



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA EM ÁREA DE OCORRÊNCIAS DE
MANGANÊS SUPERGÊNICO NA REGIÃO DE HELIODORA, SUL
DE MINAS GERAIS.**

Samuel Siqueira Reis

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

SAMUEL SIQUEIRA REIS

PROSPECÇÃO GEOFÍSICA EM ÁREA DE
OCORRÊNCIAS DE MANGANÊS SUPERGÊNICO NA
REGIÃO DE HELIODORA, SUL DE MINAS GERAIS.

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro - SP
2015

551
R375p

Reis, Samuel Siqueira

Prospecção geofísica em área de ocorrências de manganês
supergênico na região de Heliadora, Sul de Minas Gerais. / Samuel
Siqueira Reis. - Rio Claro, 2015

39 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual
Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Orientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Prospecção geofísica. 3. Manganês. 4. Resistividade.
5. Cargabilidade. 6. Modelamento 3D. I. Título.

SAMUEL SIQUEIRA REIS

PROSPCÇÃO GEOFÍSICA EM ÁREA DE OCORRÊNCIA
DE MANGANÊS SUPERGÊNICO NA REGIÃO DE
HELIODORA, SUL DE MINAS GERAIS

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira (orientador)

Dr. Daniel Françoso de Godoy

Me. Alex J.C.A. Silva

Rio Claro, 17 de dezembro de 2015.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Aos meus pais, Maria Isabel Siqueira Reis e Antônio Laércio do Reis (In memoriam).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente meu orientador e amigo por quem tenho enorme admiração, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pelo apoio e pela oportunidade de realizar esse trabalho na minha cidade natal.

Agradeço todos os docentes e funcionários dos departamentos de Geologia que de alguma forma foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Deixo um agradecimento em especial ao Prof. Edson Gomes de Oliveira (*In memorian*), pela amizade, confiança e ensinamentos que fizeram e fazem diferença na minha formação e na minha vida.

Aos amigos que fiz na faculdade, em especial com os quais convivi na República Mansão (Lumbriga, Cinderela, Boca, Julião, Stopa, Sacudo, Nelson, Mumuco, Merdinha, Chester, Markito, Quevedo, Bueiro, Simba, Frank, Macaco, Buchecha, Jiripoca, 2D, Piru, Bapt, Pança, e os Bixos 2015) e na República Balangateta quando ainda cursava Física (Pemba, Precoce, Dinho, Skiter, Carunxo, Timóteo, Piter, Empire, Cadeia), deixo meus sinceros agradecimentos por cada momento junto, pelo aprendizado único que a convivência com tantas pessoas traz e, pela sincera amizade que pretendo levar pro resto da vida.

Deixo um agradecimento a parte ao meu grande amigo e primo, Lucas Carvalho (Nelson), por quem tenho grande admiração e respeito, e por ter estado sempre ao meu lado, seja na república, no trabalho ou nas dificuldades. Obrigado por tudo irmão.

Agradeço também ao Bar Madalena, seus proprietários e todos amigos com quem tive o prazer de trabalhar durante os quase sete anos como garçom. Agradeço ainda algumas pessoas que conheci através do Madalena e que se tornaram grandes amigos.

Aos geólogos e funcionários da Yamana Gold - Exploração Projeto Chapada, Goiás, onde fui estagiário e pude ter uma experiência importante na minha formação, muito obrigado pela oportunidade.

Aos meus grandes amigos de Heliadora, sempre fiéis, agradeço de coração pelo apoio e carinho de sempre, mesmo eu estando distante durante esses anos. A amizade de vocês é inestimável pra mim.

Pra terminar agradeço a minha Mãe pelo apoio incondicional; Ao meu Pai (*In memorian*), que agora está ao meu lado mais do que nunca, pelo respeito e confiança que continuarão sendo sempre minha motivação. Ao meu irmão pela amizade e amor; Aos meus Padrinhos, Nelson e Jane, por todo apoio e carinho, aos meus Avós por cada benção e oração e, a toda minha família e amigos que de alguma forma tiveram influencia na minha vida.

Epígrafe

"... Toda imagem no espelho refletida
tem mil faces que o tempo ali prendeu,
todos tem qualquer coisa repetida
um pedaço de quem nos concebeu.
A missão do meu pai já foi cumprida,
Vou cumprir a missão que Deus me deu.
Se o meu pai foi espelho em minha vida,
quero ser pro meu filho espelho seu.

A vida é mesmo uma missão,
a morte é uma ilusão,
só sabe quem viveu,
pois quando o espelho é bom
ninguém jamais morreu ..."

João Nogueira

Resumo

Este trabalho discute os resultados de uso combinado dos métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida na prospecção geofísica de uma ocorrência mineral de manganês de origem supergênica, caracterizada por óxidos de manganês e ferro com textura terrosa, oriundos do intemperismo de espessartita contida em metassedimentos. A partir das medidas de resistividade elétrica foi possível o reconhecimento de uma zona concêntrica em modelos de inversão 2D, com valores entre $73\Omega.m$ e $380\Omega.m$, coincidente com a porção mais enriquecida em óxidos. Os modelos de inversão 2D para cargabilidade obtidos próximo no perfil de solo exposto, permitiram delimitar toda a extensão mineralizada, caracterizada por valores abaixo de $5mVV$. O modelamento 3D gerado por interpolação de modelos de inversão 2D, possibilitou uma análise morfológica da ocorrência, caracterizada por uma extensa faixa (cerca de 50m) visível em campo, mas restrita a cerca de 10m de profundidade, basicamente entre os horizontes B e C do perfil de solo. A restrição em profundidade pode estar associada a precipitação de metais lixiviados, na interface de oxidação-redução proporcionada pelo corte no terreno para construção da estrada, que promove aeração e evapotranspiração do solo. Os resultados relevam o potencial de detalhamento morfológico de mineralizações supergênicas de forma rápida e expedita, pelo uso combinado de métodos geoeletricos e avaliação de dados via modelamento 3D.

Palavras-chave: Prospecção geofísica, manganês, resistividade, cargabilidade, modelamento 3D.

Abstract

This paper discusses the results of combined use of the methods of Electrical Resistivity and Induced Polarization in the geophysical prospection of a supergene manganese mineral occurrence, characterized by manganese and iron oxides with earthy texture, derived from the weathering of spessartite contained in metasediments. From electrical resistivity measurements it was possible to recognize a concentric zone in 2D inversion models, ranging from $73\Omega.m$ to $380\Omega.m$, coinciding with the richer portion in oxides. 2D inversion models for chargeability obtained near the exposed soil profile, helped to determine the entire mineralized zone, characterized by values below $5mV/V$. The 3D modeling generated by interpolation of 2D inversion models allowed a morphological analysis of the event, characterized by a wide zone (around 50m) visible on field, but restricted to approximately 10m deep, basically between the horizons B and C of the soil profile. The restriction in depth may be associated with the precipitation of leached metals, in the oxidation-reduction interface provided by the cut in the ground to the road construction, which promotes aeration and soil evapotranspiration. The results reveal the potential of morphological detailing of supergene mineralizations quickly and expeditiously by the combined use of geoelectric methods and data evaluation by 3D modelling.

Keywords: Geophysical Prospecting, manganese, resistivity, chargeability, 3D modeling.

Lista de Figuras

1.1	Localização da Área	5
2.1	Mapa geotectônico regional	8
2.2	Mapa geológico local	10
2.3	Protominério de Mn - Granada-biotita xistos.	11
2.4	Perfil de solo com detalhe pra ocorrência de Mn	11
5.1	Medição da resistividade por meio de arranjo linear de 4 eletrodos	20
5.2	Polarização de membrana	22
5.3	Polarização eletrônica	22
5.4	Método IP no domínio do tempo	23
5.5	Arranjo Wenner	25
5.6	Arranjo Schlumberger	25
5.7	Posicionamento das linhas de aquisição de dados geofísicos.	27
5.8	Resistímetro ABEM <i>Terrameter LS</i>	27
5.9	Equipamentos utilizados na aquisição dos dados geofísicos	28
6.1	Modelos de inversão de resistividade e cargabilidade	30
6.2	Modelos de visualização 3D	31

Lista de Tabelas

4.1 Principais minerais de Mn formadores de depósitos	16
---	----

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Objetivos	4
1.2	Localização e aspectos fisiográficos da área	4
2	Contexto Geológico Regional	6
2.1	Contexto geotectônico	6
2.2	Estratigrafia	7
2.3	Geologia estrutural e metamorfismo	9
2.4	Geologia econômica	9
2.5	Geologia local	11
3	Prospecção Geofísica	12
3.1	Geofísica aplicada na pesquisa mineral	13
3.1.1	Geofísica aplicada na pesquisa de manganês	14
4	Manganês	16
4.1	Depósitos de Manganês	17
4.1.1	Depósitos supergênico de Mn	17
5	Materias e Métodos	19
5.1	Eletrorresistividade	19
5.2	Polarização induzida	21
5.3	Técnica e arranjo de campo	24
5.3.1	Caminhamento elétrico	24
5.3.2	Arranjo Wenner-Schlumberger	24
5.4	Aquisição e processamento de dados	26
6	Resultados e discussão	29
7	Conclusão	34
	Referências Bibliográficas	36

Capítulo 1

Introdução

O setor mineral no Brasil é responsável por 4,2% do Produto Interno Bruto (PIB) e representa cerca de 20% das exportações brasileiras. Os insumos minerais que se destacam no cenário nacional são o nióbio, ferro, bauxita, manganês e cobre, além de ouro e rochas ornamentais (MME, 2011).

Em 2008, o Brasil liderou a produção mundial de manganês com 20,1% das ofertas (3,16 Mt) quando ocupava a sétima colocação no *ranking* com apenas 1,1% das reservas mundiais. Atualmente é o quarto colocado, com 8,8% das reservas, enquanto que a produção ocupa a quinta colocação estimada em 7,2% (1,2 Mt) da produção mundial. A queda na produção em relação a 2008 deve-se principalmente a crise econômica daquele ano e a reavaliação de jazidas nos anos seguintes (SANTANA, 2010; SANTANA, 2015). As maiores reservas estão localizadas na África do Sul (26,5%), Ucrânia (24,7%), Austrália (17,1%), Brasil (8,8%) e Índia (8,7%).

O setor mineral é, portanto, de suma importância para a manutenção do crescimento econômico brasileiro. Haja visto que os depósitos minerais de classe mundial já foram descobertos, exige-se cada vez mais da exploração mineral, tanto para a descoberta de novas ocorrências e depósitos minerais, quanto para a ampliação de jazidas já conhecidas (MOREIRA et al., 2012).

Uma peculiaridade intrínseca a este setor com impacto direto nos procedimentos de pesquisa é o valor atual e projeções futuras quanto ao preço das commodities minerais. Projeções ou expectativas de queda nos preços resultam em cortes de custos, redução no ritmo das pesquisas e concentração dos trabalhos em alvos de maior potencial econômico, ou seja, maiores teores associados a baixo custo de lavra. Em contrapartida, cenários de altas nos preços no presente ou projetos futuros proporcionam a pesquisa em áreas pouco conhecidas e de ocorrências de baixos teores, áreas de alto risco ao retorno do investimento, mas que podem resultar em descobertas promissoras e de grande retorno financeiro.

A Prospecção Geofísica consiste num conjunto de métodos e técnicas de investigação e aquisição de dados utilizada na exploração mineral. Associada com mape-

amento geológico, prospecção geoquímica e geoestatística subsidiam as principais etapas de planejamento e estratégia da Pesquisa Mineral (MARANHÃO, 1985; PEREIRA, 2003).

A geoquímica e a geofísica são amplamente empregadas em estudos de gênese de depósitos minerais focados na temática Geologia Econômica. Existem centenas de artigos nacionais e internacionais nessa área. Entretanto, no Brasil, estudos em pesquisa mineral voltados ao uso sistemático de prospecção geoquímica são escassos (ARAÚJO; MACEDO, 2008; CORNELIUS et al., 2007). Trabalhos de Prospecção Geofísica de detalhe em alvos localizados são ainda mais escassos. Todavia um grupo de pesquisa vinculado ao Departamento de Geologia Aplicada da UNESP-Rio Claro vem atuando na área de Geofísica Aplicada, mas especificamente no âmbito de pesquisa em Geofísica rasa (MOREIRA; ILHA, 2011; MOREIRA et al., 2012; MOREIRA et al., 2014; VIEIRA, 2015).

Em pesquisas voltadas a área de geofísica em exploração mineral, predominam estudos regionais a partir de aerolevantamentos e sensoriamento remoto (MAAS et al., 2003; MORAIS; JUNIOR; PARADELLA, 2011). Em estudos mais detalhados utilizam-se principalmente os métodos elétricos e eletromagnéticos na prospecção de sulfetos e óxidos (MOON et al., 2006; TELFORD; SHERIFF, 1990).

Em condições de pequeno contraste de propriedades físicas entre zona mineralizada e solo/rocha estéril, estudos geofísicos em ocorrências minerais são relevantes no sentido de definir limitações do uso de métodos geofísicos, além da análise de possibilidade em adaptações de procedimentos de aquisição e análise de dados, no sentido de aperfeiçoamento e avanços acerca de aplicações desta ferramenta em pesquisa mineral.

No caso dos métodos elétricos e eletromagnéticos é possível citar o conteúdo mineral, teor e tipos predominantes de argilominerais, variabilidade granulométrica, porosidade, permeabilidade, presença e composição do fluído intraporo, heterogeneidades, anisotropias, fraturas e falhas (MCNEILL, 1980b).

