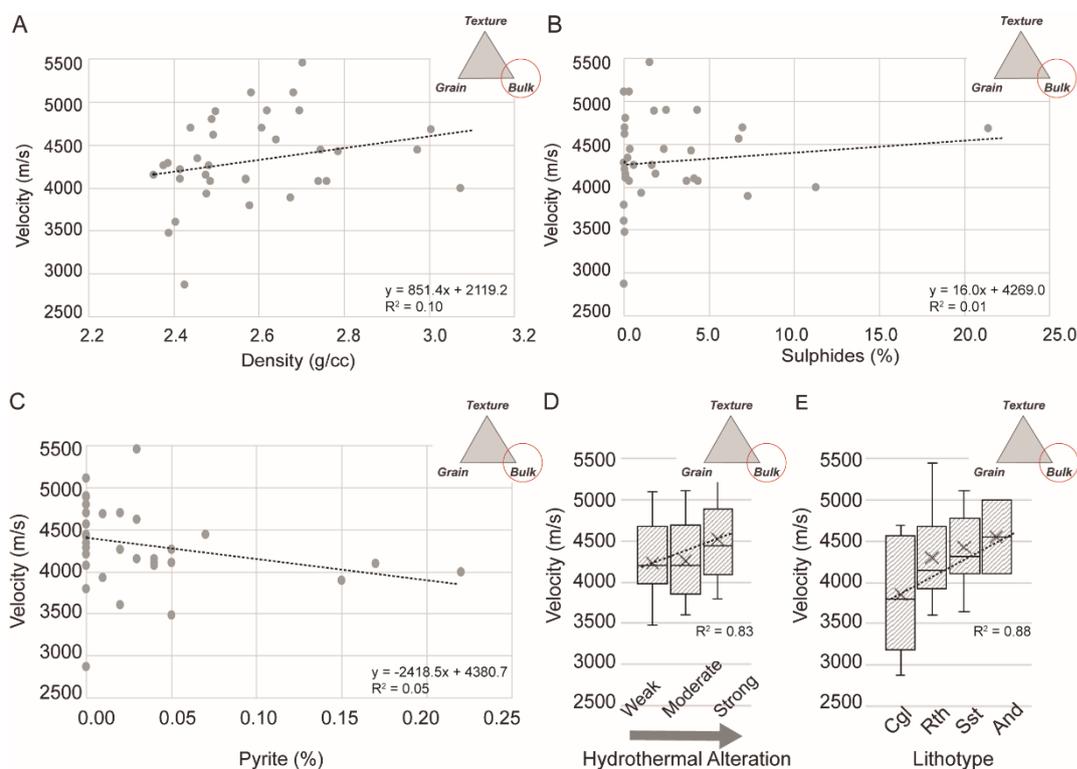


Figura 2. 15 - a) Gráfico de dispersão mostra relação direta entre valores de densidade e velocidade de todas amostras; b) Gráfico de dispersão de porcentagem de sulfetos versus velocidade; c) Gráfico de dispersão entre porcentagem de pirita versus velocidade; d) Gráfico caixa de ranges de velocidade para diferentes intensidades de alterações hidrotermais; e) Gráfico caixa de ranges de velocidade para grupos de litotipos . Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.

Resistividade e Condutividade

A resistividade (Ohm*m) e a condutividade (mS/m) variam em uma escala de até 10x de magnitude, pois são afetadas por diversos fatores como: o tipo da

rocha, porosidade, conectividade entre poros, natureza do fluido nos poros e mineralogia, de modo que a porosidade é o fator de maior influência. Devido a estes fatores, rochas sedimentares são mais condutivas que as ígneas; e as metamórficas são as mais variáveis, pois dependem da combinação de outros fatores (Shoqeir et al., 2014).

A área de estudo é caracterizada por minerais metálicos e sulfetos, como por exemplo pirrotita, galena e magnetita, que costumam ter boas respostas para condutividade. Esfalerita e a hematita, que também são encontradas no depósito em estudo, não mostram bons resultados ao serem submetidas a correntes elétricas. A pirita, muito comum em rochas e também presente no depósito, possui maior variação na sua resposta quando associada ao cobre, mesmo em baixos teores, ou quando afetada por espaços porosos. Finalmente, os óxidos são menos condutivos, além de serem dependentes do tipo de rocha na qual se encontram; enquanto silicatos e carbonatos são considerados isolantes (King, 2007). Tabela 2.9 mostra valores de resistividade e condutividade dos principais minerais e minérios presentes no depósito Santa Maria.

Tabela 2. 9 - Valores de resistividade e condutividade dos principais minerais e minérios relevantes (King, 2007).

Minerals	Resistivity (Ohm*m)	Conductivity S/m
Gold	---	50×10^6
Copper	---	$3.0 - 80.0 \times 10^6$
Graphite	---	$10^2 - 10^6$
Chalcopyrite	$12.2 \times 10^{-5} - 0.3$	$10.0 - 10^4$
Pyrite	$3.0 \times 10^{-5} - 1.5$	$1.0 - 10^5$
Pyrrhotite	---	50.0×10^6
Magnetite	$5.0 \times 10^{-4} - 5.0 \times 10^4$	$10^{-4} - 10^5$
Hematite	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	---
Galena	$3.0 \times 10^{-5} - 3.0 \times 10^2$	---
20% Sulphides	---	---
8-20% Sulphides	---	---
2-8% Sulphides	---	---

Apenas os dados de resistividade serão discutidos, já que é clara a relação inversamente proporcional entre resistividade e condutividade (Figura 2.16a).

O QEMScan disponibilizou a porcentagem destes minerais que costumam afetar a resistividade. Um gráfico de dispersão com a soma da ocorrência de todos estes minerais *versus* resistividade, mostrou baixo coeficiente de determinação (Figura 2.16b), mas para valores de sulfetos acima da média de ocorrência, nota-se tendência crescente com mais evidencia. O baixo ângulo de inclinação da linha de tendência pode ser justificado pela baixa porcentagem dos minerais comparados com propriedades físicas que podem atingir escalas de variação de 10x de magnitude.

Como a resistividade mostrou ser influenciada apenas por valores de ocorrência de sulfetos acima da média, optou-se por trabalhar apenas com as amostras com ocorrência de sulfetos abaixo da média para entender a assinatura da resistividade quanto a alteração hidrotermal. No gráfico de dispersão mica + carbonatos *versus* resistividade, nota-se tendência crescente (Figura 2.16c). Ao considerar a classificação de alteração quanto à intensidade, as médias das resistividades foram de 981 ohm*m, 958 ohm*m e 1740 ohm*m, para alteração fraca, moderada e forte, respectivamente. Apesar da alteração forte possuir média menor do que a moderada, estes são valores próximos, que provavelmente se inverteram devido à baixa amostragem e alto desvio padrão de alteração hidrotermal forte, 5 amostras *versus* 21 amostras. No *boxplot*, apesar do alto desvio padrão, há tendência crescente, de tal modo que a alteração hidrotermal pode ser mapeável quanto à resistividade (Figura 2.16d).

Ao analisar a resistividade quanto à rocha encaixante, os litotipos não mostram tendência significativa a ser discutida. Como mostrado anteriormente, a alteração hidrotermal foi um fator que auxiliou na quantificação da resistividade, logo, ao comparar os mesmos tipos de rochas encaixantes com intensidade de alterações diferentes, estes mostraram resultados a serem considerados.

A média de resistividade de um arenito não alterado é 764.51 Ohm*m e o máximo de uma arenito alterado é de 3968.03 Ohm*m, de tal modo que a alteração pode afetar a resistividade do arenito em até 5X. Um ritmito não alterado apresenta um valor médio de 641.24 Ohm*m e um ritmito alterado um valor máximo de 31793.76 Ohm*m, visto então que a alteração pode aumentar 50X a sua resistividade. E o conglomerado tem sua resistividade aumentada em até 8X, uma vez que um conglomerado não alterado tem valor médio de 381.35 Ohm*m e um alterado de 3056.74 Ohm*m. Logo, fica claro como a alteração

eleva a resistividade das rochas, seja arenito, ritmito ou conglomerado, devido ao preenchimento dos poros e a diminuição da conectividade entre eles, que resultam no fechamento da porosidade primária da rocha.

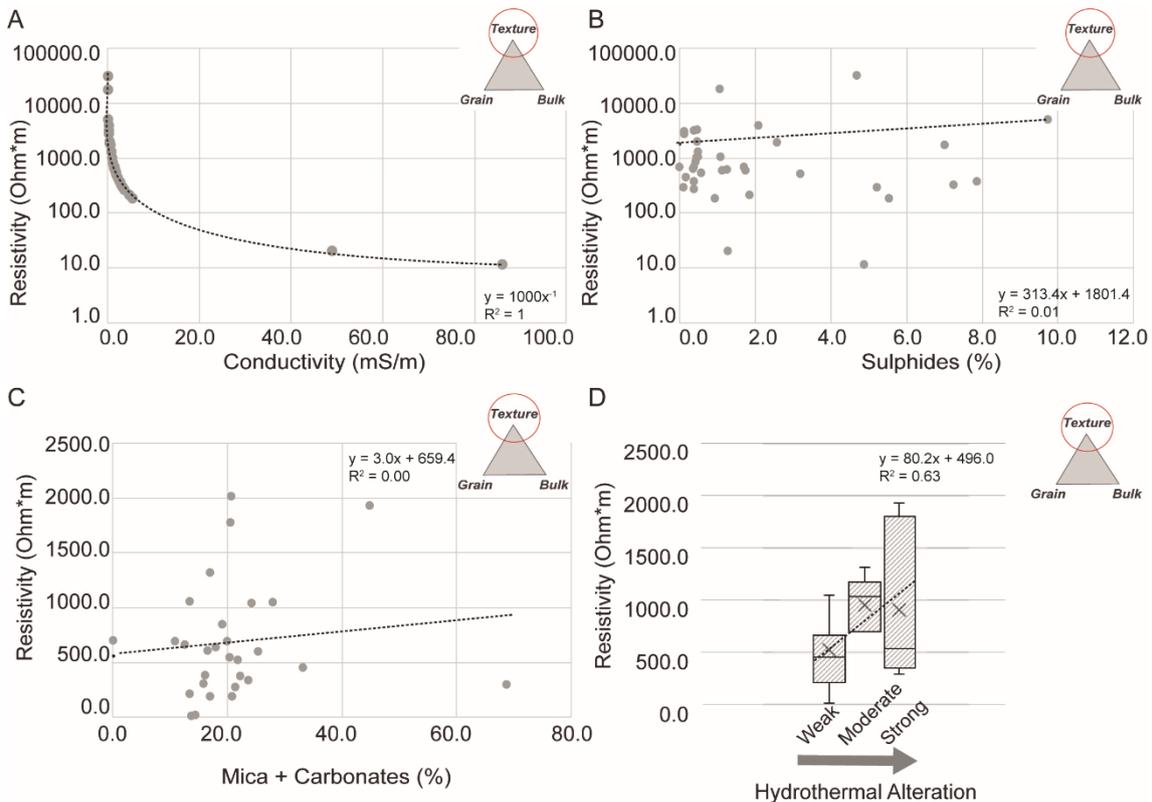


Figura 2. 16 - a) Gráfico de dispersão mostra relação inversamente proporcional entre resistividade e condutividade; b) Gráfico de dispersão sulfetos versus resistividade; c) Gráfico de dispersão entre a soma de mica + carbonatos versus resistividade; d) Gráfico caixa de ranges de alteração hidrotermal. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal.

Cargabilidade

A cargabilidade representa a capacidade de armazenamento de energia eletrostática em um material submetido a uma corrente elétrica que é abruptamente interrompida. O tempo gradual de decaimento da corrente é dependente do comportamento dos íons, que varia de material para material, onde a variável da medida de diferença de potencial (mV/V) em um certo intervalo de tempo é a cargabilidade (Telford et al., 1990).

Esta propriedade física é influenciada pela mineralogia, mas também pela presença de porosidade, permeabilidade e fluidos no material de estudo, principalmente se este for salino. Diferentes tipos de rochas e minerais apresentam diferentes valores de cargabilidade devido à oscilação do

comportamento dos íons. Uma sequência de aumento de cargabilidade entre minerais é sugerida por autores: pirita > calcocita > cobre > grafita > calcopirita > bornita > galena > magnetita > malaquita > hematita (Tabela 2.10) (Dentith and Mudge, 2014; King, 2007; Shoqeir et al., 2014).

Tabela 2. 10 - Valores de cargabilidade dos principais minerais e minérios relevantes (King, 2007).

Minerals	Chargeability	Minerals	Chargeability
Gold	---	Magnetite	2.2
Copper	12.3	Hematite	0.0
Graphite	11.2	Galena	3.7
Chalcopyrite	9.4	20% Sulphides	2000.0 – 3000.0
Pyrite	13.4	8-20% Sulphides	1000.0 – 2000.0
Pyrrhotite	~10.0	2-8% Sulphides	500.0 – 1000.0

Quando associados a sulfetos, os dados de cargabilidade do depósito Santa Maria não apresentaram tendência, independente da classificação dos sulfetos, tanto em *ranges* de porcentagens, quanto em classificação de acordo com textura, mas quando comparada à pirita individualmente, mesmo com valores ínfimos de no máximo 0.3%, observa-se que sua presença tende a aumentar o valor da cargabilidade (Figura 2.17a).

O gráfico de mica + carbonatos *versus* cargabilidade (Figura 2.17b), mostra que a alteração hidrotermal tende a diminuir o valor de cargabilidade na rocha. Outro item a ser discutido, seria a comparação do grau de inclinação entre o gráfico de pirita *versus* cargabilidade (Figura 2.17a) e pirita + mica + carbonatos *versus* cargabilidade (Figura 2.17c). O primeiro gráfico tem grau de inclinação maior e ascendente do que o segundo gráfico, ou seja, entende-se que a alteração hidrotermal mascara a resposta da pirita quanto a cargabilidade.

Ao analisar a cargabilidade quanto ao litotipo (Figura 2.17d), estes não mostraram tendência significativa a ser discutida. Logo, a alteração hidrotermal foi o fator que mais mostrou-se mapeável quanto a cargabilidade.

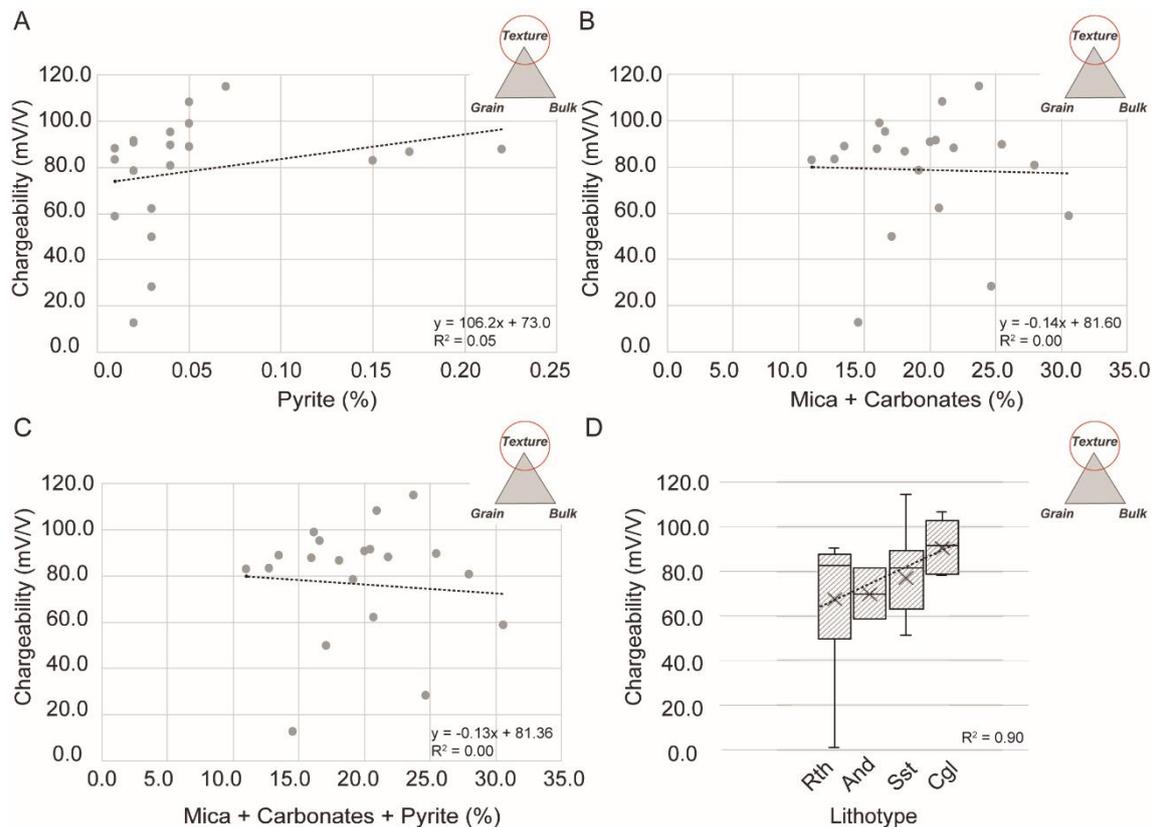


Figura 2. 17 - a) Gráfico de cargabilidade versus pirita com tendência crescente; b) Gráfico de cargabilidade versus pirita + sulfetos de cobre que mostra que o sulfeto de cobre inibe a resposta da pirita; c) Gráfico de cargabilidade versus pirita + mica com tendência crescente; d) Gráfico de cargabilidade versus pirita + carbonato+ mica com tendência crescente. Todos os gráficos contêm coeficiente de determinação para verificar o quanto a reta de tendência se aproxima do valor ideal. As abreviaturas foram retiradas de Krbrz, (1983), do qual Sst -Arenito, Cgl – Conglomerado, Rth – Ritmito e And – Andesito.

As análises e discussões realizadas para cada propriedades física foram sumarizadas e podem ser visualizadas na imagem a seguir (Figura 2.18), que apresenta a eficiência de cada propriedade física para mapear mineralizações, alteração hidrotermal e litologia, e ainda mostra os métodos geofísicos compatíveis, que podem ser implementados na exploração mineral dependendo do item à ser pesquisado ou depósito que o contempla.

Physical Properties	Signatures			Geophysical Methods
	Ore	Alteration	Lithological	
Density	●	●	●	Gravimetry
Magnetic Susceptibility	●	●	●	Magnetometry
Velocity of Acoustic Wave	●	●	●	Seismic
Resistivity	●	●	●	Electrical
Conductivity	●	●	●	
Chargeability	●	●	●	

● High Effectiveness
● Moderate Effectiveness
● Low Effectiveness

Figura 2. 18 – Gráfico sumariza a efetividade das propriedades físicas para mineralizações, alterações hidrotermais e litotipos do Depósito Santa Maria, e ainda o método geofísico equivalente a resposta petrofísica.

2.6. Conclusões

A exploração mineral mundial se torna cada vez mais desafiadora, pois grande parte dos depósitos em superfície ou média profundidade já foram descobertos e explorados. Dessa forma, é cada vez mais salutar a aplicação simultânea e transversal de conhecimento e dados vinculados à geologia, geofísica e geoquímica. Na exploração mineral no Brasil, a geofísica e a petrofísica auxiliam e guiam novas descobertas de depósitos minerais, do qual um dos principais exemplos da eficiência destes métodos é o Depósito de Limoeiro, PE (Fruchting, 2017), que demonstra que essas técnicas devem ser mais utilizadas e aplicadas em pesquisas locais.

