

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

ALEXANDRE LISBOA LAGO

Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de
disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP

São Paulo

2009

ALEXANDRE LISBOA LAGO

Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas para a obtenção
do título de Doutor em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

São Paulo

2009

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alexandre Lisboa Lago

Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas para a obtenção
do título de Doutor em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica Aplicada

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

Instituição: IAG/USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Renato Luiz Prado

Instituição: IAG/USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Instituição: IGc/UNESP-Rio Claro

Assinatura: _____

Prof. Dr. José Gouveia Luiz

Instituição: IG/UFPA

Assinatura: _____

Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Instituição: IG/UNICAMP

Assinatura: _____

Dedico este trabalho aos meus pais,
Clóvis e Nazaré, e às minhas irmãs,
Liane e Lígia.

AGRADECIMENTOS

Este é o momento de externalizar minha gratidão a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram, participaram ou vivenciaram o encerramento deste ciclo acadêmico.

A minha família pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada acadêmica, em especial ao meu sábio pai, Clóvis; a minha doce mãe, Nazaré; as minhas irmãs, Liane e Lígia; e a minha sobrinha, Isabella. Amo vocês!

Ao meu orientador Prof. Dr. Vagner Roberto Elis pela orientação, confiança, respeito, contribuição e amizade ao longo desses sete anos, que se iniciaram com a orientação do mestrado. Muito obrigado pela segurança com a qual este trabalho foi conduzido.

Ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela realização desta pesquisa. Sou grato aos professores desta instituição que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Ao técnico da Geofísica Aplicada Ernande Costa Santos do Departamento de Geofísica do IAG/USP, pela realização do trabalho de campo. Sua presença na etapa de aquisição dos dados foi essencial. Muito obrigado!

Ao técnico Edílson Brito do Departamento de Geofísica do IAG/USP, pela presteza no atendimento quando solicitado.

Às secretárias do Departamento de Geofísica do IAG/USP, Teca e Virgínia, pelo excelente atendimento prestado. A vocês os meus sinceros elogios.

À secretária dos Cursos de Pós-Graduação do IAG/USP, Rosemary Feijó, pela presteza no atendimento quando solicitado.

Ao Dr. Giovanni Chaves Penner pelo empréstimo de mapas cartográficos, dados geológicos da região e resultados de investigação direta, fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

Ao Sr. Sérgio Barbieri pela autorização de acesso a área de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado. A CAPES/PROAP pelo apoio financeiro nas etapas de campo.

Ao Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges da Universidade Federal do Espírito Santo, pelo apoio ao longo do doutorado e pelas valiosas contribuições e discussões, em especial sobre o método GPR. Obrigado amigo!

A equipe de trabalho de campo: Andréa Ustra, Ernande Santos, Sérgio Fachin e Welitom Borges. Obrigado pela realização desta etapa com harmonia e disposição. Aos colegas Ivan, Juliana e Paulo (Baiano) que auxiliaram na aquisição dos dados em algumas etapas de trabalho de campo.

A CPRM - Serviço Geológico do Brasil pela licença concedida durante o período de três meses para finalizar a Tese, representada pelo Diretor-Presidente, Agamenon Dantas; pelo Diretor de Geologia e Recursos Minerais (DGM), Manoel Barretto da Rocha Neto; pelo Chefe do Departamento de Geologia (DEGEO), Inácio de Medeiros Delgado; e pelo Chefe da Divisão de Geofísica (DIGEOF), Maria Laura Vereza de Azevedo.

A geóloga Maria Laura Vereza de Azevedo, chefe da DIGEOF, pela motivação, confiança, compreensão e condições dadas para a finalização do doutorado. Estou certo que além de um Chefe, tenho uma grande amiga. Obrigado por tudo!

Aos Professores Reginaldo Rodrigues (Núcleo Pedagógico Integrado da UFPA) e Ronaldo Campos (Universidade de Tocantins), pela revisão da língua vernácula.

A Fred Hanson pelas revisões do *Abstract* e do artigo publicado na revista *Environmental Geology*.

Aos amigos-irmãos Miguel e Michelline, que riram, choraram, cantaram, acreditaram, ouviram, interrogaram e calaram comigo. Amo vocês!

A Aline pela amizade incondicional e pela acolhida desde os tempos de CRUSP. Você é muito especial.

Ao clã de amigos pela magia da amizade compartilhada, digo obrigado a: Alberto (*in memoriam*), Augusto, Fernando, Humberto, Jorge, Karina (Titão), Lizete (Nega), Luís, Márcia, Nilson, Reginaldo e Tadeu.

Aos vários amigos da Pós-Graduação: Allana, Andréa, Danilo, Eduardo, Elizete, Érika, Everton, Fábio Lucas, Francisca, Gil, Gelvan, Ivan, Juliana, Manuelle, Marcelo Peres, Marcus, Miguel, Nilton, Selma, Sérgio Fachin, Sérgio Bezerra, Soraya, Welitom e demais alunos pelo companheirismo ao longo do doutorado.

Enfim, ao meu companheiro Fred Hanson pelo equilíbrio emocional e pela compreensão da importância desta etapa da minha vida. Obrigado por sua existência!

A palavra é o fio de ouro do
pensamento.

(Sócrates)

RESUMO

LAGO, A.L. 2009. Investigação geofísica 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP. *Tese de Doutorado*, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 194p.

A geofísica tem mostrado eficácia em identificar áreas contaminadas por derivados de petróleo, contribuindo para tornar mais efetivos os programas de sondagem voltados à coleta de amostras e instalação de poços de monitoramento. O presente trabalho apresenta resultados de investigações geofísicas em uma área de disposição de resíduos de re-refino de óleo lubrificante localizada no município de Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo. Na área de estudo os resíduos foram dispostos em quatro cavas com um volume total de aproximadamente 25.000 m³. Esta área está situada nos domínios geológicos dos derrames basálticos da Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu. As cavas foram totalmente preenchidas com resíduos por aproximadamente 25 anos e não foi usado nenhum tipo de impermeabilização na base e laterais destas cavas. O objetivo do trabalho foi o estudo de uma metodologia geofísica de aquisição e modelagem de dados 3D com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida para a caracterização geoambiental da área de estudo, seguido pelos métodos potencial espontâneo e *ground penetrating radar* (GPR). A aquisição de dados 3D, a partir de uma série de levantamentos elétricos 2D, mostrou-se eficaz em mapear variações de resistividade e cargabilidade em três dimensões, mostrando em subsuperfície o comportamento dos contaminantes. As anomalias condutivas na zona saturada e zona não saturada estão relacionadas à contaminação gerada pelo processo de biodegradação. Em geral, as cavas com resíduos são caracterizadas por baixos valores de cargabilidade. Nos levantamentos elétricos 2D são observadas anomalias condutivas abaixo das cavas coincidentes com a atenuação do sinal eletromagnético do GPR, evidenciando a contaminação do meio, bem como o aumento da polarização à medida que se afasta da fonte de contaminação. O método potencial espontâneo possibilitou também o mapeamento da contaminação, que é associada às anomalias negativas de potencial espontâneo e evidencia atividade geoquímica no local. O GPR foi o método mais eficiente na identificação da geometria das cavas, com exceção da cava 1, cuja base não é bem caracterizada pelo sinal GPR. As análises diretas de amostras de solo e água subterrânea confirmam a contaminação. Nas análises de solo, baixas concentrações de alguns hidrocarbonetos policíclicos aromáticos foram encontradas, principalmente naftaleno e fenantreno. Nas amostras de água, foi confirmado contaminação da água subterrânea por chumbo (Pb). O processo de biodegradação é confirmado pela existência de microorganismos (bactérias), como constatado na análise biológica das amostras de solo coletadas em um ponto específico, onde assinaturas geofísicas sugerem contaminação. Os métodos geofísicos utilizados afirmam-se como uma ferramenta de grande potencial na caracterização geoambiental, juntamente com os métodos de investigação direta neste caso de estudo, e podendo ser aplicados no estudo de áreas similares.

Palavras-chave: Aquisição 2D e 3D, Eletrorresistividade, Polarização Induzida, Potencial Espontâneo, GPR, Óleo Lubrificante.

ABSTRACT

LAGO, A.L. 2009. 2D and 3D geophysical investigation with environmental application: study on a lubricant oil waste disposal area in the municipal of Ribeirão Preto-SP. PhD Thesis, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 194p.

Geophysics has been shown to be effective in identifying areas contaminated by oil products, contributing to the greater efficiency of soundings programs and the installation of monitoring wells. The present work presents results of geophysical investigations in a lubricant oil waste area located in the municipality of Ribeirão Preto, São Paulo State, Brazil. In the study area the waste was disposed of in four trenches with a total volume of about 25.000 m³. This area is situated on the geological domains of the basaltic spills of the Serra Geral Formation and the sandstones of the Botucatu Formation. The trenches were totally filled with waste over approximately 25 years and no protection liners were used in the bottom or laterals of the trenches. The goal of the study was the acquisition and modeling of 3D data with the electroresistivity and induced polarization methods for the environmental characterization of the study area, followed by self potential and ground penetrating radar methods (GPR). The acquisition of 3D data, from a series of 2D electrical surveys, was effective in mapping variations of resistivity and chargeability in three dimensions, showing in the subsurface the behavior of contaminants. The conductive anomalies in the saturated zone and unsaturated zone were related to contamination generated by the biodegradation process. In general, the trenches with waste were characterized by low values of chargeability. In 2D electrical surveys, conductive anomalies were observed below the trenches coincident with the attenuation of the electromagnetic signal of the GPR, indicating the contamination of the environment and increased polarization from the contamination source. The self potential method also allowed mapping of the contamination, which is associated with negative anomalies of self potential and evidence of geochemical activity in the locale. GPR was the method most efficient in the identification of the geometry of the trenches, except in the trench 1, in which the base is not delineated by a GPR signal. A direct analysis of the soil and groundwater samples confirmed the contamination. In the soil analysis, low concentrations of several polycyclic aromatic hydrocarbons were found, mainly naphthalene and phenanthrene. In the water samples, there was confirmed contamination of the groundwater by lead (Pb). The biodegradation process was confirmed by the presence of microorganisms (bacteria), as evidenced in a biological analysis of soil samples collected at a specific point, where geophysical signatures suggested contamination. The geophysical methods used were an excellent tool for an environmental characterization, and together with the direct methods of investigation in this case study and can be applied in the study of similar areas.

Keywords: 2D and 3D acquisition, Electrical Resistivity, Induced Polarization, Self Potential, GPR, Lubricant Oil.

APRESENTAÇÃO

A presente tese foi estruturada em sete capítulos buscando objetividade no conteúdo abordado.

No Capítulo 1 - Introdução - é feita uma abordagem sobre o problema da contaminação, uma breve revisão da geofísica aplicada à contaminação por hidrocarbonetos existentes na literatura e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 - Comportamento dos contaminantes orgânicos em subsuperfície - apresenta-se os mecanismos que governam o transporte dos contaminantes, as fases dos contaminantes em subsuperfície e o processo de atenuação natural.

No Capítulo 3 - Caracterização da área de estudo - é mostrada a localização da área de estudo, um breve histórico da disposição do resíduo e caracterização do mesmo. Nesse Capítulo, também é apresentado o contexto geológico da área e investigação geofísica antecedente.

No Capítulo 4 - Fundamentação teórica - são apresentados os princípios básicos dos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e *ground penetrating radar* e, também, são descritas as tecnologias *direct push*.

No Capítulo 5 - Ensaio realizados - são mostradas as localizações dos levantamentos geofísicos e investigação direta realizados na área de estudo. Nesse Capítulo, também traz uma descrição de que maneira foram feitos os levantamentos na área, e quais equipamentos e *softwares* foram utilizados.

No Capítulo 6 - Interpretação e discussão dos resultados - são apresentadas as interpretações e as discussões dos resultados obtidos por cada método geofísico, bem como os resultados obtidos pelos métodos de investigação direta.

Enfim, as principais conclusões e recomendações do estudo realizado em uma área de disposição de resíduo de óleo lubrificante são apresentadas no Capítulo 7.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenho esquemático do comportamento de LNAPL em subsuperfície.....	36
Figura 2.2 - Desenho esquemático do comportamento de DNAPL em subsuperfície.....	36
Figura 2.3 - Desenho esquemático de zonas de biodegradação de uma pluma de contaminação de hidrocarboneto. (1) Metanogênese. (2) Redução de Sulfato. (3) Redução de Ferro. (4) Redução de Manganês. (5) Redução de Nitrato. (6). Biodegradação aeróbica.....	40
Figura 2.4 - Desenho esquemático das zonas definidas em um derrame de NAPL. (1) Zona vadosa diretamente abaixo do derrame. (2) Produto livre e residual. (3) Zona vadosa diretamente acima do produto livre/residual. (4) Franja reativa ao redor da pluma dissolvida. (5) Núcleo anaeróbico da pluma dissolvida. (6) Zona distante da pluma dissolvida (modificado de Sauck, 2000).....	41
Figura 3.1 - Localização da área de estudo.....	46
Figura 3.2 - Fotografia aérea da área de estudo.....	47
Figura 3.3 - Resíduo de óleo lubrificante disposto nas cavas.....	47
Figura 3.4 - Mapa geológico da região de Ribeirão Preto-SP (modificado da CPRM, 2006).....	49
Figura 3.5 - Perfil E-W obtido através dos furos de sondagem e informações de poço.....	50
Figura 3.6 - Interpretação da SEV 1 (PENNER, 2005).....	52
Figura 3.7 - Interpretação da SEV 2 (PENNER, 2005).....	53
Figura 4.1 - Intervalos de valores de resistividade elétrica de algumas rochas e materiais (modificado ELIS, 1999 e LOKE, 2004).....	56
Figura 4.2 - Direção do fluxo de corrente no semi-espaço.....	58
Figura 4.3 - Linhas, de fluxos de correntes e equipotenciais, para duas fontes pontuais (eletrodos) de corrente em um meio homogêneo.....	59
Figura 4.4 - Técnicas de aquisição de dados pelo método da eletrorresistividade. (a) Sondagem Elétrica Vertical – SEV. (b) Caminhamento Elétrico – CE. (c) Perfilagem Elétrica de Poço – PEP.....	62

Figura 4.5 - Arranjos eletródicos mais utilizados em ensaios de campo pelo método da eletrorresistividade e seus fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004).....	63
Figura 4.6 - Arranjo dipolo-dipolo com cinco níveis de investigação em profundidade.....	67
Figura 4.7 - Forma de plotagem do arranjo dipolo-dipolo e a seqüência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.....	68
Figura 4.8 - Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D completo (modificado de LOKE e BARKER, 1996).....	73
Figura 4.9 - Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D diagonal cruzado (modificado de LOKE e BARKER, 1996).....	73
Figura 4.10 - (a) Pseudoseção de resistividade aparente. (b) Seção de resistividade.....	77
Figura 4.11 - Arranjo dos blocos usado no modelo 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de LOKE e DAHLIN, 2002).....	80
Figura 4.12 - Modelo 3D de discretização utilizado pelo programa de inversão (adaptado de LOKE e BARKER, 1996).....	81
Figura 4.13 - Os modelos 3D utilizados na inversão. (a) Modelo onde as camadas superiores são divididas pela metade nas direções horizontal e vertical. (b) Modelo onde as camadas superiores são divididas somente na direção horizontal (adaptado de GEOTOMO, 2001).....	83
Figura 4.14 - Formas de ondas usadas no método IP – domínio do tempo, mostrando a corrente primária I_p aplicada, o potencial primário V_p máximo e a curva do potencial transiente $V_{ip}(t)$ (modificado de SUMNER, 1976).....	85
Figura 4.15 - Associação da resistividade e cargabilidade aparentes com a litologia (modificado de DRASKOVITS et al., 1990).....	87
Figura 4.16 - Efeito de polarização de membrana. (a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso. (b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de voltagem em corrente contínua (modificado de TELFORD et al., 1990).....	88
Figura 4.17 - Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior (modificado de TELFORD et al., 1990).....	90

Figura 4.18 - Polarização espontânea. Localização dos pólos de um corpo polarizado. As setas indicam o sentido do movimento dos elétrons e íons negativos (modificado de ORELLANA, 1972).....	93
Figura 4.19 - Sentido do movimento de elétrons e íons no potencial espontâneo (modificado de ORELLANA, 1972).....	96
Figura 4.20 - Localização e natureza de algumas reações no potencial espontâneo (modificado de ORELLANA, 1972).....	96
Figura 4.21 - Desenho esquemático de formação do potencial de eletrofiltração <i>per descensum</i> (modificado de ORELLANA, 1972).....	99
Figura 4.22 - Desenho esquemático de aquisição de dados de SP pelo método de potenciais.....	100
Figura 4.23 - Desenho esquemático de aquisição de dados de SP pelo método de gradientes.....	102
Figura 4.24 - Desenho esquemático da reflexão do sinal EM em subsuperfície.....	106
Figura 4.25 - (a) Desenho esquemático de aquisição de dados no modo <i>common offset</i> . (b) Traços mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta no solo e da onda refletida na subsuperfície. S é o espaçamento entre as antenas, e nx é o espaçamento entre os traços.....	113
Figura 4.26 - Desenho esquemático dos tipos de sondagens de velocidade. (a) Sondagem CMP. (b) Sondagem WARR. (modificado de PORSANI, 1999).....	114
Figura 5.1 - Mapa de localização dos ensaios na área de estudo.....	119
Figura 5.2 - Desenho esquemático da aquisição 3D a partir de uma série de seções 2D paralelas e equi-espaçadas.....	120
Figura 5.3 - Equipamento Syscal R2, fabricado pela IRIS.....	121
Figura 5.4 - Fotos mostrando aquisições com a técnica de caminhamento elétrico na área de estudo.....	121
Figura 5.5 - Desenho esquemático de eletrodos não-polarizáveis.....	124
Figura 5.6 - Fotos de aquisições de dados GPR utilizando antenas não-blindadas de 100 MHz sobre um trenó de PVC e odômetro.....	125