O método da Eletroresistividade pode ser aplicado na pesquisa de óxidos de manganês disseminados, devido a alta condutividade elétrica do metal, em contraste com as rochas encaixantes (RAMAZI; MOSTAFAIE, 2013). O método da Polarização Induzida (IP) foi desenvolvido e otimizado para a exploração de sulfetos disseminados, a partir da década de 1950 (IRVINE; SMITH, 1990).

Estudos que mostram as vantagens e limitações da aplicação desses métodos na exploração mineral podem ser encontrados nos trabalhos de (IRVINE; SMITH, 1990; MCNEILL, 1980b).

Para esse trabalho foi selecionada uma área com ocorrências de Manganês supergênico. O depósito foi originado do intemperismo de rochas de médio a alto grau metamórfico, portadoras de granada manganesíferas e, recombinação de Mn em for-

mas estáveis como óxidos e hidróxidos em solo e saprólito. Propriedades físicas como resistividade elétrica e polarizabilidade são relacionados principalmente ao teor de óxidos e hidróxidos minerais e, ao grau de umidade no perfil de alteração.

1.1 Objetivos

Este trabalho avalia a aplicação dos métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida na caracterização morfológica de uma zona com enriquecimento supergênico de manganês, proveniente da alteração de cristais de espessartita e formações de óxidos em perfis de solo, previamente reconhecidas em trabalhos de campo. Por meio de modelos 2D e 3D, também são analisadas a continuidade lateral e em profundidade da zona mineralizada.

1.2 Localização e aspectos fisiográficos da área

O estudo é realizado região de Heliodora, sul do Estado de Minas Gerais (Figura 1.1). O município corresponde a uma área de 154 km^2 com população de 6.120 habitantes segundo o último censo (IBGE, 2010). Está distante 383 km da capital Belo Horizonte (BH), 270 km de Rio Claro (SP) e 250 km de São Paulo (SP).

A região está inserida no Planalto do Sul de Minas, unidade morfoestrutural que integra o Planalto Atlântico do Brasil Sudeste (AB'SÁBER, 1998). O município é delimitado pela serra das Águas a norte e Santa Catarina a sul, ambas com cristas orientadas na direção ENE/WSW e altitude média em torno de 1450m. Nas baixadas predominam colinas e morros, com cotas entre 900 e 950m.

O relevo atual é atribuído ao Ciclo Velhas (KING, 1957) que, durante o pliopleistoceno, entalhou os planaltos gerados no Ciclo Sul-Americano. Devido as condições úmidas seguinte, predominaram processos morfológicos químicos que originou formas colinosas, com vertentes convexo-côncavas e morros mamilomares (BALTAZAR, 1988).

A bacia hidrográfica da região pertence ao rio Sapucaí, que percorre o noroeste e sudoeste do município e é um dos principais afluentes do rio Grande. Constitui com seus afluentes pela margem direita uma rede de drenagem nitidamente controlada pelas direções estruturais da área.

Predomina na região o latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVd), que ocorre nas áreas de relevo ondulado e montanhoso, e os cambissolos (C) que ocorrem preferencialmente nos divisores de água. Solos aluvias ocupam as partes baixas e margens dos principais cursos d'água.

Baseado na classificação de Koppen, o tipo climático é mesotérmico úmido (Cwb) com invernos seco e verões brandos e chuvosos. A pluviosidade média anual está entre 1200-1400mm, com janeiro como mês mais chuvoso e, secas de maio a setembro.

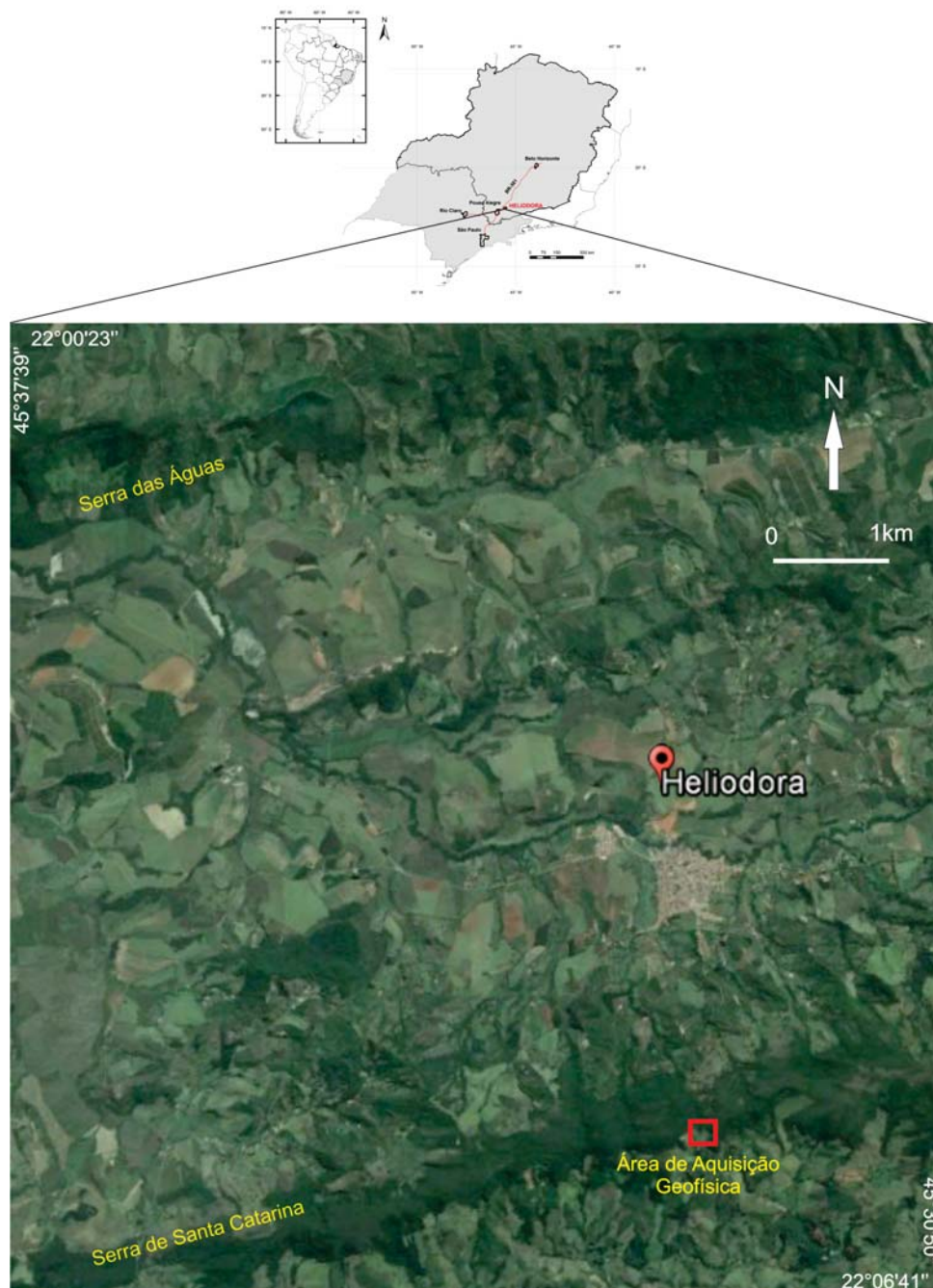


Figura 1.1: Localização da Área

Capítulo 2

Contexto Geológico Regional

A geologia da região de Heliódora chamou atenção de diversos pesquisadores a partir da década de 50 quando iniciaram-se os primeiros trabalhos sobre estratigrafia do pré-cambriano brasileiro e compartimentação da Plataforma Sul-Americana. Na tentativa de inserir essa região num contexto geotectônico verificou-se uma grande complexidade estrutural que fez com que vários autores sugerissem um contexto geotectônico distinto e por vezes controverso.

2.1 Contexto geotectônico

A região sul do Estado de Minas Gerais está inserida na Faixa de Dobramentos Alto do Rio Grande (ALMEIDA; HASUI, 1984), que corresponde ao extremo sul da Faixa de Dobramentos Brasília (TROUW; PACIULLO; RIBEIRO, 1994), ou Orógeno Tocantins Meridional (CAMPOS-NETO et al., 2004). Está situada na borda sul do Cráton do São Francisco (CFS) e desenvolveu-se durante o neoproterozoico, com os eventos brasilia-nos de aglutinação do Gondwana Ocidental no sudeste brasileiro. O embasamento do sul de Minas constitui rochas Arqueanas/Paleoproterozóicas (>1,8Ga) do Complexo Mantiqueira, geradas nos ciclos tectônicos Transamazônico, Jequié e possíveis outros mais antigos (HASUI, 2010).

Essa faixa é caracterizada por evolução policíclica com indícios de vários eventos tectono-metamórficos que resultaram em um arcabouço tectônico complexo. Na margem sul do CSF, as direções estruturais não se ajustam aos movimentos tectônicos convencionais, com vergência para o cráton, como nas margens E e W do CSF, nem um cinturão de Faixas Móveis brasileiras independentes (RIBEIRO et al., 1995). Desta maneira Trouw, Paciullo e Ribeiro (1994) definiu esta região como zona de interferência entre as Faixas Brasília e Ribeira, baseados em critérios estruturais, estratigráficos e geocronológicos. Essa complexidade foi inicialmente reconhecida por EBERT (1984), como bifurcação entre "Paraibides e Araxides".

Duas colisões continentais consecutivas remontam a evolução geotectônica neo-proterozóica dessa região. A primeira, ocorreu entre o paleocontinente Paranapanema e a margem passiva ocidental na margem sul do CSF, e formou a porção meridional da Faixa Brasília. A segunda ocorreu entre o Arco Magmático Rio Negro e margem passiva sudeste do CSF, que resultou na formação da formação da Faixa de Dobramentos Ribeira (POLO, 2009).

Nesse contexto duas bacias intracontinentais (Bacia São João Del Rei e Carandaí) e uma de margem passiva (Bacia Andrelândia), desenvolveram-se sobre embasamento pré 1.8 Ga na borda meridional do CSF. Ambas foram afetadas pelos eventos que culminaram com a aglutinação do Gondwana Ocidental. Isso resultou em um sistema de *nappes* empilhadas durante a estruturação da Faixa Brasília, posteriormente retrabalhadas durante a orogenia Ribeira (RIBEIRO et al., 1995).

Na região de Heliódora, destaca-se o sistema de *nappes* Liberdade-Luminárias (Figura 2.1) onde foram reconhecidas as *nappes* Carmo da Cachoeira, Lambari. A *nappe* Socorro/Guaxupé representa um fragmento de crosta continental profunda proveniente da raiz de arco magmático instalado na borda oriental na paleocontinente Paranapanema (CAMPOS-NETO et al., 2004), empurrada sobre o metassedimentos da Megassequência Andrelândia.

2.2 Estratigrafia

De acordo com a estratigrafia proposta por Baltazar (1988) (Figura 2.2), na região de Heliódora, o embasamento é de idade arqueno/paleoproterozoico, constituído por ortognaisses heterogêneos de composição monzonítica a granodiorítica, pertencente ao Complexo Silvanópolis, subdivididos nessa região nas unidades As_1 e As_2 . Subordinado ocorre um corpo de rocha ultramáfica, interpretado como um fragmento ofiolítico intercalado (POLO, 2009).

As rochas supracrustais correspondem aos metassedimentos pertencentes a Megassequência Andrelândia (MSA), com rochas que variam de 1.0 a 0.6 Ga, além de rochas máficas e metaultramáficas subordinadas. Na região a MSA é subdivida, da base para o topo nos Grupos Lambari e Andrelândia. No domínio da área de estudos afloram predominantemente rochas pertencentes ao Grupo Andrelândia, subdivididas do topo para a base nas unidades: Formação Gnaisses Brejão (Plab); Formação São Tomé da Letras (Plast); Formação Cambuquira (Palc₂).