Esse trabalho é um exemplo de como a aplicação da petrofísica é essencial para o entendimento de um depósito mineral, pois esta pesquisa atingiu os objetivos por meio da aplicação das técnicas e dos planos propostos, uma vez que a assinatura dos litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações foram identificadas e mapeadas, e ainda quando associado as demais técnicas, foi possível indicar o método prospectivo mais efetivo dentro do contexto geológico em estudo. Podemos apontar as seguintes conclusões:

- A análise simultânea de vários conjuntos de dados, que contêm informações sobre diferentes variáveis como técnicas analíticas, mineralogia, propriedades físicas, geoquímica, foi primordial para maximizar e consolidar o modelo de assinatura do depósito Santa Maria;
- Informações geológicas, geoquímicas e petrofísicas facilitaram o processo de identificação da assinatura de cada propriedade física;
- A geoquímica confirmou a classificação de alguns arenitos do depósito Santa Maria como arcoseanos, e ainda apontou que os demais pertencem à classificação de grauvaça;
- Foi indicada a proveniência das amostras do depósito Santa Maria, como ígneas félsicas, justificada pela alteração hidrotermal, uma vez que se tem maior mobilidade de elementos que podem afetar a proveniência da rocha e, sedimentares quartzosas que podem ser associadas ao Grupo Santa Bárbara;

-
- A geoquímica apresentou compatibilidade com os dados de mineralogia modal do QEMScan, mesmo com diferença considerável de volume e área de amostragem de 15 cm³ para 2cm;
 - A petrofísica foi fundamental para o entendimento da assinatura de cada propriedade física junto a litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações, mesmo em amostragem restrita de 38 amostras;
 - A densidade foi a propriedade física com melhor resposta e menos ambígua, pois esta mapeou minerais que a afetam diretamente, destacando a galena, calcopirita, pirita, pirrotita e esfalerita, principalmente em ocorrências superiores a 10%;
 - Ao analisar a influência de sulfetos em apenas um litotipo, notou-se que altas porcentagens desses minerais podem elevar o valor de densidade da rocha em 0.2 a 0.4 g/cc;
 - A densidade mostrou-se diretamente relacionada com o nível de alteração hidrotermal, devido a presença de mica e carbonatos que podem afetar a porosidade primária da rocha, tornando-a mais densa;
 - Os litotipos também foram diferenciados pela densidade, onde os arenitos apresentaram a menor densidade e os andesitos as maiores;
 - A susceptibilidade das amostras do depósito Santa Maria mostrou ser mais influenciada pelo tamanho do cristal de sulfeto, do que pela porcentagem de ocorrência de minerais magnéticos;
 - Os litotipos mostraram, entre si, variações de até 1.24×10^{-3} SI, visto que rochas com grãos maiores (conglomerados) exibem contribuição modal mais expressiva de minerais ferrimagnéticos, que sugerem proximidade com a rocha-fonte, que no Depósito Santa Maria pode ser considerada as rochas vulcânicas da Suíte Rodeio Velho;
 - Já amostras pertencentes a apenas um litotipo mostraram aumento na susceptibilidade de até 0.5×10^{-3} SI, de uma amostra pouco alterada para uma amostra muito alterada;
 - A soma da porcentagem de todos os sulfetos, ou a soma de apenas sulfetos que afetam diretamente a velocidade de onda P, ou apenas a pirita
-

apresentaram baixa variação ou ainda valores opostos ao esperado, o que faz da mineralogia um item não conclusivo quanto a esta propriedade física;

- A textura do minério foi o item que mais influenciou na velocidade de onda P, uma vez que a textura *stringer* apresentou maior velocidade em relação as demais e também em relação a amostras não sulfetadas;
- A velocidade de onda P mostrou assinatura similar à da densidade, portanto foi possível mapear e diferenciar litotipos e alterações hidrotermais através de sua variação, uma vez que a alteração hidrotermal preenche a porosidade primária e eleva a velocidade de onda P;
- A interpretação do resultado dos dados de propriedade elétrica revelou-se complexa, uma vez que esta é dependente do tipo da rocha e de sua mineralogia, da porosidade das rochas, da conectividade entre os poros e da natureza do fluido nos poros, resultando em variações de escala com magnitudes de até 10x;
- A porcentagem de sulfetos, a classificação de sua textura e o litotipo não foram fatores que influenciaram diretamente na resistividade;
- A alteração hidrotermal mostrou-se mapeável pela resistividade, uma vez que esta propriedade atingiu variações de escalas de 5x entre arenitos alterados e arenitos não alterados, de 8x em conglomerados alterados e não alterados e 50x em ritmitos alterados e não alterados, mostrando mais uma vez como o preenchimento da porosidade primária influencia nas propriedades físicas;
- A soma da porcentagem de todos os sulfetos não apresentou predisposição, mas a pirita individualmente revelou-se ser um elemento que atua sobre a cargabilidade de forma progressiva;
- A alteração hidrotermal não foi mapeada quanto a cargabilidade, mas quando analisada a resposta da alteração juntamente com a pirita, notou-se que a alteração tende a mascarar a assinatura da pirita na rocha;
- Finalmente, volumes de dados petrofísicos permitiram uma caracterização espacial mais completa das propriedades das rochas, das alterações e da composição.

ACKNOWLEDGEMENTS

Agradeço a NEXA Resources pelo apoio financeiro a esta pesquisa inovadora em parceria com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Cnpq e ao Instituto Euvaldo Lodi - IEL. Ainda a eles, pela oportunidade de trabalhar com um banco de dados tão amplo que disponibilizava itens, como a petrofísica, que ainda são pouco utilizados no campo da exploração.

REFERÊNCIAS

- Airo, M.-L., 2015. Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland. *Geol. Surv. Finl.* 58, 9–70.
- Airo, M.-L., Säävuori, H., 2013. Petrophysical characteristics of Finnish bedrock - Concise handbook on the physical parameters of bedrock.
- Asiedu, D.K., Hegner, E., Rocholl, A., Atta-Peters, D., 2005. Provenance of late Ordovician to early Cretaceous sedimentary rocks from southern Ghana, as inferred from Nd isotopes and trace elements. *J. African Earth Sci.* 41, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.05.003>
- Basei, M.A.S., Siga Jr., O., Masquelin, E.C., Harara, O.M., Reis-Neto, J.M., Preciozzi, F., 2000. The Dom Feliciano Belt (Brazil-Uruguay) and its foreland (Rio de la Plata Craton): Framework, tectonic evolution and correlations with similar terranes of Southwestern Africa. *Tecton. Evol. South Am.* 311–334.
- Berger, B.R., Ayuso, R. a, Wynn, J.C., Seal, R.R., 2008. Preliminary model of porphyry copper deposits. *Open-File Rep. - U. S. Geol. Surv.* 55. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2011/0172>
- Bérubé, C.L., Olivo, G.R., Chouteau, M., Perrouy, S., Shamsipour, P., Enkin, R.J., Morris, W.A., Feltrin, L., Thiémonge, R., 2018. Predicting rock type and detecting hydrothermal alteration using machine learning and petrophysical properties of the Canadian Malartic ore and host rocks, Pontiac Subprovince, Québec, Canada. *Ore Geol. Rev.* 96, 130–145. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.011>
- Biondi, J.C., 2015. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros, 2nd ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Bongiolo, E.M., Renac, C., Mexias, A.S., Gomes, M.E.B., Ronchi, L.H., Patrier-Mas, P., 2011. Evidence of ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry-epithermal Au-Cu deposits of lavras do sul. *Precambrian Res.* 189, 404–419. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.05.007>
- Borba, A.W. De, 2006. Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com

base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Brito Neves, B.B., Cordani, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Res.* 53, 23–40.

Brito, R.S.C., Silva, M. da G., Kuyumjian, R.M., 2010. Modelos de depósito de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo, Programa geologia do Brasil. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Clark, D.A., 2014. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics* 624–625, 46–65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.011>

Council for Geoscience, 2017. Petrophysical Analysis of Core Samples for Zinc Exploration Santa Maria Project in Brazil. Pretoria.

CPRM, 2010. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos.

da Silva, L.C., Mcnaughton, N.J., Armstrong, R., Fletcher, I.R., 2005. The neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections : a zircon-based U – Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano / Pan-African systems of orogens. *Precambrian Res.* 136, 203–240. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.004>

Dentith, M., Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for Mineral Exploration Geoscientist*, 1st ed. Cambridge University Press.

Fambrini, G.L., Janikian, L., De Almeida, R.P., Fragoso-Cesar, A.R.S., 2007. Evolução estratigráfica e paleogeográfica do grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS. *Geol. USP - Ser. Cient.* 7, 1–24. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2007000200001>

Fruchting, A., 2017. Estratégia para utilização de dados geofísicos na exploração de mineralizações do tipo Ni-Cu-PGE: A descoberta do depósito de Limoeiro - PE. Universidade de Brasília.

Garver, J.I., Scott, T.J., 1995. Trace elements in shale as indicators of crustal

-
- provenance and terrane accretion in the southern Canadian Cordillera. *Geol. Soc. Am. Bull.* 107, 440–453. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0440:TEISAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0440:TEISAI>2.3.CO;2)
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7)
- Herron, M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.* 58, 820–829.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D., Vikre, P.G., 2010. Porphyry Copper Deposit Model Scientific Investigations Report 2010 – 5070 – B. USGS Sci. Investig. Rep. 2010-5070-B 169.
- King, A., 2007. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *Ore Depos. Explor. Technol. Proceeding*, 647–665.
- Krbrz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 68, 277–279.
- McGladrey, A.J., Olivo, G.R., Silva, A.M., Oliveira, G.D., Neto, B.B., Perrouy, S., 2017. The integration of physical rock properties, mineralogy and geochemistry for the exploration of large zinc silicate deposits: A case study of the Vazante zinc deposits, Minas Gerais, Brazil. *J. Appl. Geophys.* 136, 400–416. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.11.013>
- Milkereit, B., Berrer, E.K., King, A.R., Watts, A.H., Roberts, B., Adam, E., Eaton, D.W., Wu, J., Salisbury, M.H., 2000. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada. *Geophysics* 65, 1890–1899. <https://doi.org/10.1190/1.1444873>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 2007. Homepage | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [WWW Document]. URL <https://www.swpc.noaa.gov/> (accessed 4.15.19).
- NEXA Resources, 2015. Relatório Anual - Projeto Santa Maria. Minas do Camaqua.
-

-
- NEXA Resources, 2009a. Relatório Final de Aquisição e Processamento de Dados de Magnetometria Terrestre.
- NEXA Resources, 2009b. Relatório Final de Aquisição e Processamento de Dados de Polarização Induzida Espectral.
- Oldenburg, D., Pratt, D., 2007. Geophysical Inversion for Mineral Exploration: a Decade of Progress in Theory and Practice. *Proceedings Explor. 07 Fifth Decenn. Int. Conf. Miner. Explor.* 61–95.
- Paim, P.S.G., Chemale Junior, F., Wildner, W., 2014. Estágios Evolutivos Da Bacia Do Camaquã (Rs). *Ciência e Nat.* 36, 183–193. <https://doi.org/10.5902/2179460X13748>
- Paine, J., 2007. Developments in Geophysical Inversion in the Last Decade, in: B. Milkereit (Ed.), *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.* pp. 485–488.
- Philipp, R.P., Pimentel, M.M., Chemale Jr, F., 2016. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian J. Geol.* 46, 83–104. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150016>
- Remus, M. V.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., 2000. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Cacapava Granite of the Brasiliano cycle in southern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 13, 191–216. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00017-1)
- Renac, C., Mexias, A.S., Gomes, M.E.B., Ronchi, L.H., Nardi, L.V.S., Laux, J.H., 2014. Isotopic fluid changes in a Neoproterozoic porphyry-epithermal system: The Uruguay mine, southern Brazil. *Ore Geol. Rev.* 60, 146–160. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.016>
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.* 67, 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Salisbury, M.H., 1996. Seismic Imaging of Massive Sulfide Deposits: Part I. *Rock Properties* *. *Econ. Geol.* 91, 821–828.
-

-
- Saruwatari, K., Ji, S., Long, C., Salisbury, M.H., 2001. Seismic anisotropy of mantle xenoliths and constraints on upper mantle structure beneath the Southern Canadian Cordillera. *Tectonophysics* 339, 403–426. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00136-6)
- Shoqeir, J.H., Hoetzi, H., Flexer, A., 2014. Integration of Electrical Resistivity and Electromagnetic Radiation Methods for Fracture Flow System Detection. *Sci. Res.* 5, 863–875.
- Sillitoe, R.H., Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits, in: Simmons, S.F., Graham, I.J. (Eds.), *Volcanic, Geothermal and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. Society of Economic Geologists, pp. 315–343. <https://doi.org/10.1126/science.101.2621.295-b>
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, 2 Edition. ed. Cambridge University Press, Melbourne.
- Veigel, R., Dardenne, M.A., 1990. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas da evolução da mineralização Cu-Pb-Zn do Distrito de Camaquã, RS. *Rev. Bras. Geociências* 20, 55–67.
- Williams, N.C., 2009. Mass and magnetic properties for 3D geological and geophysical modelling of the southern Agnew-Wiluna Greenstone Belt and Leinster nickel deposits, Western Australia. *Aust. J. Earth Sci.* 56, 1111–1142. <https://doi.org/10.1080/08120090903246220>
- Winterburn, P., Noble, R.R., Lawie, D., 2017. Advances in Exploration Geochemistry , 2007 to 2017 and Beyond. *Proc. Explor. 17 Sixth Decenn. Int. Conf. Miner. Explor.* 495–505.
-

APÊNDICE I

Description	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26
Sample ID	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O%	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	P ₂ O ₅ %	Na ₂ O%	MnO%
SM01	67.04	13.18	8.70	1.44	0.39	0.23	0.26	0.11	0.08
SM02	60.79	11.80	7.78	5.83	2.37	0.91	0.24	0.10	0.27
SM03	61.44	12.30	8.00	3.45	3.26	0.36	0.20	0.10	0.31
SM04	71.14	11.16	7.51	1.30	1.52	0.14	0.19	0.11	0.03
SM05	56.08	11.00	5.71	11.66	2.05	1.66	0.18	0.09	0.42
SM06	51.09	14.24	6.55	15.84	0.54	1.56	0.10	0.11	0.43
SM07	71.25	9.27	5.98	6.55	0.49	0.78	0.15	0.13	0.24
SM08	64.16	11.99	7.18	3.69	1.68	0.43	0.21	0.11	0.14
SM09	71.09	10.94	7.99	3.08	2.31	0.31	0.20	0.08	0.15
SM10	65.28	14.07	10.20	1.49	3.35	0.20	0.10	0.24	0.28
SM11	65.57	11.58	6.05	8.10	1.38	2.07	0.19	0.10	0.15
SM12	76.09	11.78	7.14	1.58	0.06	0.23	0.05	0.23	0.01
SM13	61.37	12.28	7.80	1.57	5.07	0.26	0.08	0.24	0.63
SM14	69.99	11.94	7.83	2.36	0.62	0.41	0.20	0.12	0.03
SM15	55.78	10.30	2.06	8.80	0.96	0.72	0.19	2.33	0.05
SM16	73.60	8.08	6.39	1.40	0.30	0.12	0.10	0.11	0.02
SM17	75.19	8.79	6.89	2.05	0.57	0.17	0.12	0.13	0.05
SM18	78.95	7.70	5.85	3.00	0.20	0.12	0.12	0.11	0.01
SM19	66.57	12.44	6.61	3.44	3.50	0.41	0.11	0.38	0.30
SM20	63.37	12.07	8.33	3.88	2.60	0.50	0.19	0.11	0.28
SM21	51.00	14.30	6.59	4.73	0.79	1.54	0.16	0.14	0.05
SM22	67.73	9.49	6.16	4.25	2.21	1.56	0.09	0.16	0.09
SM23	66.21	10.98	6.75	4.74	0.99	1.60	0.18	0.10	0.10
SM24	69.88	12.22	7.90	5.03	0.34	0.20	0.25	0.12	0.10
SM25	75.02	11.20	7.14	2.28	0.62	0.40	0.19	0.13	0.03
SM26	49.82	18.12	11.70	4.34	3.65	1.28	1.73	0.06	0.16
SM27	42.15	13.14	6.69	13.81	3.10	3.97	1.13	0.07	0.28
SM28	64.51	12.30	7.72	7.23	2.09	1.30	0.21	0.13	0.21
SM29	64.22	10.21	7.61	2.21	4.44	0.26	0.17	0.11	0.41
SM30	59.14	10.78	7.73	2.24	1.04	0.27	0.18	0.15	0.22
SM31	72.37	9.82	7.60	1.85	0.31	0.36	0.20	0.11	0.02
SM32	50.78	18.36	12.35	1.23	0.50	0.31	0.31	0.24	0.01
SM33	59.67	8.67	5.91	3.60	6.47	3.58	0.16	0.10	0.13
SM34	61.56	12.46	6.35	6.27	0.67	2.79	0.20	0.12	0.15
SM35	61.27	11.45	7.98	4.77	2.91	1.74	0.14	0.21	0.21

SM36	61.91	10.66	6.47	4.92	1.67	1.47	0.16	0.14	0.13
SM37	69.25	10.84	7.01	4.43	1.20	0.33	0.17	0.07	0.08
SM38	69.35	11.78	7.50	4.53	0.90	0.73	0.18	0.09	0.08

Description	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	ME-XRF26	OA-GRA05x
Sample ID	BaO%	TiO ₂ %	SrO%	Cr ₂ O ₃ %	LOI%
SM01	0.07	0.89	0.02	0.01	2.52
SM02	0.06	0.83	0.02	0.01	4.95
SM03	0.06	0.67	0.02	0.01	4.32
SM04	0.11	0.65	0.02	0.01	2.33
SM05	0.04	0.61	0.01	0.01	8.87
SM06	0.10	0.41	0.03	0.01	8.49
SM07	0.13	0.49	0.02	0.01	3.48
SM08	0.11	0.70	0.03	0.01	4.05
SM09	0.10	0.62	0.02	0.01	2.15
SM10	0.37	0.35	0.05	0.01	2.73
SM11	0.04	0.60	0.01	0.01	2.59
SM12	0.53	0.24	0.03	0.01	1.31
SM13	0.19	0.25	0.05	0.01	2.86
SM14	0.04	0.64	0.01	0.01	2.49
SM15	0.06	0.63	0.03	0.01	7.44
SM16	0.18	0.31	0.04	0.01	1.23
SM17	0.15	0.32	0.03	0.01	1.43
SM18	0.14	0.39	0.01	0.01	0.97
SM19	0.17	0.39	0.04	0.01	4.10
SM20	0.05	0.61	0.02	0.01	3.08
SM21	0.13	0.53	0.05	0.01	7.14
SM22	0.15	0.30	0.03	0.01	4.36
SM23	0.14	0.55	0.02	0.01	5.06
SM24	0.10	0.73	0.02	0.01	1.53
SM25	0.14	0.62	0.04	0.01	1.65
SM26	0.12	3.25	0.02	0.04	4.78
SM27	0.11	2.23	0.04	0.01	11.94
SM28	0.06	0.69	0.02	0.01	2.86
SM29	0.04	0.51	0.03	0.01	3.43
SM30	0.06	0.58	0.02	0.01	4.17
SM31	0.07	0.58	0.04	0.01	2.02
SM32	0.20	1.09	0.06	0.02	2.82
SM33	0.16	0.43	0.03	0.01	9.98

SM34	0.11	0.68	0.03	0.01	6.96
SM35	0.19	0.43	0.06	0.01	6.82
SM36	0.10	0.61	0.06	0.01	5.20
SM37	0.04	0.53	0.04	0.01	1.52
SM38	0.05	0.56	0.03	0.01	1.63

APÊNDICE II

Description	C-IR07	S-IR08	ME-MS81	ME-MS81	ME-4ACD81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
Sample ID	C %	S %	Rb	Cs	Li	Ba	Sr	Ga	V
SM01	0.09	2.27	224.00	2.38	10.00	844.00	173.00	19.00	86.00
SM02	1.09	3.27	193.50	1.61	10.00	700.00	80.80	16.90	78.00
SM03	1.13	1.81	203.00	2.21	10.00	732.00	119.00	16.70	69.00
SM04	0.33	1.76	181.50	1.63	10.00	1130.00	125.00	14.30	58.00
SM05	2.59	0.3	123.50	1.34	10.00	523.00	106.00	20.40	64.00
SM06	2.17	0.02	145.00	2.19	0.50	1170.00	196.50	22.30	51.00
SM07	0.86	0.23	125.50	1.09	20.00	1410.00	161.00	13.20	48.00
SM08	0.38	3.62	220.00	3.27	10.00	1245.00	206.00	17.10	68.00
SM09	0.51	0.22	210.00	1.83	10.00	1070.00	89.10	13.90	54.00
SM10	0.75	0.73	243.00	3.68	10.00	3510.00	432.00	16.50	47.00
SM11	0.27	0.83	140.50	1.40	30.00	587.00	67.60	18.10	61.00
SM12	0.03	0.07	177.00	3.86	20.00	5130.00	286.00	13.20	31.00
SM13	1.2	2.07	191.00	4.15	10.00	1985.00	333.00	17.50	34.00
SM14	0.11	1.89	235.00	4.74	20.00	590.00	64.90	14.40	60.00
SM15	0.17	9.66	100.00	2.62	10.00	651.00	104.00	18.20	57.00
SM16	0.05	1.22	155.50	1.02	30.00	1785.00	134.50	9.70	21.00
SM17	0.18	0.79	162.00	1.10	30.00	1565.00	139.50	9.10	28.00
SM18	0.04	0.42	156.50	1.53	30.00	1590.00	57.90	8.90	38.00
SM19	0.75	0.005	196.50	23.70	10.00	1815.00	297.00	17.70	24.00
SM20	0.63	1.66	211.00	2.12	20.00	639.00	69.00	16.60	60.00
SM21	0.81	5.56	172.50	4.60	20.00	1245.00	268.00	16.60	52.00
SM22	1.32	1.73	128.00	1.12	30.00	1660.00	205.00	10.80	33.00
SM23	1.16	1.16	168.50	2.40	20.00	1520.00	138.00	14.10	56.00
SM24	0.03	0.005	213.00	3.37	20.00	1155.00	170.50	18.30	73.00
SM25	0.21	0.01	191.00	3.97	30.00	1535.00	372.00	15.80	54.00
SM26	0.96	0.3	349.00	4.20	10.00	1070.00	127.50	31.20	248.00
SM27	3.38	0.62	151.00	2.10	10.00	1230.00	345.00	21.80	155.00
SM28	0.44	1.97	182.50	1.59	20.00	601.00	62.50	15.80	68.00
SM29	1.05	1.29	195.00	1.68	20.00	545.00	73.10	13.30	50.00
SM30	0.38	4.7	204.00	2.13	10.00	700.00	67.10	14.20	64.00
SM31	0.35	1.08	193.00	1.18	30.00	846.00	232.00	11.90	54.00
SM32	0.02	2.93	315.00	3.92	10.00	1970.00	294.00	27.90	133.00
SM33	2.66	0.03	167.00	1.66	30.00	1825.00	297.00	11.20	66.00
SM34	1.68	0.6	168.00	3.05	20.00	1345.00	270.00	17.70	78.00
SM35	1.82	0.15	180.00	1.16	10.00	2170.00	550.00	17.20	72.00

SM36	1.18	2.29	152.50	1.92	20.00	1175.00	368.00	15.80	55.00
SM37	0.24	0.47	216.00	3.79	20.00	587.00	178.00	16.10	59.00
SM38	0.16	0.4	234.00	2.64	30.00	756.00	152.00	16.20	64.00