Figura 5.7 - Análise de velocidade de CMP realizada sobre a cava 3. (a) Modelo de velocidade. (b) Traço empilhado da CMP. (c) Sondagem de velocidade CMP com os principais eventos identificados. (d) Análise de semblance mostrando a velocidade de maior coerência do refletor hiperbólico	126
Figura 6.1 - Linha C2. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	133
Figura 6.2 - Linha C2. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	134
Figura 6.3 - Linha C3. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	136
Figura 6.4 - Linha C3. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	137
Figura 6.5 - Linha C7. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	139
Figura 6.6 - Linha C7. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	140
Figura 6.7 - Linha C8. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	142
Figura 6.8 - Linha C8. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	143
Figura 6.9 - Linha C12. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	145
Figura 6.10 - Linha C12. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	146
Figura 6.11 - Linha C14. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	148

Figura 6.12 - Linha C14. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	149
Figura 6.13 - Linha C17. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	151
Figura 6.14 - Linha C19. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.....	153
Figura 6.15 - Linha C19. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.....	154
Figura 6.16 - Modelo 3D de resistividade da área de estudo.....	158
Figura 6.17 - Modelo 3D de cargabilidade da área de estudo.....	159
Figura 6.18 - Bloco 3D de resistividade da área. (a) Comportamento geral da resistividade. (b) Valores de resistividade entre 1 a 40 ohm.m.....	160
Figura 6.19 - Bloco 3D de cargabilidade da área. (a) Comportamento geral da cargabilidade. (b) Valores de cargabilidade entre 0,1 a 5 mV/V.....	161
Figura 6.20 - Mapa de potencial espontâneo da área de estudo.....	164
Figura 6.21 - Seção da Linha GPR1, realizada fora da área de disposição dos resíduos.....	167
Figura 6.22 - Seção da Linha GPR2 realizada sobre a cava 1.....	168
Figura 6.23 - Seção da Linha GPR3 realizada sobre a cava 2, mostrando limites da cava, refletores correlacionados a tanques/tambores e atenuação do sinal EM abaixo da cota de 538 metros.....	168
Figura 6.24 - Seção da Linha GPR4 realizada sobre a cava 3, mostrando limites da cava e atenuação do sinal EM abaixo da cota de 534,5 metros.....	169
Figura 6.25 - Cava 4 preenchida com resíduos e alguns tambores dispostos em superfície.....	169
Figura 6.26 - Seção GPR realizada sobre a cava 4 (Linha GPR5), marcando limites e base da cava (profundidade máxima de 5,45 metros) representada por um refletor em forma de vale.....	170
Figura 6.27 - Seção da Linha GPR6 (fora das cavas). Não há indícios de atenuação nesta seção, provocada por contaminação.....	171

Figura 6.28 - (a) Seção GPR realizada perpendicularmente a todas as cavas.
(b) Modelo interpretado a partir da atenuação do sinal EM, marcando assim os limites e a base das cavas..... 172

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Profundidades efetivas de investigação para o arranjo eletródico dipolo-dipolo (EDWARDS, 1977).....	70
Tabela 4.2 - Profundidades de investigação (BARKER, 1989).....	70
Tabela 4.3 - Intervalo de valores de constante dielétrica e condutividade elétrica observadas em alguns materiais (PORSANI, 1999; PRADO, 2000; BORGES, 2007).....	109
Tabela 6.1 - Resultados das análises de solo.....	176
Tabela 6.2 - Resultados dos parâmetros obtidos para as águas nos poços de monitoramento.....	177
Tabela 6.3 - Resultados da análise biológica para solo.....	178

LISTA DE QUADROS

Quadro 6.1 - Síntese do levantamento elétrico 2D na área de estudo.....	155
Quadro 6.2 - Síntese comparativa de aplicação dos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e GPR na área de estudo.....	173

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CE	Caminhamento Elétrico
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CMP	<i>Common Mid Point</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPT	<i>Cone Penetrometer testing</i>
DIC	<i>Depth of Investigation Characteristic</i>
DNAPL	<i>Dense nonaqueous phase liquids</i>
Eh	Potencial redox
EM	Eletromagnético
Eq.	Equação
E-W	Leste-Oeste
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
HPL	Hidrocarboneto Policíclico Aromático
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IP	<i>Induced Polarization (Polarização Induzida)</i>
LNAPL	<i>Light nonaqueous phase liquids</i>
N.A.	Nível d'água
NAPL	<i>Nonaqueous phase liquids</i>
N-S	Norte-Sul
OD	Oxigênio Dissolvido
PEP	Perfilagem Elétrica de Poço
pH	Potencial hidrogeniônico
PM	Poço de Monitoramento
PVC	Poli Cloreto de Vinila
RMS	<i>Root Mean Square (média quadrática)</i>
SD	Furo de Sondagem
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SI	Sistema Internacional de Unidades
SP	<i>Self Potential (Potencial Espontâneo)</i>
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
USEPA	<i>United State Environmental Protection Agency</i>
USP	Universidade de São Paulo
WARR	<i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{B}	Campo de indução magnética (W/m ²)
\vec{D}	Densidade de corrente de deslocamento (C/m ²)
\vec{E}	Intensidade do campo elétrico (V/m)
ε	Permissividade dielétrica
ε_0	Permissividade dielétrica no vácuo
ε_r	Permissividade dielétrica relativa
\vec{H}	Intensidade do campo magnético (A/m ²)
I	Corrente elétrica (mA)
i	Número complexo
I_p	Corrente elétrica primária (mA)
\vec{J}	Densidade de corrente de condução (A/m ²)
K	Fator geométrico (constante geométrica utilizada em ensaios elétricos)
k	Número de onda
L	Comprimento (m)
M	Cargabilidade (mV/V)
Ma	Cargabilidade aparente (mV/V)
R	Resistividade elétrica (ohm)
r_{gpr}	Coefficiente de reflexão GPR
S	Área da seção transversal (m ²)
Z	Impedância elétrica
ρ	Resistividade elétrica (ohm.m)
ρ_a	Resistividade elétrica aparente (ohm.m)
α	Constante de atenuação (dB/m)
β	Constante de propagação (dB/m)
σ	Condutividade elétrica (S/m)
μ	Permeabilidade magnética (H/m)
ω	Frequência angular
δ	<i>Skin depth</i>
ΔV	Diferença de potencial (mV)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 OBJETIVOS.....	31

CAPÍTULO 2

2 COMPORTAMENTO DOS CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM SUBSUPERFÍCIE.....	32
2.1 TRANSPORTE DO CONTAMINANTE NO MEIO.....	32
2.2 MIGRAÇÃO DOS NAPLs.....	35
2.3 ATENUAÇÃO NATURAL.....	39
2.3.1 Efeitos da biodegradação nas propriedades elétricas.....	40

CAPÍTULO 3

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.1 LOCALIZAÇÃO.....	45
3.2 HISTÓRICO DA DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO	45
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	45
3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	48
3.5 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA ANTECEDENTE.....	51

CAPÍTULO 4

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	54
4.1 ELETORRESISTIVIDADE.....	54
4.1.1 Propriedades elétricas dos materiais terrestres.....	55
4.1.2 Teoria elementar.....	57
4.1.3 Técnicas de aquisição de dados.....	61
4.1.4 Aquisição 2D.....	64
4.1.5 Aquisição 3D.....	71
4.1.6 Interpretação.....	76
4.1.6.1 Interpretação qualitativa.....	77
4.1.6.2 Interpretação quantitativa.....	78
4.2 POLARIZAÇÃO INDUZIDA.....	82
4.2.1 Fontes dos efeitos IP.....	84
4.2.1.1 Polarização de membrana.....	86
4.2.1.2 Polarização de eletrodo.....	88
4.2.2 Medidas de polarização induzida.....	89
4.2.2.1 Medida no domínio do tempo.....	90
4.2.3 Técnicas de aquisição de dados.....	91
4.2.4 Interpretação.....	92
4.3 POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	92
4.3.1 Mecanismos causadores do SP.....	93
4.3.1.1 Potencial de mineralização.....	94
4.3.1.2 Potencial de difusão.....	97
4.3.1.3 Potencial de eletrofiltração.....	98
4.3.2 Aquisição de dados.....	100
4.3.2.1 Método de potenciais.....	100

4.3.2.2 Método de gradientes.....	101
4.3.3 Interpretação.....	103
4.4 <i>GROUND PENETRATING RADAR</i>	104
4.4.1 Propagação de ondas eletromagnéticas.....	105
4.4.2 Técnicas de aquisição de dados.....	112
4.5 INVESTIGAÇÃO DIRETA.....	115
4.5.1 Tecnologias <i>direct push</i>	115

CAPÍTULO 5

5 ENSAIOS REALIZADOS.....	118
5.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA.....	118
5.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	123
5.3 <i>GROUND PENETRATING RADAR</i>	124
5.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA.....	127

CAPÍTULO 6

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	131
6.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA.....	131
6.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	164
6.3 <i>GROUND PENETRATING RADAR</i>	166
6.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA.....	173

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	179
7.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA.....	179
7.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	182
7.3 <i>GROUND PENETRATING RADAR</i>	182

7.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA.....	183
7.5 RECOMENDAÇÕES.....	183
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184
APÊNDICE	

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, até a década de 70, os resíduos industriais e urbanos eram dispostos diretamente no solo, pois se acreditava que o solo era um receptor ilimitado de substâncias nocivas descartáveis, como o lixo doméstico e os resíduos industriais, com base no suposto poder tampão e potencial de autodepuração (CETESB, 2001). Porém esta capacidade, como é comprovada atualmente, foi superestimada, causando danos irreversíveis ao meio ambiente.

A contaminação do solo é preocupante porque é nesta camada que é cultivada a maior parte dos alimentos necessários à sobrevivência humana. Além do solo, o contaminante pode atingir o lençol freático, e tornar a água imprópria para o consumo.

Os contaminantes são tipicamente dispostos em subsuperfície como constituintes da fase líquida, assim como solução aquosa diluída, solução aquosa concentrada (chorume), ou um líquido orgânico (fase líquida não aquosa ou *Nonaqueous phase liquids*-NAPL), que é imiscível com água. As características do contaminante influenciam a direção da migração, a extensão da pluma e a persistência do mesmo (COMMITTEE ON SOURCE REMOVAL OF CONTAMINANTS IN THE SUBSURFACE, 2004).

Estudos hidrogeológicos mostram que os mecanismos de migração e dispersão de contaminantes são complexos, o que torna difícil estimar adequadamente a quantidade ou continuidade destes produtos em subsuperfície, utilizando apenas poços de monitoramento (FREEZE e CHERRY, 1979). A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) recomenda, no diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de poços de monitoramento e levantamentos geofísicos nas áreas.

De uma forma geral a utilização de levantamentos geofísicos na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na detecção e mapeamento da extensão da área contaminada e informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. Uma justificativa ainda mais forte para a aplicação de métodos geofísicos, além das citadas acima, é que algumas técnicas fornecem dados contínuos sobre o local estudado, reduzindo muito a necessidade de dados diretos e específicos, assim como permitem uma análise temporal e espacial mais detalhada.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos, aliados ao baixo custo operacional e rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. Os métodos geofísicos fazem o uso de propriedades físicas para investigar estruturas e objetos em subsuperfície; então, a eficácia de um levantamento geofísico está condicionada à existência de contrastes dos valores da propriedade física mensurada.

Para uma melhor interpretação dos dados obtidos pelos métodos geofísicos, são necessárias informações geológicas prévias obtidas por métodos de investigação direta, como por exemplo, poços de monitoramento e furos de sondagens. Além disso, a aplicação conjunta de técnicas/métodos geofísicos no estudo de uma área contribui para um melhor modelo de interpretação dos dados. Logo, para minimizar a ambigüidade das respostas obtidas pelos métodos geofísicos, devido à solução de um determinado problema não ser única, é preciso utilizar métodos de investigação direta e diferentes métodos geofísicos para fornecer maiores informações desejáveis e necessárias para a obtenção de resultados mais confiáveis.

Dentre os métodos geofísicos aplicados em estudos ambientais, principalmente no estudo de contaminação de águas subterrâneas, destacam-se os métodos geoeletricos. Estes métodos são constituídos pelos métodos elétricos (eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo) e eletromagnéticos (WARD, 1990; ZHDANOV e KELLER, 1994). Entre os métodos eletromagnéticos, aplicados para investigações rasas (profundidades menores que 10 metros), destaca-se o *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Os métodos geoeletricos são caracterizados por medir em superfície (ou no interior de furos de sondagens) a resposta de propriedades intrínsecas dos materiais geológicos em subsuperfície à excitação por campos elétricos ou magnéticos de origem natural ou artificial. A resistividade elétrica (ou condutividade), o potencial espontâneo, a polarização, a permeabilidade magnética e a permissividade dielétrica são características mensuráveis por estes métodos.

Levando em consideração o grande contraste da resistividade elétrica^{1.1} entre as águas subterrâneas e os hidrocarbonetos, a aplicação do método da eletrorresistividade no estudo de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, é amplamente relatada na literatura.

Para locais contaminados por NAPL, Mazác et al. (1990) propôs o modelo de camada isolante (anomalia resistiva). Este modelo assume que a presença de NAPLs na subsuperfície

^{1.1} Normalmente, o contraste de resistividade elétrica entre as águas subterrâneas e os hidrocarbonetos é de 1 para 10¹¹ (AZAMBUJA et al., 1999).

é inferida devido o solo e água subterrânea contaminados terem baixíssimas condutividade elétrica e permissividade do que o meio não contaminado circundante. Posteriormente, este modelo foi suportado por experimentos em laboratório e derrame de hidrocarboneto controlado (SCHNEIDER e GREENHOUSE, 1992; REDMAN et al., 1994; ENDRES e REDMAN, 1996). Portanto, investigações geofísicas em áreas de derrames de hidrocarbonetos, geralmente, assumem a hipótese de que eles intrinsecamente possuem resistividades muito altas.

Em contrapartida, Sauck et al. (1998) sugerem que o volume contaminado por derrame de hidrocarboneto, neste caso NAPLs, no ambiente natural muda de um comportamento resistivo para um comportamento mais condutivo com o tempo, devido a uma variedade de processos biogeoquímicos. Esta hipótese partiu dos estudos geoquímicos de sítios contaminados por hidrocarbonetos que evidenciam alta condutividade na água subterrânea abaixo de algumas plumas de LNAPL (COZZARELLI et al., 1990; BAEDECKER et al., 1993; BENNETT et al., 1993; EGANHOUSE et al., 1993).

Sauck (2000) em sua publicação “*A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments*”, com base em diversos estudos e observações geofísicas (dados de resistividade medidos continuamente em poços), propôs o modelo geoeletrico condutivo de pluma de LNAPL. Nos anos seguintes, este modelo foi corroborado pelos trabalhos de Atekwana et al. (2000, 2002, 2004), Shevnin et al. (2003), Werkema Jr. et al. (2003, 2004), Braga e Cardinali (2005), Allen et al. (2007) e Baessa (2007).

Lima et al. (1995) aplicaram o método da eletrorresistividade (técnica de caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) em um local contaminado por derivados de petróleo (resíduos líquidos de um aterro). Os autores constataram que a pluma de contaminação proveniente da disposição dos resíduos líquidos foi caracterizada por valores baixos de resistividade. De acordo com Atekwana et al. (2000), em um local contaminado por hidrocarboneto (LNAPL), a contaminação é associada aos baixos valores de resistividade (anomalias condutivas), que são coincidentes com a atenuação do sinal eletromagnético do GPR (*shadow zone*^{1,2}). Moreira et al. (2006) aplicaram a técnica de caminhamento elétrico em uma área industrial contaminada por derivados de petróleo. Os autores mostraram que a zona de contaminação, gerada por processos de atenuação natural que ocorrem na área, foi caracterizada por baixos valores de resistividade (anomalia condutiva).

^{1,2} Zona de sombra, onde as reflexões se apresentam fortemente atenuadas, devido às perdas por transmissão/absorção em uma interface sobrejacente (DUARTE, 2003).

O método da polarização induzida e do potencial espontâneo, embora não sejam amplamente relatados na literatura como o método da eletrorresistividade, em estudos de áreas contaminadas por derivados de petróleo, mostram-se promissores no entendimento dos mecanismos que alteram as propriedades elétricas do meio. Destacam-se, os trabalhos de Ntarlagiannis et al. (2005) e Nyquist e Corry (2002). Para Ntarlagiannis et al. (op. cit.), o mecanismo de polarização está associado com a interface célula microbial/fluido e com a interface mineral metálico precipitado/fluido, onde o início do aumento da polarização está relacionado com o início do consumo de lactado (metabolismo microbial). Há casos registrados na literatura que associam anomalias negativas de potencial espontâneo em locais contaminados por derivados de hidrocarbonetos. Segundo Nyquist e Corry (op. cit.), as anomalias negativas SP podem ser explicadas pelo potencial redox (Eh) causado pela degradação do hidrocarboneto pela atividade bacteriana.

Braga e Cardinali (2005), em estudos efetuados em modelos reduzidos, em tanques contendo sedimentos areno-argilosos e arenosos da Formação Rio Claro, contaminados por derivados de hidrocarbonetos, neste caso gasolina, observaram que a resistividade aumentou significativamente, logo após a contaminação, enquanto que a cargabilidade diminuiu sensivelmente. Após 6 meses, a resistividade dos materiais superficiais diminuíram, em relação às leituras sem contaminação, enquanto que a cargabilidades mantiveram-se baixas. A partir deste estudo experimental, Braga e Cardinali (op. cit., p.187) concluíram que:

[...] Em vazamentos de derivados de hidrocarbonetos, atingindo os solos e rochas sedimentares e águas subterrâneas, o fator tempo é fundamental. Em relação ao meio natural (sem contaminante), vazamentos recentes deverão apresentar: resistividades altas – anomalias resistivas, e cargabilidades baixas – anomalias de baixa cargabilidade. Em vazamentos antigos, a situação se inverte: a resistividade deverá ser baixa – anomalias condutivas, e a cargabilidade alta – anomalias de alta cargabilidade.

O GPR mostra bons resultados na identificação e monitoramento de plumas de contaminação de hidrocarbonetos (DAVIS e ANNAN, 1989; BENSON, 1995; DANIELS et al., 1995; ATEKWANA et al., 2000; DEHAINE, 2001; CASTRO e BRANCO, 2003; BORGES et al., 2006).