Além destas, a sul da região do mapa da Figura 2.2, ocorrem ainda rochas orto e paraderivadas pertencentes a *nappe* Socorro-Guaxupé, agrupadas na região como unidade Piranguinhos (NP2pi). Esta unidade é constituída predominantemente por ortognaisses com intercalações subordinadas de quartzitos micáceos, granaditos (pos-

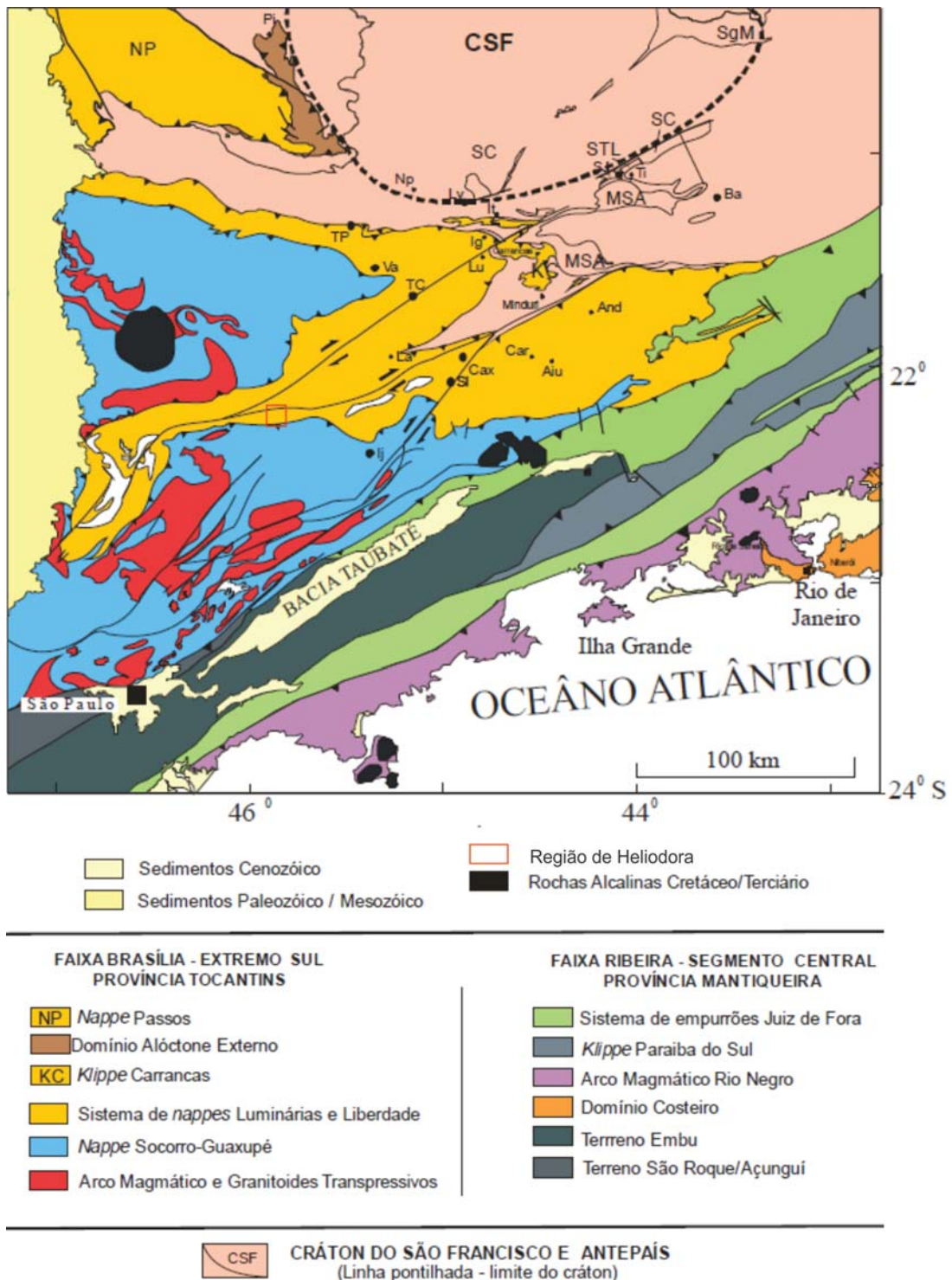


Figura 2.1: Mapa geológico regional e localização da região de Heliodora. Modificado de (POLO, 2009).

sivelmente metachert), gnaisses ricos em quartzo e granulitos.

Ocorrem também, de forma subordinada, granitos sin a tardi tectônicos encaixados na MSA, NSG e no embasamento, localmente miloníticos, encaixado em zona de cisalhamento tardia.

2.3 Geologia estrutural e metamorfismo

Na região, Polo (2009) reconheceu quatro fases deformacionais (D_1 a D_4), das quais D_1 e D_2 são relacionadas a estruturação da Faixa Brasília, e D_3 e D_4 a interferência da Faixa Ribeira. A estrutura D_1 gerou uma clivagem de crenulação S_1 nas rochas do embasamento, parcialmente transpostas pela foliação principal S_2 . A fase D_2 gerou a foliação principal reconhecida na região, marcada pela orientação de minerais micáceos em geral com mergulhos íngremes, ora pra NW ora pra SE, além de ser reconhecida em dobras fechadas a isoclinais. A fase D_3 gerou dobras regionais abertas com plano axial íngreme ortogonal a S_2 . A fase D_3 está associada a zona de cisalhamento dextral, de caráter dúctil-rúptil, reconhecida em milonitos na área. A fase D_4 está associada a zona de cisalhamento Jesuânia, dextral com direção ENE-WSW, e zona de cisalhamento Santa Rita do Sapucaí, dextral com direção NE-SW. Essas duas últimas foram identificadas a norte e a sul de mapa respectivamente.

Dois eventos metamórficos M_1 e M_2 , sobrepostos, foram relacionados as orogênicas Brasília e Ribeira respectivamente. No geral as rochas do embasamento e os metassedimentos foram submetidos a fácies anfíbolito médio com pressão relativamente alta, enquanto que a *nappe* Socorro-Guaxupé atingiu fácies granulito de pressão intermediária.

2.4 Geologia econômica

O potencial mineral da região é apresentado na carta metalogenética 1:50.000 da Folha Heliadora, elaborada pelo DNPM, junto a Programa de Levantamentos Básicos do Brasil (BALTAZAR, 1988). Destaca-se na região as ocorrências de manganês e cobre, nas cidades vizinhas de Careaçú e Natércia respectivamente.

Ocorrências de ouro aluvionar, e sulfetos metálicos foram identificados em pequenas quantidades em toda região. Os gnaisses lavrados em décadas passadas foram utilizados principalmente no calçamento das ruas de Heliadora. As únicas minerações ativas na região, são de pequeno porte, e lavram areia e cascalho extraído Rio Sapucaí e afluentes.

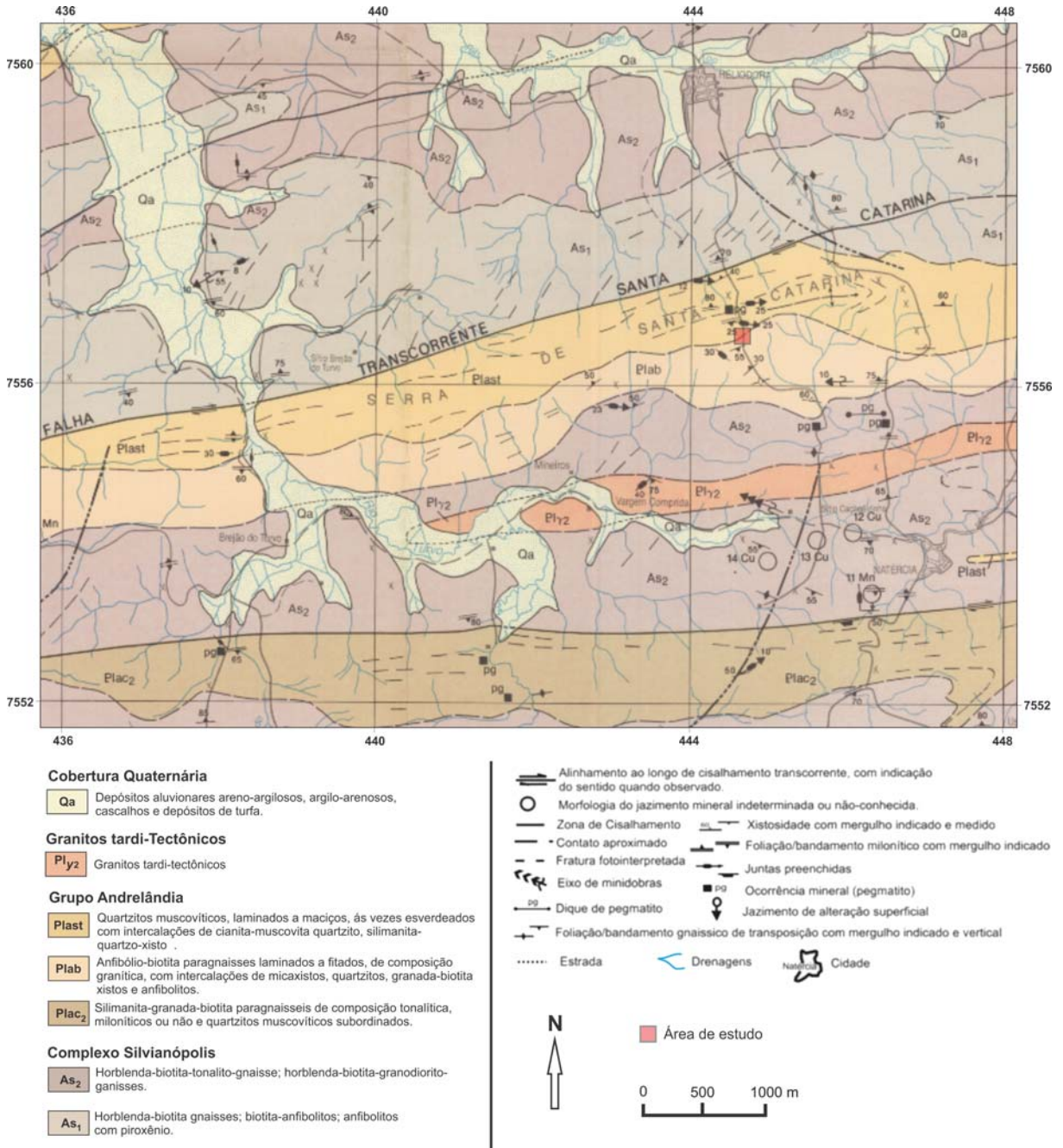


Figura 2.2: Mapa geológico local com localização da área de estudo. Modificado de (BALTAZAR, 1988)

2.5 Geologia local

A ocorrência mineral selecionada para estudo faz parte de um conjunto de diversos alvos que ocorrem isoladamente nas regiões de Heliadora, Careaçu e Natércia sul de Minas Gerais.

As ocorrências mais conhecidas estão relacionadas principalmente a corpos de gonditos intercalados em quartzitos muscovíticos e muscovita xistos pertencentes as formações São tomé das Letras (Plast) e Gnaiss Brejão (Plab), cuja gênese é atribuída a oxidação superficial de espessartita e precipitação de óxidos de ferro e manganês (Figura 2.3).

O alvo selecionado está possivelmente associado ao enriquecimento supergênico de Mn no solo (Figura 2.4) e preenchimento de fraturas por óxidos de manganês, classificada como uma ocorrência de gondito ao sul de Heliadora. A zona mineralizada ocorre sob a forma de corpos irregulares centimétricos intercaladas a rocha encaixante. Nas porções visíveis no terreno, a mineralização é caracterizada por uma associação de pirolusita, wad, psilomelana, goethita, hematita e magnetita, com textura terrosa a puviolenta.



Figura 2.3: Protominério de Mn - Granada-biotita xistos.

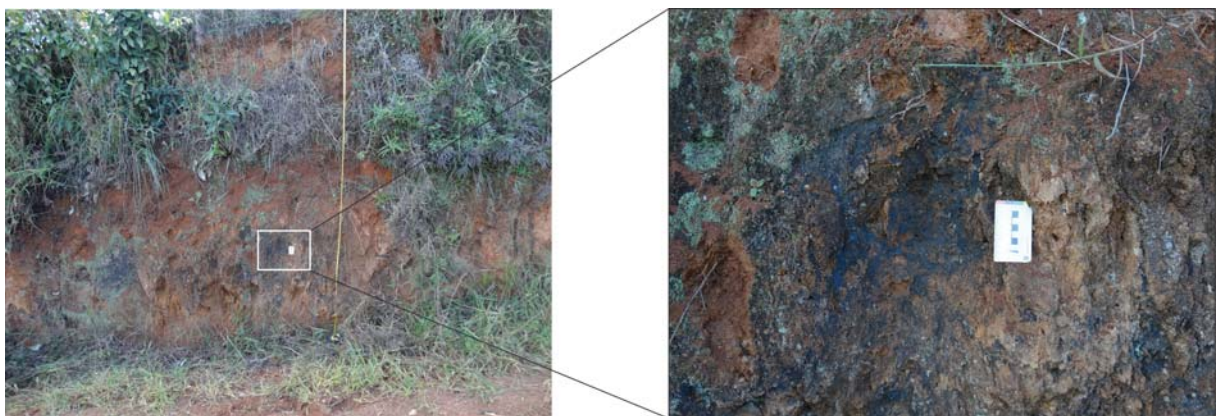


Figura 2.4: Perfil de solo com detalhe pra ocorrência de Mn

Capítulo 3

Prospecção Geofísica

Prospecção geofísica é uma parte integral da Geofísica baseada no estudo dos campos físicos da terra (gravitacional, magnético, elétrico, elástico, eletromagnético, termal e radioativo), com a finalidade econômica e de monitoramento. A medida desses parâmetros podem ser feitas na superfície da terra (continente ou mar), no ar e, em sub-superfície (furos de sondagem, galeria e *shafts*). A informação obtida auxilia na identificação e caracterização de estruturas geológicas, corpos de minério, áreas contaminadas etc.

Os métodos utilizados na prospecção geofísica utilizam tanto os campos físicos naturais como artificiais e são classificados como passivos e ativos respectivamente (MOON et al., 2006). Métodos passivos inclui medidas dos campos magnéticos e gravitacionais, campo elétrico natural e ocorrências naturais de radiação alfa e gama. Todos os outras técnicas elétricas e eletromagnéticas, métodos sísmicos, e alguns métodos de perfilagem, que utilizam fontes artificiais são ativos. A resolução, ou seja, a capacidade em distinguir especificamente as características do ambiente em via de regra é maior, nos métodos ativos.

A prospecção geofísica é utilizada com frequência na exploração mineral. Assim como a prospecção geoquímica e a análise geoestatística dos dados, fornece subsídio às principais etapas de estratégia e planejamento, tanto nas fases de pesquisa como de desenvolvimento mineral.