Description	ME-MS81	ME-4ACD81							
Sample ID	Sn	W	Ta	Nb	Th	U	Zr	Hf	Ni
SM01	3.00	5.00	1.10	17.90	11.50	16.15	498.00	11.90	29.00
SM02	3.00	9.00	0.90	14.80	9.75	2.20	434.00	10.50	32.00
SM03	2.00	6.00	0.80	13.70	8.31	3.23	326.00	7.90	26.00
SM04	2.00	7.00	0.80	12.80	7.51	1.89	341.00	8.40	12.00
SM05	3.00	11.00	0.70	11.70	7.45	2.56	273.00	6.70	54.00
SM06	2.00	12.00	0.80	13.40	7.14	3.27	288.00	6.80	48.00
SM07	2.00	10.00	0.90	17.30	8.12	1.49	386.00	9.40	37.00
SM08	2.00	4.00	1.00	18.70	9.24	2.56	332.00	8.30	19.00
SM09	2.00	8.00	0.70	11.50	7.47	2.75	266.00	6.60	8.00
SM10	2.00	5.00	0.70	11.70	6.67	10.25	267.00	6.50	15.00
SM11	2.00	4.00	0.70	12.80	8.11	2.64	219.00	5.40	22.00
SM12	1.00	2.00	0.50	9.20	4.54	1.66	170.00	4.00	9.00
SM13	2.00	3.00	0.60	9.70	5.26	12.50	174.00	4.30	11.00
SM14	3.00	5.00	0.70	11.90	8.26	2.85	213.00	5.20	19.00
SM15	2.00	4.00	0.70	11.10	7.31	1.65	254.00	6.60	12.00
SM16	1.00	16.00	0.40	6.70	3.74	6.48	118.00	2.90	4.00
SM17	1.00	24.00	0.40	6.90	4.03	15.85	127.00	3.20	5.00
SM18	2.00	12.00	0.50	7.50	5.17	4.67	143.00	3.70	5.00
SM19	2.00	5.00	0.80	13.60	8.60	1.84	249.00	6.50	8.00
SM20	2.00	3.00	0.80	11.40	7.48	1.77	212.00	5.60	21.00
SM21	2.00	3.00	0.80	12.90	7.69	4.96	308.00	7.80	12.00
SM22	1.00	3.00	0.50	8.10	4.44	1.62	162.00	4.20	8.00
SM23	2.00	4.00	0.60	9.90	6.85	1.78	192.00	5.20	16.00
SM24	2.00	5.00	0.90	14.90	9.59	2.03	391.00	10.00	23.00
SM25	2.00	7.00	0.80	13.30	8.43	1.84	379.00	10.10	22.00
SM26	2.00	17.00	1.50	30.90	2.53	2.28	466.00	9.90	53.00
SM27	2.00	25.00	1.20	23.70	2.43	1.08	309.00	7.10	56.00
SM28	2.00	3.00	0.70	11.90	8.16	1.86	233.00	6.20	24.00
SM29	2.00	4.00	0.60	9.50	6.69	1.52	162.00	4.40	11.00
SM30	2.00	2.00	0.70	10.40	6.64	1.92	278.00	7.30	22.00
SM31	2.00	6.00	0.80	11.40	7.54	1.84	304.00	7.70	27.00
SM32	2.00	4.00	1.40	23.30	14.80	6.71	715.00	17.00	338.00
SM33	1.00	2.00	0.70	8.70	5.97	1.55	226.00	6.20	9.00

SM34	2.00	4.00	0.90	16.00	10.70	3.81	410.00	10.20	20.00
SM35	1.00	3.00	0.70	12.10	6.59	1.27	205.00	5.10	15.00
SM36	2.00	5.00	0.90	13.90	9.69	3.16	521.00	13.00	11.00
SM37	1.00	34.00	0.70	10.20	7.16	2.27	205.00	5.40	12.00
SM38	1.00	8.00	0.70	11.00	7.02	1.70	232.00	6.30	14.00

Description	ME-MS81	ME-4ACD81	ME-MS42						
Sample ID	Cr	Co	Cu	Cd	Zn	Pb	Mo	Ag	As
SM01	80.00	22.00	131.00	176.50	>10000	1085.00	0.50	6.20	62.00
SM02	80.00	27.00	308.00	67.90	>10000	7000.00	13.00	5.10	90.80
SM03	70.00	19.00	72.00	98.70	>10000	5740.00	4.00	3.30	51.10
SM04	60.00	13.00	47.00	96.90	>10000	5020.00	0.50	2.10	91.90
SM05	60.00	29.00	7770.00	0.03	296.00	59.00	1.00	11.00	6.10
SM06	30.00	38.00	577.00	0.03	271.00	44.00	0.50	2.70	8.30
SM07	30.00	47.00	7830.00	0.03	525.00	46.00	0.50	5.70	1.90
SM08	70.00	13.00	57.00	90.60	>10000	4970.00	1.00	3.30	11.90
SM09	60.00	4.00	63.00	0.03	87.00	632.00	0.50	0.50	12.90
SM10	20.00	11.00	24.00	13.20	1150.00	281.00	0.50	3.50	169.00
SM11	60.00	18.00	48.00	0.03	306.00	3340.00	0.50	1.20	57.00
SM12	20.00	8.00	78.00	0.03	110.00	65.00	0.50	2.50	1.40
SM13	10.00	9.00	41.00	102.00	>10000	1160.00	6.00	4.20	115.00
SM14	60.00	12.00	58.00	63.70	>10000	1920.00	1.00	4.60	>250
SM15	60.00	6.00	563.00	320.00	>10000	>10000	7.00	5.10	>250
SM16	30.00	4.00	4220.00	6.10	569.00	>10000	2.00	49.60	11.80
SM17	50.00	77.00	>10000	3.80	270.00	>10000	2.00	98.80	5.60
SM18	50.00	2.00	8490.00	0.03	89.00	3670.00	1.00	45.40	6.30
SM19	20.00	3.00	140.00	0.03	139.00	134.00	0.50	0.03	5.90
SM20	60.00	14.00	196.00	74.30	>10000	>10000	5.00	1.90	61.70
SM21	40.00	15.00	268.00	302.00	>10000	>10000	23.00	6.60	57.40
SM22	30.00	7.00	41.00	36.60	7610.00	9370.00	0.50	1.20	4.90
SM23	50.00	12.00	124.00	32.20	7980.00	>10000	1.00	1.20	15.50
SM24	70.00	12.00	8.00	1.20	550.00	305.00	0.50	0.03	1.70
SM25	60.00	14.00	32.00	1.80	883.00	1100.00	0.50	0.70	1.30
SM26	180.00	20.00	2850.00	4.80	1170.00	3330.00	1.00	2.00	8.10
SM27	110.00	18.00	2250.00	0.03	275.00	20.00	0.50	1.10	3.80
SM28	60.00	15.00	4940.00	6.50	2110.00	3970.00	0.50	12.10	118.50
SM29	50.00	6.00	385.00	5.40	1295.00	>10000	5.00	2.40	13.00
SM30	60.00	16.00	952.00	367.00	>10000	>10000	25.00	20.90	36.00
SM31	70.00	88.00	1160.00	44.20	>10000	>10000	0.50	4.00	1.70

SM32	100.00	446.00	274.00	110.50	>10000	>10000	326.00	16.50	43.80
SM33	60.00	9.00	7.00	0.03	169.00	111.00	1.00	0.03	1.80
SM34	60.00	19.00	16.00	5.00	1720.00	1660.00	0.50	0.50	2.90
SM35	40.00	12.00	15.00	1.70	614.00	9060.00	0.50	0.60	0.70
SM36	60.00	17.00	932.00	68.80	>10000	>10000	0.50	13.40	34.50
SM37	50.00	6.00	63.00	0.03	87.00	>10000	1.00	2.60	5.40
SM38	60.00	11.00	93.00	0.03	185.00	>10000	0.50	1.40	9.60

Description	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS81	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42
Sample ID	Sb	Bi	Se	Hg	Tl	Ge	In	Re	Te
SM01	0.61	0.20	3.30	2.29	0.38	4.00	0.17	0.01	0.01
SM02	0.93	0.20	1.80	1.19	0.10	4.00	0.58	0.01	0.02
SM03	0.31	0.15	2.60	0.47	0.19	4.00	0.14	0.02	0.01
SM04	0.93	0.14	1.80	1.04	0.20	4.00	0.18	0.01	0.01
SM05	0.24	0.73	0.10	0.03	0.03	4.00	0.22	0.00	0.01
SM06	0.65	9.34	6.20	0.05	0.03	4.00	0.37	0.00	0.01
SM07	0.41	1.13	0.60	0.20	0.03	4.00	0.06	0.00	0.01
SM08	0.51	0.13	2.20	6.05	0.24	4.00	0.03	0.01	0.01
SM09	0.92	0.18	0.10	0.12	0.09	4.00	0.02	0.00	0.01
SM10	0.48	0.05	0.40	0.74	0.66	4.00	0.00	0.00	0.01
SM11	0.49	0.24	0.10	0.19	0.60	4.00	0.06	0.00	0.02
SM12	0.10	0.05	0.10	0.03	0.08	4.00	0.00	0.00	0.01
SM13	1.30	0.06	2.60	1.94	0.83	4.00	0.02	0.03	0.01
SM14	1.46	0.14	1.60	8.08	0.17	4.00	0.04	0.03	0.01
SM15	1.65	0.15	5.90	4.50	0.10	4.00	0.09	0.00	0.02
SM16	0.55	0.28	0.10	1.18	0.07	4.00	0.03	0.00	0.01
SM17	0.75	0.67	0.10	3.13	0.04	4.00	0.07	0.00	0.01
SM18	3.71	8.09	0.20	0.28	0.03	4.00	0.05	0.00	0.01
SM19	5.31	0.06	0.10	0.00	0.44	4.00	0.01	0.00	0.01
SM20	1.26	0.20	1.60	0.74	0.06	4.00	0.10	0.01	0.01
SM21	1.79	0.27	6.20	4.39	0.11	4.00	0.15	0.06	0.01
SM22	0.09	0.15	0.50	0.33	0.04	4.00	0.06	0.01	0.01
SM23	0.57	0.09	0.50	0.37	0.05	4.00	0.02	0.00	0.01
SM24	0.25	0.04	0.20	0.01	0.05	4.00	0.01	0.00	0.01
SM25	0.31	0.05	0.10	0.02	0.07	4.00	0.01	0.00	0.02
SM26	0.32	0.18	0.70	0.28	0.11	4.00	0.04	0.00	0.01
SM27	0.03	0.21	0.50	0.01	0.04	4.00	0.22	0.00	0.01
SM28	0.21	1.65	0.40	0.59	0.10	4.00	0.14	0.00	0.01
SM29	1.07	0.20	0.50	0.10	0.07	4.00	0.14	0.01	0.01

SM30	6.88	0.12	7.00	10.80	0.16	4.00	0.03	0.06	0.01
SM31	0.35	0.15	0.90	1.28	0.06	4.00	0.03	0.01	0.01
SM32	7.43	0.19	2.00	1.59	0.38	4.00	0.17	0.43	0.02
SM33	0.06	0.01	0.10	0.00	0.03	4.00	0.01	0.00	0.01
SM34	0.05	0.05	1.30	0.03	0.03	4.00	0.02	0.00	0.01
SM35	0.03	0.04	0.10	0.33	0.02	4.00	0.09	0.00	0.01
SM36	0.85	0.13	1.20	0.72	0.03	4.00	0.19	0.00	0.01
SM37	1.74	0.14	0.20	0.04	0.05	4.00	0.03	0.00	0.01
SM38	2.36	0.15	0.20	0.01	0.04	4.00	0.03	0.00	0.01

APÊNDICE III

Description	ME-MS81	ME-MS42	ME-MS81						
Sample ID	Y	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
SM01	26.40	1.10	51.20	100.00	10.35	39.30	6.74	1.34	5.30
SM02	28.90	3.50	48.30	91.10	9.42	35.20	6.28	1.00	5.66
SM03	24.70	2.80	44.00	83.70	8.74	34.20	5.60	1.30	5.36
SM04	22.90	0.70	48.80	90.60	9.31	35.70	6.43	1.95	5.52
SM05	15.10	4.00	19.20	37.90	4.00	15.90	2.68	0.57	2.72
SM06	11.60	2.60	17.50	33.10	3.40	12.70	2.56	0.46	2.24
SM07	9.20	1.60	57.00	100.00	10.00	35.30	5.23	1.36	3.59
SM08	27.90	0.80	39.30	79.10	8.17	32.00	5.95	1.29	5.78
SM09	21.70	2.50	40.40	77.10	8.01	31.50	5.67	1.43	4.97
SM10	10.50	0.60	80.30	104.00	8.82	30.30	4.11	1.23	2.96
SM11	22.80	3.30	39.70	76.40	8.00	31.00	5.57	1.24	5.27
SM12	14.30	0.40	28.20	58.20	5.61	21.50	3.79	1.06	3.67
SM13	10.80	0.80	30.40	58.50	5.52	20.70	3.43	0.91	2.71
SM14	16.40	1.00	30.20	78.40	9.86	43.20	7.74	1.54	4.73
SM15	25.10	0.50	38.20	71.30	7.35	29.90	5.19	1.07	5.34
SM16	10.40	0.40	27.60	50.00	5.22	19.90	3.69	1.06	2.86
SM17	9.60	0.60	25.50	46.60	4.84	18.20	3.32	0.96	2.67
SM18	13.20	1.00	32.90	62.70	6.43	25.20	4.33	1.75	3.54
SM19	13.30	1.40	31.20	66.80	5.32	19.90	3.48	1.15	3.04
SM20	20.30	3.20	39.80	75.20	7.94	30.60	5.31	1.39	4.65
SM21	14.00	0.90	42.40	79.20	7.82	29.60	4.86	1.03	3.99
SM22	11.90	0.90	28.60	52.70	5.37	20.00	3.62	0.67	3.14
SM23	18.20	2.10	38.30	73.60	7.54	29.50	4.93	1.28	4.52
SM24	21.20	2.50	49.00	93.50	9.52	37.90	6.24	1.49	5.16
SM25	16.60	1.70	44.90	83.80	8.26	32.30	5.49	1.47	4.39
SM26	78.20	6.90	81.30	162.50	21.30	86.20	15.25	4.64	16.05
SM27	46.20	7.30	68.80	148.00	15.85	69.90	12.95	4.01	12.20
SM28	24.40	3.90	39.40	75.50	7.94	31.70	5.71	1.52	6.22
SM29	26.10	2.40	34.00	67.80	7.00	29.00	5.68	1.35	5.88
SM30	17.10	0.80	38.80	74.70	7.79	30.00	4.76	1.12	4.67
SM31	14.60	0.70	45.30	89.50	9.20	31.80	5.49	1.05	3.93
SM32	18.60	0.50	86.30	171.50	17.05	59.00	8.69	1.14	5.25
SM33	17.30	1.10	35.90	71.40	7.29	26.10	4.91	1.23	4.31
SM34	16.90	3.00	51.20	102.50	10.40	38.00	6.21	1.28	4.36
SM35	18.90	1.70	40.10	74.40	7.54	26.70	4.93	1.28	4.25

SM36	16.80	1.80	48.10	90.40	9.11	31.60	5.15	1.18	3.85
SM37	17.30	1.30	38.30	73.80	7.97	28.30	5.03	1.35	4.23
SM38	21.10	1.50	40.70	79.20	8.38	30.70	5.78	1.34	4.87

Description	ME-MS81						
Sample ID	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SM01	0.86	4.75	0.92	2.68	0.39	2.73	0.39
SM02	0.94	5.04	1.07	2.95	0.41	2.62	0.41
SM03	0.74	4.52	0.87	2.37	0.35	2.27	0.34
SM04	0.82	4.37	0.84	2.15	0.33	2.18	0.31
SM05	0.39	2.30	0.55	1.61	0.27	2.11	0.31
SM06	0.32	2.09	0.45	1.32	0.21	1.53	0.22
SM07	0.45	1.92	0.35	0.95	0.18	1.25	0.20
SM08	0.82	5.27	1.00	2.80	0.41	2.60	0.41
SM09	0.78	4.30	0.87	2.36	0.32	2.30	0.34
SM10	0.39	2.03	0.39	1.23	0.19	1.26	0.19
SM11	0.70	4.47	0.91	2.36	0.33	2.22	0.35
SM12	0.43	2.93	0.55	1.45	0.26	1.56	0.23
SM13	0.37	2.23	0.45	1.11	0.19	1.16	0.18
SM14	0.68	3.42	0.65	1.84	0.30	2.16	0.30
SM15	0.81	4.59	0.90	2.42	0.31	2.31	0.31
SM16	0.40	2.20	0.41	1.11	0.13	1.05	0.15
SM17	0.36	2.10	0.38	1.11	0.15	1.15	0.16
SM18	0.51	2.79	0.56	1.50	0.20	1.23	0.21
SM19	0.42	2.63	0.51	1.37	0.21	1.40	0.21
SM20	0.64	4.24	0.76	2.05	0.32	2.39	0.32
SM21	0.52	2.70	0.57	1.61	0.23	1.66	0.24
SM22	0.46	2.36	0.47	1.24	0.18	1.16	0.18
SM23	0.64	3.65	0.74	1.94	0.27	1.84	0.32
SM24	0.75	4.00	0.88	2.43	0.36	2.27	0.38
SM25	0.59	3.45	0.68	1.80	0.26	1.73	0.27
SM26	2.17	12.65	2.65	7.20	1.03	6.33	0.92
SM27	1.69	10.05	1.97	4.99	0.62	4.40	0.60
SM28	0.87	4.82	1.06	2.79	0.40	2.37	0.41
SM29	0.86	5.35	0.99	2.54	0.35	2.37	0.30
SM30	0.66	3.41	0.68	1.94	0.27	2.00	0.26
SM31	0.46	2.35	0.58	1.61	0.26	1.94	0.30
SM32	0.59	3.54	0.73	2.02	0.35	2.51	0.34
SM33	0.61	2.95	0.63	1.69	0.24	1.65	0.22

SM34	0.57	3.12	0.67	1.94	0.30	2.17	0.33
SM35	0.60	3.58	0.70	1.77	0.26	1.79	0.22
SM36	0.55	2.65	0.57	1.65	0.23	1.77	0.25
SM37	0.57	3.43	0.64	1.98	0.29	1.90	0.28
SM38	0.67	3.83	0.75	1.85	0.28	2.01	0.29

APÊNDICE IV

Petrophysics Sample ID	Density (g/cc)	Magnetic Susceptibility [SI]	Velocity (m/s)	Resistivity (Ohm*m)	Conductivity (mS/m)	Chargeability (mV/V)
SM01B	2.376	2.2E-05	4259	1053	0.95	88.8
SM02B	2.674	1.2E-04	3889	687	1.46	82.6
SM03C	2.483	1.3E-04	4259	20	48.97	12.8
SM04A	2.486	2.8E-05	4074	606	1.65	95.1
SM05C	2.739	6.0E-04	4074	447	2.24	65.6
SM06B	2.973	1.3E-03	4444	295	3.38	91.5
SM07C	2.455	1.5E-04	4340	2815	0.36	79.3
SM08B	2.570	1.3E-04	4098	632	1.58	86.5
SM09B	2.119	3.7E-04	3651	542	1.84	91.3
SM10A	2.388	4.7E-05	3478	381	2.62	98.6
SM11C	2.354	4.1E-04	4151	595	1.68	89.4
SM12B	2.425	7.8E-05	2875	270	3.70	106.6
SM13B	2.606	9.1E-05	4694	845	1.18	78.5
SM14B	2.570	1.5E-04	4107	187	5.36	108.1
SM15B	3.073	2.0E-04	4000	299	3.34	87.8
SM16B	2.759	1.6E-04	4074	5089	0.20	52.4
SM17B	2.440	3.0E-04	4694	3288	0.30	88.5
SM18C	2.581	3.9E-04	5106	18191	0.05	61.7
SM19A	2.578	1.7E-04	3793	3057	0.33	78.7
SM20B	2.387	3.3E-04	4286	699	1.43	80.9
SM21C	2.695	1.5E-04	4894	1770	0.57	72.6
SM22A	2.619	1.4E-04	4894	3968	0.25	69.2
SM23C	2.702	2.4E-04	5455	31794	0.03	28.2
SM24B	2.405	1.3E-04	3607	692	1.44	90.7
SM25C	2.415	9.0E-05	4211	1319	0.76	86.8
SM26B	2.575	2.7E-04	4107	2292	0.44	58.6
SM27B	2.791	8.5E-04	5000	1930	0.52	81.4
SM28B	2.415	4.5E-04	4107	1043	0.96	80.6
SM29A	2.476	2.4E-04	4151	186	5.39	49.9
SM30A	2.640	1.6E-04	4561	214	4.68	51.1
SM31B	2.499	9.1E-05	4889	12	85.98	0.9
SM32B	2.746	4.1E-05	4444	330	3.03	114.7
SM33A	3.004	6.0E-05	4681	655	1.53	83.1
SM34C	2.681	3.0E-04	5111	1039	0.96	81.9
SM35C	2.493	1.8E-04	4615	3196	0.31	62.0
SM36A	2.786	1.7E-04	4423	373	2.68	64.0
SM37B	2.490	3.3E-04	4800	2011	0.50	88.7
SM38A	2.477	3.6E-04	3929	517	1.93	87.9