Daniels et al. (op. cit.) monitoraram o comportamento de poças de hidrocarbonetos em um tanque de areia e água com o GPR, e verificaram que a amplitude do sinal eletromagnético é menor na parte superior da pluma de hidrocarboneto, podendo ser provocada pela fase residual do mesmo. Benson (op. cit.), em estudos de contaminação, mostra que a gasolina tem forte reflexão nas seções de GPR. Dehaine (op. cit.) identificou

vazamentos de gasolina, em postos de serviço na cidade de São Paulo, utilizando GPR e poços de monitoramento. A autora mostra que o contaminante atenua a onda eletromagnética do GPR. Castro e Branco (2003), usando GPR 4D, monitoraram a evolução de zonas contaminadas por gasolina em um posto de Fortaleza. Moreira e Dourado (2007), no estudo comparativo entre seções de GPR, analisaram o comportamento de uma pluma de contaminação sob processo de atenuação natural. Os autores concluíram que:

Os intervalos com ausência de sinal descritos nas seções de GPR são anomalias caracterizadas por elevada condutividade elétrica que resultou na atenuação da onda eletromagnética, aparentemente devido aos produtos e subprodutos da biodegradação de hidrocarbonetos aromáticos provenientes de poço de injeção de resíduos (MOREIRA e DOURADO, op. cit., p.396).

Face ao exposto, os métodos geoeletricos têm mostrado eficácia em mapear as áreas afetadas por contaminantes e contribuído para tornar mais efetivos os programas de sondagem voltados à coleta de amostras e instalação de sistemas de monitoramento. A experiência brasileira na área de geofísica ambiental tem sido expressiva, entretanto, tem se limitado à utilização de procedimentos convencionais tanto na investigação de campo (sondagem e caminhamento elétricos) quanto na interpretação de dados (modelos uni e bi-dimensionais). As áreas de disposição de resíduos, devido a sua geometria e comportamento dos contaminantes, caracterizam um ambiente tridimensional. Dentro desse contexto que este trabalho consiste no estudo de uma metodologia geofísica de aquisição e modelagem de dados 3D de resistividade elétrica e polarização induzida aplicada na caracterização geoambiental de uma área de disposição de resíduos de re-refino de óleo no município de Ribeirão Preto – SP, em área de ocorrência de arenitos da Formação Botucatu e Basaltos da Formação Serra Geral. Como métodos auxiliares na caracterização geoambiental da área foram aplicados ensaios de potencial espontâneo e *ground penetrating radar*. A utilização integrada de métodos geofísicos tem mostrado eficiente na avaliação e caracterização de problemas ambientais.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa de doutorado tem como objetivo a aplicação de uma metodologia geofísica de aquisição 3D, visando a caracterização geoambiental de uma área utilizada para a disposição de resíduos de re-refino de óleo, no município de Ribeirão Preto no estado de São Paulo. Além da aquisição 3D com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, foram utilizados os métodos potencial espontâneo e *ground penetrating radar* para complementar as informações das características locais.

A área de estudo é caracterizada por 4 cavas onde foram dispostos resíduos de re-refino de óleo até o ano de 1995. Estas cavas não receberam qualquer tipo de impermeabilização de fundo e dos taludes laterais e, conseqüentemente, o descarte de resíduos no solo originou um passivo ambiental. Levando em consideração que solos e/ou águas subterrâneas contaminados por óleo usado e resíduo de re-refino de óleo lubrificante não são comumente relatados na literatura, e também, pelo caráter inovador de métodos geofísicos aplicados no estudo deste tipo de contaminação, espera-se que esta investigação seja de grande importância, no estudo deste caso e de casos similares, para a comunidade geofísica brasileira, pois representa uma oportunidade de caso real para testar e avaliar os métodos geofísicos.

CAPÍTULO 2

2 COMPORTAMENTO DOS CONTAMINANTES ORGÂNICOS EM SUBSUPERFÍCIE

Os *Nonaqueous phase liquids* (NAPLs) podem ser classificados em *light nonaqueous phase liquids* (LNAPL) e *dense nonaqueous phase liquids* (DNAPL). Diferenciados principalmente pela densidade, o primeiro é um líquido imiscível em fase não aquosa mais leve que a água, ao passo que o segundo é mais denso que a água. Estes líquidos podem apresentar solubilidade parcial em água e, desta maneira, ocorre uma fase dissolvida, bem como a fase imiscível.

2.1 TRANSPORTE DO CONTAMINANTE NO MEIO

Para avaliação do comportamento de NAPLs, durante o processo de migração em subsuperfície, é necessário o entendimento dos mecanismos que governam o transporte de solutos (contaminantes) dissolvidos em água subterrânea.

Advecção

“O transporte advectivo ocorre quando espécies químicas são transportadas devido ao movimento preferencial de um fluido, ao longo de um escoamento [...]” (PENNER, 2005, p.11), e a quantidade de soluto transportado depende da concentração do soluto em água e da quantidade de água que está escoando. Como este transporte ocorre em conformidade com a velocidade intersticial do meio poroso, de acordo com a Lei de Darcy^{2.1}, ele depende das propriedades do aquífero (porosidade efetiva, gradiente hidráulico e condutividade hidráulica), sendo “o mecanismo preponderante na mobilização da fase livre dos hidrocarbonetos” (BAESSA, 2007, p.11).

^{2.1} Lei que prevê que o fluxo de um fluido através de um meio poroso é proporcional à permeabilidade, ao gradiente de pressão através do meio e ao inverso da viscosidade do meio (DUARTE, 2003).

Difusão

A movimentação de um soluto ocorre de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração, sendo o deslocamento proporcional à concentração inicial do mesmo (FETTER, 1998). Esse fenômeno é chamado de difusão molecular ou somente difusão, sendo o principal processo formador da fase dissolvida responsável pela maior mobilidade dos contaminantes. Todas as vezes que ocorre um gradiente de concentração também ocorre difusão, mesmo quando o solvente (água) não está em movimento.

Em meios porosos a difusão não se processa tão rápido quanto em água, porque os íons e moléculas percorrem caminhos mais longos quando se movimentarem ao redor dos minerais.

Dispersão Mecânica

De acordo com Penner (2005), o escoamento subterrâneo ocorre a taxas maiores ou menores que a velocidade linear média, ocasionado pelos seguintes fatores:

1. Com o escoamento de fluido através dos poros, prevalecerá maior velocidades no centro dos poros do que nas extremidades;
2. Para uma mesma distância linear, as partículas percorrerão caminhos diferentes na matriz porosa;
3. Como os poros apresentam diferentes espaçamentos ocorrem diferenças na velocidade de escoamento.

Penner (op. cit., p.15-16), explica o processo de dispersão mecânica da seguinte forma:

Se toda a água subterrânea que contém um soluto pudesse se mover com uma mesma velocidade, isto criaria, na ausência de efeitos difusivos, uma interface entre águas contaminadas e não contaminadas. Contudo, o que se observa é que ocorrem misturas ao longo do escoamento provocadas pelas diferentes velocidades. Esta mistura é denominada de dispersão mecânica, sendo a primeira causa da diluição do soluto nas extremidades do escoamento [...].

Este processo é influenciado, basicamente, pela variação da velocidade através dos poros, tortuosidade^{2.2} e fricção no interior dos poros do arcabouço.

Dispersão Hidrodinâmica

O processo de difusão molecular não pode ser analisado separadamente da dispersão mecânica em escoamento de água subterrânea, logo, a dispersão hidrodinâmica resulta da fusão desses processos. A dispersão hidrodinâmica é responsável pela diluição da concentração de contaminantes dissolvidos na água subterrânea.

Sorção

No processo sorcivo podem ocorrer quatro processos separados, que são:

1. Adsorção, que ocorre quando um soluto adere à superfície dos grãos;
2. Sorção química, que ocorre quando o soluto é incorporado à superfície de grãos, sedimentos ou rochas por reações químicas;
3. Absorção, que ocorre quando as partículas de soluto são sorvidas no interior de grãos e/ou partículas;
4. Troca iônica, que ocorre quando o soluto é fixado à superfície dos grãos por forças eletrostáticas.

Portanto, é o processo pelo qual os contaminantes dissolvidos na água subterrânea particionam-se, aderindo aos grãos do arcabouço. Como resultado do processo sorcivo, ocorre o retardamento da migração do soluto em relação à velocidade do fluxo da água subterrânea. Processos de biodegradação causam a redução da concentração do soluto (contaminante), tal como o decaimento radioativo e a precipitação.

^{2.2} É a medida da forma de escoamento seguido pelas moléculas de água em um meio poroso específico, sendo uma grandeza com valor sempre superior a um, pois o caminho que as moléculas seguem sempre diverge ao redor das partículas sólidas (PENNER, 2005). Sedimentos melhor sortidos possuem um valor de tortuosidade menor em relação a sedimentos pouco sortidos (FETTER, 1998).

2.2 MIGRAÇÃO DOS NAPLs

As fases dos contaminantes em subsuperfície são:

1. Fase dissolvida;
2. Fase vapor;
3. Fase adsorvida;
4. Fase separada (livre ou residual).

Os hidrocarbonetos em fase adsorvida, livre e dissolvida representam a maior ameaça para a qualidade da água subterrânea; enquanto que, os hidrocarbonetos em fase vapor próximos à superfície apresentam riscos à segurança de pessoas e instalações, devido à possibilidade de explosão.

Ao migrar pela zona não saturada, o produto é parcialmente retido (adsorvido) pelas partículas do solo e, assim, forma a fase adsorvida (OLIVEIRA, 2000).

O LNAPL, ao interagir com o nível d'água ou com uma camada de condutividade hidráulica muito baixa, quando derramado passa a fluir através dos mesmos, gerando a fase livre. Porém, o DNAPL, ao interagir com o nível d'água continuará descendo até encontrar uma camada com condutividade hidráulica muito baixa ou impermeável, passando a fluir lateralmente. Ao atingir o nível d'água, parte do produto é dissolvido devido ao contato com a água subterrânea, gerando uma pluma de contaminação denominada de fase dissolvida.

Outra pequena parte do produto pode ser encontrada como componente do vapor do solo, e com isso gerando a chamada fase vapor. A **Figura 2.1** mostra o comportamento de LNAPL em subsuperfície e a **Figura 2.2** mostra o comportamento de DNAPL em subsuperfície.

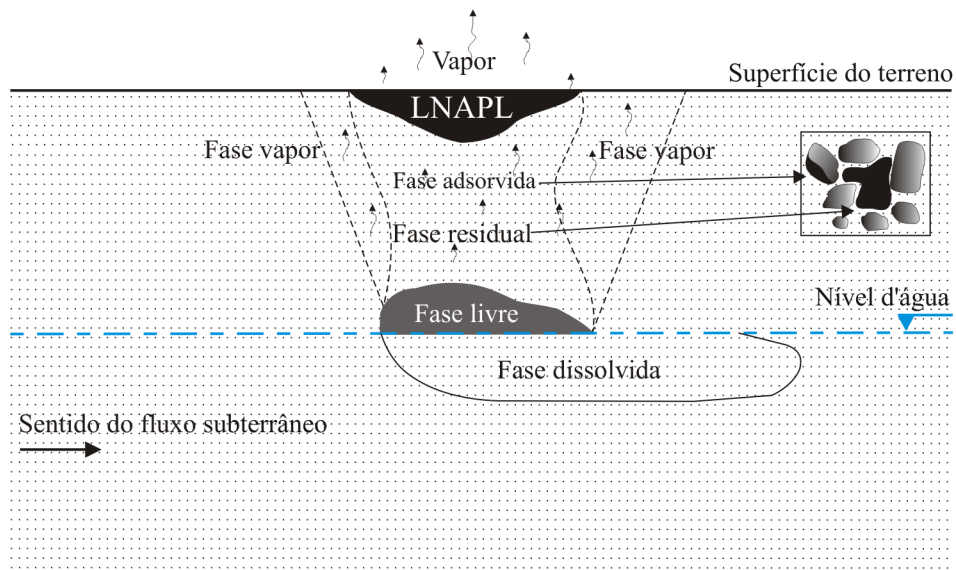


Figura 2.1 – Desenho esquemático do comportamento de LNAPL em subsuperfície.

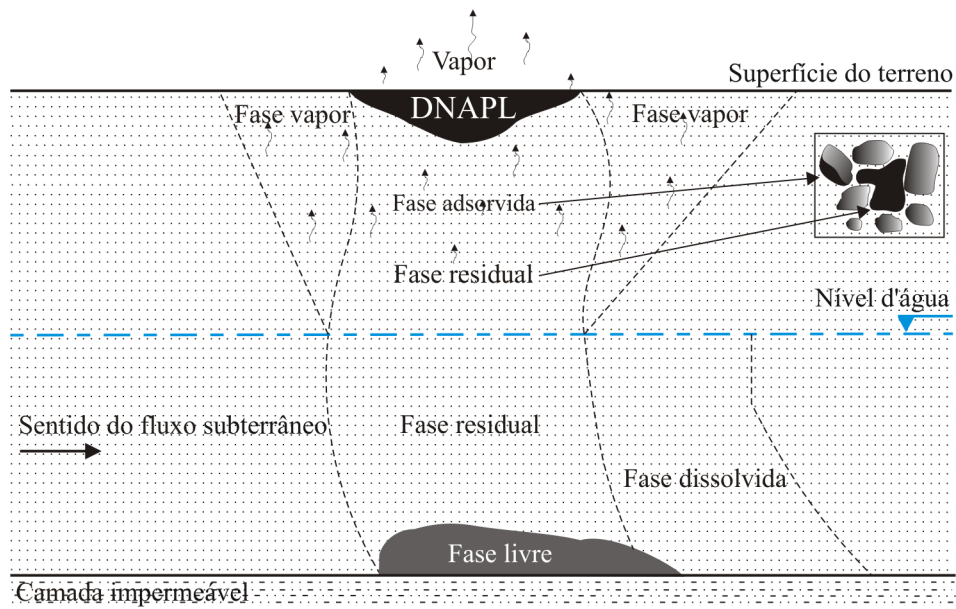


Figura 2.2 - Desenho esquemático do comportamento de DNAPL em subsuperfície.

Fase dissolvida

A fase dissolvida dos hidrocarbonetos resulta do contato entre a água subterrânea e os NAPLs, onde a água subterrânea dissolve lentamente o NAPL formando uma pluma de hidrocarbonetos no escoamento subterrâneo (NADIM et al., 2000).

De acordo com Guiguer (1996) as vias de contato entre NAPL e água subterrânea são:

1. Processos de infiltração através da zona não saturada, contendo hidrocarbonetos residuais;
2. Movimento da água subterrânea que se infiltra, e entra em contato com a pluma de contaminação de hidrocarbonetos livres;
3. Contato direto entre a pluma de contaminação e lençol subterrâneo.

Para o autor, a concentração de hidrocarbonetos dissolvidos e a transferência para a água subterrânea dependem de alguns fatores, como por exemplo: profundidade do lençol freático, condutividade hidráulica do solo, valores de recarga pluviométrica, flutuações no lençol freático, velocidade da água subterrânea, solubilidade do produto, temperatura da água e concentração destes compostos dentro da fase de hidrocarboneto residual. Os processos de advecção e dispersão hidrodinâmica controlam o movimento dos NAPLs em fase dissolvida na água subterrânea. Os fatores que mais interferem no processo de dissolução são solubilidade e grau de mistura entre as fases (NADIM et al., op. cit.).

Fase vapor

Os hidrocarbonetos em fase vapor resultam principalmente da volatilização dos hidrocarbonetos em fase sorvida presentes na zona não saturada. Os hidrocarbonetos nesta fase, também, podem se volatilizar a partir de hidrocarbonetos residuais em fase sorvida e, numa escala menor, a partir de hidrocarbonetos em fase livre e/ou fase dissolvida presente na água do solo (PENNER, 2005).

A migração de vapor na subsuperfície é controlada por vários parâmetros (GUIGUER, op. cit.), tais como:

1. Propriedades físicas e químicas do produto liberado (pressão de vapor, solubilidade, concentração, densidade e viscosidade);

2. Propriedades hidrogeológicas (condutividade hidráulica, profundidade da água subterrânea, direção do fluxo subterrâneo, temperatura da água, porosidade e conteúdo de água);
3. Outros (pressão barométrica, duração e intensidade de precipitação pluviométrica e estruturas feitas pelo homem).

Fase adsorvida

A camada de solo com condutividade hidráulica baixa promove espalhamento horizontal dos NAPLs em fase líquida na camada do solo sobrejacente com condutividade hidráulica maior. Fluidos em movimento descendente podem se acumular acima dessa camada com baixa condutividade. Ao cessar o movimento vertical, seja pela presença de uma camada de condutividade muito baixa ou por se atingir o nível d'água, o produto que ficou retido na superfície do grão é denominado de fase adsorvida.

Fase separada

Em um derramamento de LNAPL no solo, quando o produto atinge a zona saturada, passa a flutuar sobre o nível d'água ou franja capilar, por possuir densidade menor que a da água e por ser imiscível. Portanto, esta fase é denominada de fase livre. Em contrapartida, em um derramamento de DNAPL em solo, este passará a migrar verticalmente até encontrar uma camada de baixa condutividade hidráulica ou impermeável. Nesse momento o DNAPL passa a fluir lateralmente.

O movimento vertical do nível d'água afeta a presença de produto livre e a distribuição do produto residual nas zonas saturada e não saturada. O movimento descendente resulta em hidrocarbonetos residuais presos ao solo na zona não saturada, enquanto que o movimento ascendente resulta em um aparente desaparecimento do produto livre, no momento em que uma nova fase residual é desenvolvida. Quando o nível da água volta ao normal, esta fase residual pode ser remobilizada e produz novamente a fase livre. A remobilização pode ser confundida com um novo vazamento quando, na verdade, trata-se do mesmo vazamento (OLIVEIRA, 1992). Portanto, se a fase residual não for removida, agirá como fonte permanente de contaminação para a água subterrânea.

2.3 ATENUAÇÃO NATURAL

A atenuação natural de contaminantes consiste de um conjunto de processos (físicos, químicos e biológicos) que ocorrem naturalmente em uma área contaminada e, portanto, resultam na degradação, diluição e dispersão de contaminantes no solo e na água subterrânea.

A biodegradação é a forma de degradação de hidrocarbonetos por ação de microorganismos (fungos e bactérias), causando a redução de massa e toxicidade dos compostos em subsuperfície. A eficiência deste processo dependerá dos seguintes fatores: presença de receptores de elétrons; condições adequadas de pH, Eh, temperatura e umidade; nutrientes; aeração; composição química do contaminante; concentração e toxicidade do contaminante; densidade microbiana; salinidade e capacidade metabólica dos microorganismos (MOREIRA et al, 2006; BAESSA, 2007). A ausência de nutrientes e/ou receptores de elétrons limitam o processo natural. Existem situações, onde o processo de biodegradação ocorre apenas nas zonas periféricas da pluma de contaminação, devido à elevada concentração de contaminantes que torna o meio extremamente hostil à proliferação de microorganismos (MOREIRA et. al., op. cit.)