O uso das técnicas geofísicas na exploração mineral está baseado nos contrastes das propriedades físicas das rochas e solos com concentrações minerais anômalas as regiões encaixantes. Anomalia geofísica é definida como a diferença, positiva ou negativa, que pode ser registrada a partir de um *background* regional ou local. No entanto, uma anomalia não precisa estar necessariamente centrada sobre sua fonte. Nesse caso o que vale ressaltar são os contrastes das propriedades físicas entre a zona anômala e região ao redor. A partir da interpretação dos dados são feitas correlações com características geológicas, que estão relacionadas direta ou indiretamente as ocorrências minerais da região (MOON et al., 2006).

A escolha do método utilizado na pesquisa mineral depende da etapa do projeto, da escala de trabalho e característica geológica de interesse (BRAGA, 2006). Levantamentos aereogeofísicos como magnetometria, gamaespectometria e gravimetria são utilizados em estudos regionais na seleção de áreas e alvos. As aquisições geofísicas de superfície fornecem informações mais detalhadas e os principais métodos utilizados são: métodos elétricos, eletromagnéticos, sísmica, magnetometria, gravimetria, gamaespectometria e sensoriamento remoto (MOREIRA et al., 2012).

No caso dos métodos Elétricos e Eletromagnéticos, segundo McNeill (1980b), Telford e Sheriff (1990) é possível citar: conteúdo mineral, teor e tipos predominantes de argilominerais, tamanho de grãos, variabilidade granulométrica, porosidade, permeabilidade, presença e composição do fluido intraporo, heterogeneidades e anisotropias como foliação, xistosidade, acamamento, fraturas e falhas.

O depósito selecionado para estudos neste projeto, foi originado do intemperismo de espessartita gnaisses e recombinação do Mn em formas estáveis como óxidos e hidróxidos, que resultaram em acumulações em solo e saprólito. Desta forma, os fatores que condicionam propriedades físicas como resistividade elétrica e polarizabilidade, são relacionados principalmente ao teor de óxidos e hidróxidos minerais e ao grau de umidade no perfil de alteração.

3.1 Geofísica aplicada na pesquisa mineral

No trabalho de Irvine e Smith (1990) foram utilizados os métodos da magnetometria terrestre, sísmica, gravimetria terrestre, IP e resistividade na exploração de ouro epitermal. O estudo ocorreu na mina de ouro de McLaughlin, a 110km nordeste de São Francisco-Califórnia.

Nessa mina a mineralização é controlada por um sistema de falhas que gera diversos cataclasitos hidrotermalizados sobre a sequência vulcano-sedimentar formada por argilitos, sepeertinitos, basaltos, sobrepostas por andesitos recentes.

Dos métodos empregados, os mais eficientes foram resistividade e IP. Regiões de alta resistividade marcaram zonas fortemente silicificadas que envelopam a zona mineralizada, apesar do andesito fornecer resposta semelhante. No IP a boa resposta se deu em função da alta cargabilidade dos sulfetos, em especial a pirita, que estava diretamente relacionada as ocorrências de ouro.

Os estudos feitos por Moreira e Ilha (2011) testaram métodos geofísicos da eletroresistividade e IP com a técnica do caminhamento elétrico, em arranjo azimutal, com o objetivo de caracterizar zonas mineralizadas por carbonato de cobre. O trabalho ocorreu na bacia sedimentar do Camaquã, formada por sequências estratigráficas sedimentares e vulcanogênicas, no sul do Rio Grande do Sul.

Devido o contraste das propriedades físicas da zona mineralizada e das rochas encaixantes, zonas com alta resistividade foram associadas a zonas silicificadas, enquanto zonas com carbonatação apresentaram valores intermediários e regiões de baixa resistividade foram relacionadas as zonas com sulfetos disseminados.

O trabalho de Moreira et al. (2012) foi desenvolvido numa ocorrência de cobre denominada Colônia Santa Bárbara, localizada a nordeste de Caçapava do Sul (RS), pesquisada pelo DNPM em 1965. A prospecção foi iniciada pela abertura de três trincheiras, com teor em cobre da amostra mais rica não atingia 1%. O uso combinado de dados diretos e indiretos resultou no avanço dos conhecimentos acerca da ocorrência mineral estudada. A área está localizada no cruzamento de sistemas de falhas, algo que sugere um depósito mineral estruturalmente controlado. A aplicação dos métodos da resistividade e IP com a técnica do caminhamento elétrico, permitiu determinar regiões com predomínio de elevados valores de cargabilidade e baixos valores de resistividade na área de tufos vulcânicos, indicam também a presença de sulfetos disseminados. Os produtos foram apresentados na forma de seções 2D e modelos 3D interpolados a partir das seções.

3.1.1 Geofísica aplicada na pesquisa de manganês

Trabalhos que utilizam de métodos geofísicos na pesquisa de manganês, principalmente sobre a utilização de métodos elétricos são raros.

Ocorrências manganésíferas no distrito de Pacatuba, no Ceará, 60 km ao sul de Fortaleza foram estudas por Filho e Marinho (1983). A mineralização nessa região é caracterizada como óxido-silicática, devido a presença de um composto formado por espessartita, rodonita, tefroíta, jacobsita e hausmannita, originado a partir do metamorfismo de rochas sedimentares ricas em manganês e ferro.

Neste trabalho foram utilizados métodos magnéticos devido a presença de Jacob-sita no protominério, mineral fracamente magnético. As medidas foram feitas com um magnetômetro de precessão nuclear.

A ação do intemperismo sobre o protominério resultou na formação de minerais secundários de manganês. Os resultados mostraram uma série de anomalias magnéticas negativas em ambas as áreas de estudos, as quais foram correlacionadas com corpos lenticulares de minério de manganês, rico em jacobsita.

Na região de Itapira - SP, cerca de 200km da área de estudos desse trabalho, Moreira et al. (2014), Vieira (2015) estudaram a ocorrência de manganês através dos métodos da eletrorresistividade e Polarização Induzida. Nestes trabalhos utilizou-se a técnica do caminhamento elétrico com os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger respectivamente.

No início da década de 1990, nessa região, o manganês foi lavrado por meio de escavação na mina do Córrego de Cocho pela mineração Itapira Ltda. Os depósitos dessa região foram formados pela ação de processos supergênicos sobre lentes de goudits encaixados nas sequências metassedimentares do Grupo Itapira, complexo Guaxupé.

As exposições da mina é possível distinguir a presença de bolsões de minério maciço, envolvidos pelas rochas encaixantes bastante intemperizadas. No primeiro trabalho referido o resultado obtido em uma linha realizada diretamente acima das exposições da frente de lavra permitiu a correlação visual direta dos padrões de resistividade e cargabilidade do modelo geofísico e o minério exposto. Valores de alta cargabilidade e baixa resistividade correspondem ao minério maciço de alto teor observado na frente de lavra.

O trabalho de Vieira (2015) revelaram a existência de outros corpos independentes de minério independentes na região, tanto em superfície como em profundidade, e não um corpo único como é sugerido nos mapas geológicos locais. A partir da modelagem 3D foi possível visualizar as principais direções estruturais que controlam a mineralização, no caso WNW-ESE, e não NNE-SSW como sugerido em trabalhos de mapeamento na região.

Capítulo 4

Manganês

O manganês (Mn) é o décimo elemento mais abundante na crosta e o quarto metal mais abundante depois do alumínio, ferro e titânio. É encontrado na natureza em ordem de abundância, na forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos e em raros sulfetos.

A geoquímica do Mn assemelha-se a do ferro quanto as condições de pH e Eh. A maioria dos compostos de manganês é solubilizada em águas neutras a ácidas e precipitada em águas alcalinas. Em condições extremamente oxidantes precipitam minerais de composição MnO_2 e, em condições altamente redutoras, sulfetos (alabandita MnS) e óxidos reduzidos (manganosita MnO) podem ocorrer. Desta forma o manganês tende a se concentrar em ambientes rasos e oxigenados associado principalmente a carbonatos (PARK; MACDIARMID, 1975). Os principais minerais de minério de Mn são apresentados na tabela 4.1.

Mineral	Fórmula	Comentários
Óxidos Pirolusita	MnO_2	Comum produto do intemperismo de sedimentos com Mn
Criptomelana	$[K(Mn_8O_{16})]$	Comum produto do intemperismo de sedimentos com Mn
Jacobsita	$(Mn,Fe)_3O_4$	Metamorfismo de sedimentos com Mn
Hausmanita	$(Mn,Fe)_3O_4$	Comum e abundante; principal mineral de minério de manganês
Psilomelana	$[BaMn_9O_{16} \cdot 2H_2O]$	Comum e abundante, ocorre junto com a criptomelana
Todorokita	$(Na,Ca,K,Ba,Mn)Mn_3O_7 \cdot xH_2O$	Mineral primário em nódulos de manganês oceânicos
Litioforita	$(Al,Li)(OH)_2MnO_2$	Produto de intemperismo
Hidróxidos		
Manganita	$MnOOH$	Não muito abundante, produto de intemperismo
Silicatos		
Espessartita	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	Grupo das granadas. Comum produto do Metamorfismo de sedimentos Mn
Rodonita	$MnSiO_3$	Metamorfismo de sedimentos Mn, geralmente associada com espessartita
Carbonatos		
Rodocrosita	$MnCO_3$	
Sulfetos		
Alabandita	MnS	Nunca abundante, formado sob condições muito anaeróbicas em presença de S
Wad	$MnO \cdot MnO_2 \cdot H_2O$ (comp. geral)	Agregado amorfo de óxidos de manganês, geralmente hidratado

Tabela 4.1: Principais minerais de manganês formadores de depósitos.

O principal uso do manganês, cerca de 95%, é na indústria metalúrgica-siderúrgica onde atua nos alto fornos como agente dessulfurante, oxidante ou desoxidante para a obtenção de diferentes tipos de aços, ferro-gusa e ferro-ligas. Além dessas, possui propriedades inseticidas, bactericidas, algicidas e nutritivas que lhe confere uma grande aplicação na indústria de um modo geral, com destaque também na fabricação de baterias de célula seca, fertilizantes, cerâmica e indústria do vidro (CHATTERJEE, 2007).

4.1 Depósitos de Manganês

De acordo com Roy (1997), os primeiros depósitos econômicos de manganês se formaram no Arqueano, pelo menos 800 milhões de anos mais tarde do que a mais nova sequência contendo formações ferríferas e sulfetos portadores de metais-base. Isto se deve provavelmente à um reflexo das condições da atmosfera, hidrosfera e litosfera atuantes nesse período. No Proterozoico muitos dos depósitos gigantes de Mn foram formados como resultado do imenso aporte de terrígenos após a estabilização dos crátons e oxigenação da atmosfera e hidrosfera. No entanto o ápice ocorreu durante as Eras Mesozoicas e Cenozoicas, com a formação de grandes depósitos de águas rasas em áreas marinhas transgressivas assim como a deposição das crostas e nódulos manganésíferos no assoalho oceânico.

Na literatura existem diversas classificações para os depósitos de Mn, seja pelo tipo de ambiente ou metalogênese. Mas de uma forma geral, são classificados como: sedimentares (sedimentos vulcânicos e não vulcânicos); supergênicos; hidrotermais (ROY, 1981).

Dos depósitos de Mn os sedimentares são os mais importantes e representam 80% das reservas mundiais. Estes depósitos podem se formar em ambientes marinho, lacustre e pantanoso. Contudo, a distribuição dos depósitos de manganês ao longo do tempo dificulta sua classificação quanto ao tipo de depósito, visto que, diversos processos como erosão, sedimentação, metamorfismo e enriquecimento supergênico, podem atuar em conjunto ou se sobrepor no registro geológico (ROY, 1997). O melhor exemplo são os gonditos: depósitos essencialmente sedimentares que sofreram metamorfismo e eventual enriquecimento supergênico (GONÇALVES; SERFATY, 1976).

4.1.1 Depósitos supergênico de Mn

Os depósitos supergênicos de Mn formam-se a partir da ação do intemperismo sobre rochas com teores significativos de Mn, tais como: rochas básicas, ultrabásicas, sedimentares e metamórfica principalmente (VALETON, 1994).

Os principais fatores que levam a formação de um depósito supergênico de Mn são a presença de clima tropical úmido e o conteúdo de Mn na rocha fonte. A variação constante no nível freático somada a abundante cobertura vegetal e soluções húmicas levemente ácidas, favorecem a dissolução e precipitação dos compostos. O predomínio de processos intempéricos químicos, em clima tropical, torna economicamente viável uma série de depósitos minerais como de ferro, níquel e manganês.

Para Lelong et al. (1976) a atuação de processos de enriquecimento supergênico é imprescindível para a viabilização dos depósitos gondílicos. Os processos intempéricos, químicos e físicos, promovem concentrações secundárias de Mn a partir dessas rochas, que se desenvolvem na forma de perfis lateríticos e/ou acumulações residuais de material oxidado sobre morros e colinas, dando origem a depósitos coluvionares nos sopés dos taludes. As principais concentrações de Mn nos solos, alteritas e colúvios são representadas por crostas oxidadas nódulos/pisólitos de manganês.

Capítulo 5

Materias e Métodos

Neste trabalho a proposta é investigar uma concentração de manganês observada num perfil de solo de aproximadamente 5 m. Para isso foram aplicados os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida sobre a zona mineralizada.

Os métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida são métodos ativos de investigação das propriedades elétricas em subsuperfície. Estes métodos baseiam-se na introdução de corrente elétrica (contínua ou alternada) de baixa frequência no solo, e no uso de equipamentos com alta sensibilidade para a medir os diversos parâmetros relacionados ao fluxo de corrente, tais como: resistividade, cargabilidade, capacitância etc.