APÊNDICE V

Sample ID	Pyrite	General Cu Sulphide Trap	Pyrrhotite	Chalcopyrite	Galena	Pb Minerals	Sphalerite	Bornite	Chalcocite	Covellite	Ag Sulphide	Fe Hydro or Oxides
SM01B	0.05	0.42	0.05	0.00	0.01	0.00	2.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
SM02B	0.15	4.50	0.14	0.00	1.19	0.04	9.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42
SM03C	0.02	0.47	0.03	0.00	0.88	0.01	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68
SM04A	0.04	0.75	0.04	0.00	1.43	0.01	5.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SM05C	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.01	4.36
SM06B	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.01	5.04
SM07C	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	1.09
SM08B	0.17	1.69	0.15	0.00	0.59	0.01	5.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SM09B	0.02	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48
SM10A	0.05	0.59	0.06	0.00	0.01	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SM11C	0.04	0.27	0.17	0.00	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
SM12B	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.24
SM13B	0.02	0.67	0.02	0.00	0.09	0.00	10.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SM14B	0.05	1.14	0.08	0.00	0.28	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
SM15B	0.22	15.30	0.42	0.01	4.16	0.53	11.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
SM16B	0.00	0.20	0.00	0.00	9.49	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
SM17B	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.97
SM18C	0.00	0.14	0.00	0.00	0.64	0.03	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.24
SM19A	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45
SM20B	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SM21C	0.03	0.80	0.04	0.00	6.51	0.04	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
SM22A	0.02	0.99	0.03	0.00	1.88	0.00	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
SM23C	0.00	0.25	0.01	0.00	4.28	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
SM24B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
SM25C	0.00	0.23	0.00	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
SM26B	0.00	0.67	0.00	0.02	0.06	0.00	0.18	0.00	0.25	0.00	0.00	0.29
SM27B	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
SM28B	0.04	0.82	0.12	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.59
SM29A	0.03	0.90	0.05	0.00	4.69	0.01	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
SM30A	0.00	0.20	0.00	0.00	1.22	0.00	8.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
SM31B	0.01	0.62	0.02	0.00	4.25	0.04	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	0.20
SM32B	0.01	0.81	0.01	0.00	6.05	0.06	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SM33A	0.07	3.92	0.06	0.00	0.10	0.00	25.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
SM34C	0.01	0.56	0.04	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
SM35C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
SM36A	0.03	1.67	0.08	0.00	7.37	0.14	1.60	0.00	0.05	0.00	0.00	1.11

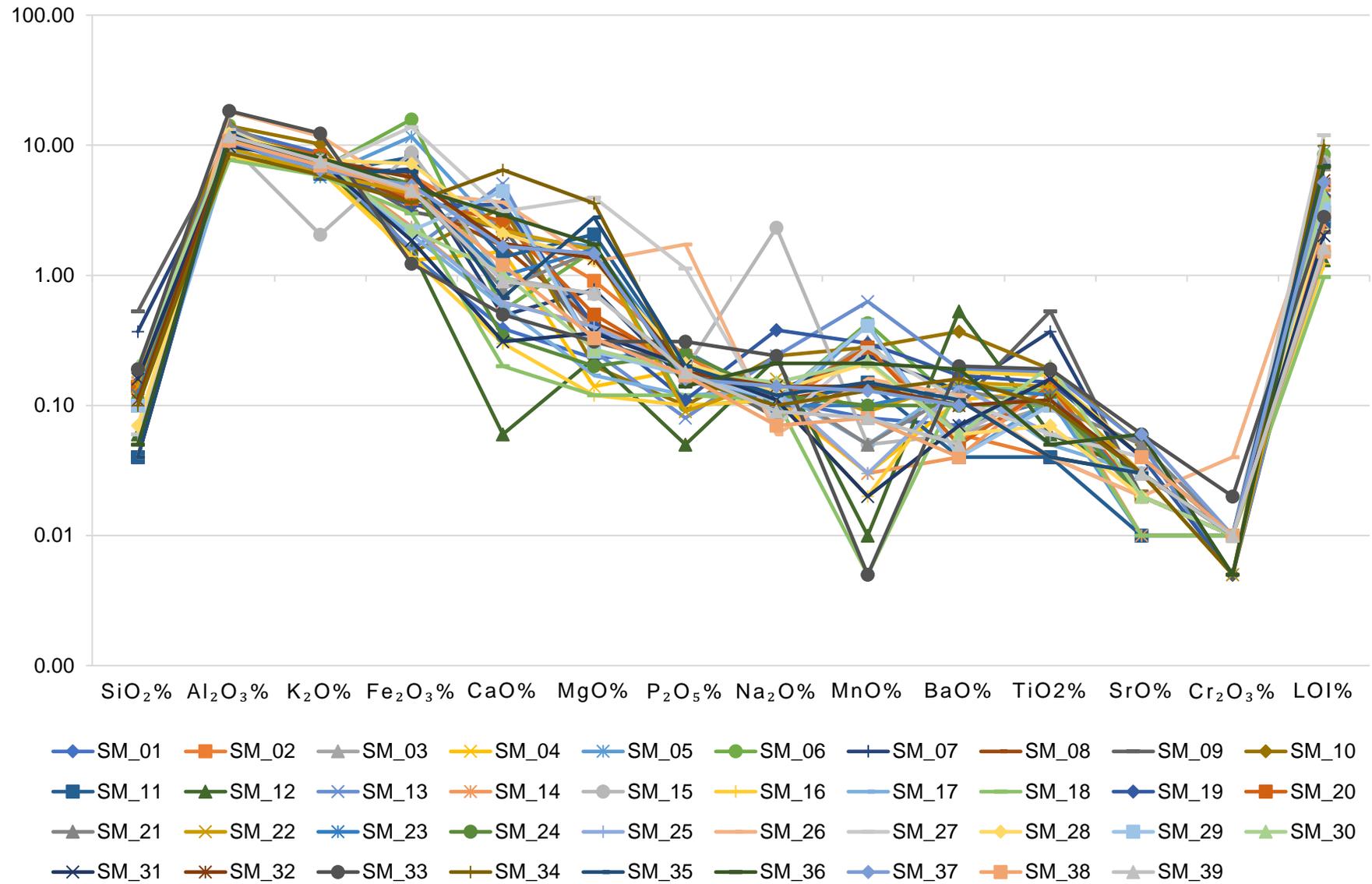
SM37B	0.00	0.03	0.00	0.00	0.23	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.40
SM38A	0.01	0.12	0.01	0.00	2.76	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53
Sample ID	K-Feldspar	Albite	Quartz	Chlorite	Mica	Apatite	Carbonates	Sb Sulphide	Cu Metal	Chrysocolla	Rutile/Anatase	Ilmenite
SM01B	36.81	0.08	27.06	0.00	13.49	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.16	0.38
SM02B	23.70	0.00	20.00	0.00	10.60	0.02	0.00	0.02	0.04	0.00	0.11	0.22
SM03C	30.17	0.02	22.88	0.00	14.21	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.10	0.35
SM04A	32.73	0.00	32.63	0.00	16.26	0.02	0.00	0.20	0.03	0.00	0.11	0.24
SM05C	10.42	0.03	23.05	0.00	30.68	0.01	0.00	0.11	0.10	0.00	0.03	0.16
SM06B	7.38	0.05	0.05	0.00	58.04	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.03	0.10
SM07C	26.22	0.07	39.61	0.00	13.56	0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.02	0.12
SM08B	27.26	0.03	26.13	0.00	13.88	0.03	0.01	0.09	0.01	0.00	0.13	0.34
SM09B	41.82	0.00	26.69	0.00	20.18	0.04	0.00	0.30	0.03	0.00	0.27	0.53
SM10A	52.37	0.00	23.55	0.00	16.19	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.08	0.26
SM11C	22.57	0.00	28.87	0.07	24.66	0.02	0.00	0.74	0.00	0.00	0.12	0.66
SM12B	33.15	0.01	36.29	0.00	21.39	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.39
SM13B	37.54	0.05	21.81	0.00	13.73	0.01	0.00	0.19	0.01	0.00	0.04	0.29
SM14B	33.97	0.16	20.62	0.00	20.96	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52
SM15B	2.56	0.14	24.80	0.00	15.79	0.02	0.00	0.10	0.03	0.00	0.13	0.40
SM16B	27.52	0.10	34.02	0.00	9.32	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.25
SM17B	33.29	0.01	37.00	0.00	15.85	0.02	0.02	0.01	0.04	0.00	0.12	0.44
SM18C	21.64	0.08	37.32	0.00	19.70	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.06	0.43
SM19A	26.39	0.18	24.00	0.00	16.08	0.01	0.04	0.31	0.01	0.00	0.02	0.12
SM20B	0.00	0.01	0.01	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
SM21C	27.50	0.00	40.36	0.00	14.30	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.14	0.46
SM22A	27.23	0.02	39.16	0.00	10.36	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06	0.17
SM23C	23.73	0.05	29.81	0.00	17.52	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.37
SM24B	33.18	0.01	28.96	0.00	20.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.35
SM25C	32.68	0.06	38.37	0.00	16.63	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.40
SM26B	53.57	0.02	0.01	0.00	26.59	0.24	0.00	0.00	0.16	0.00	0.47	4.74
SM27B	27.09	0.00	2.26	0.00	34.17	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	2.57
SM28B	30.30	0.00	23.59	0.01	27.74	0.04	0.00	0.09	0.01	0.00	0.15	0.70
SM29A	34.97	0.02	23.22	0.00	16.80	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.30	0.76
SM30A	35.13	0.01	23.94	0.00	13.16	0.04	0.00	0.02	0.07	0.00	0.23	0.64
SM31B	34.95	0.04	35.94	0.00	13.46	0.03	0.00	0.00	0.07	0.00	0.22	0.61
SM32B	64.99	0.00	0.01	0.00	23.76	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.13	1.11
SM33A	30.15	0.00	0.24	0.00	12.54	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.19
SM34C	22.90	0.04	27.53	0.00	22.52	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.35

SM35C	39.17	0.04	24.01	0.00	13.82	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.06	0.17
SM36A	27.29	0.02	27.00	0.00	17.56	0.02	0.01	0.01	0.11	0.00	0.13	0.42
SM37B	30.59	0.00	35.75	0.00	20.59	0.01	0.00	0.31	0.00	0.00	0.02	0.23
SM38A	35.26	0.00	34.29	0.00	21.12	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.10	0.42

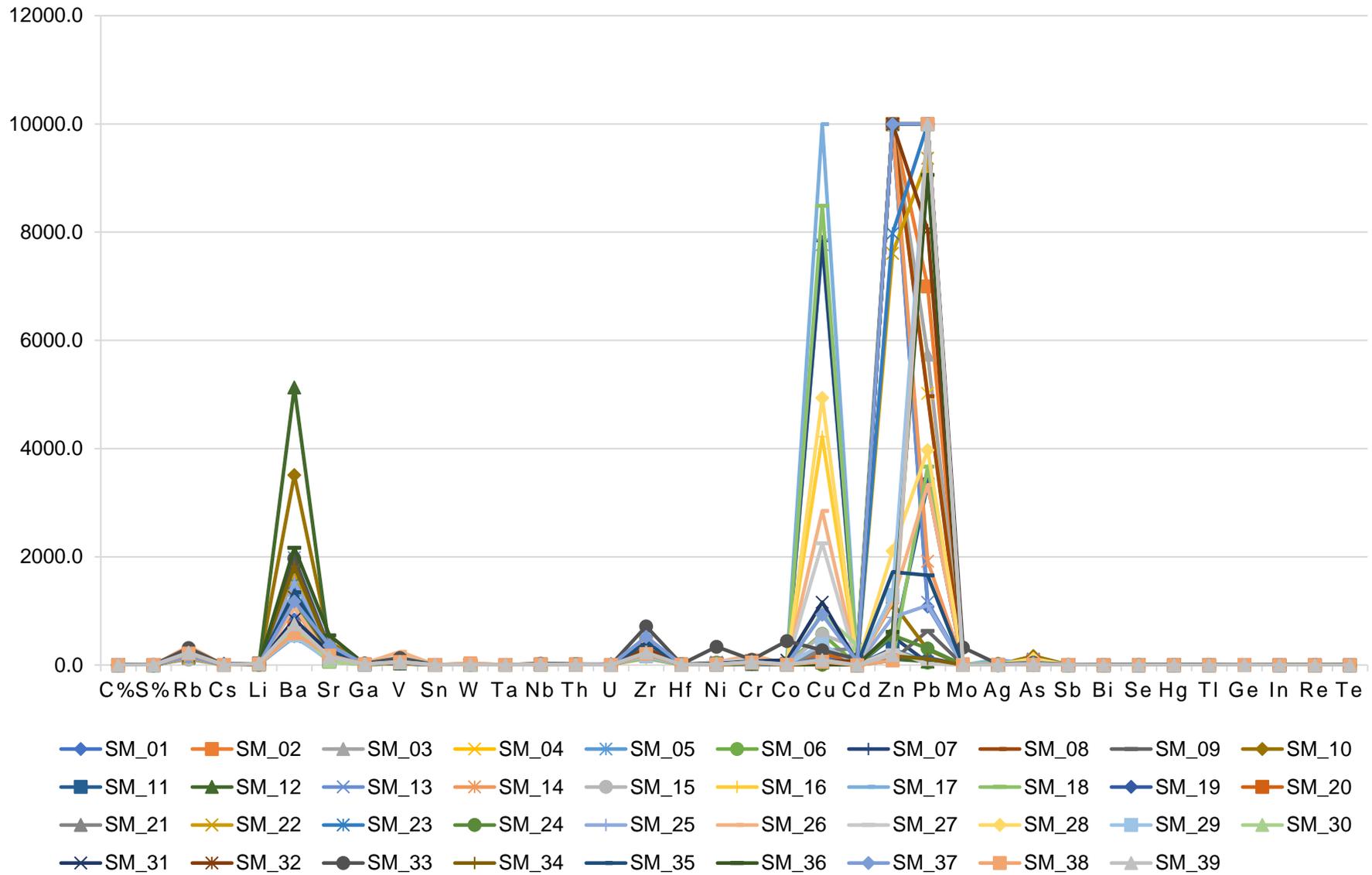
Sample ID	Corundum	Cr Trap	Alunite	Barite	(Phos) Sulphate	Zr Mineral	General Silicates	Others	HiBSE
SM01B	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.04	0.28	11.87	6.83
SM02B	0.00	0.01	0.01	0.07	0.01	0.14	0.32	23.86	5.24
SM03C	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.32	16.24	13.19
SM04A	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.28	6.23	3.33
SM05C	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	1.04	19.51	9.75
SM06B	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.36	24.88	3.13
SM07C	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.28	17.85	0.59
SM08B	0.01	0.00	0.02	0.09	0.01	0.03	0.38	20.13	2.98
SM09B	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.56	6.10	1.76
SM10A	0.08	0.01	0.05	0.00	0.02	0.01	0.19	6.02	0.30
SM11C	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	8.09	10.76	0.91
SM12B	0.01	0.01	0.00	0.11	0.00	0.04	0.34	6.18	0.68
SM13B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.24	10.53	4.34
SM14B	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.25	21.05	0.76
SM15B	0.05	0.01	0.01	0.05	0.01	0.06	0.91	17.68	5.51
SM16B	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.70	17.83	0.30
SM17B	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.03	0.30	11.25	0.47
SM18C	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01	0.23	19.07	0.16
SM19A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.55	28.47	3.34
SM20B	0.00	6.94	0.00	0.00	1.54	0.00	0.13	45.51	45.38
SM21C	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.04	0.70	7.99	0.45
SM22A	0.01	0.01	0.01	0.15	0.01	0.01	0.27	12.57	1.31
SM23C	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	1.60	21.59	0.30
SM24B	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.14	15.63	0.66
SM25C	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.06	0.38	9.15	1.03
SM26B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	11.62	1.04
SM27B	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.12	28.74	4.46
SM28B	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	3.95	8.98	1.57
SM29A	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.80	14.88	2.15
SM30A	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.06	0.26	10.05	5.99
SM31B	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.08	0.41	8.15	0.70
SM32B	0.00	0.01	0.00	0.07	0.01	0.10	0.67	1.39	0.58

SM33A	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.08	0.12	12.10	14.58
SM34C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	1.06	23.92	0.44
SM35C	0.01	0.01	0.01	0.06	0.07	0.03	0.51	18.67	2.80
SM36A	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.63	13.78	0.85
SM37B	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.31	9.31	1.14
SM38A	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.85	4.06	0.33

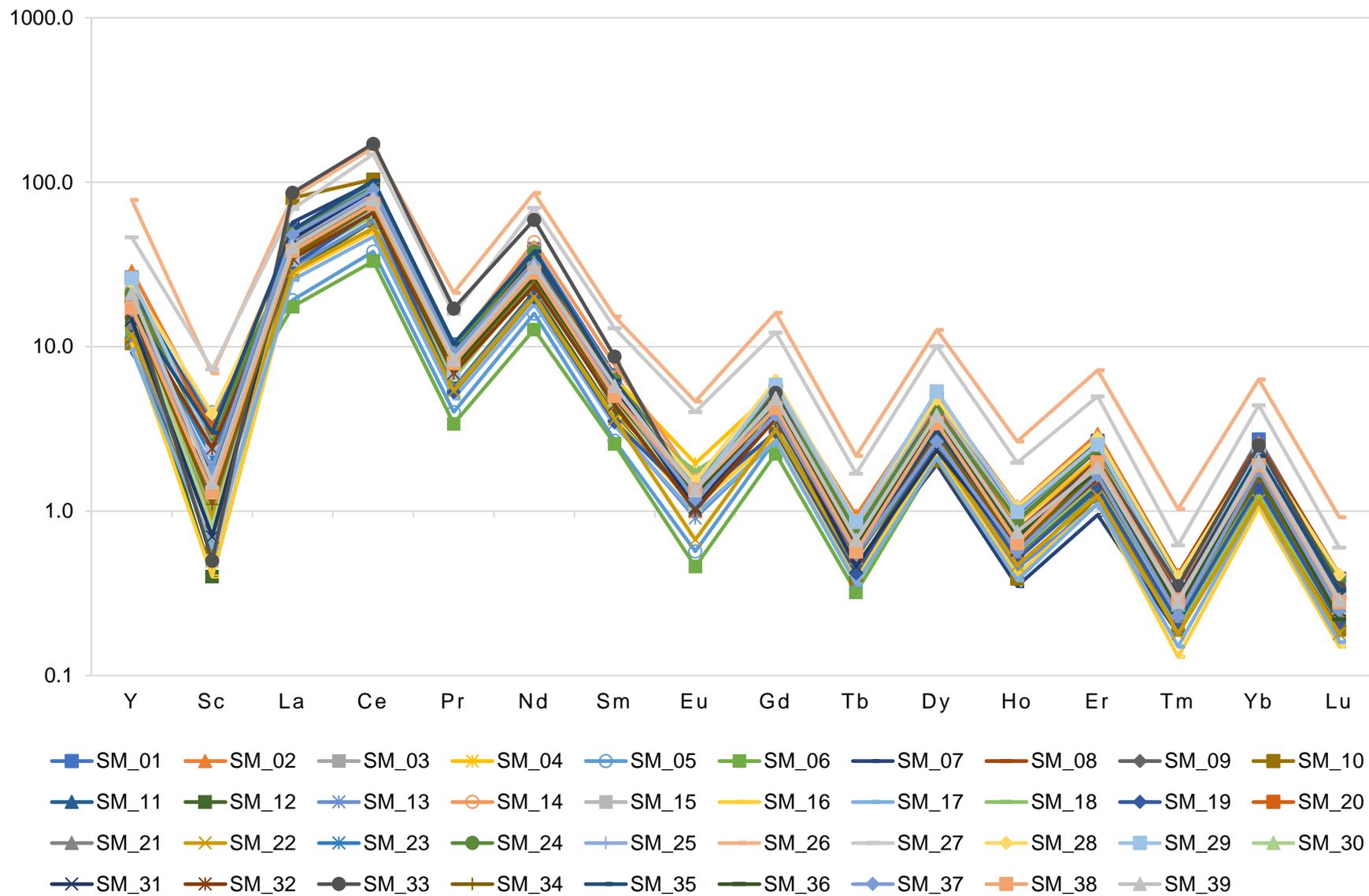
APÊNDICE VI



APÊNDICE VII



APÊNDICE VIII



CAPÍTULO III

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados de geofísica terrestre

A geofísica terrestre foi programada afim de recobrir as áreas I, II e III, principais áreas com mineralizações identificadas em mapeamento geológico. A magnetometria terrestre foi planejada e realizada com foco em recobrir o comprimento de onda das principais anomalias magnéticas de interesse, consequentemente foram delimitadas as fontes rasas e demarcados alguns corpos magnéticos. Este método mostrou duas anomalias a serem interpretadas e discutidas, uma de formato contínuo localizada ao centro do *grid* (Figura 3.1a), e outra na parte sudoeste (Figura 3.1b). Os valores de magnetometria variaram entre 7.0×10^{-3} nT e 408×10^{-3} nT.