De acordo com Moreira (2005), a biodegradação de hidrocarbonetos é predominantemente uma reação de oxi-redução. O hidrocarboneto é oxidado (doa elétrons) e um receptor elétrico é reduzido (recebe elétrons). Bactérias aeróbicas utilizam o oxigênio (O_2) como receptor de elétrons, neste caso, os microorganismos utilizam o oxigênio para oxidar o composto orgânico a dióxido de carbono (CO_2). O oxigênio é o receptor elétrico que fornece o maior rendimento energético em reações aeróbicas. Na ausência de oxigênio, em condições anaeróbicas, os receptores elétricos utilizados são o nitrato (NO_3^-), manganês (Mn^{4+}), ferro (Fe^{3+}), sulfato (SO_4^{2-}) e dióxido de carbono (CO_2). O uso de um determinado receptor elétrico é condicionado a sua disponibilidade no ambiente e, principalmente, pelo teor de oxigênio dissolvido.

Para o autor, durante a biodegradação, as bactérias oxidam os hidrocarbonetos aromáticos, quebrando suas cadeias, resultando na produção de ácidos pirúvico, succínico, fumárico e acético, e aldeídos, sendo utilizados por microorganismos na síntese de constituintes celulares e na produção de energia. Como resultado, os produtos finais destas reações são: dióxido de carbono e água.

Embora as reações que utilizam oxigênio serem termodinamicamente mais favoráveis, as concentrações de oxigênio tendem a diminuir, podendo chegar à zero em função da população, portanto, do aumento da taxa de respiração dos microorganismos. Como resultados, iniciam-se as reações de degradação em ambientes anaeróbicos (DUARTE, K., 2003). Neste ambiente as reações dependem dos microorganismos presentes, do pH e do potencial redox (Eh). Termodinamicamente, a ordem de ocorrência é redução de nitrato > redução de manganês > redução de ferro > redução de sulfato > metanogênese. A **Figura 2.3** mostra um desenho esquemático de zonas de biodegradação de uma pluma de contaminação de hidrocarboneto.

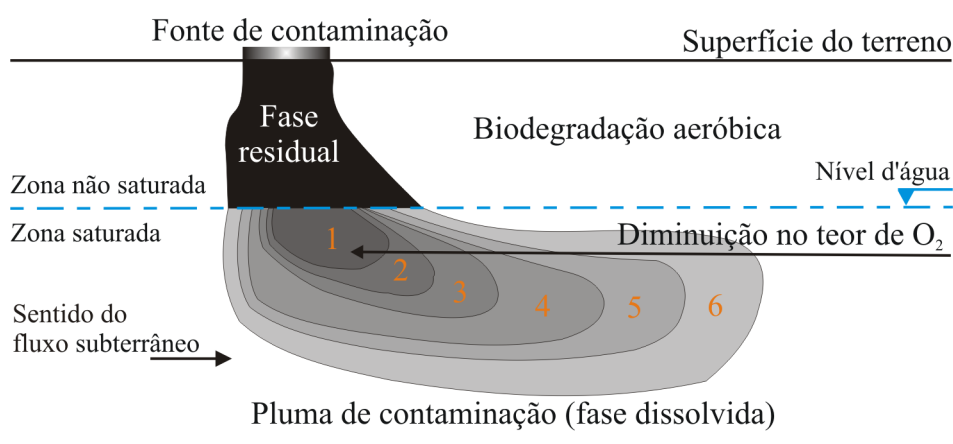


Figura 2.3 - Desenho esquemático de zonas de biodegradação de uma pluma de contaminação de hidrocarboneto. (1) Metanogênese. (2) Redução de Sulfato. (3) Redução de Ferro. (4) Redução de Manganês. (5) Redução de Nitrato. (6) Biodegradação aeróbica.

2.3.1 Efeitos da biodegradação nas propriedades elétricas

Locais contaminados por LNAPL são raramente derrames recentes. A alteração física e química de sedimentos contaminados por hidrocarbonetos, devido à ação de microorganismos, é amplamente relatada na literatura geoquímica e microbiológica. De acordo com Cozzarelli et al. (1990), em seus estudos geoquímicos de sítios contaminados por hidrocarbonetos sugerem que o maior produto metabólico da biodegradação de hidrocarbonetos são os ácidos orgânicos voláteis e carbônicos. Investigações geoeletricas em locais com derrames antigos de hidrocarbonetos, mostram anomalias condutivas coincidentes com as zonas de contaminação de hidrocarbonetos (SAUCK et al., 1998, ATEKWANA et al.,

2000; WERKEMA Jr. et al., 2003; BRAGA e CARDINALI, 2005; ALLEN et al., 2007; BAESSA, 2007). Outros trabalhos mostram que as anomalias condutivas são coincidentes com a atenuação do sinal eletromagnético do GPR, em locais com contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície (BERMEJO et al., 1997; ATEKWANA et al., op. cit.; BORGES et al., 2006; MOREIRA e DOURADO, 2007).

Para Sauck (2000), os três fatores ou processos fundamentais que afetam as propriedades e comportamento de hidrocarbonetos nas várias zonas em subsuperfície são:

1. Produção de ácidos orgânicos e carbônicos durante a biodegradação;
2. Dissolução dos sais do solo natural;
3. A natureza do contaminante livre.

O autor propôs um modelo para resposta geelétrica que trata derrames de hidrocarbonetos como sistemas dinâmicos e variáveis dominado por baixas resistividades, onde foram delimitadas seis zonas (**Figura 2.4**), descritas a seguir:

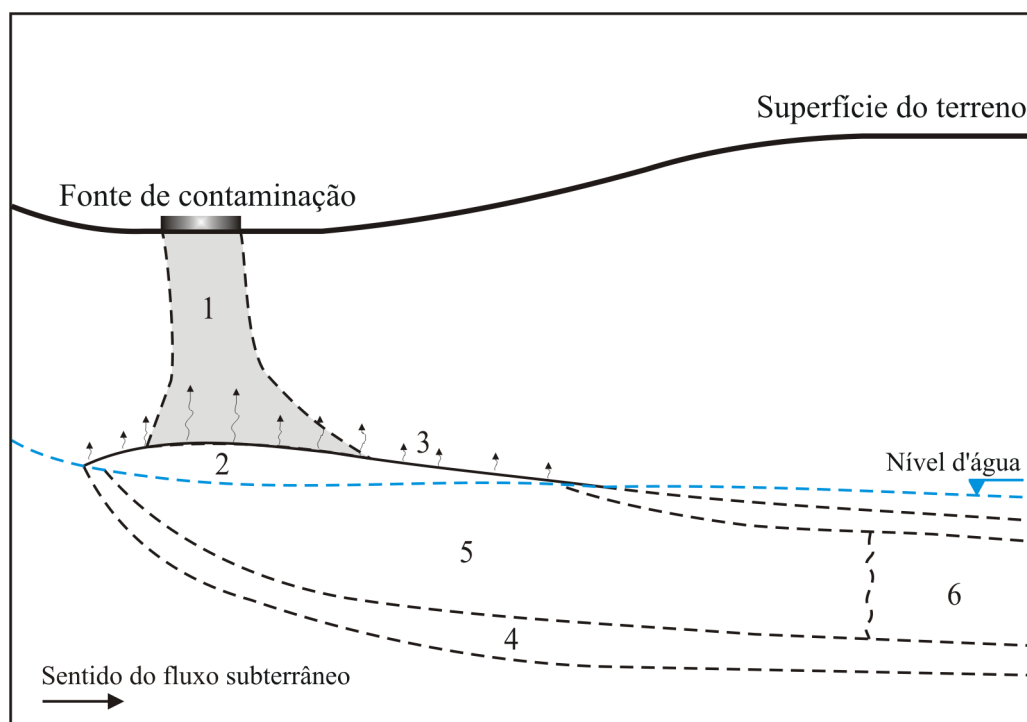


Figura 2.4 – Desenho esquemático das zonas definidas em um derrame de NAPL. (1) Zona vadosa diretamente abaixo do derrame. (2) Produto livre e residual. (3) Zona vadosa diretamente acima do produto livre/residual. (4) Franja reativa ao redor da pluma dissolvida. (5) Núcleo anaeróbico da pluma dissolvida. (6) Zona distante da pluma dissolvida (modificado de Sauck, op. cit.).

Zona 1: zona vadosa diretamente abaixo do derrame

Nesta zona, devido ao contato mínimo entre o derrame e o sedimento, tem-se um efeito negligenciável na resposta da resistividade. Entretanto, este derrame que cobre a área superficial, irá contaminar um volume grande da zona vadosa por produto residual de hidrocarbonetos. Temporariamente, isso pode elevar a resistividade elétrica. O volume de sedimentos contaminados na zona vadosa pode ser calculado com o produto da área superficial x a profundidade do nível d'água. Após o início da biodegradação, essa zona desenvolve uma resistividade menor do que a zona vadosa não contaminada circundante, devido à presença de íons lixiviados dos sedimentos. A resistividade diminuirá nesta zona em função do volume de ácidos orgânicos produzidos, do volume dos sedimentos molhados por soluções ácidas, da disponibilidade ou abundância das espécies minerais lixiviáveis, do tempo requerido para o lixiviado migrar para o aquífero e da quantidade de retenção do lixiviado por zonas silte-argilosas dentro da zona vadosa. O grau de diminuição da resistividade é também relativo à resistividade de *background* da zona vadosa. Enfim, esta zona é a responsável, principalmente, pelas variações da resposta geoeétrica ao longo do tempo, mudando de resistiva para condutiva.

Zona 2: produto livre (móvel) e produto residual

Esta zona terá propriedades bastante variáveis dependendo da espessura da seção impactada pelo produto livre. Alguns derrames acumulam o produto livre por vários metros de espessura, embora outros possuem somente uma fina lente de produto ou descontinuidades remanescente de produto residual. O segundo pode ser o caso após o início de remediação por extração física do produto móvel de poços. O produto livre e algum produto residual será lixiviado verticalmente com a variação do nível d'água. Esta zona nunca é uma camada completamente saturada com hidrocarbonetos, que é misturado com água e ar. Com um fornecimento de água oxigenada infiltrando pela superfície, esta zona tem condições ótimas para as reações microbiológicas, portanto, da produção de percolado condutivo. Em síntese, esta zona é caracterizada pela presença de produto livre inicialmente resistivo que ao longo do tempo muda para condutivo. Este fato ocorre devido à formação de biosurfactantes e biofilmes na porção superior da fase livre, que afetam a resposta geoeétrica do meio, pela atividade microbiana.

Zona 3: zona vadosa diretamente acima do produto livre/residual

O volume da zona vadosa acima do produto livre e residual (Zona 2) será sujeito a quantidades variáveis de elevação de vapores de hidrocarbonetos, produzidos em parte pela simples desvolatilização do produto original. A metabolização do hidrocarboneto por microorganismos produzirá moléculas de hidrocarbonetos mais simples, sendo algumas voláteis. A abundância de vapores originados pela desvolatilização dependerá da composição original do material de derrame, após o período de tempo decorrido do derrame, e da posição longitudinal ao longo da pluma do produto livre. A quantidade de vapores originados da biodegradação é uma medida da atividade biológica. Esta zona inclui toda a Zona 1, além de qualquer volume acima da pluma de produto livre migrado. Enquanto as Zonas 1 e 3 coincidirem ou se sobreporem, o mecanismo de diminuição de resistividade na Zona 1 (produção de percolado) deve predominar sobre mecanismo de aumento de resistividade devido ao efeito vapor da Zona 3. Então, esta zona é caracterizada pela volatilização dos compostos voláteis localizados na Zona 2, ocasionando um pequeno aumento da resistividade pelos gases provenientes do produto da zona vadosa.

Zona 4: franja reativa ao redor da pluma dissolvida

Esta zona de transição entre condições aeróbicas e anaeróbicas aparentemente tem um volume relativamente pequeno e não contribuirá significativamente na quantidade dos STD para o aquífero. Embora seja uma zona geoquímica de grande importância, não influencia fortemente a resistividade.

Zona 5: núcleo anaeróbico da pluma dissolvida

Como a solubilidade da maioria dos LNAPLs na água é pequena, o núcleo anaeróbico da pluma dissolvida não contém uma grande quantidade de hidrocarbonetos. Desta forma, a capacidade para a produção de percolado é muito menor do que nas zonas aeróbicas, e esta zona somente contribui com uma quantidade desprezível dos STD para a pluma. Enquanto a pluma de contaminação reside quase que inteiramente dentro da parte superior da zona aeróbica, os sólidos dissolvidos não são derivados da zona anaeróbica, mas das Zonas 1 a 3. Nesta zona ocorre diminuição da resistividade devido à presença dos STD.

Zona 6: zona distante da pluma dissolvida

Conforme o núcleo da pluma dissolvida, com sua carga excessiva dos STD, gradualmente reencontra condições aeróbicas em locais mais distantes no sentido do fluxo subterrâneo, onde iniciará a precipitar minerais (como por exemplo, calcita e quartzo) como revestimentos de grãos ou cimento entre os grãos. Este processo não ocorrerá para cada mineral no mesmo ponto ao longo da pluma, mais irá variar com a estabilidade de diferentes espécies de íons, tal como com as condições de pH e Eh local. Se continuado por um tempo suficiente, uma zona de porosidade reduzida pode ser produzida, cujo efeito seria o aumento da resistividade elétrica. Desta maneira, muitos, mas não necessariamente todos os íons dissolvidos dos sedimentos das Zonas 1, 2, 4 e 5 seriam transportados e precipitados na Zona 6. Se o derrame for episódico, com o volume de hidrocarboneto variável com o tempo, a localização horizontal da Zona 6 pode flutuar, prolongando-se mais na direção distal após grandes entradas, e contraindo-se na direção proximal após pequenas entradas do contaminante. O efeito geométrico disso deve ser um aumento da resistividade que está relacionado à diminuição de porosidade, assim como à diminuição do conteúdo iônico da água subterrânea. Se a pluma dissolvida, também, possuir quantidade considerável de ferro mobilizado, existe a possibilidade de deposição de magnetita ou maghemita na Zona 6, gerando uma anomalia magnética sutil. Face ao exposto, esta zona é caracterizada pelo aumento da resistividade devido à precipitação de íons.

CAPÍTULO 3

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada próximo ao km 334 da Rodovia Alexandre Balbo (SP-328), Município de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. As divisas são: ao sul e a leste com o terreno do senhor Welton Tadeu de Bortoli, ao norte com o terreno do senhor Dalton Melo Reis e a oeste com a destilaria Galo Bravo. A localidade é conhecida pelo nome Córrego do Campo (ROSSELI, 1995). A **Figura 3.1** mostra a localização da área de estudo e a **Figura 3.2** mostra a fotografia aérea desta área.

3.2 HISTÓRICO DA DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO

O local deste estudo foi receptor de resíduos de óleo lubrificante desde meados da década de 70 até o ano de 1995. Antes desta década, os resíduos eram lançados em rios. Os resíduos foram dispostos em 4 cavas com dimensões aproximadas de 41 a 49 metros de comprimento, 24 a 36 metros de largura e profundidade média de 6 metros, perfazendo um volume total de 25.000 m³. As cavas não receberam nenhum tipo de impermeabilização e foram recobertas por solo após anos de recepção de resíduo.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

O resíduo de óleo lubrificante disposto nas cavas é caracterizado por um material de cor preta acinzentado, pastoso, com densidade absoluta média de 1.1095 kg/mL (**Figura 3.3**). O óleo lubrificante é formado por uma composição orgânica (na maioria por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos-HPAs) e inorgânica (aditivos como: enxofre, nitrogênio e metais traços) (FREEMAN, 1998).

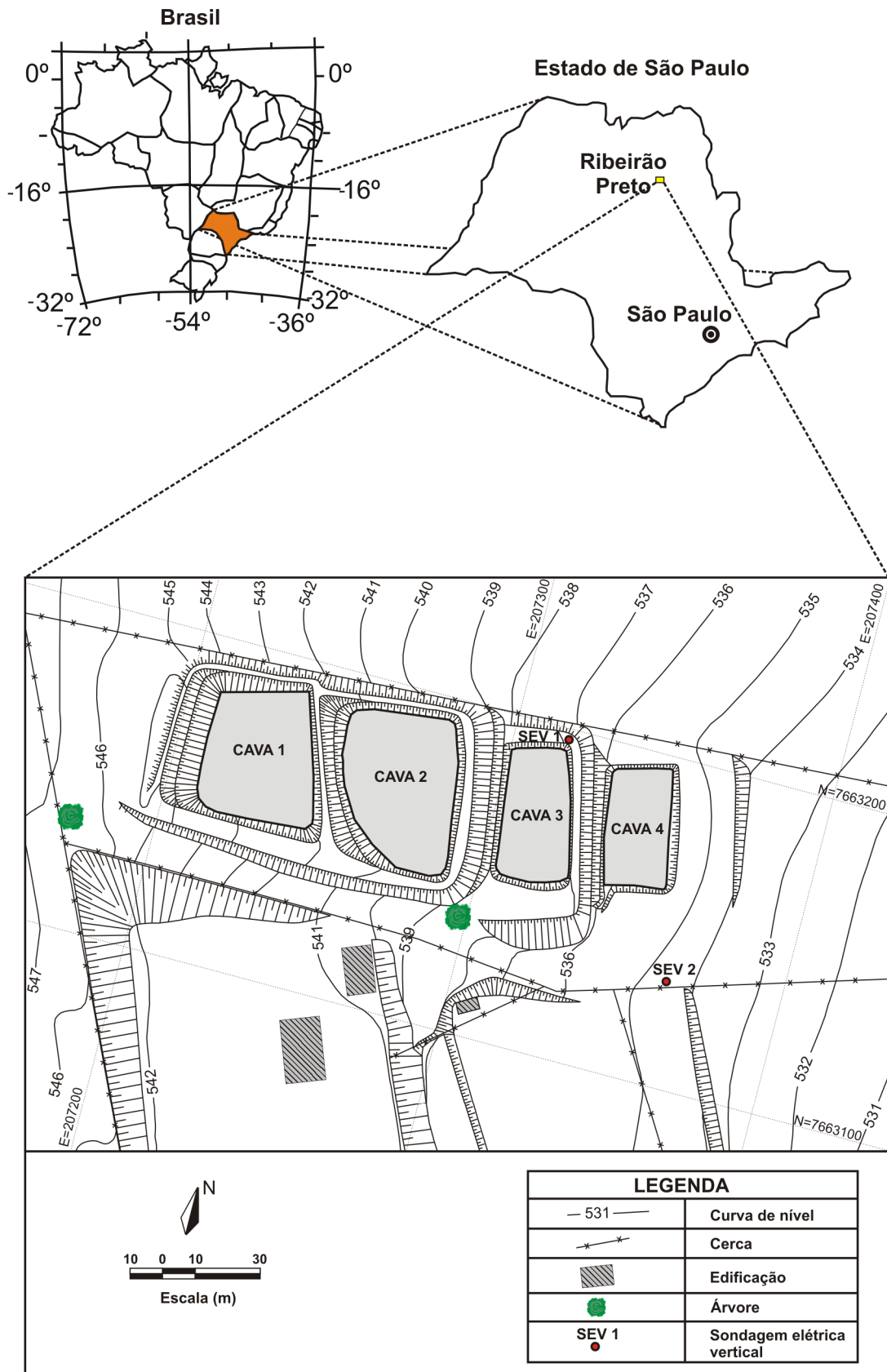


Figura 3.1 – Croqui de localização da área de estudo.