Nos solos e nas rochas a condução de corrente elétrica ocorre através de processos iônicos e eletrônicos devido a presença de água nos poros e fraturas, e através de materiais condutores ou semi-condutores como: metais nativos (Fe, Cu, Ni, Ag e Au), sulfetos, óxidos metálicos e carbonatos quando na forma de grafita (KELLER; FRISHKNECHT, 1970).

5.1 Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade está baseado na introdução de corrente elétrica no terreno, por meio de eletrodos (Eletrodos de Corrente), e na leitura da diferença de potencial resultante da passagem da corrente elétrica por um outro conjunto de eletrodos (Eletrodos de potencial). As correntes transmitidas e as diferenças de potencial medidas são registradas para cada uma das estações de medição, juntamente com as posições de cada eletrodo (PHILIP; MICHAEL; IAN, 2002).

De acordo com o arranjo ou disposição dos eletrodos, variações laterais e verticais de resistividade em subsuperfície podem ser mapeadas através da movimentação desses arranjos como um todo ou pela mudança na posição relativa entre os eletrodos. A partir disso e da interpolação dos resultados, os dados podem ser apresentados na

forma de perfis (1D), seções verticais (2D) ou volumes (3D) (PHILIP; MICHAEL; IAN, 2002).

De uma forma geral esse arranjo é construído com uma fonte geradora conectadas a quatro eletrodos, dois quais: A e B são os eletrodos de corrente e M e N, eletrodos de potencial (Figura 5.1).

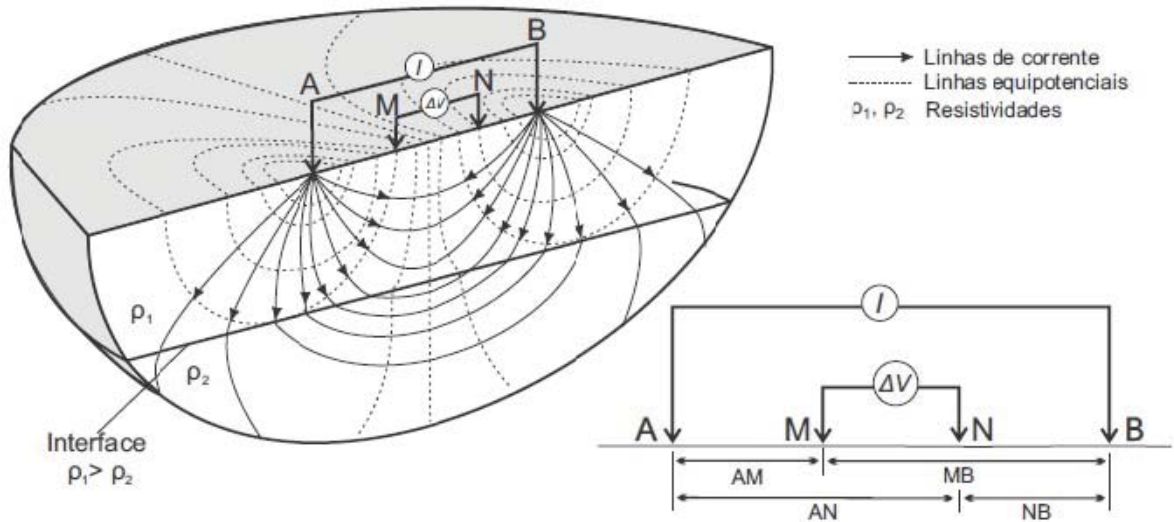


Figura 5.1: Medição da resistividade por meio de arranjo linear de 4 eletrodos. Adaptado de (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007)

Nesse caso, o eletrodo M está a uma distância AM do eletrodo A e MB do eletrodo B; e o eletrodo N está a uma distância AN do eletrodo A e uma distância NB do eletrodo B. Tomando a resistividade r como uniforme no espaço entre os eletrodos A e B, os potenciais elétricos nos eletrodos M e N serão, respectivamente:

$$V_M = \frac{IR}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \quad e \quad V_N = \frac{IR}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \quad , \quad (5.1)$$

e a diferença de potencial v_{MN} em um ponto qualquer entre os eletrodos M e N será:

$$V_{MN} = V_M - V_N = \frac{IR}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right) \quad (5.2)$$

Dessa forma, a resistividade ρ na região entre os eletrodos M e N pode ser calculada por meio da expressão 5.2, em função das diferenças de potencial:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)} \quad (5.3)$$

A relação $2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1}$ representa o fator geométrico do arranjo, utilizado como correção dos valores de resistência na determinação das resistividades do meio. Substituindo a relação acima pelo fator geométrico, K_{geom} , na equação 5.3, obtêm-se a equação geral para a resistividade:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} K_{geom} \quad (5.4)$$

Para medidas em meios homogêneos, o valor obtido representará a resistividade verdadeira do meio. Entretanto, o meio geológico é constituído de heterogeneidades intrínsecas e, portanto, as medidas de resistividade representam uma “média ponderada” das resistividades verdadeiras, cujo produto calculado é denominado *resistividade aparente (Ra)*, pois consiste em uma média ponderada das resistividades de cada um dos materiais presentes entre as equipotenciais medidas (KELLER; FRISHKNECHT, 1970).

5.2 Polarização induzida

Este método foi desenvolvido inicialmente para detecção de concentrações de minérios disseminados, essencialmente sulfetos, no âmbito da pesquisa de metais base. Seu uso intensivo ocorreu a partir da década de 1950, por meio de diversos trabalhos descritos entre 1948 e 1952 (KELLER; FRISHKNECHT, 1970).

A polarização induzida é um fenômeno de estimulação de voltagem que ocorre após a interrupção repentina do fluxo de corrente elétrica em solos e rochas, que pode ser ilustrado a partir de um arranjo de quatro eletrodos como na Figura 5.1. A injeção de um sinal de corrente direta durante um período de tempo é seguido de por um corte abrupto e resulta num decaimento do campo elétrico. Este campo não chega a zero imediatamente, mas decai lentamente após uma queda brusca inicial, para um valor E_0 que corresponde a uma fração do campo inicial.

Esta queda lenta é passível de medição, que pode variar de poucos segundos até alguns minutos. A curva de decaimento representa um retorno ao estado original de repouso pretérito ao distúrbio devido à aplicação de uma corrente elétrica. Durante o tempo de aplicação desta corrente, uma fração desta energia é armazenada no meio geológico. Este armazenamento pode ocorrer sob a forma de energia mecânica, elétrica ou química, dentre as quais a energia química se mostra a mais importante na ocorrência deste fenômeno em solos e rocha. A energia química armazenada resulta basicamente da

- Variação da mobilidade de íons em fluxo através de poros ou fraturas.

- Variação entre condutividade iônica e eletrônica em presença de metais.

O primeiro destes efeitos é conhecido como polarização de membrana ou eletrolítica (Figura 5.2) e constitui o chamado efeito de polarização induzida normal, que pode ocorrer em rochas onde não haja minerais metálicos (MUSSETT; KHAN, 2000).

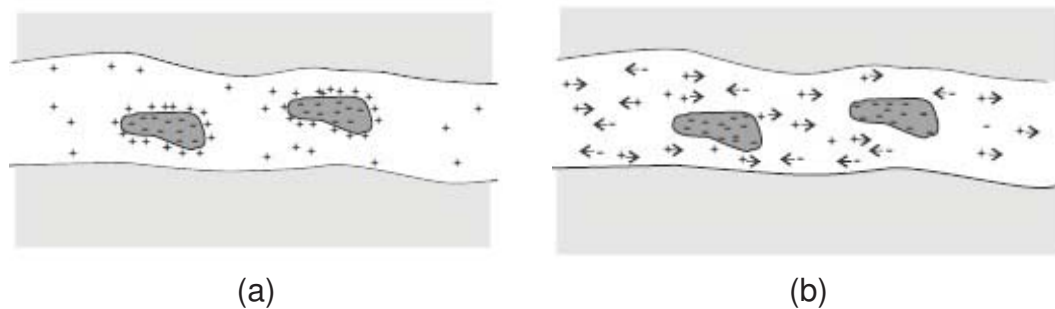


Figura 5.2: Polarização de membrana: (a) antes da passagem da corrente, com o meio em seu estado natural e (b) durante a passagem da corrente. Adaptado de (KELLER; FRISHKNECHT, 1970)

O segundo é conhecido como polarização de eletrodo ou eletrônica (Figura 5.3), relativamente de grande magnitude e depende da presença de minerais metálicos (PARASNIS, 1972).

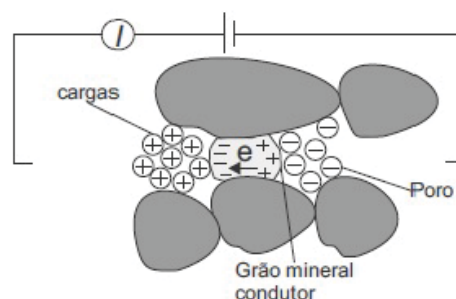


Figura 5.3: Polarização eletrônica. Adaptado de (KELLER; FRISHKNECHT, 1970).

É produzida uma diferença de potencial pela tendência de perda de elétrons metal para o eletrólito, na ausência de fluxos de corrente na interface eletrólito/mineral. A diferença entre o potencial do metal e o da solução é denominado potencial de eletrodo (E_e), com valores característicos aos diversos tipos de minerais metálicos.

Medidas de polarização induzida podem ser efetivadas de duas formas básicas. Uma forma consiste em aplicar corrente contínua no meio estudado e em medir o decréscimo da tensão após o corte de corrente. Outra forma consiste em medidas pela variação de frequência na corrente aplicada. A primeira forma é denominada técnica de domínio do tempo, utilizada neste trabalho, enquanto que a segunda é denominada técnica de domínio da frequência (ROBINSON, 1988).

No domínio da frequência as medidas são realizadas enquanto o fluxo de corrente é constante, com medição de duas ou mais frequências distintas. No domínio do tempo (Figura 5.4) as medidas são realizadas após o envio de corrente por alguns segundos, que promove um acúmulo de cargas, seguido pela a interrupção do fluxo de corrente. Um potencial (V_r) é gerado pela dissipação das cargas, é então lido num intervalo de tempo determinado (t_1 a t_2), frequentemente limitado a alguns segundos. São efetuadas dessa maneira uma série de medidas até que se obtenha um um valor médio representativo. Neste último caso, as medidas são determinadas pela característica da forma da curva de decaimento do potencial transiente entre dois pontos consecutivos e dividida pela diferença de potencial registrada antes da corrente ser desligada, e podem ser expressas na função da cargabilidade, integral tempo-transiente e percentagem (TELFORD; SHERIFF, 1990).

Cargabilidade (M) é definida pelo potencial transiente variável entre dois pontos da curva de decaimento, normalizada pelo potencial primário (expressão 5.5, frequentemente utilizado em medida no domínio do tempo, onde (M) é medido em termos de milissegundos.

$$M_{t_1 t_2} = \frac{1}{V_0 (t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad [mV/V] \quad (5.5)$$

De acordo com Mussett e Khan (2000) o total de carga acumulada no terreno é proporcional ao parâmetro cargabilidade , que por sua vez pode ser relacionado com a concentração de minerais disseminados na área de influência da investigação.

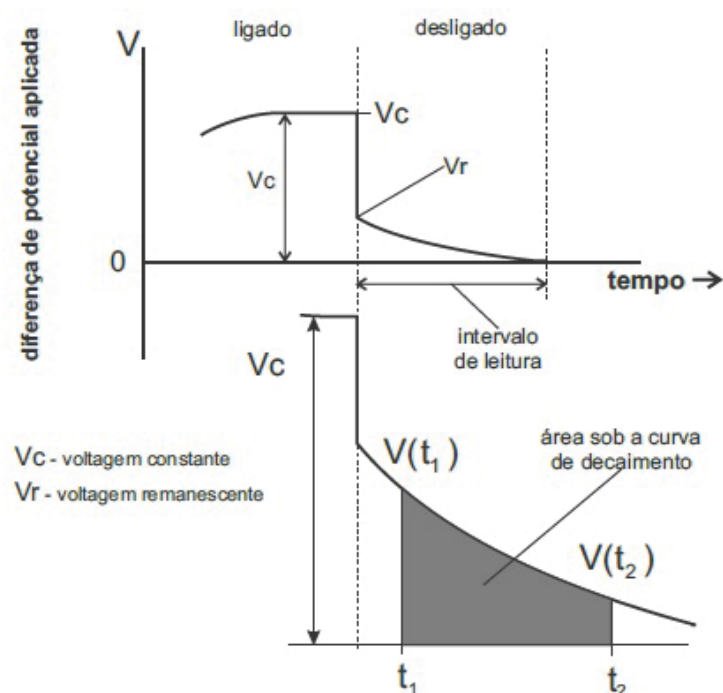


Figura 5.4: Procedimento de medição do método IP no domínio do tempo. Adaptado de (TELFORD; SHERIFF, 1990).

5.3 Técnica e arranjo de campo

Neste trabalho adotou-se a técnica do *Caminhamento Elétrico* indicada para investigação de estruturas ou camadas verticalizadas que apresentem contraste de resistividade com as rochas encaixantes.

O arranjo dos eletrodos corresponde as diferentes formas que os eletrodos de corrente e de potencial irão atuar na investigação. Uma série de arranjos são pré-definidos, tais como: arranjo dipolo e arranjo dipolo-dipolo (dipolares); arranjo Werner e arranjo Schlumberger (quadripolares).

A escolha de cada arranjo baseia-se na facilidade operacional, resolução espacial, profundidade de investigação e facilidade no processamento dos dados. Utilizou-se nesse trabalho a o arranjo Werner-Schlumberger.