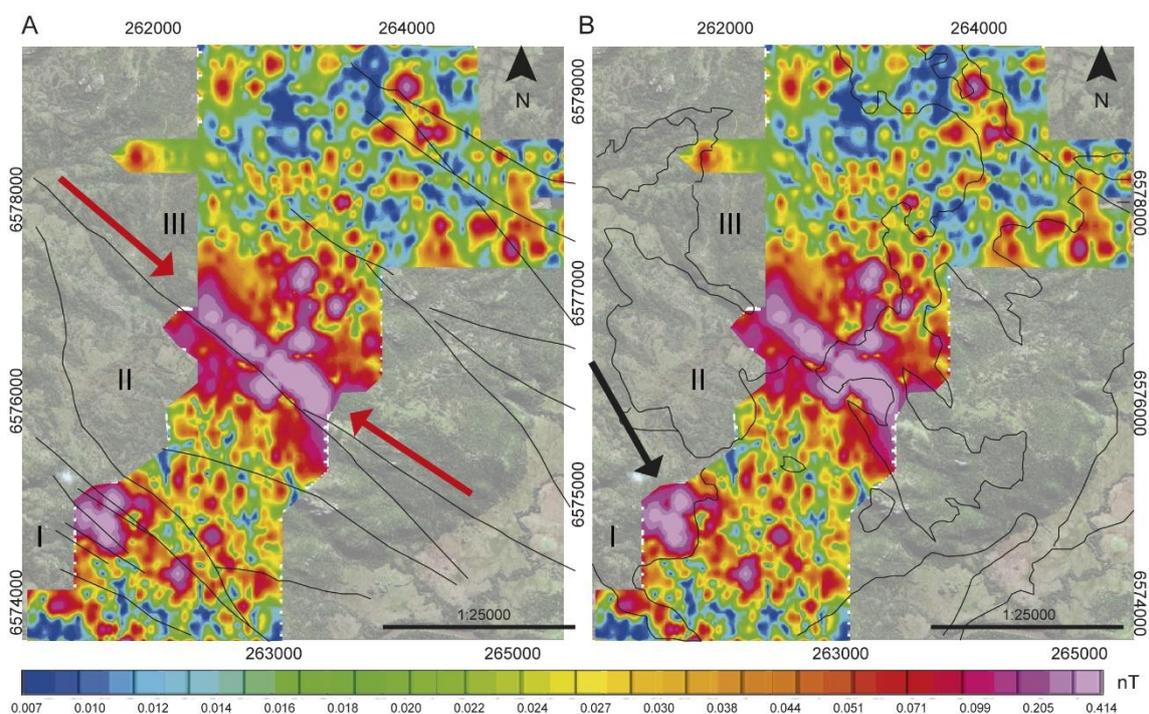


Figura 3. 1 - Resultado do método de realce de anomalias, amplitude do sinal analítico, proveniente do campo magnético anômalo, junto a lineamentos e estruturas da área de estudo; b) Resultado do método de realce de anomalias, amplitude do sinal analítico, proveniente do campo magnético anômalo, junto aos limites de unidades geológicas da área de estudo.

As seções de polarização induzida foram programadas para melhor compreensão das fontes de anomalias, melhor interpretação da assinatura das propriedades elétricas quanto as mineralizações de chumbo, zinco e cobre.

Diversas seções de inversão de resistividade e polarização induzida foram realizadas, para maior compreensão e modelamento 3D (Figura 3.2).

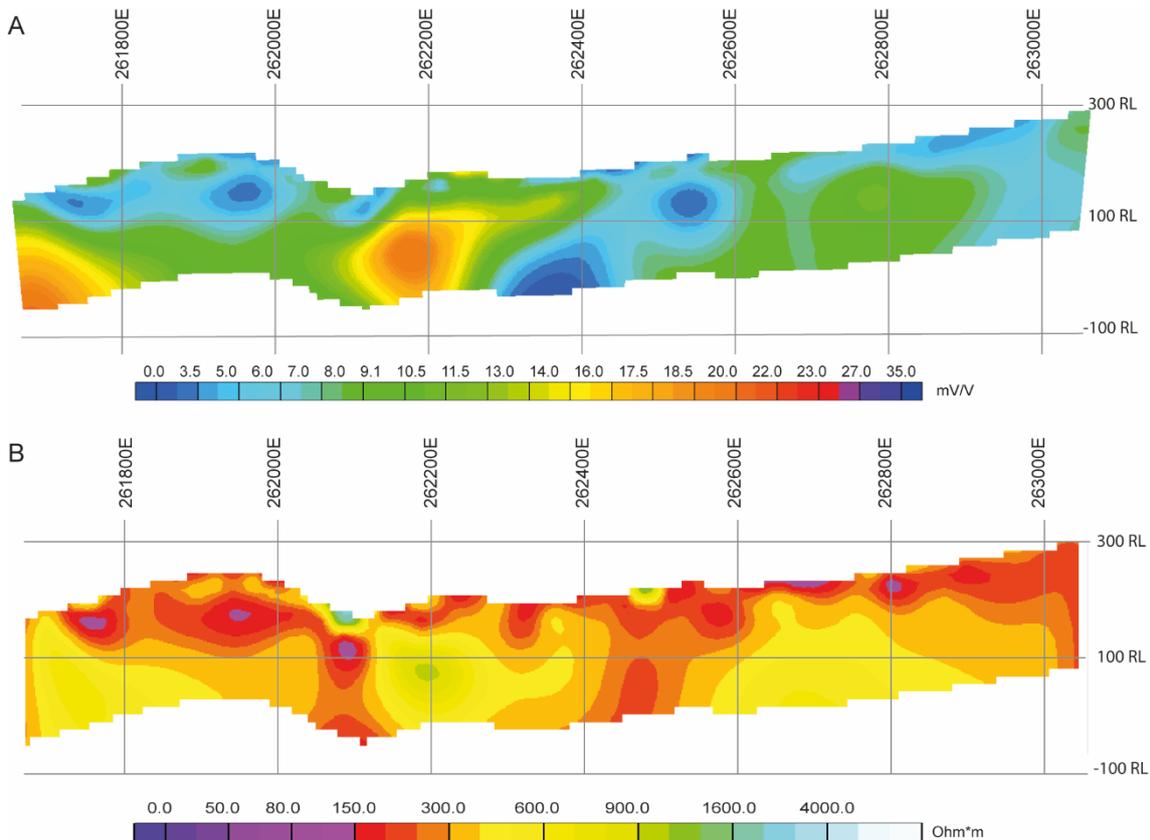


Figura 3. 2 – Exemplo de seção invertida de IP da linha SM74600; b) Exemplo de seção invertida de resistividade da linha SM74600.

A linha SM74600 que foi escolhida para ilustrar as seções invertidas de IP e resistividade, mostra uma anomalia na coordenada 262200E, que pode ser relacionada ao sistema Pb/Zn, além de ter o aumento de cargabilidade sobre o mesmo local de anomalia de resistividade. Neste exemplo nota-se que o objetivo proposto anteriormente de interpretação da assinatura das propriedades elétricas quanto a mineralizações de chumbo, zinco e cobre, foi alcançado.

3.2. Discussões

Levantamentos geofísicos auxiliam a exploração mineral na localização, identificação e refinamento de alvos potenciais. A geofísica aérea é normalmente utilizada para delineamento das estruturas de maior escala, enquanto a geofísica terrestre é utilizada para investigações de detalhes em escala de depósito. A aplicação desses métodos, a partir de propriedades físicas anômalas, tem como objetivo detectar diferentes tipos de sistemas minerais e entender como são

geologicamente controlados (Oldenburg and Pratt, 2007).

A inversão de dados visa investigar indiretamente a subsuperfície, uma vez que apenas observações geológicas em superfície não são suficientes para a estimativa de um corpo mineralizado, por exemplo. A detecção de propriedades físicas anômalas, juntamente com informações geológicas *in situ*, permite uma ligação entre a interpretação geofísica e geológica (Williams, 2009). O modelamento 3D duplicou sua importância nos últimos anos, uma vez que houve uma melhoria na qualidade, amostragem e variedade de dados geofísicos coletados (Paine, 2007).

A inversão e o modelamento foram realizados no programa VOXI da Geosoft Inc. no pacote de *software Oasis Montaj*. Diversas anomalias localizadas sobre as áreas I, II e III (principais áreas com mineralizações identificadas em mapeamento geológico) foram selecionadas, comparadas com seções, furos de sondagem e finalmente com dados petrofísicos, a fim de auxiliar na restrição de zonas do corpo de minério, e também para entender como as zonas de fraturas controlam as mineralizações do depósito Santa Maria.

A partir do mapa de amplitude do sinal analítico e *shapes* de geologia estrutural, a anomalia de formato contínuo mostrou-se localizada exatamente sobre a estrutura principal que corta a área de estudo (Figura 3.1a), que pode ser associada a um controlador de fluidos para mineralizações, mas não diretamente a uma área mineralizada. A segunda anomalia, quando comparada com os limites das unidades geológicas da área, mostra-se sobre a Suíte Intrusiva Rodeio Velho (Figura 3.1b), um derrame de rochas basálticas alcalinas. As demais anomalias detectadas no mapa de amplitude do sinal analítico podem ter sido causadas devido à presença de materiais antrópicos na área de levantamento, por exemplo.

A inversão dos dados de magnetometria terrestres foi realizada para identificar se apenas as anomalias provenientes das estruturas e da unidade geológica, são as que possuem caráter profundo (Figura 3.3a). A seção ao longo da anomalia que corta a área de estudo (Figura 3.3b) evidencia sua forma planar.

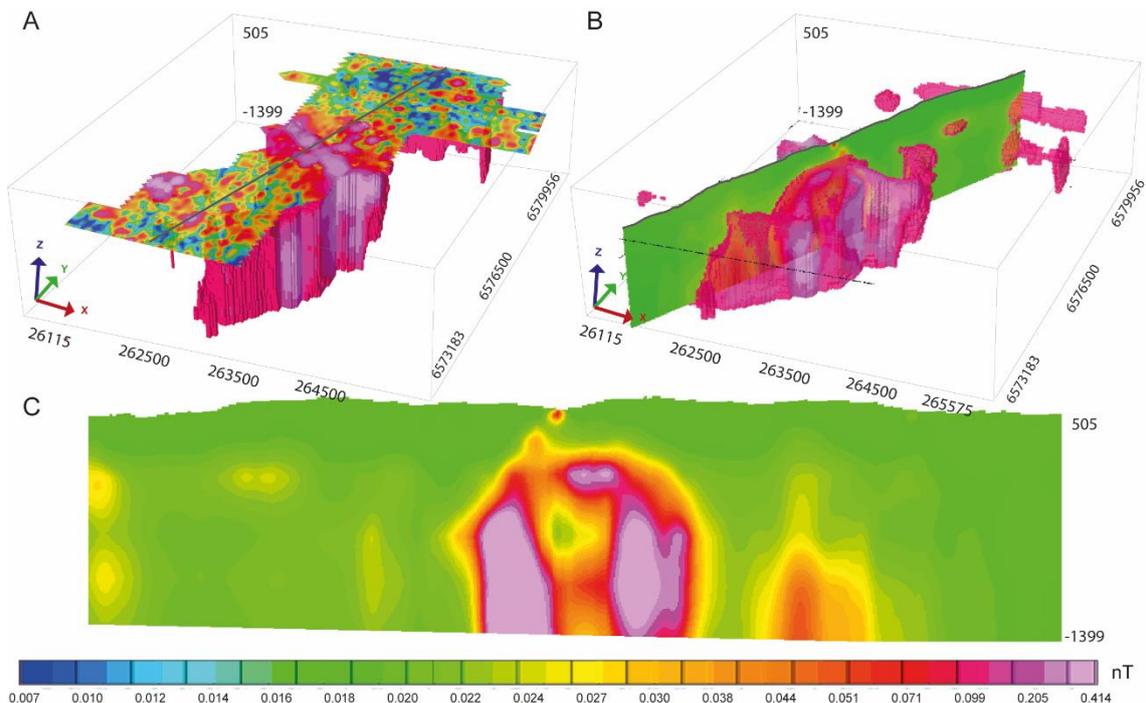


Figura 3. 3 – a) Modelo 3D dos dados magnetométricos que evidencia anomalias provenientes de fontes profundas e localização de perfil onde a seção foi realizada; b) Seção realizada que corta a anomalia em evidência; c) Slice vertical que mostra profundidade de anomalias e formato planar.

Juntamente com os dados petrofísicos de susceptibilidade magnética visou-se obter informações que vinculassem os dados geofísicos terrestres ao modelo geológico do depósito Santa Maria, ou até limitasse anomalias que na geofísica terrestre foram unificadas. As 38 amostras utilizadas para análise de petrofísica, foram plotadas juntamente a sondagens, geoquímica, seções de geofísica terrestre e mapas geológicos dentro do módulo *Target* do software *Oasis Montaj, Geosoft*. Como descrito anteriormente, a susceptibilidade magnética apresentou valores entre 0.02209×10^{-3} SI e 1.2590×10^{-3} SI, ou seja, esta propriedade teve uma variação de apenas 1.2369×10^{-3} SI, enquanto a magnetometria terrestre apresentou uma variação de 408.7×10^{-3} nT.

A figura 3.4a mostra o modelo 3D referente à magnetometria terrestre, a localização dos furos de sondagens e o posicionamento das amostras petrofísicas, todos na mesma escala de cor, para fácil compreensão e associação de intensidade entre magnetometria e susceptibilidade magnética. Na figura 3.4b, nota-se que, na área I, as amostras petrofísicas possuem cores similares à cor do modelo 3D; na área II as amostras mais rasas apresentam

intensidades similares às do modelo 3D, mas as amostras profundas mostram disparidades de cores, pois o modelo 3D apresenta valores intermediários, enquanto as amostras petrofísicas apresentam altos valores; e na área III as variáveis apresentam similaridade de cores entre os métodos.

Ao comparar valores de susceptibilidade magnética e modelo 3D, nota-se que, no geral, são correspondentes. Em alguns casos, há uma variação ínfima que, se pouco amostrada, dificulta a caracterização espacial e no modelamento.

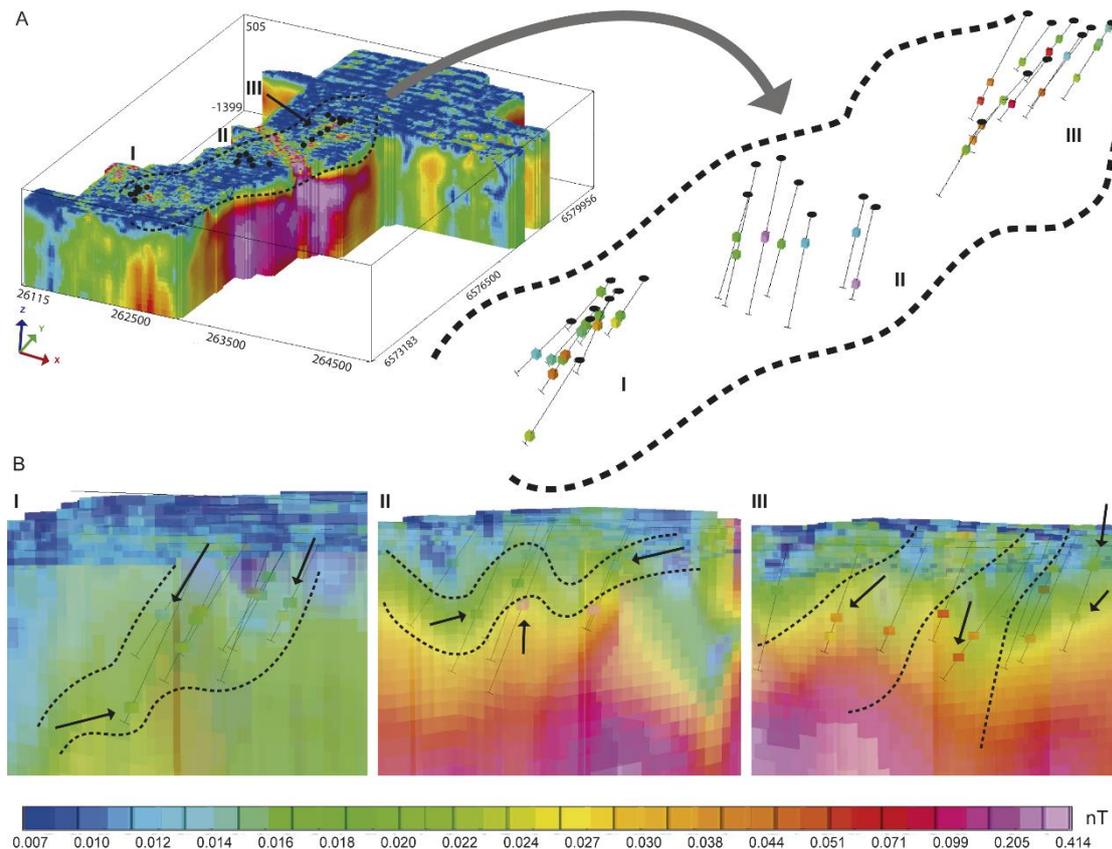


Figura 3. 4 – a) Modelo 3D referente à magnetometria terrestre e localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas com os furos de sondagens e amostras petrofísicas, onde nota-se similaridade entre eles.

Os métodos geofísicos elétricos fornecem uma ampla gama de soluções em uma série de aplicações que podem variar desde levantamentos de poços e levantamentos geológicos em escala regional, a levantamentos em 3D de alta resolução. O que faz estes métodos serem muito utilizados, além do baixo custo, é a facilidade de adaptação a diferentes: escalas, resoluções, geometrias, profundidades ou geologia/natureza do alvo.

Anomalias de polarização induzida (IP) são geralmente um indicador de mineralizações de interesse prospectivo. As anomalias de IP correlacionam-se com a mineralização de calcopirita e bornita por exemplo, além de ser um ótimo indicador de zonas de pirita mais abundantes. O IP espectral tem sido usado para classificar diferentes zonas de alteração e para distinguir sulfetos não econômicos, como pirita de calcopirita e bornita. A resistividade e as forças de anomalia de IP correlacionam-se inversamente com a resistividade da rocha hospedeira e a espessura de qualquer cobertura (Berger et al., 2008).

Como descrito anteriormente, a zona sulfetada da área de estudo é controlada por um sistema de fraturas e brechas (minério de alto teor). Há ainda dispersões disseminadas de menor teor em sulfetos, preenchidas por quartzo, carbonato, sericita e clorita, decorrente dos processos hidrotermais. O principal sulfeto metálico é a galena, com esfalerita, pirita e calcopirita/calcocita/bornita subordinadamente. Dentre as ferramentas geofísicas utilizadas em Santa Maria, a polarização induzida foi o método que melhor respondeu ao minério sulfetado conhecido.

As seções de elétrica foram integradas a sondagens, geoquímica, petrofísica e mapas geológicos para selecionar as principais áreas anômalas. As resistividades de todas as seções realizadas na área de estudo apresentam valores de no máximo 6400 Ohm*m (Figura 3.5a).

A região I é composta por 8 furos de sondagem marcados por disseminação estratiforme de galena, esfalerita e calcopirita/calcocita/bornita, principalmente em arenitos e, secundariamente, nos conglomerados, com *stringer zones* que cortam os ritmitos. A resistividade das seções dessa região tem variabilidade entre 300 a 500 Ohm*m e valores máximos geoquímicos de 9370 ppm de Pb, 7980 ppm de Zn e 2850 ppm de Cu nestes tipos de seções (Figura 3.5b).

A região II é composta por 7 furos de sondagem e marcada pela mesma geologia e minério presentes na região I. A resistividade das seções dessa região tem variabilidade entre 400 a 600 Ohm*m e valores máximos geoquímicos de 7000 ppm de Pb, 525 ppm de Zn e 7830 ppm de Cu (Figura 3.5c).

A região III é composta por 10 furos de sondagem e marcada por minério disseminado e maciço de galena, esfalerita e calcopirita/calcocita/bornita, distribuído principalmente em arenitos e secundariamente em conglomerados. A

resistividade das seções dessa região tem variabilidade entre 400 a 600 Ohm*m e valores máximos geoquímicos de 10000 ppm de Pb, 2110 ppm de Zn e 8490 ppm de Cu (Figura 3.5d e Figura 3.5e). Nas seções L 1500 NE e L 1750 NE, nota-se uma diminuição da resistividade com valores entre 150 e 300 Ohm*m, a partir da coordenada 6576500, que pode ser associada a um zoneamento gerado pela presença de fraturas e falhas com direção NW.