Figura 3.2 – Fotografia aérea da área de estudo.



Figura 3.3 – Resíduo de óleo lubrificante disposto nas cavas.

Os HPAs constituem uma classe de compostos que são liberados durante a combustão incompleta de material orgânico (FARIA e ROSA, 2004). Estes compostos são caracterizados por possuírem dois ou mais anéis aromáticos condensados.

Estudos em diversas matrizes ambientais como o efluente da combustão de carvão, a exaustão veicular, óleos lubrificantes, fumaça do cigarro, entre outras, têm demonstrado que os HPAs presentes nestas misturas são os principais responsáveis pelo seu potencial de toxicidade.

3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Paraná é uma bacia sedimentar, intracratônica ou sinéclise, que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana, e sua formação teve início a aproximadamente 400 milhões de anos, no Período Devoniano terminando no Cretáceo. A persistente subsidência na área de formação da bacia, embora de caráter oscilatório, possibilitou a acumulação de grande espessura de sedimentos, lavas basálticas e sills de diabásio, ultrapassando 5.000 metros na porção mais profunda. A consolidação e evolução final do embasamento da Bacia do Paraná ocorreram no Ciclo Tectono-magmático Brasileiro, entre o Pré-Cambriano Superior e o Eo-Paleozóico. Sua evolução se deu por fases de subsidência e soerguimento com erosão associada, no transcorrer das qual a sedimentação se processou em sub-bacias.

A reativação Wealdoniana que atuou em toda Bacia do Paraná no mesozóico pré-Bauru, ocasionou a reativação de falhas pré-cambrianas, gerando dois sistemas de falhas normais, formando desta maneira, um sistema de *horsts* e *grabens*. Os reflexos desta tectônica causaram o soerguimento das rochas mesozóicas do Grupo São Bento, expondo-as à erosão pré-Bauru. Em seguida, a superfície irregular foi aplainada devido a um período de intensa erosão. Sobre esta superfície quase regular, ocorreu a sedimentação do Grupo Bauru. Desta forma, a tectônica e evolução da área condicionaram, de maneira marcante, o potencial hídrico do Sistema Aquífero Botucatu (CAVAGUTI e SILVA, 1992).

A **Figura 3.4** mostra o mapa geológico da região de Ribeirão Preto-SP.

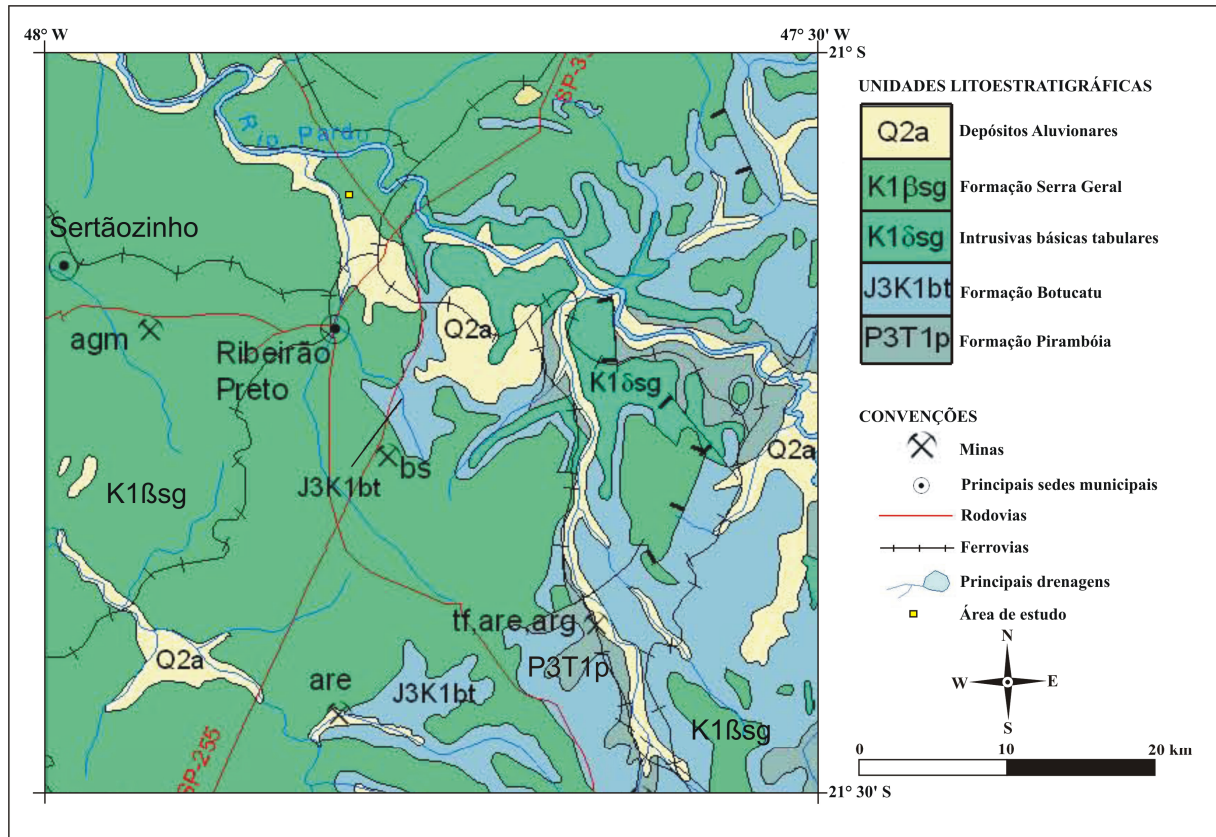


Figura 3.4 – Mapa geológico da região de Ribeirão Preto-SP (modificado da CPRM, 2006).

A área de estudo está representada por duas unidades geológicas distintas, a Formação Botucatu e a Formação Serra Geral.

A Formação Botucatu é representada por um pacote de arenitos vermelhos finos a médios, bem selecionados, de origem eólica. O contato superior pode ser abrupto com a Formação Serra Geral ou de maneira discordante com o Grupo Bauru (CAVAGUTI e SILVA, 1992). Esta Formação é a principal unidade do Aquífero Guarani, responsável pela maior parte do abastecimento da cidade de Ribeirão Preto. Na região, ocorre comumente recoberta por basaltos da Formação Serra Geral. Quando aflorante constitui uma zona de recarga do Aquífero Guarani (COSTA e FERREIRA, 1997).

A Formação Serra Geral é formada por derrames de lavas basálticas. Na parte basal, apresenta interdigitação com arenitos da Formação Botucatu. O contato superior ocorre com o Grupo Bauru de forma discordante (CAVAGUTI e SILVA, op. cit.). Os basaltos desta Formação são de textura fina, estrutura maciça a fraturada.

É comum a ocorrência de colúvio recobrindo os basaltos e arenitos na região. O colúvio é de origem silto-arenoso a silto-argiloso, apresentando coloração variando de roxa a

vermelha. São encontrados também nódulos ou crostas de lateritas inseridas no colúvio silto-arenoso. Sua origem pode estar relacionada ao intemperismo das rochas básicas da Formação Serra Geral e enriquecidas da fração arenosa pelo retrabalhamento de solos arenosos da Formação Botucatu na região (ROSSELI, 1995).

Solo residual de arenito da Formação Botucatu foi identificado a leste da área, através de furos de sondagem, em profundidade superior a 12 metros. Já a Formação Serra Geral é evidenciada na área por fragmentos e solo aluvionar de basalto (Argissolos). As sondagens mostraram uma camada de argila silto-arenosa de cor vermelha escura até a profundidade máxima de 6 metros, seguida por siltes muito argilosos provenientes da alteração do basalto (PENNER, 2005). Esta camada de colúvio superficial recobre as outras unidades. As relações entre essas unidades na área de estudo são visualizadas na **Figura 3.5**.

Dois aquíferos podem ser identificados: um superficial (cerca de 15 metros de profundidade) sustentado pelo solo residual menos permeável do basalto ocorre na parte oeste da área e o outro ocorre dentro dos materiais arenosos permeáveis, a 27 metros de profundidade.

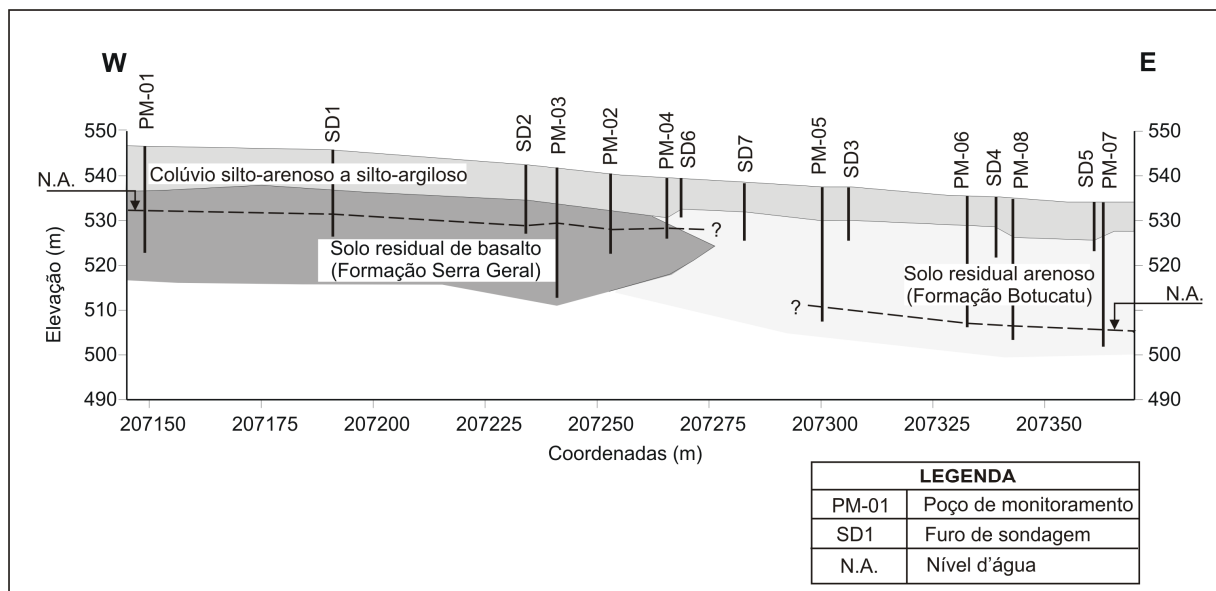


Figura 3.5 – Perfil E-W obtido através dos furos de sondagem e informações de poço.

3.5 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA ANTECEDENTE

Penner (2005) realizou duas Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) na área de estudo (**Figura 3.1**), com o objetivo de ter uma referência da profundidade da zona saturada. As SEVs forneceram informações sobre a profundidade do nível d'água e do posicionamento dos diversos materiais em subsuperfície.

A **Figura 3.6** mostra cinco camadas para o modelo geoeletrico da SEV 1. A camada 1 com 631 a 2052 ohm.m e 10 a 39 mV/V representa o aterro utilizado na borda da cava 3. A camada 2 com 2142 ohm.m e 23 mV/V representa a cobertura coluvionar do solo da região. A camada 3 com 101 ohm.m e 15 mV/V representa o solo residual de basalto. A camada 4 com 1016 ohm.m e 9 mV/V representa o arenito não saturado. A camada 5 com 63 ohm.m e 90 mV/V representa o arenito saturado.

A **Figura 3.7** mostra quatro camadas para o modelo geoeletrico da SEV 2. A camada 1 com 3059 ohm.m e 20 mV/V representa a cobertura coluvionar do solo da região. A camada 2 com 1118 ohm.m e 29 mV/V representa o solo residual arenoso. A camada 3 com 2295 ohm.m e 18 mV/V representa o arenito não saturado. A camada 4 com 93 ohm.m e 86 mV/V representa o arenito saturado.

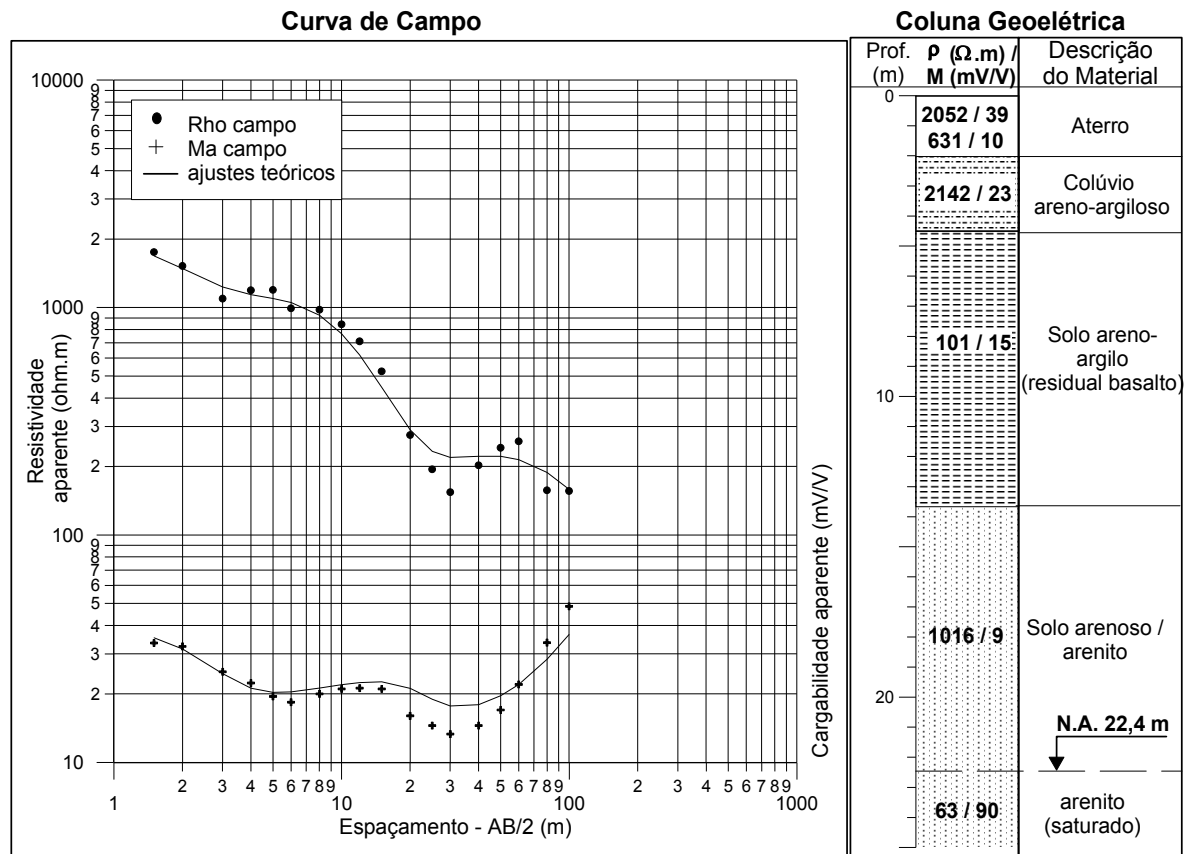


Figura 3.6 – Interpretação da SEV 1 (PENNER, 2005).

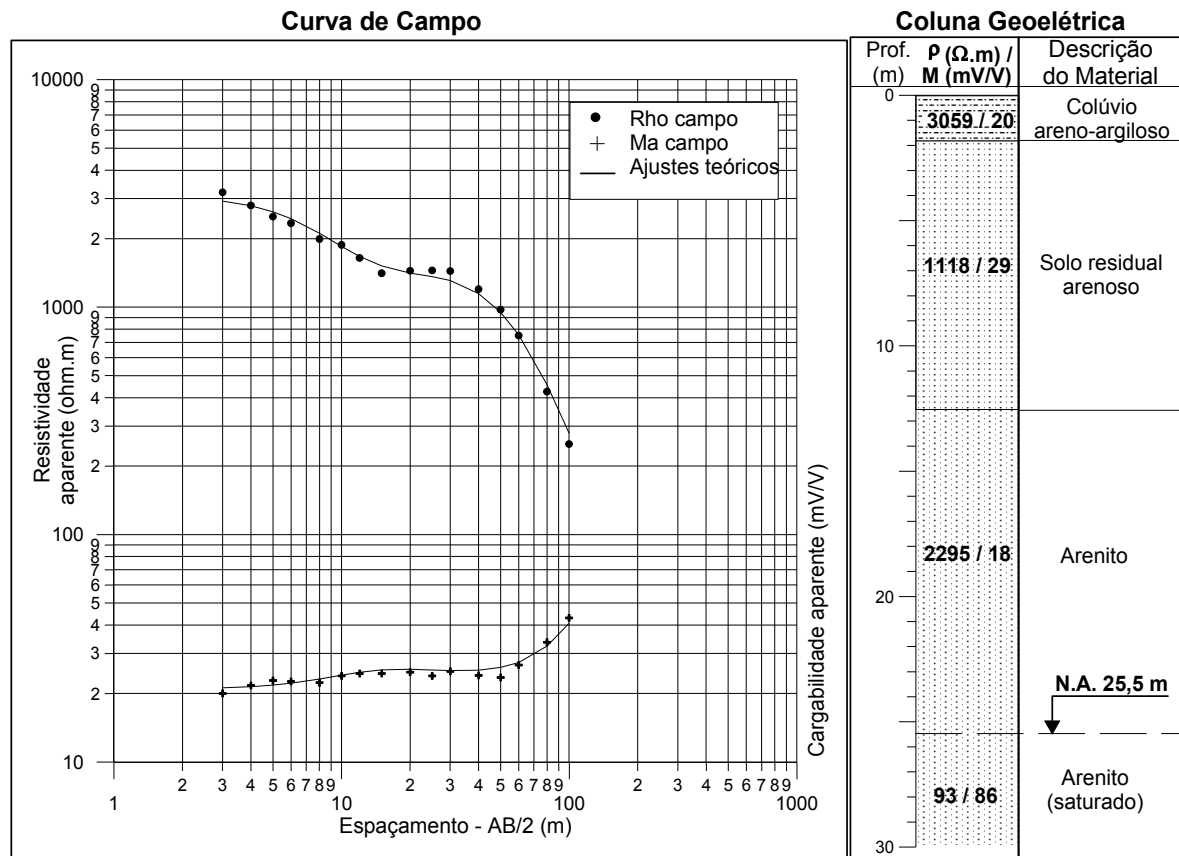


Figura 3.7 – Interpretação da SEV 2 (PENNER, 2005).