5.3.1 Caminhamento elétrico

No *Caminhamento Elétrico* busca-se determinar as variações laterais das propriedades elétricas do terreno. Neste caso, o espaçamento entre os eletrodos é mantido constante, uma vez que, quanto maior o espaçamento entre os eletrodos maior o nível, ou profundidade de investigação. Desta forma todo o conjunto é movimentado lateralmente, executando medidas em quantas linhas forem necessárias, onde o espaçamento entre linhas é definido de forma a captar as variações dos parâmetros em uma área determinada.

5.3.2 Arranjo Wenner-Schlumberger

Os arranjos Werner e Schlumberger são considerados arranjos móveis de campo onde todos o eletrodos são movimentados lateralmente no decorrer do ensaio, mantendo-se uma distância proporcional entre os eletrodos em investigações em profundidade (ORELLANA, 1972).

O arranjo Werner é um arranjo linear, quadripolar, e simétrico em relação ao centro do arranjo. Esta técnica envolve quatro eletrodos mantidos em espaçamentos equidistantes, onde a distância entre quaisquer eletrodos adjacentes é a mesma. Durante a investigação por caminhamento elétrico todo o arranjo é movido ao longo de um perfil, onde a distância a é mantido constante (Figura 5.5).

Neste arranjo, os eletrodos de corrente (A e B) são posicionados nas extremidades da linha de investigação, e os de potencial (M e N) são posicionados entre os dois primeiros, simetricamente com relação ao centro do arranjo (O), numa distância tal que $AM = MN = NB = a$.

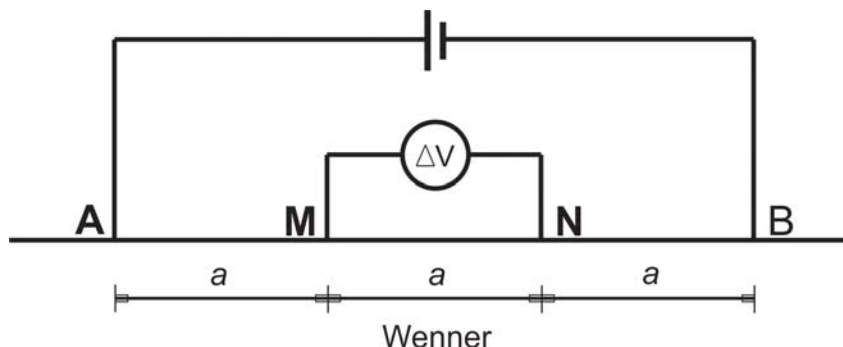


Figura 5.5: Arranjo Wenner. Adaptado de (PHILIP; MICHAEL; IAN, 2002)

O arranjo Schlumberger difere-se do arranjo Werner, basicamente, quanto ao espaçamento dos eletrodos de corrente e potencial (Figura 5.6). A idéia básica do arranjo Schlumberger é fazer com que os eletrodos A e B estejam simetricamente afastados do centro do conjunto O por uma distância a , e os eletrodos de M e N estão espaçados por uma distância b , que seja uma pequena proporção de a , sendo que $\overline{AB} \gg \overline{MN}$ (PARASNIS, 1972).

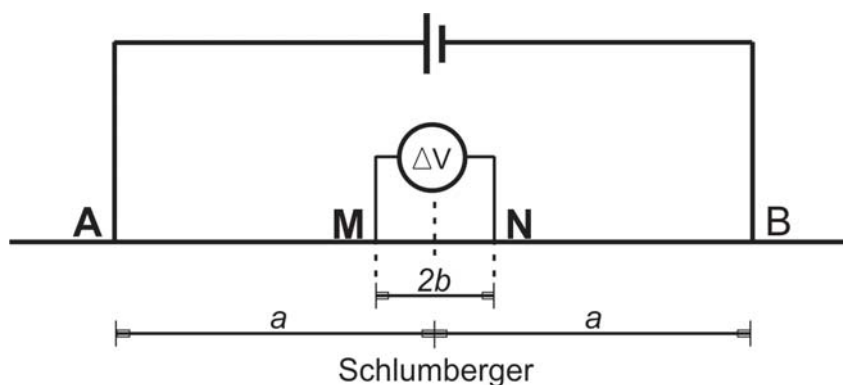


Figura 5.6: Arranjo Schlumberger. Adaptado de (PHILIP; MICHAEL; IAN, 2002)

Neste caso o espaçamento usado no arranjo entre os eletrodos de potencial, $2b$, é muito menor do que o espaçamento entre os eletrodos de corrente $2a$ ao contrário do Wenner, onde o espaçamento entre os eletrodos a é a mesma para quaisquer eletrodos. Um outro aspecto é que a distância $2a$ entre os eletrodos de corrente é aumentada passo a passo (simetricamente com relação ao centro do conjunto) no decorrer do ensaio, enquanto a distância b entre os eletrodos de potencial é mantida fixa até o momento em que o sinal se torna muito baixo para ser medido.

Este arranjo quando utilizado na técnica do caminhamento elétrico, a distância entre todos os eletrodos é mantida fixa e todo o conjunto é movimentado sobre o terreno, de acordo com o intervalo estabelecido para a pesquisa.

Utilizando-se um cabo multinúcleo ao qual um número de eletrodos é permanentemente ligado a uma distância padrão, a pode ser gradativamente aumentado após

cada leitura, fazendo com que b permanece sempre na mesma proporção. Desta maneira é possível obter-se um arranjo combinado Wenner-Schlumberger.

A vantagem dessa combinação é que uma maior abertura entre os eletrodos de potencial neste arranjo proporciona um aumento na intensidade de sinal captada pelo instrumento durante a investigação (WARD, 1990). Já o aumento gradual do espaçamento entre os eletrodos de corrente permite a penetração sucessivamente maior da corrente elétrica no terreno, aumentando a profundidade de investigação (PHILIP; MICHAEL; IAN, 2002).

O modelo geoeletrico final obtido, através da interpretação dos dados, é atribuído ao ponto central do arranjo. As leituras nesse tipo de arranjo, estão menos sujeitas às variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais. Com isso as leituras de campo apresentam maior precisão, resultando numa interpretação mais próxima da realidade (BRAGA, 2006).

5.4 Aquisição e processamento de dados

Os procedimentos iniciais na área de estudos consistiram em reconhecimento geológico preliminar, para identificação de indícios de mineralização supergênica de manganês em perfis de solo expostos ao longo da estrada. Selecionada a ocorrência mais promissora em termos de continuidade lateral e espessura, foram programadas 6 linhas de tomografia elétrica (ERT) para realização conjunta de medidas de resistividade elétrica e cargabilidade no domínio do tempo, por meio do arranjo Wenner-Schlumberger, com espaçamento de 5m entre sensores, 10m entre linhas e 95m de extensão cada linha (Figuras 5.7).

A aquisição de dados geofísicos contou com o resistímetro *Terrameter LS* (Figura 5.8), desenvolvido pela ABEM (Suécia), que consiste num módulo integrado de transmissão e recepção de sinais e possibilita a realização de ensaios de Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo, por meio de aquisição automática contínua em sistema multi-cabo a partir de programação inicial do equipamento. A programação do equipamento contou com as seguintes configurações: corrente máxima de 200mA, corrente mínima de 100mA, tempo de transmissão de corrente de 1s, tempo de leitura após o corte de corrente de 0,2s e leitura em duas janelas fixas de 0,1s cada.

Foram utilizados eletrodos não polarizáveis caracterizados por um recipiente de base porosa preenchido por uma solução saturada em sulfato de cobre (CuSO₄), a qual é inserida uma haste de cobre e conectada ao sistema multi-cabo (Figura 5.9a). Este sistema possibilita que o fluxo de corrente elétrica e a redução significativa de



Figura 5.7: Posicionamento das linhas de aquisição de dados geofísicos.



Figura 5.8: Resistímetro ABEM *Terrameter LS*. (a) Detalhe da interface do aparelho. (b) Detalhe do cabo acoplado.

correntes parasíticas e da resistência de contato (Figura 5.9b).

As medidas adquiridas em campo foram processadas no programa *Res2dinv* e resultaram em modelos de inversão em termos de distância \times profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores em cores. Este é um programa que determina automaticamente um modelo bidimensional de subsuperfície, a partir de dados de resistividade ou cargabilidade obtidos em ensaios de caminhada elétrica (GRIFFITHS; BARKER, 1993).

O modelo 2D utilizado no programa divide a pseudo-seção em blocos retangulares, que representarão a pseudo-seção pelo ajuste das medidas de campo. Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados



Figura 5.9: Equipamentos utilizados na aquisição dos dados geofísicos. (a) Eletrodo não polarizável. (b) Resistivímetro, bobina com o cabo, eletrodo, e bateria.

e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos, cuja diferença é expressa pelo erro RMS (Root Mean Squared) (LOKE; BARKER, 1996).

O produto numérico de inversão bidimensional dos dados de cada seção foi reunido em planilha única, que reuni a posição das leituras ao longo das linhas (variável “ x ”), espaçamento entre linhas (variável “ y ”), profundidade modelada pela inversão (variável “ z ”) e o valor de resistividade elétrica (variável “ R ”).

Esta planilha foi utilizada para geração de modelos de visualização 3D, numa rotina de etapa básicas adotadas em pesquisa mineral. Neste caso, o plano de amostragem é frequentemente definido a partir de critérios estatísticos, estruturais, disposição espacial de uma acumulação mineral, dentre outros (MOON et al., 2006). Um procedimento simples consiste em amostragens por um conjunto de furos perpendicular ao eixo principal da estrutura, sucedidos por um conjunto paralelo de linhas de furo.

A resolução da malha de amostragem é condicionada ao espaçamento entre furos, entre linhas de furos e entre quantidade de amostras coletadas por furo. De qualquer forma, o resultado analítico das amostras é tabelado e modelado em termos bidimensionais e posteriormente interpolado em termos tridimensionais. Cada ponto do modelo 3D final é transformado num bloco, com dimensões condicionadas a critérios estatísticos e de malha amostral, ao qual é atribuído um teor baseado em análises químicas e um valor médio de densidade relativo a rocha que hospeda o minério. A relação entre teor em volume possibilita o cálculo de reservas e a viabilidade econômica do empreendimento (MOON et al., 2006). Os modelos de visualização foram gerados por aplicação do algoritmo de Mínima Curvatura.

Modelos geofísicos de visualização 3D derivados de seções 2D proporcionam uma compreensão bastante ampla da complexidade de estruturas geológicas, modelamento de litotipos ou depósitos minerais (MOREIRA et al., 2012; HOULDING, 2012; MOREIRA et al., 2014; VIEIRA, 2015).

Capítulo 6

Resultados e discussão

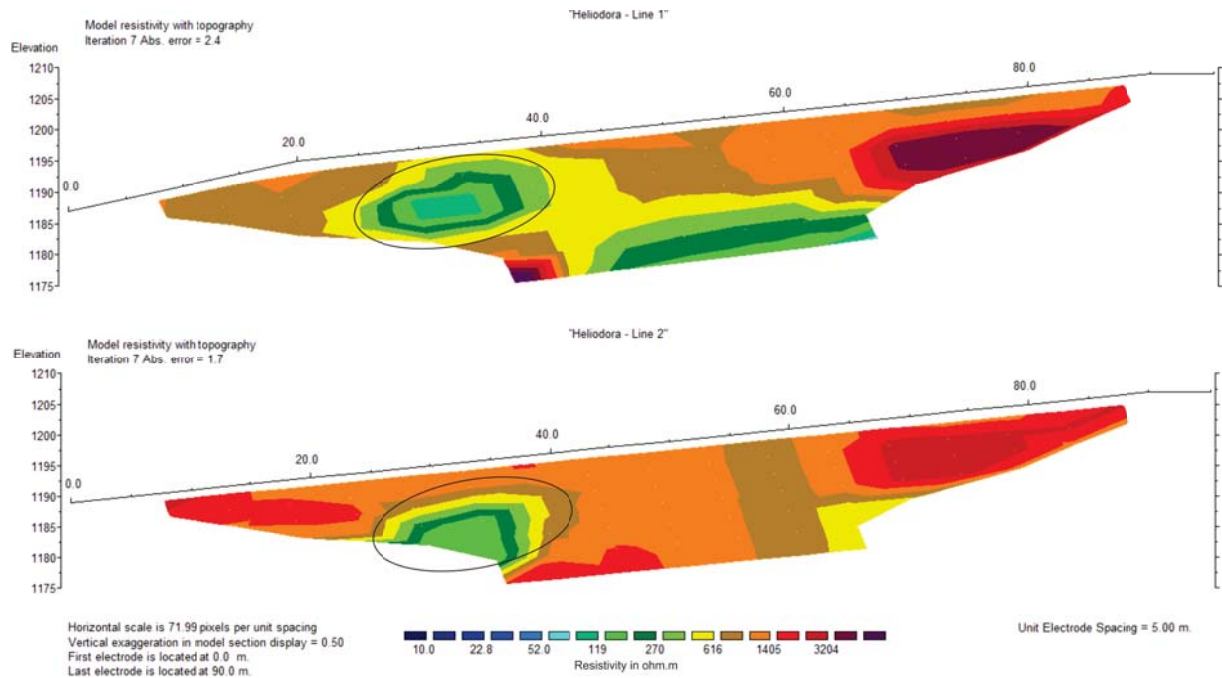
Para fins de correlação direta entre a ocorrência descrita em campo e dados geofísicos, foram selecionados os modelos de inversão obtidos a partir das linhas mais próximas da mineralização aflorante (Figura 6.1).