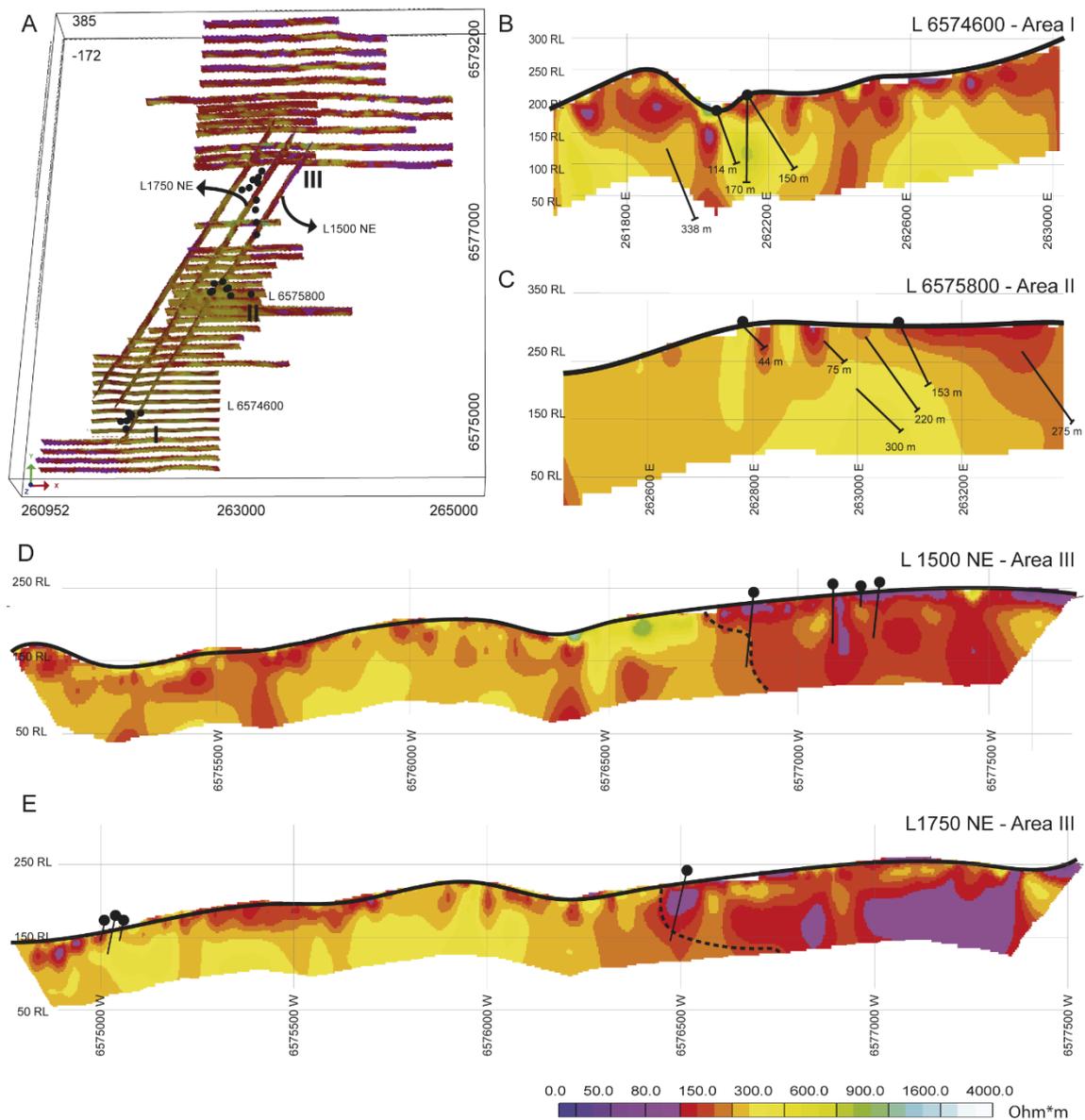


Figura 3. 5 – a) Seções de resistividade do levantamento realizado na área de estudo e localização de furos de sondagem objeto do estudo petrofísico; b) Seção L6574600 pertencente à área I e furos de sondagem que a cortam; c) Seção L6575800 pertencente à área II e furos de sondagem que a cortam; d) Seção L1500NE que corta as áreas I e III, furos de sondagem que a cortam e localização de zoneamento gerado por fratura; e)

Seção L1750NE que corta à região III, furos de sondagem que a cortam e localização de zoneamento gerado por fratura.

Os valores de resistividade em 3D, variaram de 0 a 6400 Ohm*m, enquanto os de análise petrofísica variaram de 11.63 a 31793.76 Ohm*m. Esta variação pode ser justificada pela amostragem; pelo fato da petrofísica ser um método pontual; e principalmente por a resistividade obtida em campo, ser uma resistividade aparente, enquanto a obtida em laboratório é real, impossibilitando uma análise direta. A figura 3.6 ilustra a incompatibilidade entre modelo 3D e resistividade das amostras petrofísicas.

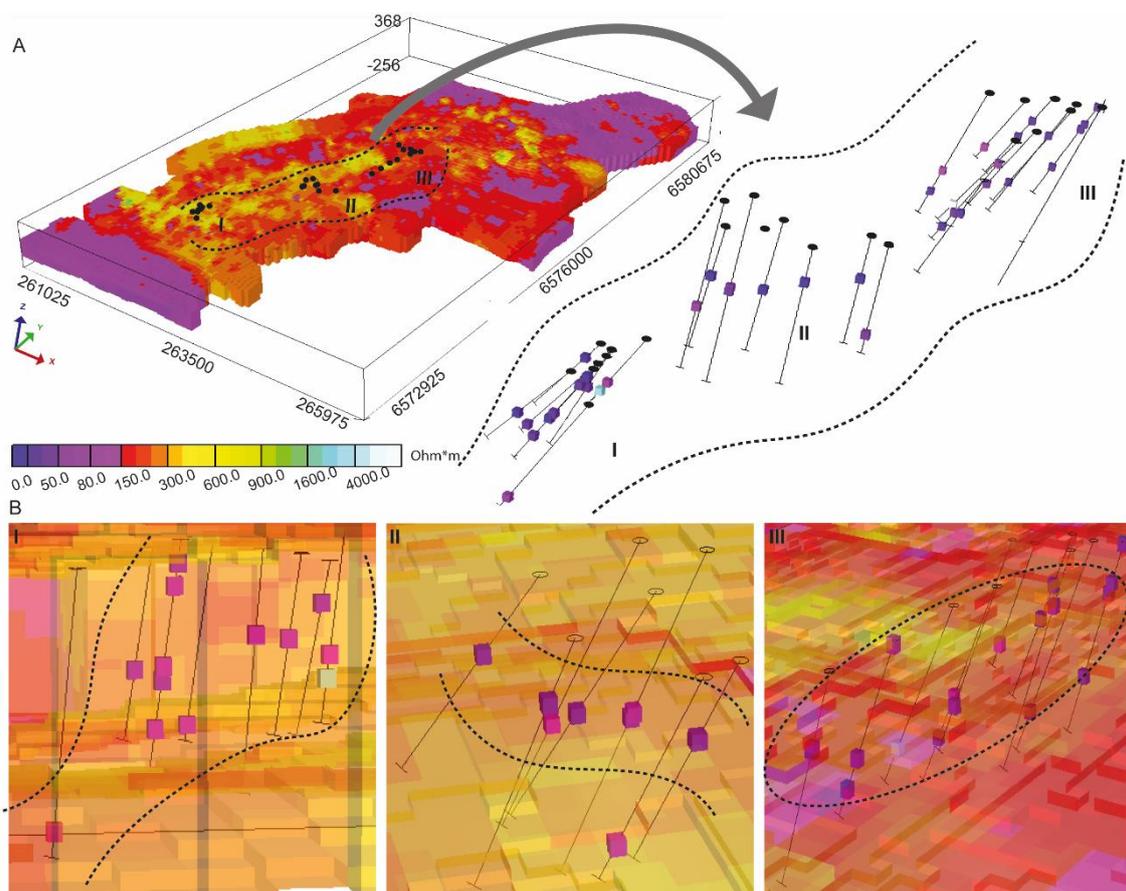


Figura 3. 6 - a) Modelo 3D referente à resistividade, com localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas com os furos de sondagens e amostras petrofísicas, que mostra incompatibilidade entre estes métodos.

Em alguns momentos, nota-se a paridade entre altos resistivos e altos de cargabilidade, que pode ser justificado pela disseminação de sulfetos em camadas de arenitos e conglomerados, onde a paragênese de alteração

hidrotermal (quartzo, carbonato, sericita e clorita) possa ter elevado a resistividade natural da encaixante.

Quando analisada a cargabilidade, os minerais calcocita, calcopirita, bornita e galena, todos na forma disseminada, apresentam valores de 13.2 mV/V, 9.4 mV/V, 6.3 mV/V e 3.7 mV/V, respectivamente. Hematita e esfalerita não são polarizáveis (King, 2007) e, neste contexto, a galena, mesmo com cargabilidade menor que os demais sulfetos de cobre, apresentam maior representatividade modal.

A cargabilidade das seções de IP apresenta valores de no máximo 35 mV/V que, quando agrupados e posicionados espacialmente, permitem a identificação de anomalias que podem auxiliar na delimitação e entendimento da posição do corpo de minério na área de estudo (Figura 3.7a). A região III, inicialmente não foi totalmente coberta por seções, mas duas seções espaçadas em aproximadamente 300 m sugeriram que entre elas seria necessária uma maior investigação (Figura 3.7a).

Após o recobrimento desta área inicialmente não contemplada pelo levantamento de IP, foi possível evidenciar anomalias a partir do filtro *Fraser* que permite que os dados sejam contornados e apresentados como um mapa plano, neste caso de cargabilidade em planta. A área destacada é marcada por grande contraste, que apresenta uma variabilidade de 7 a 14 mV/V (Figura 3.7b), onde a região I apresenta valores entre 10 e 19 mV/V, a região II, 10 e 13 mV/V, e a região III, 10 e 19 mV/V.

Dentre as variações de cargabilidade por área, a região que apresentou discordância com as demais foi a área II. Esta é marcada pela redução de Pb e Zn e o acréscimo de Cu; logo valores superiores a 13 mV/V são associados a Pb e Zn, e não ao Cu (bornita por exemplo).

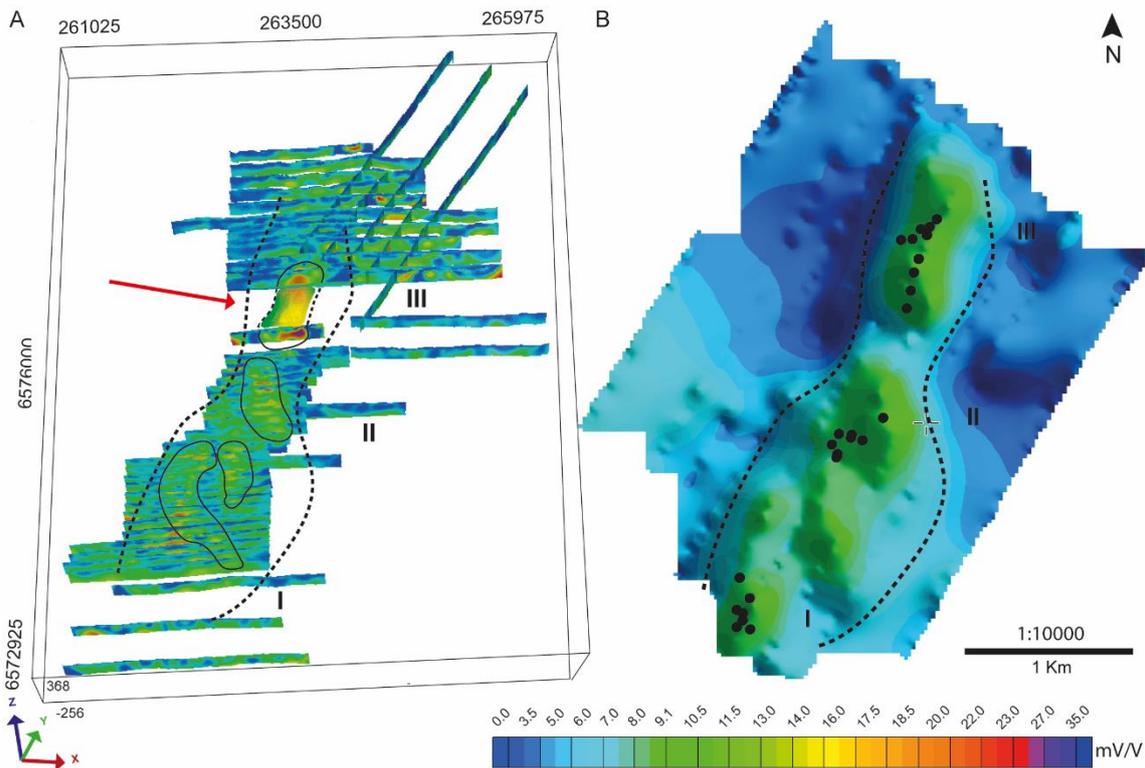


Figura 3. 7 – a) Seções de IP com anomalias identificadas; b) Mapa de cargabilidade em planta, resultado do levantamento IP com aplicação de filtro Fraser, zonas anômalias associadas aos corpos de minério e furos de sondagens em evidência.

Os valores das seções de cargabilidade ou modelo 3D em relação aos valores das amostras petrofísicas, apesar da amostragem não proporcional, mostram alguma compatibilidade (Figura 3.8a). Como dito anteriormente, em seção, há uma variação de 10 a 19 mV/V, e em laboratório, de 0.09 a 114.7 mV/V. A figura 3.8b mostra os pontos de concordância-discordância entre 3D e petrofísica e a região I é a que mais apresenta paridade entre estes valores.

A região II é marcada por um zoneamento, onde as amostras próximas a este têm valores de petrofísica similares aos do 3D, com exceção das amostras a direita que apresentam altos valores, que pode ser justificado pelo aumento de Cu que ocorre nesta região e pela possibilidade destas duas amostras terem interceptado *stringer zones* (Figura 3.8b). A região III é a que mais apresenta discrepância entre os métodos e, pode ser justificada pelo aumento de Pb e Cu, muitas vezes em forma disseminada e maciço de galena e calcopirita/calcocita/bornita (Figura 3.8b).

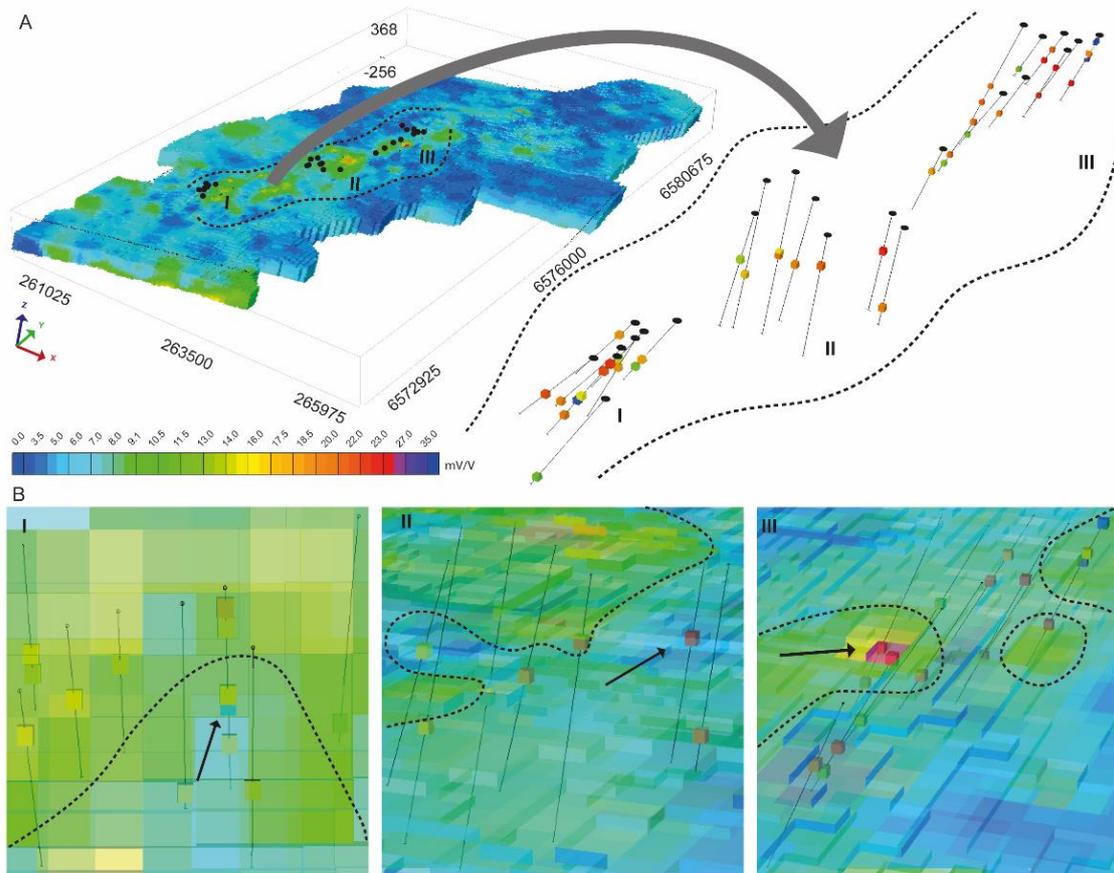


Figura 3. 8 - a) Modelo 3D referente à cargabilidade e localização dos furos de sondagens; b) Perfil do modelo 3D das três áreas, furos de sondagens e amostras petrofísicas, que mostra paridade ou incompatibilidade entre estes métodos.

A modelagem dos corpos de minério inicialmente foi baseada em geologia, onde primeiramente considerou-se as rochas encaixantes do Grupo Santa Bárbara e Grupo Guaritas, respectivamente de base para topo, através dos pontos de contatos das litologias. Os furos de sondagens e a geoquímica foram utilizados para identificação de contatos, zonas de alterações e mineralizações, principalmente quanto a distinção de minério *stringer* ou disseminado.

Os dados geofísicos e petrofísicos, quando integrado a dados geológicos, geoquímicos e estruturais, permitem o modelamento e interpretação de um modelo geológico ou alvo mineralizado, com grande precisão e diminuem a incerteza geológica. A figura 3.8a mostra a concordância de anomalias magnéticas com dados estruturais NW, que juntamente com a porosidade primária e granulação da rocha hospedeira, é o que controla a mineralização da

área III. A figura 3.8b mostra a anomalia de cargabilidade em planta, após uso de filtro *Fraser*, exatamente sobre localização dos corpos de minério.

Juntamente com a geofísica terrestre, os dados petrofísicos apresentaram resultados importantes para o entendimento do subsolo, assim como informações que podem auxiliar na caracterização e classificação (minério *stringer* ou disseminado) ou restrição e diferenciação de elementos (minério Cu ou PbZn) em subsuperfície (Figura 3.8c).

As anomalias das inversões geofísicas se ajustam à geometria dos corpos de minérios e a partir das propriedades físicas, pode-se inferir a geologia. Em resumo, um modelo geológico ao qual se pode, de maneira geral, agregar valores ao usar a inversão geofísica e dados petrofísicos, quando disponíveis em quantidades suficientes, vai tornar o modelo mais confiável ao separar fontes aflorantes de anomalias profundas.

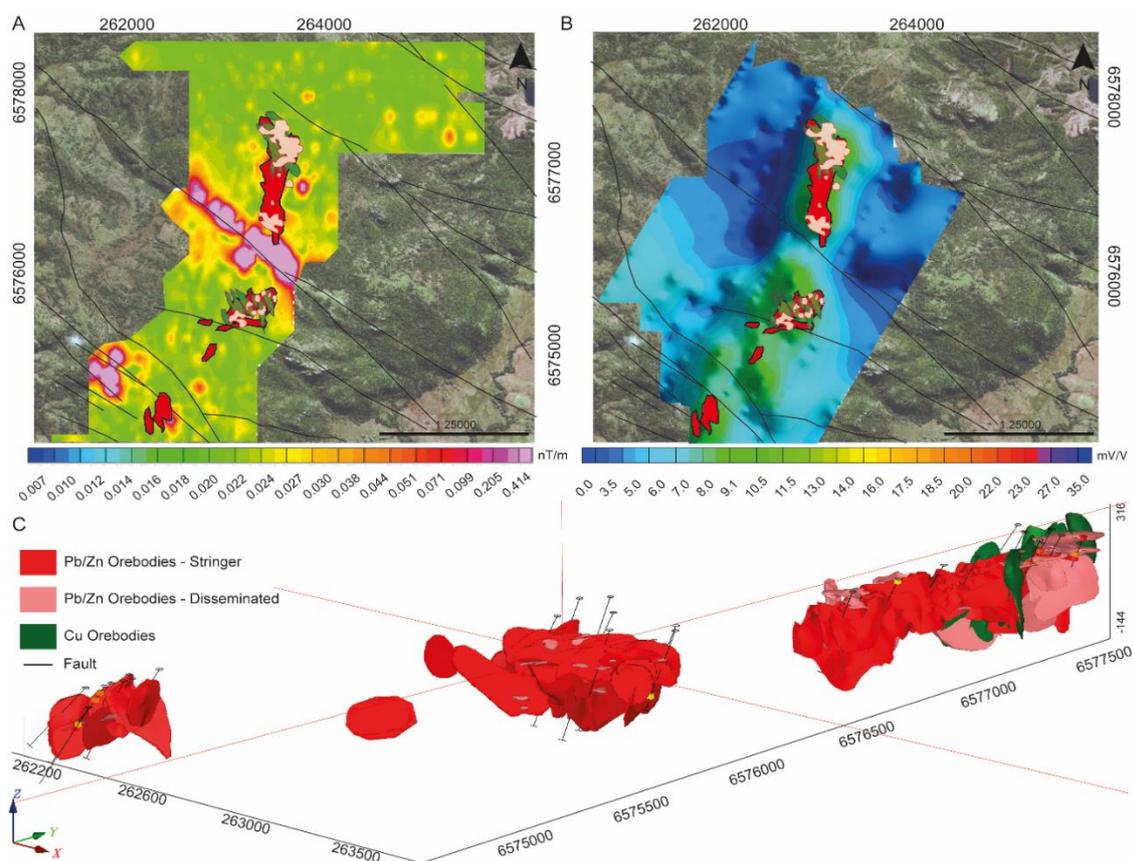


Figura 3. 9– a) Mapa de amplitude do sinal analítico, localização dos corpos de minérios e lineamentos da área de estudo; b) Mapa de cargabilidade em planta com aplicação de filtro *Fraser*, localização dos corpos de minérios e lineamentos da área de estudo; c) Corpos de minério Pb/Zn e Cu em texturas *stringers* e disseminadas modelados pela NEXA Resources.

Todas as etapas realizadas nesta pesquisa, quando sumarizadas e compiladas revelam o desenvolvimento de uma *guideline* e um processo de interpretação que pode ser seguido em uma pesquisa da exploração mineral (Figura 3.10).