CAPÍTULO 4

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 ELETORRESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade tem sua origem no ano de 1920 devido ao trabalho dos irmãos Schlumberger (LOKE, 2004). As principais técnicas de investigação desse método são a sondagem elétrica vertical e o caminhamento elétrico; porém, somente a sondagem convencional foi utilizada até a década de 80, devido à limitação de processamento e interpretação quantitativa dos dados obtidos pela técnica de caminhamento elétrico. Este método é de fácil execução e baixo custo, e a propriedade física investigada é a resistividade elétrica ou o seu inverso, a condutividade elétrica. O objetivo desse método é determinar a distribuição da resistividade em subsuperfície a partir de medidas feitas na superfície do terreno.

De acordo com Borges (2007, p.91-92),

O método da eletrorresistividade é relativamente rápido, fácil de usar e normalmente, proporciona resultados satisfatórios. A medida de resistividade elétrica do solo, empregando diferentes arranjos de eletrodos, tem sido utilizada, geralmente, para identificar variações estratigráficas ou para localizar objetos cujas dimensões e profundidades oscilem entre metros até alguns quilômetros. O inconveniente deste método aparece quando se necessita de uma exploração detalhada, com grande resolução espacial. Em casos como este se faz necessária a aquisição de uma grande quantidade de dados que pode ser inviável, devido às restrições de tempo, mais do que às considerações técnicas. Recentemente, têm surgido sistemas automáticos de coleta de dados que podem acelerar os processos de medida e interpretação. Paralelamente, uma maior capacidade de cálculos pelos computadores tem permitido, nos últimos anos, a obtenção de imagens em duas ou três dimensões da distribuição real de resistividade do subsolo.

Dentro desse contexto o método da eletrorresistividade, seguramente, é o método geofísico mais utilizado, devido à possibilidade de aplicação nos diversos campos de estudo, como: mineração (GALLAS, 2000), geologia de engenharia (ELIS, 1993; BRAGA, 1997), hidrogeologia (CUTRIM et al., 2007; BRAGA, 2008), estudos ambientais (LIMA et al., 1995; PORSANI et al., 2004; GALLAS et al., 2005; FACHIN, 2006; LAGO et al., 2006) e estudos agrícolas (NASCIMENTO, 2008).

4.1.1 Propriedades elétricas dos materiais terrestres

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica, e pode ser definido como a resistência dos materiais em conduzir a corrente elétrica. A resistividade depende da natureza e do estado físico do material. Segundo Dobrin e Savit (1988), a resistividade pode ser definida como a resistência elétrica de um cilindro de seção transversal e comprimento igual à unidade. Para um corpo cilíndrico de um material homogêneo e condutor de comprimento L e seção transversal S , a resistividade deste corpo é dada pela **Eq. 4.1**:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (\text{Eq. 4.1}),$$

onde R é a resistência elétrica do corpo e sua unidade é ohm.m no Sistema Internacional de Unidades (SI).

A resistividade elétrica se relaciona aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais pela condução eletrônica e pela condução eletrolítica ou iônica. A condutividade eletrônica em solos e rochas pode ser devida à presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, e a condutividade eletrolítica devida ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

1. Composição mineralógica;
2. Porosidade;
3. Teor em água;
4. Quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água são os mais importantes. O aumento do valor do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos leva a uma diminuição dos valores de resistividade, permitindo a grande possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos. Devido a essa série de fatores, o parâmetro resistividade apresenta um largo intervalo de variação de valores. A resistividade elétrica de algumas rochas e materiais (ELIS, 1999; LOKE, 2004) é mostrada na **Figura 4.1**.

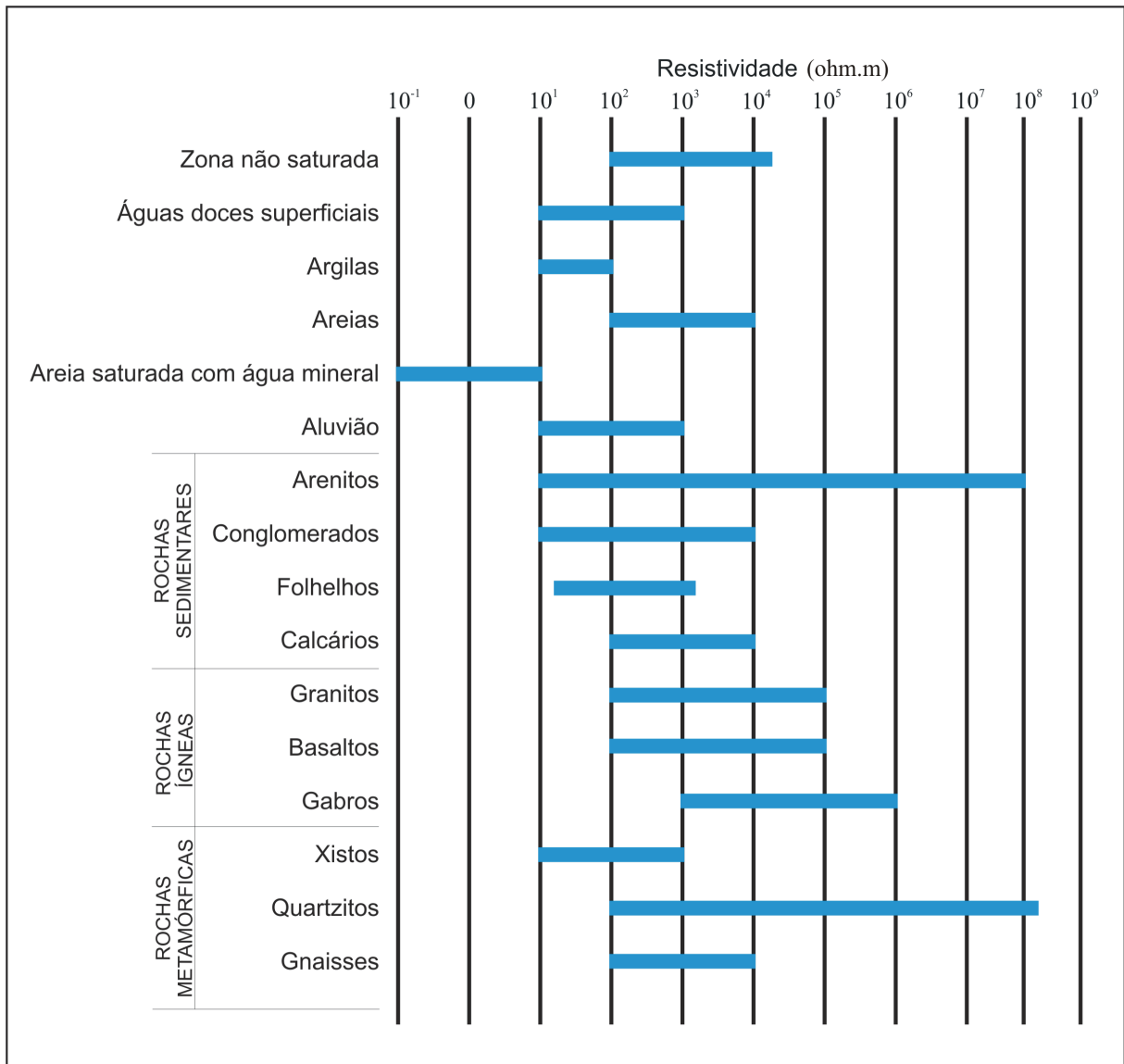


Figura 4.1 – Intervalos de valores de resistividade elétrica de algumas rochas e materiais (modificado ELIS, 1999 e LOKE, 2004).

Em geral, as rochas ígneas e metamórficas apresentam valores altos de resistividade. A resistividade destas rochas depende do grau de fraturamento^{4.1} e da quantidade de fraturas preenchidas com água. Por exemplo, se a rocha apresenta um alto grau de fraturamento, a água que circula através das fraturas, contendo sais minerais dissolvidos, diminuirá bastante a resistividade da rocha. Desta maneira, um mesmo tipo de rocha pode apresentar um intervalo grande de valores de resistividade.

As rochas sedimentares, que são geralmente mais porosas e tem conteúdo de água mais alto, geralmente apresentam valores de resistividade mais baixos em relação às rochas

^{4.1} O grau de fraturamento indica o número de discontinuidades por unidade litológica e por trecho de fraturamento homogêneo (<http://www.deinfra.sc.gov.br> acessado no dia 08/10/2008).

ígneas e metamórficas. Os valores de resistividade dependem da porosidade das rochas e da salinidade da água contida.

Os sedimentos não consolidados apresentam valores de resistividade mais baixos do que as rochas sedimentares. O valor da resistividade depende da porosidade e do conteúdo de argila. Normalmente, o solo argiloso apresenta um valor mais baixo de resistividade do que o solo arenoso.

A resistividade da água subterrânea varia de 10 a 100 ohm.m, dependendo da concentração de sais dissolvidos. A água do mar apresenta baixa resistividade devido ao alto conteúdo de sal. Essa condição permite a imensa possibilidade de aplicação do método no mapeamento da interface água doce e salgada em regiões costeiras (LOKE, 2004).

4.1.2 Teoria elementar

Em qualquer superfície esférica (S), a uma distância (r) da origem, a corrente flui radialmente. Considerando um semi-espaco, a corrente flui radialmente em uma semi-esfera, como mostra a **Figura 4.2**. Aplicando uma corrente elétrica (I) através de um eletrodo na superfície do semi-espaco, a corrente flui radialmente para fora através da semi-esfera de raio (r), e superfície $2\pi r^2$. Desta maneira, a densidade de corrente (\vec{J}) é a corrente (I) dividida pela área (A) em que a corrente está distribuída em uma semi-esfera ($A = 2\pi r^2$), e a densidade de corrente diminui com o aumento da distância da fonte de corrente. Portanto, a densidade de corrente para um eletrodo pontual no semi-espaco homogêneo é dada pela **Eq. 4.2**:

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

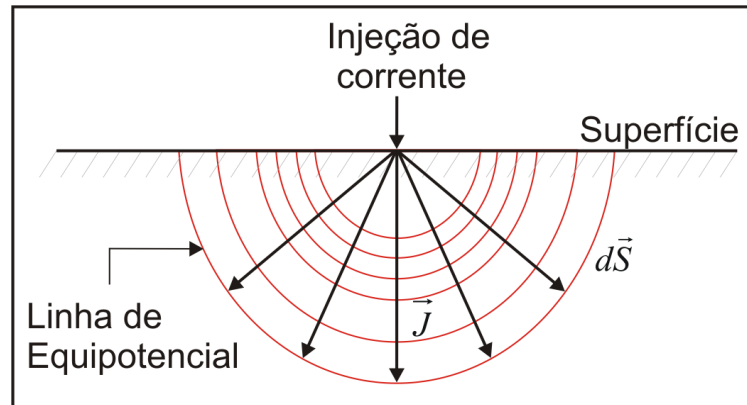


Figura 4.2 – Direção do fluxo de corrente no semi-espaço.

Se ρ é a resistividade homogênea e isotrópica, então podemos escrever a **Lei de Ohm**^{4.2} da seguinte forma:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4.3}),$$

onde E_r é o campo elétrico gerado por I .

O potencial elétrico V a uma distância r dos eletrodos é dado pela integral de E_r entre r e o infinito, como mostra a **Eq. 4.4**:

$$V = \int_r^{\infty} E_r dr = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Essa equação fornece a relação fundamental para todos os métodos de prospecção elétrica realizados na superfície da terra.

Se dois eletrodos de correntes de intensidade A ($+I$) e B ($-I$) são colocados na superfície de um sólido condutor nas posições C1 e C2 (**Figura 4.3**), os potenciais resultantes nos pontos M e N são dados pelas equações **4.5** e **4.6**:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] \quad (\text{Eq. 4.5}),$$

onde \overline{AM} é a distância entre C1 e P1 e \overline{MB} é a distância entre C2 e P1.

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \quad (\text{Eq. 4.6}),$$

^{4.2} Lei que estabelece que a tensão elétrica E nas extremidades de um resistor é igual ao produto da resistência R pela corrente I , ou seja: $E = RI$ (DUARTE, 2003).

onde \overline{AN} é a distância entre C1 e P2 e \overline{NB} é a distância entre C2 e P2.

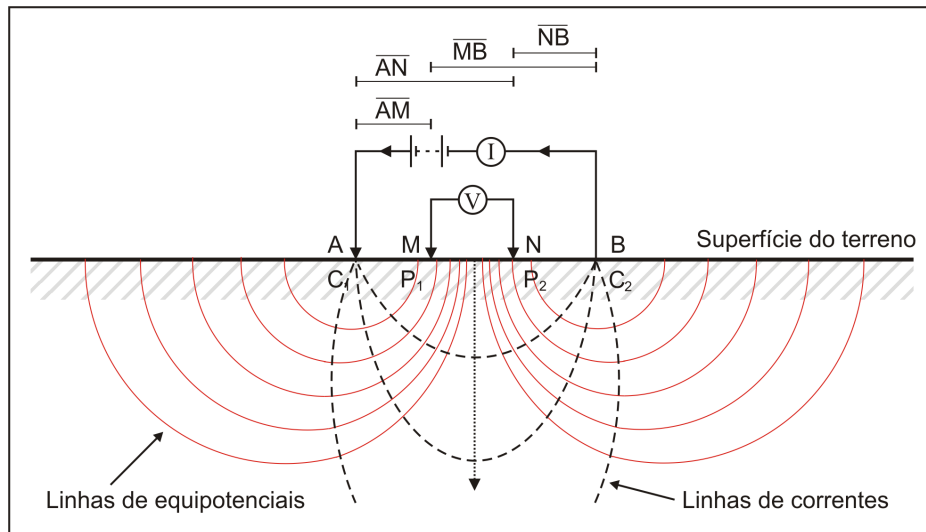


Figura 4.3 – Linhas, de fluxos de correntes e equipotenciais, para duas fontes pontuais (eletrodos) de corrente em um meio homogêneo.

Na prática, mede-se uma diferença de potencial ao invés de um potencial, de modo que para um arranjo de quatro eletrodos, tem-se a **Eq. 4.7**:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right] - \left[\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Reescrevendo a **Eq. 4.7** para que fique em função da resistividade elétrica, temos a resistividade do semi-espaco dada pela **Eq. 4.8**:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot K \quad (\text{Eq. 4.8}), \text{ onde:}$$

ρ = Resistividade elétrica (ohm.m);

K = Fator geométrico;

ΔV_{MN} = Diferença de potencial entre os eletrodos M e N;

I = Intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B.

O fator geométrico (K) depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado através da **Eq. 4.9**:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{NB}\right)} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Conceito de resistividade aparente

A resistividade real de um solo homogêneo isotrópico pode ser calculada pela **Eq. 4.8**. Entretanto, ao utilizar o mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio heterogêneo, a diferença de potencial observada (ΔV) será diferente da registrada sobre um meio homogêneo, pois o campo elétrico deverá sofrer modificações em função desta heterogeneidade do meio, que engloba o solo, a rocha subjacente, a influência do nível freático e de outras rochas intercaladas (no caso de um conjunto de rochas estratificadas).

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a resistividade medida é uma resistividade aparente (ρ_a), que varia com a posição e/ou direção do arranjo eletrodico. Cada medida de resistividade da subsuperfície é a resistividade aparente de um semi-espço homogêneo equivalente e não guarda nenhuma relação quantitativa absoluta com o valor da resistividade real. Ela reflete apenas as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou. Desta forma, rearrumando a **Eq. 4.8**, tem-se a resistividade aparente calculada pela **Eq. 4.10**:

$$\rho_a = \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot K \quad (\text{Eq. 4.10})$$

A resistividade aparente (ρ_a) é a variável que expressa os resultados das medidas no método da eletrorresistividade, e é a que se toma como base para a interpretação. Da mesma forma que a resistividade real sua unidade é ohm.m. As variações nas medidas de resistividade aparente são interpretadas como desvios em relação a um meio totalmente uniforme, em função da estratificação geolétrica do meio investigado.

“O conceito de resistividade aparente é de grande utilidade em aplicações práticas do método, pois é um parâmetro que pode apresentar variações ao longo de uma seção, sendo diagnóstico da presença de heterogeneidades elétricas resistivas ou condutivas [...]” (GANDOLFO, 2007, p.16).

4.1.3 Técnicas de aquisição de dados

Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aquisições de dados de campo. As técnicas de ensaios de campo mais comuns são: a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), o Caminhamento Elétrico (CE) e a Perfilagem Elétrica de Poço (PEP), dentro das quais existe uma grande variedade de configurações eletródicas possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade. A **Figura 4.4** mostra as principais técnicas de aquisição de dados pelo método da eletrorresistividade.

A Sondagem Elétrica Vertical é aplicada quando é desejada uma informação pontual, com observação da variação vertical do parâmetro físico (resistividade) em profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos de corrente. Nesta técnica, a resistividade muda somente com a profundidade e não muda na direção horizontal, sendo aplicada em algumas situações geológicas onde o modelo 1D é aproximadamente verdadeiro. Esta técnica é bastante abordada, de modo satisfatório, na literatura geofísica existente.