Nos dados relativos à Eletrorresistividade foi possível o reconhecimento apenas da porção central e mais enriquecida da zona mineralizada, caracterizada por valores de resistividade entre $73\Omega.m$ e $380\Omega.m$ (Figura 6.1a). Áreas reconhecidas em campo e descritas como disseminações mais esparsas e periféricas ao centro da ocorrência, não são identificáveis nas seções de resistividade elétrica. As porções com elevada resistividade, com valores acima de $1400\Omega.m$, estão relacionadas aos quartzitos muscovíticos maciços a laminados que predominam na área, pertencentes a Formação São Tomé das Letras (Plast). A zona mineralizada corresponde possivelmente a lentes de granada-biotita xistos descritas como intercalações subordinadas da formação Gnaisse Brejão (Plab) (Figuras 2.2, 2.3).

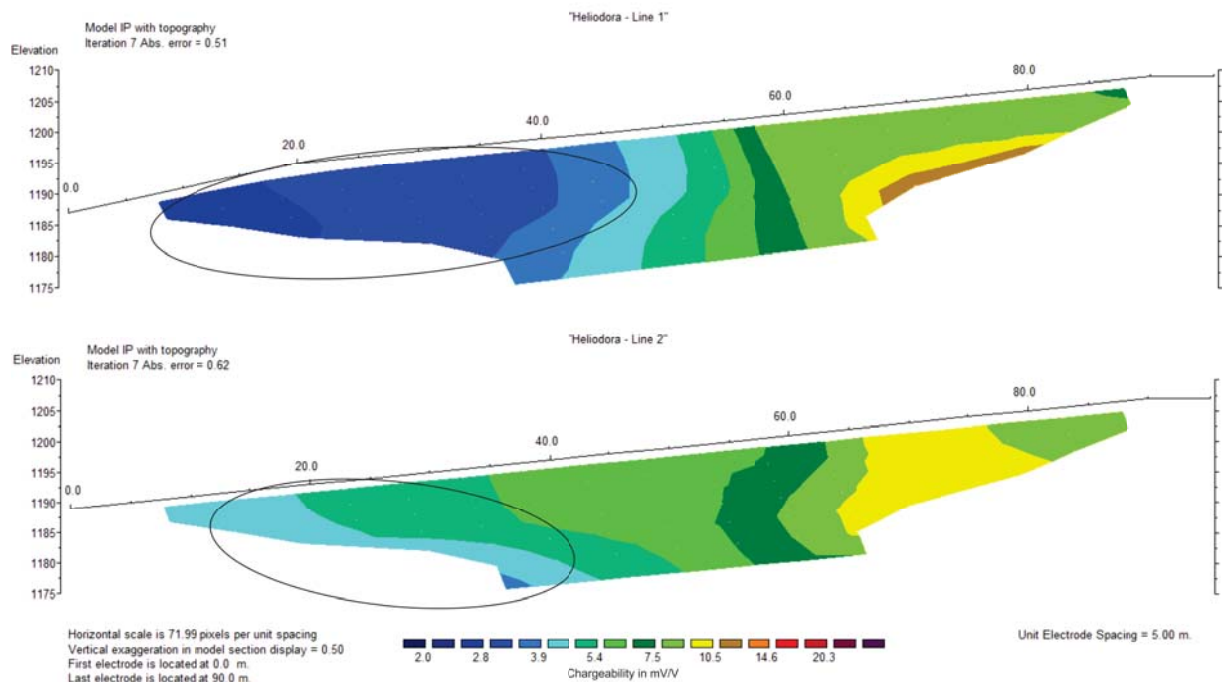
Em contrapartida, os dados de Polarização Induzida apresentam um amplo predomínio de valores de até $5mV/V$ na metade inicial das seções (Figura 6.1b). A ampla área de baixos valores de cargabilidade realçada na seção para a linha 1, corresponde basicamente a toda a área de abrangência da ocorrência mineral, que compreende uma zona central mais enriquecida (entre 25m e 40m a partir do início das seções) e seus extremos com disseminações esparsas (desde 0m até 50m do início das seções).

A integração dos parâmetros físicos medidos das linha mais próximas a área mineralizada aflorante permite definir uma assinatura de baixa resistividade e baixa cargabilidade para a zona central e de baixa cargabilidade para áreas periféricas mais disseminadas.

A integração do conjunto de seções de resistividade elétrica e cargabilidade em modelos de visualização 3D proporcionam uma análise em profundidade no terreno e a eventual continuidade da mineralização (Figura 6.2).



(a) Resistividade.



(b) Cargabilidade

Figura 6.1: Modelos de inversão de resistividade e cargabilidade mais próximos da ocorrência mineral aflorante. Linhas 1 e 2.

A porção de baixa resistividade realçada nas seções também está presente nos modelo de visualização 3D, embora caracterizada por valores comparativamente inferiores, diferença atribuída à suavização proporcionada pelo uso do algoritmo de mínima curvatura, adotado na elaboração dos modelos.

O faixa de baixos valores de resistividade presentes em níveis mais profundos é semelhante ao descrito para a zona central mineralizada, mas atribuída ao aumento do grau de umidade no solo, também notado em alguns pontos ao longo do perfil de solo estudado, sob a forma de surgências pontuais de água.

A extensão da zona de baixa resistividade ao longo do perfil de solo possui cerca de 45m. Sua continuidade em profundidade é relativamente restrita em no máximo 10m de profundidade para dentro do perfil de solo. A faixa de abrangência para o caso da zona de baixa cargabilidade possui cerca de 50m de continuidade lateral, mas ainda mais limitada em profundidade, com no máximo a cerca de 5m dentro do perfil de solo. A sobreposição das áreas de baixa resistividade e baixa cargabilidade revela com clareza tais diferenças (Figura 6.2).

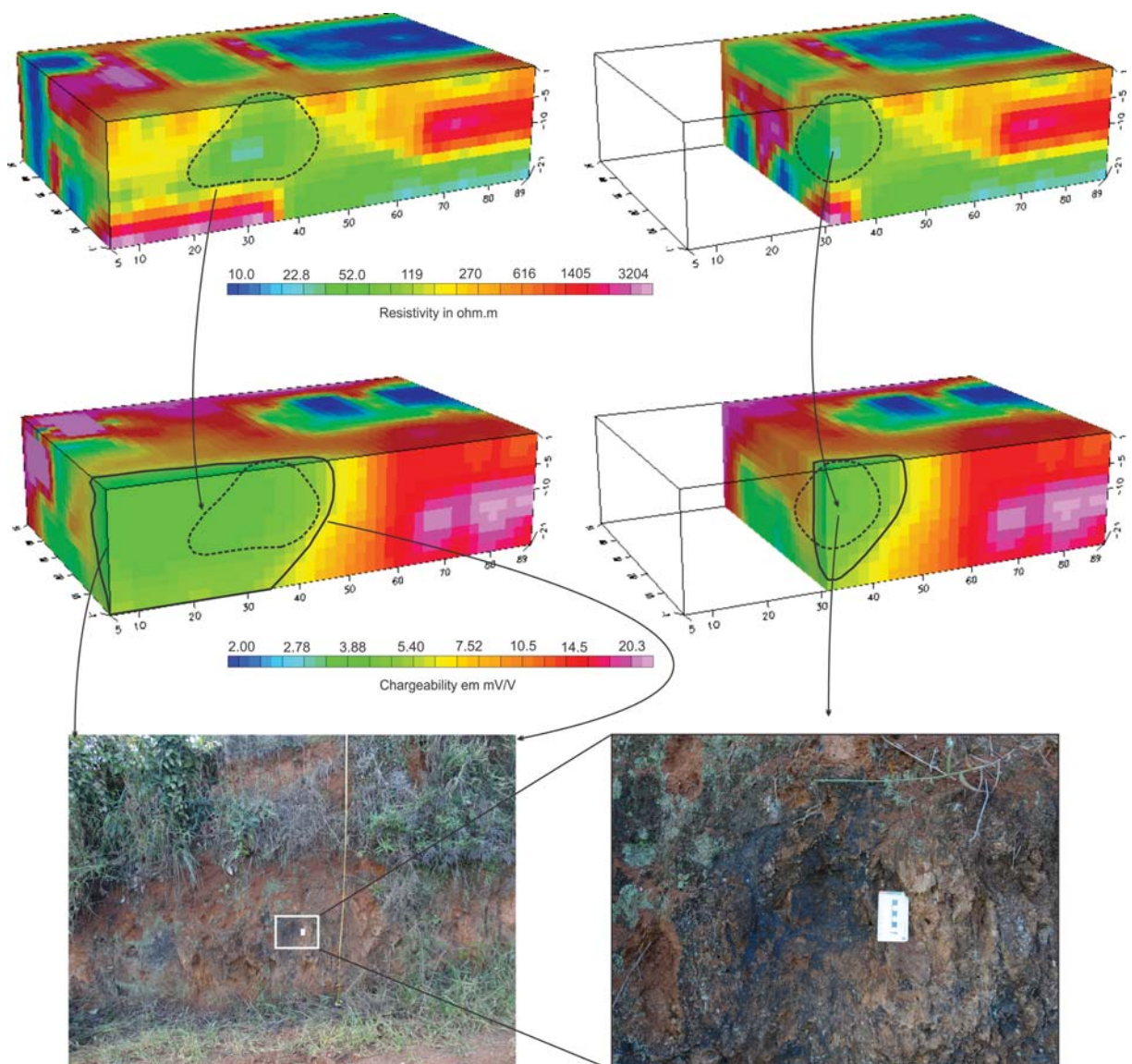


Figura 6.2: Modelos de visualização 3D em termos de resistividade e cargabilidade, com realce de áreas correlacionáveis a ocorrência mineral aflorante.

Comparando a assinatura das ocorrências estudadas nesse trabalho com os estudos geofísicos feitos por Moreira et al. (2014) e Vieira (2015), em ocorrências de Mn na região de Itapira-Sp é possível fazer algumas considerações. Na região de Itapira diversas ocorrências de manganês de origem supergênica descritas são atribuídas a lentes de gonditos intercaladas em quartzitos, xistos e paragnaisses pertencentes ao Grupo Itapira (ZANARDO et al., 1988).

Os resultados apresentados por Moreira et al. (2014), através de modelo de inversão de seção e modelagem 3D, permitiu estabelecer uma assinatura de uma zona mineralizada de alto teor, cujo a correlação foi possível pelo fato do corpo de minério estar exposto na frente de lavra de uma mineração ativa de pequeno porte (Mina do Córrego de Cocho). A assinatura geofísica desse depósito é de baixa resistividade e alta cargabilidade para porções aflorantes do depósito. Neste caso a baixa resistividade ($< 20\Omega.m$) foi associada a regiões mineralizadas ausentes de umidade, uma vez que o grau de umidade é determinante no padrão de resistividade dos solos e rochas, predominaram portanto processos de condução eletrônica. Em virtude disso os valores elevados de cargabilidade ($> 30ms$) estão condizentes e foram também relacionados ao minério de alto teor exposto na frente de lavra. Contudo essa assinatura não se manteve nas porções internas do terreno, fato que foi relacionado a fatores genéticos, controlados por processos intempéricos, teor de umidade, teor de argilominerais e porosidade.

Estudando uma ocorrência muito próxima a Mina do Córrego do Cocho, dentro do mesmo contexto geológico, Vieira (2015) verificou uma assinatura de baixa resistividade ($< 10\Omega.m$) e baixa cargabilidade ($< 10mV/V$) de um modo geral para o depósito. Entretanto, duas das dez linhas executadas em seu trabalho apresentaram valores de cargabilidade superiores a $30mV/V$ próximos a superfície, que foram confirmados em profundidade através de modelagem 3D. Neste caso os valores de cargabilidade superiores a $15mV/V$ foram associados a grafita, que é um mineral bastante polarizável, que o autor sugeriu ser um excelente guia prospectivo para o minério de manganês na região de Itapira, além de verificar a geometria e direção dos corpos de minério e protominério.

A comparação dessas assinaturas permite supor que a caracterização de uma zona mineralizada lateralmente extensa e restrita em profundidade pode ser atribuída a gênese deste tipo de depósito mineral. O intemperismo modifica e redistribui o conteúdo mineral nos diferentes níveis do depósito, originando novos zoneamentos de elementos e teores dentro do perfil de alteração, tanto vertical como horizontalmente. Este mecanismo pode proporcionar a economicidade de uma série de acumulações supergênicas em ferro, níquel e manganês, pela lixiviação de componentes acessórios e indesejáveis (ROY, 1992; VALETON, 1994; ROY, 1997; MAYNARD, 2003).

A lixiviação e o transporte do manganês são governados por processos e me-

canismos similares aos que governam o ferro, ou seja, a maioria dos compostos de manganês é solubilizada em águas neutras a ácidas e precipitada em águas alcalinas. O manganês lixiviado das rochas é carregado do perfil de solo vertical e lateralmente e em seguida transportado como compostos carbonatados ou partículas por águas naturais de pH levemente ácido até os corpos d'água (FRAKES; BOLTON, 1992).

Dois fatores são cruciais para o desenvolvimento dos depósitos supergênicos são a presença de climas tropicais úmidos e o conteúdo de manganês na rocha (PETERS, 1987; ROY, 1997). Climas tropicais úmidos favorecem altas concentração de ácidos húmicos diante da abundante cobertura vegetal e constante variação do nível freático, que favorece a precipitação de elementos químicos como o manganês. Rochas básicas, ultrabásicas e algumas rochas metamórficas apresentam quantidades significativas de manganês, com a gênese de acumulações econômicas quando intemperizadas. Concentrações secundárias de manganês a partir dessas rochas são desenvolvidas na forma de perfis lateríticos que podem atingir até 30m de espessura (VALETON, 1994).