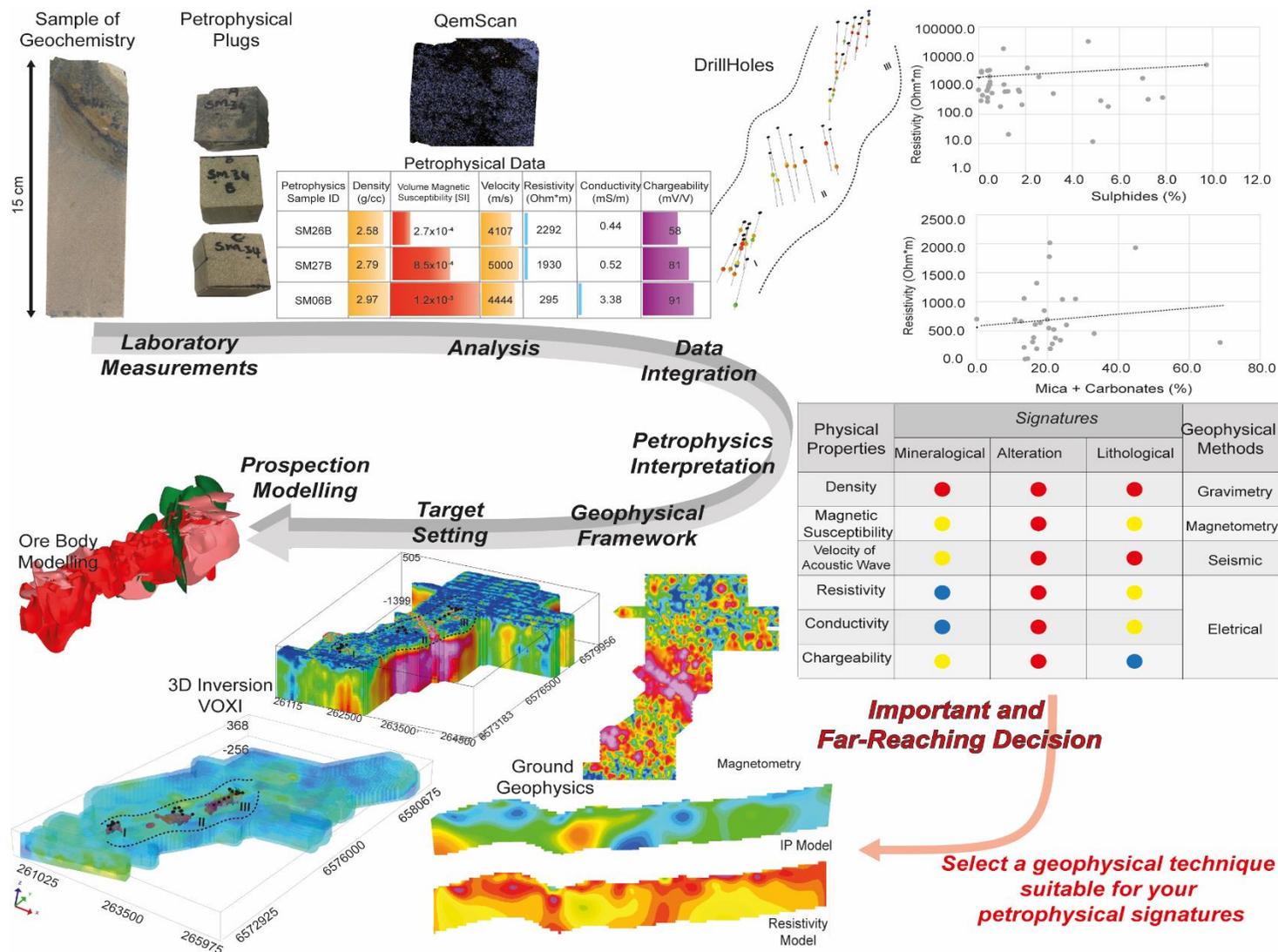


Figura 3. 10 – Guideline de caracterização multiescala de dados geológicos com técnicas analíticas, dados petrofísicos, dados geoquímicos e geofísicos integrados que vão de nível microscópico ao modelamento prospectivo.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSÕES

As técnicas utilizadas, magnetometria terrestre e IP, mostraram-se eficientes quando comparadas com a petrofísica, mesmo com a impossibilidade de comparação direta em alguns casos, ambas mostraram resultados similares em escalas distintas.

- A magnetometria terrestre auxiliou na delimitação de unidades geológicas do depósito Santa Maria, uma vez que se tem o contraste andesito e sedimento, além da identificação de estruturas que controlam a mineralização do depósito;
- A magnetometria e a susceptibilidade magnética no geral apresentaram paridade, mesmo em escalas diferentes, e apenas amostras petrofísicas mais profundas mostraram divergência com a inversão, que pode ser justificada pelo espaçamento de levantamento da magnetometria, perda de precisão do método em profundidade ou unificação de anomalias em *gridagem*;
- As seções de resistividades mostraram um zoneamento na área III, justificado pela fratura NW, que pode estar controlando a mineralização da área III;
- A área III apresentou menores valores de resistividade e maiores valores de Cu nos dados geoquímicos, logo, comprovou que o cobre realmente é um elemento condutivo, e ainda causou o questionamento se essa diferença de *background* na resistividade está ligada ao volume de conteúdo metálico (principalmente Cu) na área III, ou apenas a uma área mais alterada hidrotermalmente;
- A resistividade petrofísica e em 3D não apresentaram similaridade por não estarem na mesma ordem de grandeza, uma vez que a resistividade medida em superfície é aparente e a resistividade obtida pela petrofísica é “real”;
- Em algumas seções os altos de resistividade equivaleram à altos de cargabilidade, o que pode ser justificado por sulfetos disseminados ou alterações que aumentaram a resistividade da rocha encaixante;

- A cargabilidade em planta mostrou anomalias exatamente sobre a localização dos corpos de minérios sugerindo que a cargabilidade é um parâmetro de identificação direta da mineralização neste depósito;
- A área II teve um aumento de Cu e uma queda de Pb e Zn nos dados geoquímicos, os quais justificam a queda da cargabilidade nesta região, levando a conclusão que valores superiores à 13 mV/V podem ser associados ao aumento de Pb e Zn;
- O modelo 3D referente a cargabilidade e a petrofísica mostraram paridade de dados na área I, e nas demais áreas sugeriu-se maior investigação quanto a zona que algumas amostras podem ter interceptado;
- A integração de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e petrofísicos foi de suma importância na pesquisa deste depósito epitermal, pois mostra a necessidade da integração de dados na área da exploração mineral;
- Técnicas geofísicas utilizadas nesta pesquisa, magnetometria e IP, que alcançam maior profundidade, mostraram-se fundamentais no entendimento das mineralizações, e mostra que devem ser valorizadas, pois depósitos minerais em superfície ou subsuperfície estão cada vez mais escassos;
- A assinatura petrofísica mostrou-se eficiente na identificação ou diferenciação de alguns litotipos, alterações hidrotermais e mineralizações do depósito, atingindo o objetivo da pesquisa, mas para maior entendimento e esclarecimento de alguns fatores, é necessário uma maior amostragem e levantamento mais amplo;
- Apesar dos dados petrofísicos desta pesquisa serem pontuais, notou-se compatibilidade, que sugere que estes podem ser ampliados, quando tratar-se de anomalias geofísicas homogêneas para um mesmo litotipo;
- As amostras retiradas de furos de sondagem que cortavam o corpo de minério ou estavam próximas a estes, apresentaram anomalias correspondentes ao esperado, logo, é constatado que a petrofísica é de grande relevância e vai ajudar na prospecção mineral, uma vez que poderão inferir nos modelos e localizações de corpos geológicos;
- A petrofísica pode ser utilizada cuidadosamente, em diversos meios prospectivos, basta serem amostrados corretamente e em grande quantidade,

e no caso de restrição de dados, estes serem utilizados junto com outros métodos e técnicas;

- Finalmente, embora estudos petrofísicos sejam onerosos e trabalhosos atualmente, estes devem ser conduzidos em outros depósitos para a compreensão dos contextos geológicos e então futuramente, quando aplicados, reduzirão os gastos com metodologias pouco eficazes e acelerarão a pesquisa mineral.

REFERÊNCIAS

- Airo, M.-L., 2015. Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland. *Geol. Surv. Finl.* 58, 9–70.
- Airo, M.-L., Säävuori, H., 2013. Petrophysical characteristics of Finnish bedrock - Concise handbook on the physical parameters of bedrock.
- Asiedu, D.K., Hegner, E., Rocholl, A., Atta-Peters, D., 2005. Provenance of late Ordovician to early Cretaceous sedimentary rocks from southern Ghana, as inferred from Nd isotopes and trace elements. *J. African Earth Sci.* 41, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.05.003>
- Basei, M.A.S., Siga Jr., O., Masquelin, E.C., Harara, O.M., Reis-Neto, J.M., Preciozzi, F., 2000. The Dom Feliciano Belt (Brazil-Uruguay) and its foreland (Rio de la Plata Craton): Framework, tectonic evolution and correlations with similar terranes of Southwestern Africa. *Tecton. Evol. South Am.* 311–334.
- Berger, B.R., Ayuso, R. a, Wynn, J.C., Seal, R.R., 2008. Preliminary model of porphyry copper deposits. *Open-File Rep. - U. S. Geol. Surv.* 55. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2011/0172>
- Bérubé, C.L., Olivo, G.R., Chouteau, M., Perrouty, S., Shamsipour, P., Enkin, R.J., Morris, W.A., Feltrin, L., Thiémonge, R., 2018. Predicting rock type and detecting hydrothermal alteration using machine learning and petrophysical properties of the Canadian Malartic ore and host rocks, Pontiac Subprovince, Québec, Canada. *Ore Geol. Rev.* 96, 130–145. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.011>
- Biondi, J.C., 2015. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros, 2nd ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Bongiolo, E.M., Renac, C., Mexias, A.S., Gomes, M.E.B., Ronchi, L.H., Patrier-Mas, P., 2011. Evidence of ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry-epithermal Au-Cu deposits of lavras do sul. *Precambrian Res.* 189, 404–419. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.05.007>
- Borba, A.W. De, 2006. Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS,

-
- Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Brito Neves, B.B., Cordani, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Res.* 53, 23–40.
- Brito, R.S.C., Silva, M. da G., Kuyumjian, R.M., 2010. Modelos de depósito de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo, Programa geologia do Brasil. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Clark, D.A., 2014. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics* 624–625, 46–65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.011>
- Council for Geoscience, 2017. Petrophysical Analysis of Core Samples for Zinc Exploration Santa Maria Project in Brazil. Pretoria.
- CPRM, 2010. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos.
- da Silva, L.C., Mcnaughton, N.J., Armstrong, R., Fletcher, I.R., 2005. The neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections : a zircon-based U – Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano / Pan-African systems of orogens. *Precambrian Res.* 136, 203–240. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.004>
- Dentith, M., Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for Mineral Exploration* Geoscientist, 1st ed. Cambridge University Press.
- Fambrini, G.L., Janikian, L., De Almeida, R.P., Fragoso-Cesar, A.R.S., 2007. Evolução estratigráfica e paleogeográfica do grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS. *Geol. USP - Ser. Cient.* 7, 1–24. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2007000200001>
- Fruchting, A., 2017. Estratégia para utilização de dados geofísicos na exploração de mineralizações do tipo Ni-Cu-PGE: A descoberta do depósito de Limoeiro - PE. Universidade de Brasília.
- Garver, J.I., Scott, T.J., 1995. Trace elements in shale as indicators of crustal provenance and terrane accretion in the southern Canadian Cordillera. *Geol.*
-

-
- Soc. Am. Bull. 107, 440–453. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0440:TEISAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0440:TEISAI>2.3.CO;2)
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7)
- Herron, M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.* 58, 820–829.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D., Vikre, P.G., 2010. Porphyry Copper Deposit Model Scientific Investigations Report 2010 – 5070 – B. USGS Sci. Investig. Rep. 2010-5070-B 169.
- King, A., 2007. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits. *Ore Depos. Explor. Technol. Proceeding*, 647–665.
- Krbrz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 68, 277–279.
- McGladrey, A.J., Olivo, G.R., Silva, A.M., Oliveira, G.D., Neto, B.B., Perrouty, S., 2017. The integration of physical rock properties, mineralogy and geochemistry for the exploration of large zinc silicate deposits: A case study of the Vazante zinc deposits, Minas Gerais, Brazil. *J. Appl. Geophys.* 136, 400–416. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.11.013>
- Milkereit, B., Berrer, E.K., King, A.R., Watts, A.H., Roberts, B., Adam, E., Eaton, D.W., Wu, J., Salisbury, M.H., 2000. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada. *Geophysics* 65, 1890–1899. <https://doi.org/10.1190/1.1444873>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 2007. Homepage | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [WWW Document]. URL <https://www.swpc.noaa.gov/> (accessed 4.15.19).
- NEXA Resources, 2015. Relatório Anual - Projeto Santa Maria. Minas do Camaqua.
- NEXA Resources, 2009a. Relatório Final de Aquisição e Processamento de
-

Dados de Magnetometria Terrestre.

NEXA Resources, 2009b. Relatório Final de Aquisição e Processamento de Dados de Polarização Induzida Espectral.

Oldenburg, D., Pratt, D., 2007. Geophysical Inversion for Mineral Exploration : a Decade of Progress in Theory and Practice. *Proceedings Explor. 07 Fifth Decenn. Int. Conf. Miner. Explor.* 61–95.

Paim, P.S.G., Chemale Junior, F., Wildner, W., 2014. Estágios Evolutivos Da Bacia Do Camaquã (Rs). *Ciência e Nat.* 36, 183–193. <https://doi.org/10.5902/2179460X13748>

Paine, J., 2007. Developments in Geophysical Inversion in the Last Decade, in: B. Milkereit (Ed.), *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.* pp. 485–488.

Philipp, R.P., Pimentel, M.M., Chemale Jr, F., 2016. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian J. Geol.* 46, 83–104. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150016>

Remus, M. V.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., 2000. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Cacapava Granite of the Brasiliano cycle in southern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 13, 191–216. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00017-1)

Renac, C., Mexias, A.S., Gomes, M.E.B., Ronchi, L.H., Nardi, L.V.S., Laux, J.H., 2014. Isotopic fluid changes in a Neoproterozoic porphyry-epithermal system: The Uruguay mine, southern Brazil. *Ore Geol. Rev.* 60, 146–160. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.016>

Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.* 67, 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)

Salisbury, M.H., 1996. Seismic Imaging of Massive Sulfide Deposits : Part I . Rock Properties *. *Econ. Geol.* 91, 821–828.

Saruwatari, K., Ji, S., Long, C., Salisbury, M.H., 2001. Seismic anisotropy of

-
- mantle xenoliths and constraints on upper mantle structure beneath the Southern Canadian Cordillera. *Tectonophysics* 339, 403–426. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00136-6)
- Shoqeir, J.H., Hoetzi, H., Flexer, A., 2014. Integration of Electrical Resistivity and Electromagnetic Radiation Methods for Fracture Flow System Detection. *Sci. Res.* 5, 863–875.
- Sillitoe, R.H., Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits, in: Simmons, S.F., Graham, I.J. (Eds.), *Volcanic, Geothermal and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*. Society of Economic Geologists, pp. 315–343. <https://doi.org/10.1126/science.101.2621.295-b>
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, 2 Edition. ed. Cambridge University Press, Melbourne.
- Veigel, R., Dardenne, M.A., 1990. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas da evolução da mineralização Cu-Pb-Zn do Distrito de Camaquã, RS. *Rev. Bras. Geociências* 20, 55–67.
- Williams, N.C., 2009. Mass and magnetic properties for 3D geological and geophysical modelling of the southern Agnew-Wiluna Greenstone Belt and Leinster nickel deposits, Western Australia. *Aust. J. Earth Sci.* 56, 1111–1142. <https://doi.org/10.1080/08120090903246220>
- Winterburn, P., Noble, R.R., Lawie, D., 2017. Advances in Exploration Geochemistry , 2007 to 2017 and Beyond. *Proc. Explor. 17 Sixth Decenn. Int. Conf. Miner. Explor.* 495–505.

ANEXO I

O levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul foi realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e recobriu 159.789,21 km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos de alta resolução. Para a realização deste levantamento, foram necessárias três equipes, em diferentes aeronaves, sendo elas: Cessna C-208B – Caravan, prefixo PR-SSB, Cessna C-208B Caravan, prefixo PT-MEP e Piper Navajo PA31-310 prefixo PT-WOT. Na execução do projeto foram realizadas as linhas de vôo e controle espaçadas de 500 m e 10 km, respectivamente, orientadas nas direções N-S e E-W.

Ao longo dos perfis foram realizadas dez leituras do aeromagnetômetro para todas as aeronaves. Todas as leituras dos gamaespectrômetros corresponderam a uma amostragem por segundo, posicionada com sistema de observação de satélite GPS, de precisão melhor do que 5 m. Estações fixas para controle da variação diurna do campo magnético terrestre foram instaladas nas bases de operações utilizadas durante o levantamento nas cidades de Santa Maria e Pelotas (RS).

As calibrações dos sistemas de detectores aerogamaespectrométricos foram realizadas em duas etapas: a calibração estática, com emprego de fontes padronizadas, conduzida no aeroporto de Jacarepaguá, Rio de Janeiro (RJ); e a calibração dinâmica foi executada na região de Maricá (RJ), a partir da pista de calibração dinâmica (*Dynamic Calibration Range - DCR*) via levantamento terrestre.

Os parâmetros implementados para o levantamento seguiram os seguintes padrões: direção das linhas de voo em N-S; espaçamento entre as linhas de voo de 500 m; direção das linhas de controle em E-W; espaçamento entre as linhas de controle de 10 km; intervalo entre medições geofísicas consecutivas de 0,1 s (magnetômetro) e 1,0 s (espectrômetro); altura média de voo de 100 m; velocidade aproximada de voo para a aeronave PR-SSB de 227 km/h, para a aeronave PT-WOT de 272 km/h e finalmente para a aeronave PT-MEP, 235 km/h (Tabela I.1).

Tabela I. 1 - Tabela contendo informações de cada tipo de aeronave utilizada no levantamento executado pela CPRM, informações de cada equipamento utilizado, sistema de navegação e sistema de aquisição.

Prefixo Aeronave	Modelo Aeronave	Magnetômetro Aéreo	Gamaespectrômetro Aéreo	Sistema de Navegação	Sistema de Aquisição GPS	Magnetômetro Terrestre	Sistema de Aquisição
PR-SSB	C-208B Caravan	Scintrex CS-2	Radiations Solutions Inc/RS500	FASDAS	Trimble AgGPS 132 DGPS "RealTime"	GEM Systems GSM-19	FASDAS
PT-MEP	C-208B Caravan	Scintrex CS-3	Exploratum GR820	FASDAS	Trimble AgGPS 132 DGPS "RealTime"	GEM Systems GSM-20	FASDAS
PT-WOT	Navajo PA31-310	Scintrex CS-4	Exploratum GR820	FASDAS	Trimble AgGPS 132 DGPS "RealTime"	GEM Systems GSM-21	FASDAS

Os aeromagnetômetros são acoplados a um sensor de vapor de césio (tipo *stinger*) e localizados na cauda das aeronaves. O sinal era recebido através de um pré-amplificador, localizado na base do cone de cauda da aeronave, enviado ao sistema compensador e integrado aos outros dados pelo sistema de aquisição FASDAS. As leituras dos magnetômetros eram realizadas a cada 0,1 s. Por cada aeronave realizar o aerolevanteamento a uma velocidade diferente, a área recoberta por cada leitura era diferente. Para a aeronave PR-SSB, a área recoberta era de 6,3 m lineares, para a aeronave PT-MEP, 6,5 m lineares, e para a aeronave PT-WOT, 7,5 m lineares.

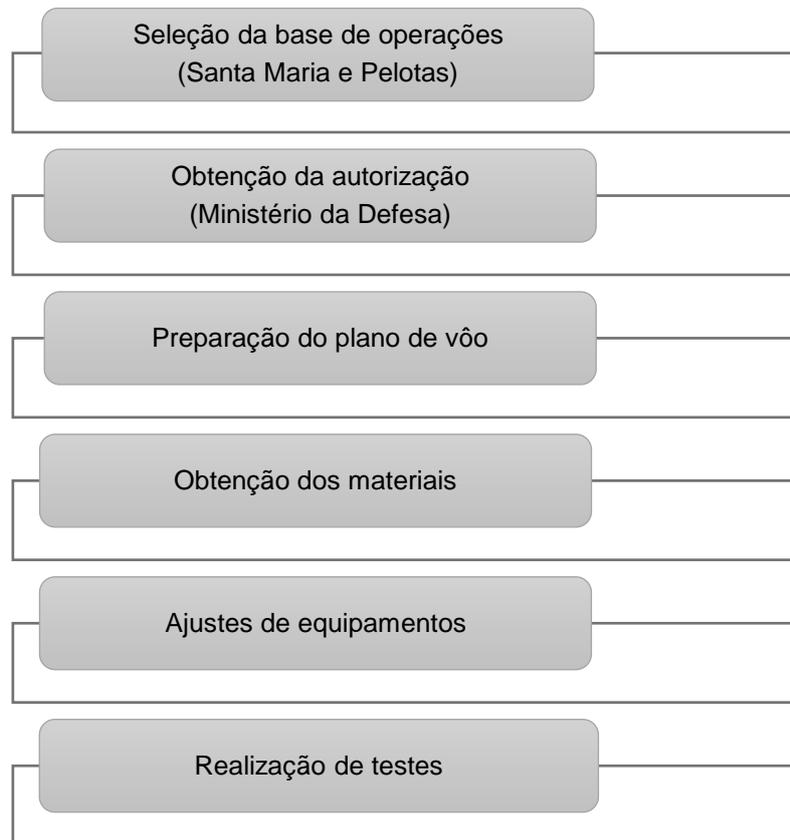
Os aerogamaespectrômetros possuem 256 canais espectrais, onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação precisa dos fotopicos de potássio, urânio e tório. As radiações gama detectadas são somadas e as leituras reduzidas a uma única saída de 256 canais espectrais. As leituras dos gamaespectrômetros são realizadas a cada segundo, que representa medições a intervalos de amostragem de aproximadamente 63, 65 e 75 m no terreno, para as aeronaves PR-SSB, PT-MEP e PT-WOT, respectivamente.