O Caminhamento Elétrico consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. De acordo com Elis (1999, p.82),

O caminhamento elétrico é aplicado em casos onde é importante a observação de variações laterais de resistividade, como por exemplo, na detecção de contatos geológicos laterais ou inclinados, mudanças de fácies ou estruturas, como falhas e fraturas, além da avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio fissurado, prospecção de areia e cascalho, e aplicações na prospecção de sulfetos.

A Perfilagem Elétrica de Poço é aplicada em investigações dentro de poços, ou seja, é um termo genérico usado para designar os perfis de poços que medem alguma propriedade elétrica da rocha (DUARTE, 2003).

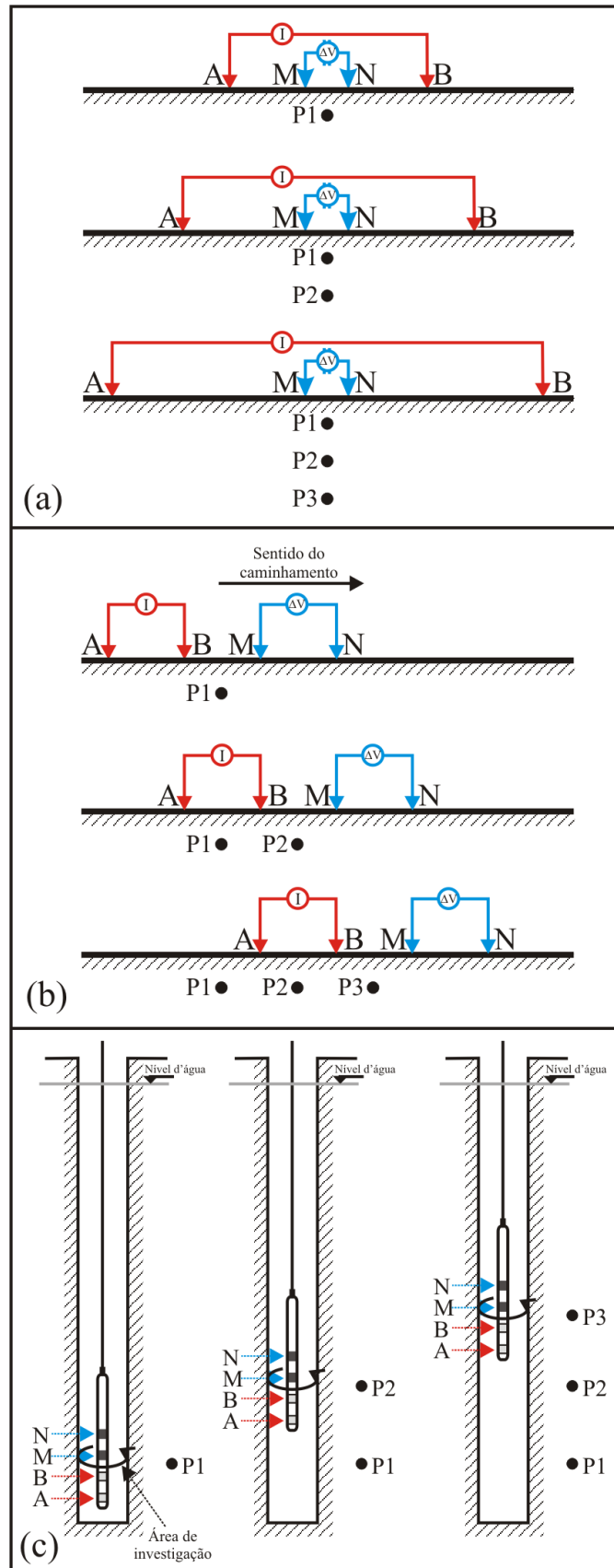


Figura 4.4 – Técnicas de aquisição de dados pelo método da eletrorresistividade. (a) Sondagem Elétrica Vertical – SEV. (b) Caminhamento Elétrico – CE. (c) Perfilagem Elétrica de Poço – PEP.

As medidas são geralmente realizadas com um arranjo de quatro eletrodos, sendo uma corrente elétrica artificial aplicada no terreno através de dois eletrodos (denominados A e B), e o potencial gerado é medido em outros dois eletrodos (denominados M e N), de modo a calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Os dispositivos eletródicos comumente utilizados pelo método da eletrorresistividade são Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente. Um resumo dos arranjos eletródicos mais utilizados em campo e seu fator geométrico é mostrado na **Figura 4.5**.

<p>Arranjo Wenner Alfa</p> <p>$k = 2 \pi a$</p>	<p>Arranjo Wenner Beta</p> <p>$k = 6 \pi a$</p>
<p>Arranjo Wenner Gama</p> <p>$k = 3 \pi a$</p>	<p>Arranjo Pólo-Pólo</p> <p>$k = 2 \pi a$</p>
<p>Arranjo Dipolo-Dipolo</p> <p>$k = \pi n(n+1)(n+2) a$</p>	<p>Arranjo Pólo-Dipolo</p> <p>$k = 2 \pi n(n+1) a$</p>
<p>Arranjo Wenner - Schlumberger</p> <p>$k = \pi n(n+1) a$</p>	<p>Arranjo Dipolo-Dipolo Equatorial</p> <p>$b = n a$ $k = (2 \pi b L)/(L - b)$ $L = (a \cdot a + b \cdot b)^{0.5}$</p>
<p>Arranjo Schlumberger</p> <p>$k = \frac{2 \pi b^2}{a} \left[1 - \frac{a^2}{4 b^2} \right] \quad b \geq 5 a$</p>	<p>$k =$ fator geométrico</p> <p> Eletrodo de corrente Eletrodo de potencial </p>

Figura 4.5 – Arranjos eletródicos mais utilizados em ensaios de campo pelo método da eletrorresistividade e seus fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004).

4.1.4 Aquisição 2D

Além da sondagem elétrica vertical (levantamento 1D), é possível investigar mudanças horizontais de resistividade, com a utilização da técnica de caminhamento elétrico (CE) para identificar variações em 2D de resistividade. No modelo 2D a resistividade muda na direção vertical, assim como na direção horizontal ao longo da linha do levantamento. Na teoria, um modelo de interpretação e levantamento 3D de resistividade é o mais ideal para representar a geologia do local investigado. “[...] No entanto, atualmente, o levantamento 2D possibilita um resultado prático, com um baixo custo financeiro, quando comparado com a investigação 3D” (BORGES, 2007, p.101-102).

A técnica de caminhamento elétrico - expressão de maior uso na literatura geofísica - é simplesmente a combinação de investigações verticais e laterais realizadas em um mesmo ensaio geofísico, denominada como *combined sounding and profiling* por Ward (1990). Na literatura especializada em geofísica são encontradas diversas terminologias para esta técnica, como por exemplo: *electrical profiling*, *electric trenching*, *electrical resistivity tomography*, *electrical imaging*, etc.

Dentre os termos usados em levantamentos 2D de resistividade, o que chama atenção é uso da expressão *electrical resistivity tomography*, usualmente utilizada na língua portuguesa como Tomografia Elétrica.

De acordo com Duarte (2003, p.245-246) a terminologia tomografia pode ser definida, dependendo de sua aplicabilidade, de duas maneiras:

Tomografia. 1. Método de imageamento do interior do corpo humano, feito com o auxílio de computador, a partir de uma multiplicidade de registros de raios X. 2. Em geofísica, designação que engloba todos os métodos de imageamento do interior da Terra, feitos com base no processamento de registros de um campo de energia. Dependendo da modalidade, o resultado final pode representar os efeitos de transmissão, absorção, reflexão ou refração. A idéia básica é a obtenção de uma imagem bidimensional correspondente a um plano ou fatia do corpo analisado.

A partir dessas definições, nota-se que o termo tomografia aplicado à geofísica apresenta um conceito próximo com o aplicado na área médica. Já Sheriff (2002) define tomografia com um método para determinar a distribuição de resistividades a partir de medidas feitas em furos de sondagens, utilizando transmissor e receptor. Face ao exposto, a terminologia tomografia utilizada na geofísica não pode ser conceitualmente um sinônimo de caminhamento elétrico, levando em consideração que esta técnica é executada na superfície e tomografia é um termo específico para os levantamentos realizados com furos de sondagens. Na presente pesquisa a nomenclatura utilizada será levantamento elétrico 2D.

Como visto anteriormente, o levantamento elétrico 2D consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Isso é obtido, ao se fixar um espaçamento de eletrodos e caminhar-se com os mesmos ao longo de perfis efetuando as medidas de resistividade aparente. O procedimento de campo consiste em manter constante o arranjo entre os eletrodos e medir a diferença de potencial (ΔV) gerada pela passagem da corrente (I) no terreno.

A escolha do melhor arranjo para um levantamento de campo depende do tipo da estrutura a ser mapeada, da sensibilidade do medidor de resistividade e do nível de ruído da área (LOKE, 2004). Segundo o autor, os arranjos comumente usados para levantamento elétrico 2D são Wenner, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger, pólo-pólo e pólo-dipolo e as características de um arranjo que devem ser consideradas são:

1. A profundidade de investigação;
2. A sensibilidade do arranjo para mudanças verticais e horizontais da resistividade em subsuperfície;
3. A cobertura horizontal dos dados;
4. A intensidade do sinal.

Dahlin e Zhou (2004) realizaram simulações numéricas para comparar a resolução e eficiência do levantamento elétrico 2D com dez arranjos eletródicos. Cinco modelos sintéticos foram utilizados, que refletem algumas estruturas geológicas como, por exemplo, canal enterrado, dique condutivo e resistivo, blocos mergulhando e cavas com resíduos. Os autores avaliaram as vantagens e limitações das configurações eletródicas, considerando a sensibilidade ao ruído e os efeitos de anomalia. Os resultados mostraram que os efeitos de anomalia para os diferentes arranjos variam com o modelo geológico. Após este estudo, os autores recomendam os arranjos gradiente, pólo-dipolo, dipolo-dipolo e Schlumberger para levantamento elétrico 2D, onde a escolha final deve ser determinada pela geologia local, objetivo do levantamento e considerações logísticas.

Arranjo Wenner

Este é um arranjo robusto que foi popularizado pelos trabalhos pioneiros com levantamento elétrico 2D realizado pelo grupo de pesquisa da Universidade de Birmingham (GRIFFITHS e TURNBULL, 1985; GRIFFITHS, TURNBULL e OLAYINKA, 1990 apud

LOKE, 2004). Em comparação com o arranjo Schlumberger, a diferença está na distância “a” entre os eletrodos de potencial e de corrente, que é a mesma para todas as medidas do ensaio. Na prática, a cada nova leitura todos os eletrodos são deslocados para uma distância “n” fator de “a”. Deste modo, obtém-se medidas em um mesmo nível de investigação. Para aumentar a profundidade, aumenta-se o espaçamento entre os eletrodos.

Dependendo da disposição entre os eletrodos de corrente e de potencial, o arranjo Wenner pode ser denominado alfa, beta e gama. O arranjo Wenner Alfa é, tecnicamente, o arranjo Wenner e apresenta a melhor razão sinal/ruído entre as três configurações. O arranjo Wenner Beta é de fato um caso especial do arranjo dipolo-dipolo para o primeiro nível de investigação, onde os espaçamentos entre os eletrodos são os mesmos. Já o arranjo Wenner Gama apresenta um arranjo relativamente incomum, onde os eletrodos de corrente e de potencial são intercalados.

Dentre os arranjos mais comuns, este é o arranjo que tem o sinal com intensidade mais forte, permitindo a utilização do arranjo em áreas com níveis de ruídos elevados. Uma desvantagem deste arranjo para levantamento elétrico 2D é a cobertura horizontal relativamente pobre com o aumento do espaçamento dos eletrodos. Isso poderia ser um problema, ao se usar um sistema com um número reduzido de eletrodos. Em geral, o arranjo Wenner é bom para identificar estruturas horizontais (camadas); porém, relativamente pobre em detectar estruturas verticais e estreitas, como por exemplo: diques e falhas.

Arranjo Dipolo-Dipolo

O levantamento elétrico 2D dipolo-dipolo foi utilizado na presente pesquisa. Este arranjo revela-se como um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo para ensaios de caminhamento elétrico. Uma de suas vantagens é o fato de ser um arranjo simétrico e, como resultado desta simetria, em uma interpretação qualitativa da pseudo-seção, o correto posicionamento de uma anomalia se torna mais fácil em relação ao arranjo pólo-dipolo (GANDOLFO e GALLAS, 2007). Segundo Ward (1990), o arranjo possui uma ótima resolução horizontal, sendo inferior somente para o arranjo gradiente neste quesito. Uma desvantagem deste arranjo é a perda de sinal recebido com o aumento do fator “n”, ou seja, quanto mais afastado estiverem os pares de eletrodos, menor será o sinal. A voltagem é inversamente proporcional ao cubo do fator “n” (LOKE, op. cit.). Em comparação ao arranjo

pólo-dipolo, sua principal desvantagem é a sua baixa razão sinal/ruído (GANDOLFO e GALLAS, 2007).

Com o arranjo dipolo-dipolo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos $X=AB=MN$. A profundidade de investigação cresce com o espaçamento (E), e teoricamente corresponde a $E/2$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas à intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° , como mostra a **Figura 4.6**. A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X, os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente (**Figura 4.7**).

Este arranjo é muito sensível às mudanças horizontais de resistividade, mas relativamente insensível às mudanças verticais, ou seja, é bom para identificar estruturas verticais (diques e cavidades); entretanto, relativamente ruim em detectar estruturas horizontais (sills ou camadas sedimentares).

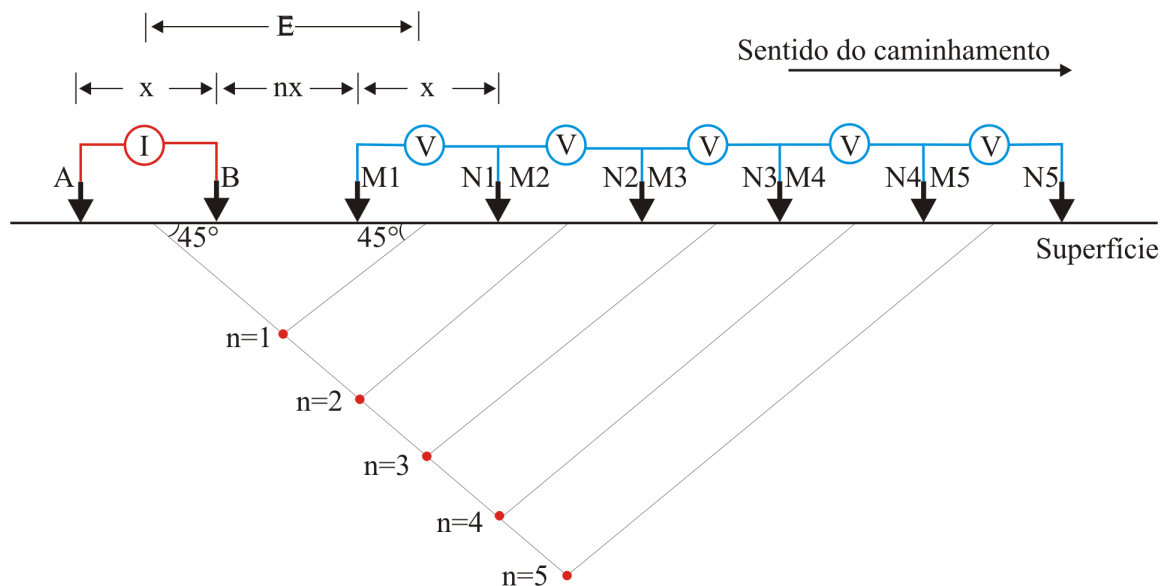


Figura 4.6 – Arranjo dipolo-dipolo com cinco níveis de investigação em profundidade.

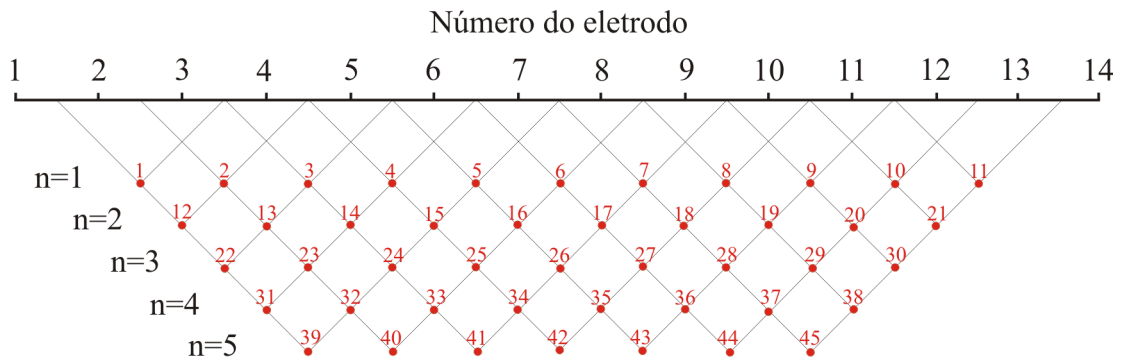


Figura 4.7 – Forma de plotagem do arranjo dipolo-dipolo e a seqüência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Arranjo Wenner-Schlumberger

O arranjo Wenner-Schlumberger é um arranjo híbrido, que resultou da combinação entre os arranjos Wenner e Schlumberger. Sua configuração eletródica apresenta o par de eletrodos de potencial no centro e os eletrodos de corrente nas extremidades, sendo o espaçamento entre os eletrodos $AM=BN$ um fator “n” do espaçamento “a” entre os eletrodos MN. Depois de realizadas as leituras no primeiro nível de investigação ($n=1$), para se investigar níveis mais inferiores, aumenta-se o fator “n”. O sinal deste arranjo é menor do que o arranjo Wenner; porém, é superior ao do arranjo dipolo-dipolo.

Arranjo Pólo-Pólo

Este arranjo eletródico não é normalmente usado como os arranjos Wenner, dipolo-dipolo e Schlumberger. Na prática o arranjo pólo-pólo ideal, com apenas um eletrodo de corrente e um de potencial, não existe.