As crostas oxidadas podem gerar horizontes endurecidos e posicionados em níveis profundos de solos ferralíticos, resultantes da migração de soluções manganêsíferas/ferruginosas provenientes de porções superiores e bastante drenadas. As soluções migram verticalmente no perfil e carregam o manganês, com solubilidade bastante superior em comparação ao ferro, até a deposição geralmente entre os horizontes B e C (saprolítico) (EVANGELOU, 1998; HILLEL et al., 2005).

Tais acumulações podem atingir concentrações de até 80% em óxidos de manganês, essencialmente constituídos por psilomelana e pirolusita de aspecto fibroso, maciço ou botrioidal (TAYLOR, 2011).

Neste sentido, a concentração de óxidos de manganês no perfil de solo estudado e sua ocorrência restrita a poucos metros de profundidade, pode estar relacionada migração lateral de soluções enriquecidas em manganês entre os horizontes B e C e a precipitação de metais numa frente de redução-oxidação, coincidente com interface de exposição de solo, onde ocorre evapotranspiração, aeração e formação de óxidos, conforme sugerido em McKenzie (1972), Loganathan e Bureau (1973).

Capítulo 7

Conclusão

A aquisição conjunta de dados de Eletrorresistividade e Polarização Induzida em perfil de solo com mineralização em manganês supergênico possibilitou a definição de uma assinatura geoeétrica característica para a ocorrência mineral.

Em modelos de inversão 2D em termos de resistividade elétrica foi possível a definição de uma zona concêntrica de baixa resistividade, coincidente com uma área de intensa disseminação de óxidos de manganês reconhecida em campo. Em termos de cargabilidade, foi possível definir uma faixa de ocorrência de valores de até 5mVV, que basicamente coincide com a extensão máxima da ocorrência de manganês.

Os resultados demonstram a eficácia de aplicação do método da Polarização Induzida na definição de disseminações de manganês supergênico em perfis de solo, ao passo que a aplicabilidade do método da Eletrorresistividade é aparentemente restrita a concentrações de teores relativamente elevados. O padrão de baixa cargabilidade (valores inferiores a 5mVV) em relação ao perfil de solo estéril (valores entre 5mVV e 20mVV), pode ser atribuído a lixiviação e ao carreamento de argilominerais do perfil de solo durante o processo de concentração supergênica de manganês.

É relevante ressaltar a polarizabilidade associada a presença de argilominerais em materiais geológicos, um mecanismo de considerável capacidade de geração de potencial elétrico. É provável que o fenômeno de polarização eletrônica seja irrelevante para o caso de acumulações de óxidos diante da pequena intensidade de valores obtidos, embora seja compreendido como o processo responsável pela elevada polarizabilidade de áreas com sulfetos disseminados.

A interpolação de linha paralelas e a geração de modelos de visualização 3D, demonstrou resultados satisfatórios em termos de análise morfológica da ocorrência mineral, sob a ótica dos parâmetros físicos medidos. A partir da analogia entre a extensão visível de óxidos de manganês e sua área de maior concentração no perfil de solo estudado, com uma assinatura geoeétrica característica, foi possível uma análise bastante razoável da continuidade do zona mineralizada em profundidade.

Aparentemente restrita a poucos metros de espessura, sua origem da ocorrên-

cia mineral pode ser atribuída a precipitação de óxidos de manganês numa interface redutora-oxidante, oriundos no fluxo de soluções aquosas que percolam e lixiviam cristais de espessartita (granada de Mn) durante o processo de intemperismo da sequência metassedimentar. Esta interface é representada pela área exposta na estrada, onde ocorre aeração e evapotranspiração, principalmente na camada formada entre os horizontes B e C de solo. Para comprovação e complementação ao estudo geofísico, são recomendados trabalhos de quantificação de teores por meio amostragem e análises químicas.

Embora esta e outras dezenas de ocorrências de manganês descritas na região de estudos sejam de pequeno volume, a eventual existência de altos teores, facilidade de acesso para lavra de um material facilmente escavável e passível de separação por processos magnéticos, pode ser algo considerável num cenário de novas aplicações ou de aumento da demanda por manganês no mercado nacional.

Referências Bibliográficas

- AB'SÁBER, A. N. Participação das depressões periféricas e superfícies aplainadas na compartimentação do planalto brasileiro: considerações finais e conclusões. *Revista do Instituto Geológico*, Revista do Instituto Geológico, v. 19, n. 1-2, p. 51–69, 1998.
- ALMEIDA, F. d.; HASUI, Y. O embasamento da plataforma sul americana. *O Precambriano do Brasil*, p. 378, 1984.
- ARAÚJO, C. C. de; MACEDO, A. B. Geoprocessamento de dados geológicos para mapeamento de favorabilidade para cobre, chumbo e zinco no vale do ribeira (sp-pr). *Brazilian Journal of Geology*, v. 34, n. 3, p. 317–328, 2008.
- BALTAZAR, O. F. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - Escala 1:50.000 Folha Heliadora, Estado de Minas*. [S.l.], 1988.
- BRAGA, A. C. de O. *Métodos da eletrorrestividade e polarização induzida aplicados nos estudos de captação e contaminação de águas subterrâneas*. Tese (Tese de Livre Docência) — Universidade Estadual Paulista - Unesp, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE, Rio Claro - SP, 2006.
- CAMPOS-NETO, M. d. C. et al. Migração de orógenos e superposição de orogêneses: Um esboço da colagem brasileira no sul do cráton do são francisco, se-brasil. *Geologia USP. Série Científica*, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, v. 4, n. 1, p. 13–40, 2004.
- CHATTERJEE, K. K. *Uses of metals and metallic minerals*. [S.l.]: New Age International, 2007. 111–112 p.
- CORNELIUS, M. et al. Soil and biogeochemical signatures of the aripuanã base metal deposit, mato grosso, brazil. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Geological Society of London, v. 7, n. 2, p. 179–192, 2007.
- EBERT, H. Os paraibides entre são joão del rei (mg) e itapira (sp), ea bifurcação entre paraibides e araxáides. *Publ. Especial SBG-Núcleo SP/Pró-Minério (In memorian)*, v. 12, 1984.
- EVANGELOU, V. *Environmental soil and water chemistry: Principles and applications* john wiley & sons. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, p. 577, 1998.
- FILHO, E. R.; MARINHO, J. M. L. Prospecção magnetométrica de depósitos óxido-silicáticos de manganês com jacobsita, no ceará. *Boletim IG-USP*, Instituto de Geociências-USP, v. 14, p. 13–20, 1983.

FRAKES, L.; BOLTON, B. R. Effects of ocean chemistry, sea level, and climate on the formation of primary sedimentary manganese ore deposits. *Economic Geology*, Society of Economic Geologists, v. 87, n. 5, p. 1207–1217, 1992.

GONÇALVES, E.; SERFATY, A. *Perfil analítico do manganês*. [S.l.]: Ministério das Minas e Energia, Department Nacional da Produção Mineral, 1976.

GRIFFITHS, D.; BARKER, R. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 211–226, 1993.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. *Geociências (São Paulo)*, Geociências (São Paulo), v. 29, n. 2, p. 141–169, 2010.

HILLEL, D. et al. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. [S.l.]: Elsevier Amsterdam, 2005. 2002 p.

HOULDING, S. *3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

IRVINE, R.; SMITH, M. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 375–412, 1990.

KELLER, G. V.; FRISHKNECHT, F. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Reprinted. [S.l.]: Pergamon Press Inc., 1970. 519 p.

KING, L. C. *A geomorfologia do Brasil Oriental*. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Conselho Nacional de Geografia, 1957.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.-J. *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

LELONG, F. et al. Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In: WOLF, K. H. (Ed.). *Supergene and surficial ore deposits; textures and fabrics*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976, (HANDBOOK OF STR-BOUND AND STRATIFORM ORE DEPOSITS). cap. 3, p. 93–133.

LOGANATHAN, P.; BURAU, R. Sorption of heavy metal ions by a hydrous manganese oxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 1277–1293, 1973.

LOKE, M. H.; BARKER, R. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method. *Geophysical prospecting*, v. 44, n. 1, p. 131–152, 1996.

MAAS, M. V. R. et al. Aplicação da geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero orós-jaguaribe. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 33, n. 3, p. 279–288, 2003.

MARANHÃO, R. J. L. Introdução à pesquisa mineral. Banco do Nordeste do Brasil SA Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste-ETENE, p. 796, 1985.

MAYNARD, J. Manganiferous sediments, rocks, and ores. *Treatise on Geochemistry*, v. 7, p. 289–308, 2003.

MCKENZIE, R. The sorption of some heavy metals by the lower oxides of manganese. *Geoderma*, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 29–35, 1972.

MCNEILL, J. Electrical conductivity of soils and rocks - technical note tn-5. Geonics Limited. Disponível em: <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn5.pdf>, p. 21, 1980b. Acesso em 28/05/15.

MME, M. d. Plano nacional de mineração 2030-geologia, mineração e transformação mineral. *Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM*, 2011.

MOON, C. J. et al. *Introduction to mineral exploration*. [S.l.]: Blackwell publishing, 2006.

MORAIS, M. C. d.; JUNIOR, P. P. M.; PARADELLA, W. R. Mapping iron-mineralized laterite environments based on textural attributes from mapsar image simulation-sar-r99b (sivam/sipam) in the amazon region. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 29, n. 1, p. 99–111, 2011.

MOREIRA, C. A. et al. Geological and geophysical data integration for delimitation of mineralized areas in a supergene manganese deposits. *Geofísica internacional*, Instituto de Geofísica, UNAM, v. 53, n. 2, p. 199–210, 2014.

MOREIRA, C. A.; ILHA, L. M. Prospecção geofísica em ocorrência de cobre localizada na bacia sedimentar do camaquã (rs). *Rem: Revista Escola de Minas*, Escola de Minas, p. 305–311, 2011.

MOREIRA, C. A. et al. Geoelectrical prospection of disseminated sulfide mineral occurrences in camaquã sedimentary basin, rio grande do sul state, brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 30, n. 2, 2012.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. *Looking into the earth: an introduction to geological geophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.

ORELLANA, E. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Madrid, SP: [s.n.], 1972.

PARASNIS, D. S. *Principles of Applied Geophysics*. Segunda edição. [S.l.]: Chapman and Hall, 1972. 214 p.

PARK, C. F.; MACDIARMID, R. A. *Ore deposits*. Third edition. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1975.

PEREIRA, R. M. Fundamentos de prospecção mineral. Editora Interciência., p. 167, 2003.

PETERS, W. C. *Exploration and mining geology*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, p. 696, 1987.

PHILIP, K.; MICHAEL, B.; IAN, H. *An introduction to geophysical exploration*. 3rd. ed. Oxford: Blackwell Science, 2002.

- POLO, H. J. O. *Evolução Geotectônica Neoproterozóica na Região de Heliódora Sul de Minas Gerais*. 102 f. Dissertação (UFRJ) — Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- RAMAZI, H.; MOSTAFAIE, K. Application of integrated geoelectrical methods in marand (iran) manganese deposit exploration. *Arabian Journal of Geosciences*, Springer, v. 6, n. 8, p. 2961–2970, 2013.
- RIBEIRO, A. et al. Evolução das bacias proterozóicas e o termo-tectonismo brasileiro na margem sul do cráton do são francisco. *Brazilian Journal of Geology*, v. 25, n. 4, p. 235–248, 1995.
- ROBINSON, E. S. *Basic Exploration Geophysics*. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 1988. 562 p.
- ROY, S. *Manganese deposits*. [S.l.]: Academic press London, 1981. v. 458. 459 p.
- ROY, S. Environments and processes of manganese deposition. *Economic Geology*, Society of Economic Geologists, v. 87, n. 5, p. 1218–1236, 1992.
- ROY, S. Genetic diversity of manganese deposition in the terrestrial geological record. *Geological Society, London, Special Publications*, Geological Society of London, v. 119, n. 1, p. 5–27, 1997.
- SANTANA, A. L. Manganês. *Sumário Mineral 2009.*, DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral., p. 77–78, 2010.
- SANTANA, A. L. Manganês. *Sumário Mineral 2014.*, DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 86–87, 2015.
- TAYLOR, R. *Gossans and leached cappings: field assessment*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. 165 p.
- TELFORD, W. M.; SHERIFF, R. E. *Applied geophysics*. [S.l.]: Cambridge university press, 1990. v. 1.
- TROUW, R.; PACIULLO, F.; RIBEIRO, A. A faixa alto rio grande reinterpretada como zona de interferência entre a faixa brasília e a faixa ribeira. *SBG, Cong. Bras. Geol*, v. 38, n. 3, p. 234–235, 1994.
- VALETON, I. Element concentration and formation of ore deposits by weathering. *Catena*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 99–129, 1994.
- VIEIRA, L. B. *Caracterização morfológica de ocorrência de manganês por meio de dados geofísicos*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - Unesp, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE, Rio Claro - SP, 2015.
- WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. *Investigations in Geophysics. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysics*, v. 1, n. 5, p. 147–198, 1990.
- ZANARDO, A. et al. Protominério de manganês das ocorrências do grupo itapira. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA SBG, NÚCELO MINAS GERAIS. *Anais do XL Congresso Brasileiro de Geologia*. Belo Horizonte, MG, 1988. v. 1, p. 159.