Os magnetômetros terrestres utilizados para controle da variação do campo magnético terrestre foram os mesmos para os diferentes levantamentos: GEM *Systems* modelo GSM-19. Este magnetômetro tem resolução de 0,1 nT e envoltória de ruídos em nível equivalente. As leituras do campo magnético total foram realizadas a intervalos de 1 s e armazenadas na memória do próprio equipamento. Os magnetômetros foram instalados nos aeroportos de Santa Maria e Pelotas em locais de gradiente magnético suave, livre de objetos móveis e de interferência cultural.

A fim de garantir uma maior confiabilidade de dados diferentes, os seguintes testes sob os equipamentos foram realizados: teste altimétrico; compensação magnética dinâmica com a finalidade de eliminar o ruído provocado pelo movimento da aeronave; determinação dos coeficientes de compensação magnética; teste de paralaxe para a exclusão de dados afetados pelo retardamento de tempo causados pela aeronave; teste com amostras radioativas no solo com o objetivo de controlar o comportamento do desempenho do sistema gamaespectrométrico dos cristais; teste de repetibilidade radioativa para verificar a repetibilidade e a consistência das medições dos equipamentos

geofísicos. As diretrizes básicas para a execução dos levantamentos deste projeto seguiram as etapas listadas no Fluxograma I.1.

Fluxograma I. 1 - Diretrizes implementadas para a execução do levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil.



ANEXO II

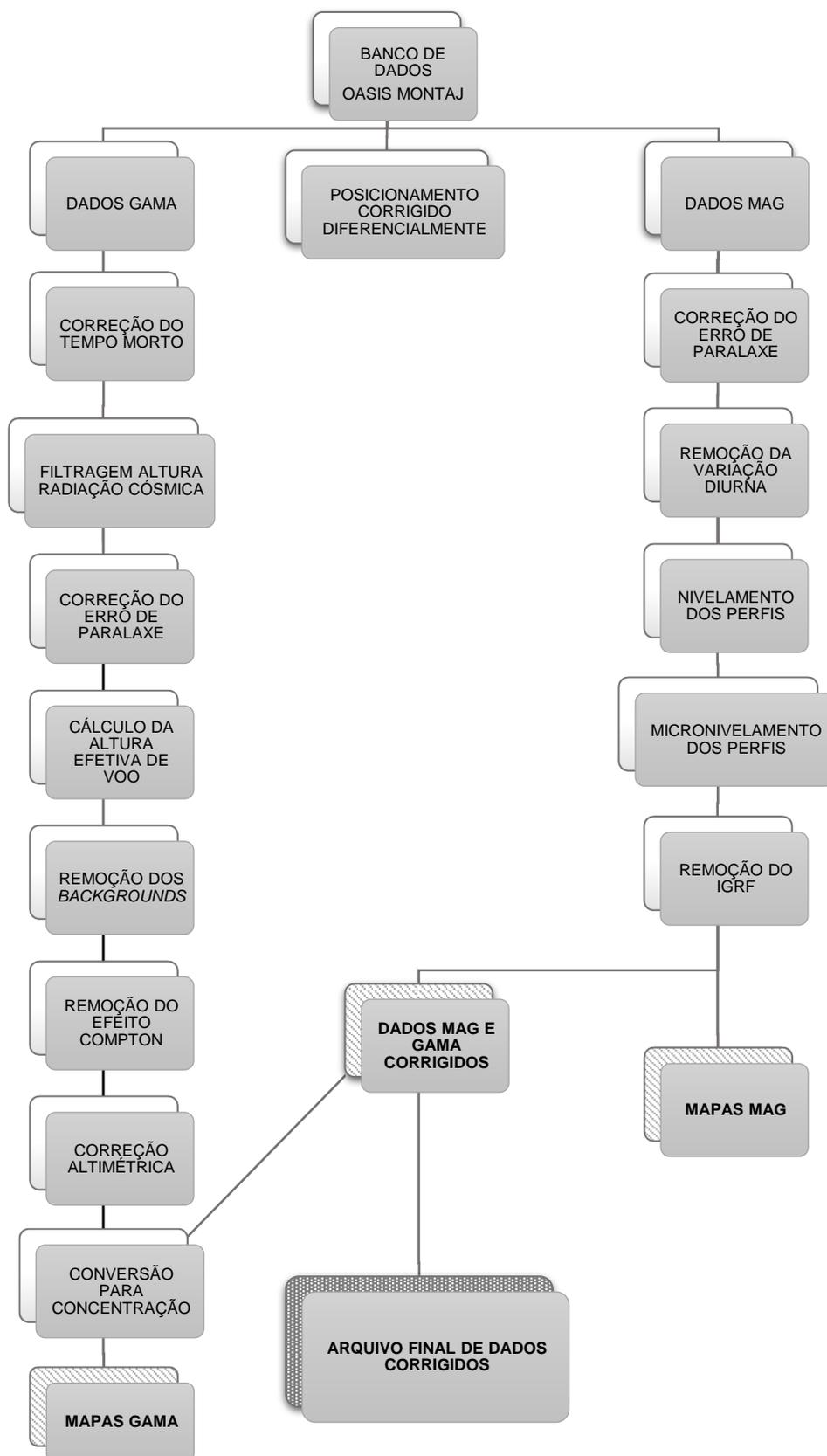
Para o controle de qualidade, ao término de cada jornada de produção do levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, as informações coletadas eram submetidas ao processamento preliminar: verificação das leituras do magnetômetro terrestre para processamento da variação diurna; verificação da qualidade da gravação e análise dos perfis coletados (desvios na altura de voo, envoltória de ruídos e desvios de navegação); geração das plotagens dos traços das linhas de voo e de controle (identificação dos possíveis trechos desviados); verificação da qualidade da gravação, em vídeo, do trajeto percorrido pela aeronave.

O processamento final dos dados foi realizado no *software* OASIS MONTAJ versão 7.1.1 do sistema GEOSOFT. No levantamento aeromagnetométrico as correções realizadas foram: correção do erro de paralaxe; remoção da variação magnética diurna; nivelamento dos perfis; micronivelamento dos perfis (eliminação de qualquer resíduo de “desnivelamento” que tenha permanecido nos dados); remoção de IGRF (Campo Geomagnético Internacional de Referência) (Fluxograma II.1).

No processamento dos dados aerogamaespectrométricos as correções foram: correção do tempo morto; filtragem de dados afetados por variações de alta frequência (*spikes*, *dummys*, *nugget*, ruídos do instrumento e valores negativos); novamente a correção do erro de paralaxe; cálculo da altura efetiva de voo; remoção do *background* da aeronave e cósmico; remoção do *background* do radônio; cálculo de estimativa dos coeficientes *skyshine* a_1 e a_2 ; correção do Efeito *Compton*; correção altimétrica; conversão da concentração de elementos (Fluxograma II.1).

Para a gerar os *grids*, foram utilizadas as rotinas do Oasis Montaj de *Minimum curvatura* (*RANGRID*) e *bidirecional line gridding* (*BIGRID*). Nos dados radiométricos, utilizou-se a mínima curvatura e, nos magnetométricos, a *gridagem* bidirecional. Os mapas de contorno foram elaborados a partir de *grids* regulares, interpolados em malha quadrada, com dimensões de 125 m x 125 m, o que equivale a um quarto do espaçamento entre as linhas de voo.

Fluxograma II. 1 - Fluxograma mostra a rotina de controle de qualidade e correções realizadas no levantamento aerogeofísico do Projeto Escudo do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil



ANEXO III

Os levantamentos geofísicos terrestres realizados no território de estudo ocorreram nos anos de 2009, 2012 e 2016. Os métodos executados foram os de Polarização Induzida *IP* e Magnetometria e engloba todas as áreas que apresentam corpos de minério. Todas as informações foram obtidas a partir do relatório cedido pela Nexa *Resources* (NEXA Resources, 2009b).

Os levantamentos realizados em 2009 foram divididos em duas campanhas. A primeira campanha foi realizada em fevereiro, março e abril do qual apenas o método de *IP* foi implementado. A segunda campanha ocorreu durante os meses de agosto, setembro e outubro, ao qual a magnetometria e *IP* foram implementados pela empresa FUGRO, contratada pela Votorantim Metais - VM, atual NEXA *Resources*.

A primeira campanha, conduzida no mês de fevereiro, foi dividida em duas etapas. A primeira etapa foi a recuperação dos dados de polarização induzida no domínio da frequência (adquiridos pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM em 1993) junto à biblioteca da Companhia Brasileira do Cobre, nas Minas do Camaquã. A CPRM executou o levantamento de cinco perfis, localizados sob A2 e A3, e os dois restantes na parte norte.

O reprocessamento dos dados foi executado pelas empresas de prestação de serviços *Reconsult* Geofísica e AFC Geofísica, com o principal objetivo de testar de diferentes arranjos do *IP*.

Os resultados do reprocessamento e do orientativo integrados à geologia e sondagem foram animadores, pois mostraram que a mineralização sulfetada do alvo A3 apresenta resposta de cargabilidade com valores entre 9 a 18 mV/V. A resistividade - RES auxiliou na delimitação dos pacotes areníticos resistivos e estruturas rúpteis sub-verticalizadas. Isso possibilitou a definição de uma nova campanha de *IP/RES* com maior densidade entre linhas e equipamentos mais precisos.

A segunda etapa foi o novo levantamento de *IP* no domínio do tempo conduzido pela empresa FUGRO durante os meses de março e abril, com a aquisição de 29 km de perfis dispostos sobre os alvos A1, A1/A2, A2, A2/A3, A3 e A4. Primeiramente, foi realizado um teste com os arranjos Polo-Dipolo (PDP)

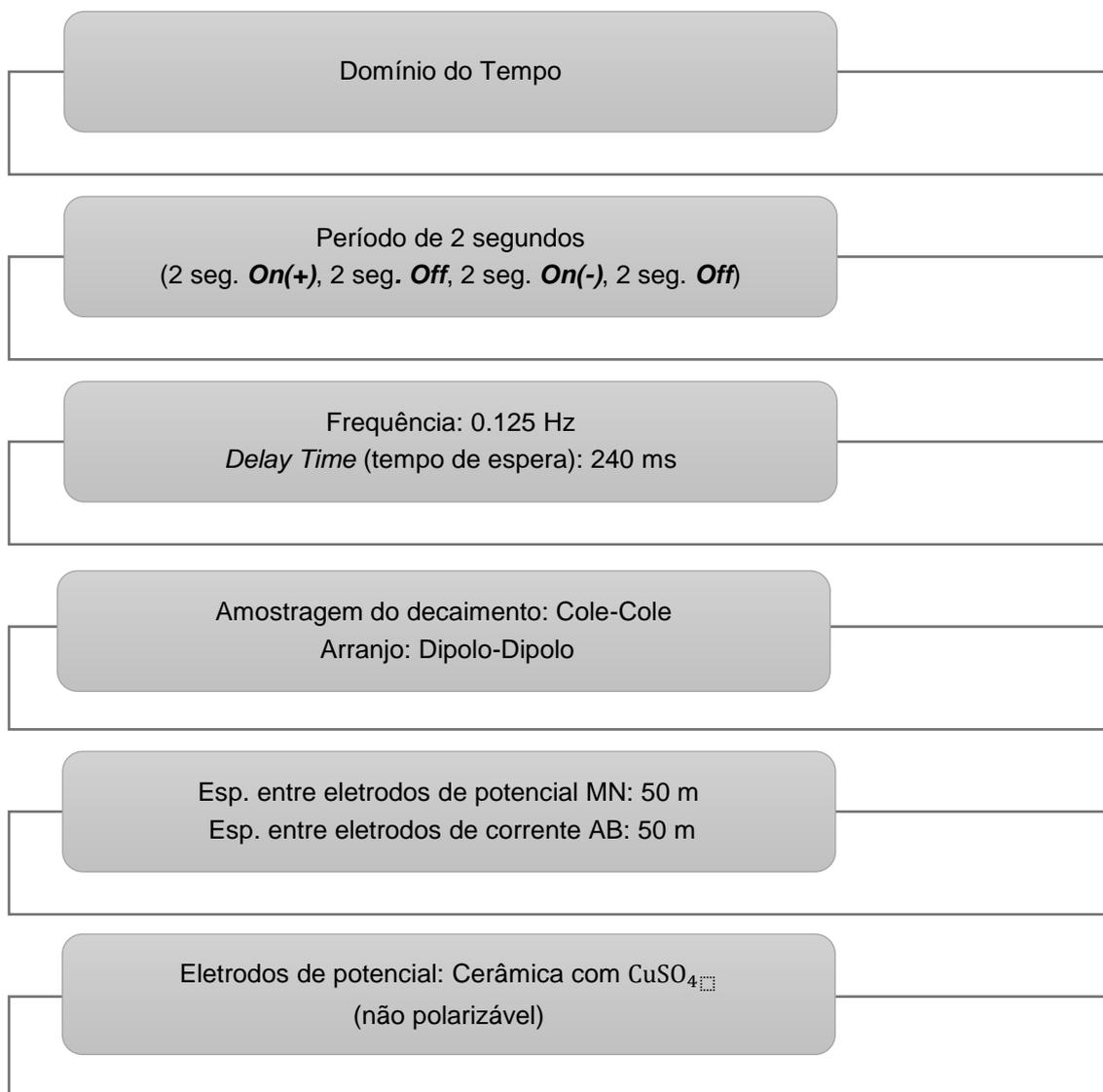
e Dipolo-Dipolo (DPDP) sobre um perfil no alvo A3, para efeito de comparação com os dados da AFC.

Os resultados do arranjo PDP não foram satisfatórios, devido à dificuldade de posicionamento de anomalias de *IP* já testadas por sondagem. O arranjo DPDP apresenta o benefício de atingir uma profundidade de pesquisa maior, sem perda de resolução. O teste deste arranjo mostrou uma boa resolução lateral em comparação ao PDP, devido à sua simetria e espaçamento constante entre eletrodos de corrente e potencial, além da vantagem de praticidade operacional de campo e a facilidade na interpretação qualitativa da pseudoseção/inversão. A principal desvantagem do dipolo-dipolo é a sua baixa razão sinal/ruído em comparação ao PDP. O item final para confirmação de que o arranjo DPDP seria o melhor a ser implementado foi o resultado de processamento, onde a pseudoseção e inversão de cargabilidade do arranjo DPDP mostrou-se similar aos dados do IMIP da AFC.

Definido o arranjo, optou-se pelo espaçamento entre eletrodos de 50 m e 10 níveis de investigação. Baseada nestas especificações, a profundidade confiável de investigação é de aproximadamente 140 m.

Os equipamentos utilizados durante o levantamento envolveram um sistema *IP* Espectral no domínio do tempo desenvolvido pela *IRIS Instruments*, constituído por um receptor ELREC-Pro, um transmissor de corrente VIP 4000, alimentado por um gerador Honda de 10 kVA. O transmissor consegue trabalhar com geradores comerciais de 60 Hz, que fornece até 4 kVA de potência de saída, com faixa de corrente que variava de 0,5 A a 5 A. O receptor, por sua vez, pode trabalhar nos domínios do tempo ou frequência, com o armazenamento de diversos parâmetros como cargabilidade, resistividade, potencial espontâneo, corrente injetada e diferença de tensão entre os eletrodos de potencial. As demais características da aquisição de dados são apresentadas a seguir (Fluxograma III.1).

Fluxograma III. 1 - Informações do levantamento terrestres de IP como o domínio utilizado, período de decaimento, frequência utilizada, amostragem, arranjo, espaçamento e material dos eletrodos.



Após processamento e interpretação de todos os perfis levantados, recomendou-se ainda uma segunda campanha de *IP/RES* com aproximadamente 18 km de perfis distribuídos sobre os alvos A1 (extensão oeste e sul) e A1/A2 (*infill*), pela má definição de várias anomalias de cargabilidade.

Entre os dias 24 de agosto a 8 de outubro de 2009, foram levantadas 26 linhas de *IP* e, adicionalmente, um levantamento magnetométrico sobre as mesmas linhas levantadas com o *IP*. As linhas possuem espaçamento de 100 e 200 m, todas na direção E-W com comprimento variável (Tabela III.1).

A aquisição de dados de IP foi realizada com o mesmo equipamento e sistema de levantamento implementado na campanha anterior (descritos anteriormente). A única particularidade a ser evidenciada é a utilização de um conjunto de três eletrodos de aço inoxidável de uma polegada de diâmetro por um metro de comprimento, para cada estação, interligados por cabos elétricos e aterrados com solução salina. O uso deste conjunto visou minimizar a resistência de contato entre os eletrodos de corrente (AB) e o solo.

O levantamento magnetométrico sobre as mesmas linhas levantadas com o IP, utilizou o magnetômetro *overhouser*, modelo GSM-19, versão 5.0, fabricado pela GEM System, de alta sensibilidade e precisão (0,01 nT). As demais características da aquisição de dados são apresentadas a seguir (Fluxograma III.2).

Fluxograma III. 2 - Características implementadas no levantamento magnetométrico e informações do equipamento utilizado.



O levantamento de 2012 ocorreu com a intenção de verificar se as anomalias de cargabilidade de IP, muitas mal definidas, se expandiam lateralmente. De onze perfis levantados, três estavam sobre os alvos A1 (extensão oeste e sul) na direção E-W; dois sobre o alvo A2/A3 (*infill* extensão leste) também na direção E-W e seis sobre o A3/A4 (extensão leste e norte) na direção NE-SW (Tabela III.2). O levantamento de 2016 ocorreu sobre os quatro alvos (A1, A2, A3 e A4), mas na direção NE-SW, para a verificação se os dados adquiridos (IP e magnetometria) sofreram influência (superfície de tendência) da metodologia implementada, a gerar anomalias (Tabela III.2). As respostas obtidas por alguns furos de sondagem justificam também a sugestão/execução de um novo levantamento sobre a mesma área, mas com direção diferente.

A empresa contratada para a execução de ambos levantamentos foi a mesma contratada em 2009 (FUGRO). Estas execuções de levantamentos em diferentes anos ocorreram com os mesmos equipamentos e metodologia citados anteriormente.

Tabela III. 1 - Tabela com informações gerais sobre a primeira e segunda campanhas realizadas em 2009.

LEVANTAMENTO 2009

CAMPANHA 1 (FEVEREIRO, MARÇO E ABRIL)							
Alvo	Linha	Extensão (m)	Direção	Arranjo	Esp. entre Linhas (m)	Esp. entre Eletrodos (m)	Níveis de Investigação
A1	74500	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74600	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74700	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74800	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74900	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
A1/A2	75100	2000.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	75300	1200.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	75500	1200.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
A2	75600	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	75700	2000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	75800	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	75900	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	76000	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
A2/A3	76100	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	76200	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	76300	1200.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	76400	1200.00	E-W	DPDP	1000.00	50.00	10
A3/A4	77400	2500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	77600	2500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
A4	77800	2500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	78000	2500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	78200	3500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10

CAMPANHA 2 (AGOSTO, SETEMBRO E OUTUBRO)							
Alvo	Linha	Extensão (m)	Direção	Arranjo	Esp. entre Linhas (m)	Esp. entre Eletrodos (m)	Níveis de Investigação
A1	74000	1900.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74100	1900.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74200	1900.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74300	1900.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	74400	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
A1/A2	75000	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	75200	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
A3	75400	1000.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	76700	1400.00	E-W	DPDP	700.00	50.00	10
	77900	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
	78100	1400.00	E-W	DPDP	100.00	50.00	10
A4	78400	2000.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	78600	2000.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	78800	2000.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	79000	2000.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10
	79200	1500.00	E-W	DPDP	200.00	50.00	10

Tabela III. 2 - Tabela com informações gerais sobre as campanhas realizadas em 2012 e 2016.

LEVANTAMENTO 2012							
Alvo	Linha	Extensão (m)	Direção	Arranjo	Esp. entre Linhas (m)	Esp. entre Eletrodos (m)	Níveis de Investigação
A1	13	2000.00	E-W	DPDP	400.00	50.00	10
	14	2000.00	E-W	DPDP	400.00	50.00	10
	15	2300.00	E-W	DPDP	400.00	50.00	10
A2/A3	11	2000.00	E-W	DPDP	400.00	50.00	10
	12	2000.00	E-W	DPDP	400.00	50.00	10
A3/A4	8	3500.00	NE-SW	DPDP	250.00	50.00	10
	9	1500.00	NE-SW	DPDP	250.00	50.00	10
	10	3500.00	NE-SW	DPDP	250.00	50.00	10
	19	1300.00	NE-SW	DPDP	250.00	50.00	10
	20	3800.00	NE-SW	DPDP	250.00	50.00	10
LEVANTAMENTO 2016							
Alvo	Linha	Extensão (m)	Direção	Arranjo	Esp. entre Linhas (m)	Esp. entre Eletrodos (m)	Níveis de Investigação
A2, A3 e A4	0	3400.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	250	3400.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	500	3400.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	750	3400.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	1000	3400.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	1250	3800.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	1500	3800.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	1750	4000.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	2000	3800.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	2250	3800.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	2500	2300.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	2750	3300.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	3000	3300.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10
	3250	2300.00	NE/SW	DPDP	250.00	50.00	10