Os pares de eletrodos de corrente e de potencial ficam a uma distância “a” e os eletrodos mais externos de cada par ficam a uma distância tendendo a infinito. A distância dos eletrodos mais externos é superior a vinte vezes à distância “a” (LOKE, 2004).

A principal vantagem desse arranjo é a possibilidade de ser alcançado vários níveis de investigação, devido a sua elevada razão sinal/ruído, levando em consideração sua geometria (GANDOLFO, 2007). Este arranjo é, principalmente, utilizado em levantamentos com espaçamento entre os eletrodos relativamente pequenos, como, por exemplo, aplicado em estudos arqueológicos.

Arranjo Pólo-Dipolo

O arranjo pólo-dipolo apresenta cobertura horizontal relativamente boa, e tem uma melhor razão sinal/ruído comparado com o arranjo dipolo-dipolo, e não é sensível a ruído telúrico como no arranjo pólo-pólo. Ao contrário dos outros arranjos comuns, o arranjo pólo-dipolo é um arranjo assimétrico. Esta assimetria é a principal desvantagem deste arranjo. Sobre estruturas simétricas as anomalias de resistividade aparente na pseudo-seção são assimétricas. Em algumas situações, a assimetria nos valores de resistividade aparente medido pode influenciar o modelo obtido após a inversão. “[...] Outra desvantagem está na indisponibilidade, em determinados locais, de espaço para a instalação do eletrodo de corrente a ser posicionado no infinito” (GANDOLFO e GALLAS, 2007, p.231).

Esse dispositivo é constituído por três eletrodos móveis B, M e N, sendo o eletrodo A mantido fixo e situado a uma distância do restante do arranjo de forma que sua influência nas medidas de resistividade aparente se torna desprezível. A distância entre os eletrodos de potencial MN é de “a”; a distância entre este par de eletrodos e o eletrodo de corrente B é “n” fator de “a”. É convencional mencionar que o eletrodo de corrente A está no infinito.

Profundidade de investigação

O conceito de profundidade de investigação foi introduzido por Schlumberger e Schlumberger (1932 apud BARKER, 1989), no artigo *Depth of investigation attainable by potential methods of electrical exploration* publicado na *Geophysical Prospecting*. Posteriormente, este conceito foi discutido por diversos autores. Dentre eles, destacam-se Evjen (1938), Roy e Apparao (1971), Roy (1972), Edwards (1977), Bhattacharya e Dutta (1982), Barker (op. cit.) e Ward (1990).

Conceitualmente, segundo Evjen (op. cit.), a profundidade de investigação é a profundidade onde metade da corrente total esteja localizada acima e abaixo exatamente da mesma, enfatizando que a penetração depende da distribuição das propriedades elétricas do meio com a profundidade.

Posteriormente, a profundidade de investigação característica - *Depth of Investigation Characteristic* (DIC) - foi definida como a profundidade em que uma fina camada horizontal contribui ao máximo para a totalidade do sinal medido na superfície de um terreno homogêneo (ROY e APPARAO, op. cit.). Este conceito, também, é proposto por Roy (op. cit.).

Edwards (1977) sugere uma profundidade efetiva de investigação mais útil e prática, definida como a média da DIC. Para o autor, a profundidade efetiva de investigação está relacionada com 50% do sinal medido em superfície. A **Tabela 4.1** apresenta os valores de profundidades efetivas do arranjo dipolo-dipolo propostas pelo autor.

Tabela 4.1 – Profundidades efetivas de investigação para o arranjo eletródico dipolo-dipolo (EDWARDS, op. cit.).

Arranjo	n	Z_e/a	Z_e/L
Dipolo-Dipolo	1	0,416	0,139
	2	0,697	0,174
	3	0,962	0,192
	4	1,220	0,203
	5	1,476	0,211
	6	1,730	0,216
	7	1,983	0,220
	8	2,236	0,224

Z_e = profundidade efetiva de investigação;

a = espaçamento entre os eletrodos;

L = distância entre os eletrodos posicionados nos extremos do arranjo.

Barker (1989), em seu estudo de um quadripolo simétrico em um semi-espaço homogêneo, com base nos estudos de Roy e Apparao (1971), Roy (1972) e Edwards (1977), definiu novos valores de profundidades de investigação para os arranjos Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo (**Tabela 4.2**).

Tabela 4.2 – Profundidades de investigação (BARKER, op. cit.).

Arranjo	Profundidade
Wenner	0,17L
Schlumberger	0,19L
Dipolo-Dipolo	0,25L

Segundo Ward (1990), a profundidade de investigação pode ser definida como a profundidade máxima, com que um dado corpo pode ser detectado, com um determinado

arranjo. A profundidade de investigação de uma determinada configuração eletródica, bem como a resolução do imageamento, não depende apenas do tamanho dos dipolos, mas também da geologia da área e do nível de ruído (DAHLIN e ZHOU, 2004).

Segundo Elis et al. (2008), a profundidade de investigação em ensaios de resistividade depende principalmente dos seguintes fatores:

1. Distribuição das resistividades em subsuperfície;
2. Razão sinal/ruído;
3. Efeito de coberturas;
4. Sensibilidade à heterogeneidades superficiais;
5. Topo rochoso;
6. Efeitos laterais;
7. Topografia.

Devido à complexidade do assunto, a profundidade de investigação no método da eletrorresistividade dificilmente é determinada com precisão, sem o conhecimento preciso das características do meio, sendo ainda necessário mais pesquisas e testes em várias situações.

4.1.5 Aquisição 3D

Embora as feições geológicas em subsuperfície sejam 3D por natureza, o levantamento 3D de resistividade é realizado raramente hoje em dia, quando comparado com as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. Além disso, teoricamente, o uso do modelo de interpretação 3D em uma aquisição 3D forneceria resultados mais precisos.

A principal razão para o uso não rotineiro de aquisição 3D é que o custo do levantamento é significativamente maior para um levantamento 3D de uma área que é suficientemente grande (LOKE, 2004). Gandolfo (2007) e Ustra (2008), também, consideram o custo e o tempo como os principais motivos para o pouco uso da aquisição 3D.

Para Gandolfo e Gallas (2005, p.192),

A baixa utilização das técnicas de eletrorresistividade 3D por parte do meio técnico-científico deve-se, em parte, ao enorme tempo gasto na aquisição dos dados, devido à grande quantidade de medidas necessárias para a execução do levantamento de campo e por tratar-se de uma técnica de aquisição ainda nova e pouco conhecida [...].

Os autores afirmam que a viabilidade do levantamento 3D, de forma a cobrir áreas grandes, seria possível com a utilização de sistemas multi-eletrodos e a aquisição automatizada, devido ao tempo gasto na tomada de medidas neste tipo de levantamento. Entretanto, a falta de equipamento de campo apropriado e a exigência de computadores mais potentes para o processamento dos dados, dificultam a execução do levantamento 3D (LOKE e BARKER, 1996).

Para um levantamento 3D os eletrodos são dispostos em uma malha quadrada com o mesmo espaçamento entre os eletrodos nas direções perpendiculares x e y. Porém, *grids* retangulares podem também ser utilizados para mapear corpos alongados com diferentes números de eletrodos e espaçamentos nas direções x e y (LOKE, 2004). Os arranjos pólo-pólo, pólo-dipolo e dipolo-dipolo podem ser utilizados em um levantamento 3D. De acordo com Loke (op. cit.) a configuração eletródica pólo-pólo é mais comumente utilizada nesse tipo de levantamento, onde o número máximo de medidas independentes (n_{\max}) que pode ser feito com n_e eletrodos (XU e NOEL, 1993 apud LOKE e BARKER, op. cit.), é dado pela **Eq. 4.10**:

$$n_{\max} = \frac{n_e(n_e - 1)}{2} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

A principal vantagem do arranjo pólo-pólo é a elevada razão sinal/ruído que o mesmo propicia. No entanto, o arranjo pólo-pólo apresenta duas desvantagens principais: 1) uma resolução muito pobre comparada a outros arranjos, onde estruturas subsuperficiais tendem a ser mascaradas no modelo final e 2) a necessidade de espaço físico para a colocação dos eletrodos no infinito.

No chamado recobrimento 3D completo, o pólo de corrente será utilizado para medidas em cada eletrodo de potencial. Devido à reciprocidade é necessário efetuar medidas de potencial somente nos eletrodos com índices maiores do que o eletrodo de corrente, como mostrado na **Figura 4.8**. Para um *grid* de 5 por 5 eletrodos, por exemplo, um conjunto de dados completo tem 300 pontos; enquanto que, para um *grid* de 7 por 7 eletrodos e 10 por 10 eletrodos, tem 1176 e 4500 pontos, respectivamente (LOKE, op. cit.). Isso requer um número imenso de medidas e, por conseguinte, um grande tempo de aquisição. Outra possibilidade é o chamado arranjo diagonal cruzado (LOKE e BARKER, op. cit.), no qual as medidas são feitas para os eletrodos de potencial posicionados na linha de ensaio, perpendicular a ela e a 45° destas (**Figura 4.9**). Este modo de aquisição reduz o número de medidas sem degradar a qualidade do modelo final obtido.

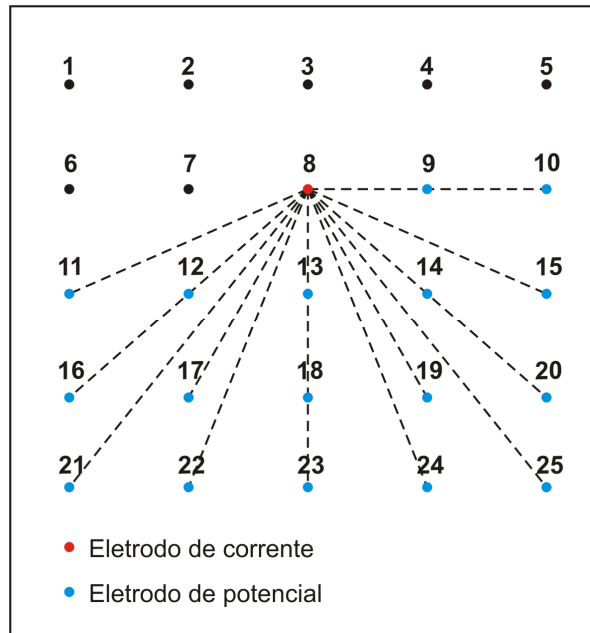


Figura 4.8 – Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D completo (modificado de LOKE e BARKER, 1996).

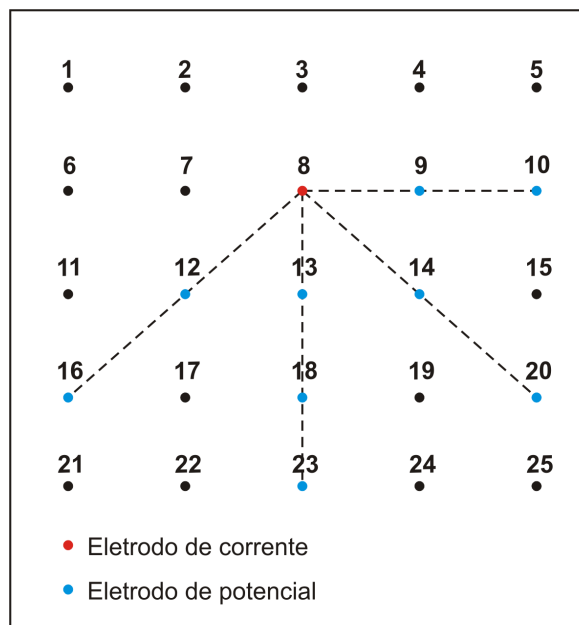


Figura 4.9 – Posição dos eletrodos de potencial correspondentes a um único eletrodo de corrente no arranjo 3D diagonal cruzado (modificado de LOKE e BARKER, op. cit.).

Gandolfo e Gallas (2005) realizaram um levantamento 3D de eletrorresistividade com o objetivo de comparar os resultados obtidos para as duas formas de aquisição descritas acima. Na aquisição dos dados foram utilizados 25 eletrodos dispostos em uma malha quadrada de 4m por 4m e espaçamento entre os eletrodos de 1m.

Gandolfo e Gallas (op. cit., p.198) afirmam que:

Utilizando os dois modos de aquisição propostos por Loke e Barker (1996), pode ser verificada a eficácia dos mesmos e a possibilidade de utilização de um modo de coleta dos dados mais expedito. **A comparação dos modelos obtidos com as duas distintas sistemáticas, demonstra a viabilidade de aquisição mais simplificada “cross-diagonal”, onde puderam ser alcançados resultados igualmente satisfatórios se comparados com os obtidos pelo levantamento 3D completo (grifo nosso).**

Na maioria dos casos, para o arranjo dipolo-dipolo, o conjunto de dados 3D é construído a partir de uma série de seções 2D paralelas e equi-espaciaadas, o que diminui o tempo de aquisição e torna a metodologia viável. O arranjo dipolo-dipolo é o mais sensível aos efeitos tridimensionais comparado com os outros arranjos comumente utilizados, devido ao padrão da sua função de sensibilidade^{4.3}.

Uma característica interessante é que a função de sensibilidade tende a ser alongada na direção y. Isto significa que o arranjo dipolo-dipolo é mais sensível a estruturas fora do seu eixo, quando comparado com os arranjos pólo-pólo e pólo-dipolo (LOKE, 2004). Essa característica é desfavorável para levantamentos 2D, mas pode ser uma vantagem em levantamentos 3D. Para o autor, o arranjo dipolo-dipolo pode, provavelmente, tolerar um espaçamento maior entre as linhas de levantamento (até aproximadamente três vezes o espaçamento entre os eletrodos) e, mesmo assim, conter informação 3D significativa.

Outra possibilidade de levantamento 3D é a técnica quasi 3D, tornando-se uma aplicação prática para uma série de levantamentos 2D, se as linhas paralelas forem muito espaçadas ou se as mesmas não forem paralelas, onde cada perfil 2D pode ser independentemente invertido e então combinado. (DAHLIN e LOKE, 1997 apud USTRA, 2008).

^{4.3} A função sensibilidade de um arranjo basicamente diz o grau com que uma mudança na resistividade de uma seção da subsuperfície influencia o potencial medido. Quanto maior o valor da função, maior a influência da região da subsuperfície na medida (USTRA, op. cit.).

Algoritmo de inversão 3D e conjunto de dados 3D

De acordo com Loke (2004) duas interessantes questões são levantadas: a definição de um algoritmo de inversão 3D e o que constitui um conjunto de dados 3D. Para o autor, a primeira é fácil de ser respondida, mas a segunda é menos clara.

Uma característica da definição de um algoritmo de inversão 3D é a variação dos valores de resistividade nas três direções (direções x,y, e z), sendo um contraste com as inversões 1D e 2D, onde os valores de resistividade em subsuperfície variam somente em uma direção e duas direções, respectivamente. Porém, o modelo construído a partir de uma série de inversões 2D ao longo de linhas paralelas não é um modelo de inversão 3D verdadeiro (LOKE, op. cit.). Segundo o autor, ainda não é possível se ter respostas claras para a definição de um conjunto de dados 3D.

Loke (op. cit.) propôs um sistema de classificação em ordem decrescente do conteúdo de informação tridimensional, para um levantamento com o arranjo pólo-pólo, listados a seguir:

Categoria 1 – um levantamento 3D ideal com os eletrodos posicionados em um *grid* retangular e com medidas em todas direções possíveis;

Categoria 2 – os eletrodos são posicionados em um *grid* retangular, com medidas ao longo de um número limitado de ângulos entre as linhas;

Categoria 3 – medidas feitas somente nas direções x e y ao longo das linhas do *grid*;

Categoria 4 – medidas feitas somente em uma direção (por exemplo, na direção x) ao longo de uma série de linhas de levantamentos 2D paralelas. Para este tipo de conjunto de dados, uma série de inversões 2D é primeiramente realizada. A inversão 3D é aplicada em um conjunto de dados combinados com os dados de todas as linhas dos levantamentos na tentativa de surgir uma nova informação em relação aos dados antigos. O sucesso de uma inversão 3D depende, em parte, do espaçamento entre as linhas e do tipo de arranjo utilizado.

Para o autor, a precisão dos modelos tridimensionais obtidos pelas aquisições de dados das categorias 3 e 4 é menor do que os modelos das categorias 1 e 2, e depende fortemente do espaçamento entre as linhas e do arranjo utilizado. Porém, mesmo para a categoria 4, os

resultados da inversão 3D devem fornecer uma indicação útil se os efeitos 3D são significantes.

4.1.6 Interpretação

As interpretações dos dados de caminhamento elétrico podem ser qualitativas e quantitativas. No caso da interpretação qualitativa, onde os valores de resistividade não são absolutos, tem-se como objetivo mostrar uma primeira análise ou aproximação da estrutura investigada em subsuperfície. Já na interpretação quantitativa, buscam-se parâmetros quantitativos do modelo.

Para ilustrar e comparar os dois tipos de interpretações, a **Figura 4.10** mostra a pseudoseção de resistividade aparente e a seção de resistividade de uma cava preenchida com resíduo de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP (área de estudo). O levantamento foi realizado com a técnica de caminhamento elétrico dipolo-dipolo e com o espaçamento entre os eletrodos de 10 metros. A pseudoseção de resistividade aparente foi gerada no *software* Surfer, versão 6.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1997) e a seção de resistividade foi gerada no *software* Res2dinv, versão 3.53 (GEOTOMO, 2003).

À luz dos resultados, na interpretação qualitativa, pseudoseção de resistividade aparente, pode ser observada uma anomalia mais resistiva entre as distâncias de 35 e 75 metros aproximadamente, que caracteriza a cava preenchida com resíduos (**Figura 4.10a**). Contudo, na interpretação quantitativa, seção de resistividade, pode ser observada uma melhor definição para o formato da cava preenchida com resíduos (**Figura 4.10b**). Além da definição da cava preenchida com resíduos, pode ser observada uma tendência de menor resistividade a partir da profundidade de 12 metros no início do perfil, que caracteriza a zona saturada. As profundidades e resistividades obtidas na seção modelada não são mais as teóricas e aparentes, mas sim as interpretadas e consideradas reais pelo processo de interpretação.

Face ao exposto, a interpretação qualitativa apresenta limitações e requer cuidado; porém, permite ao intérprete realizar uma análise inicial da qualidade dos dados de campo. A interpretação quantitativa, após a inversão matemática dos dados de campo, torna os resultados mais precisos e confiáveis.

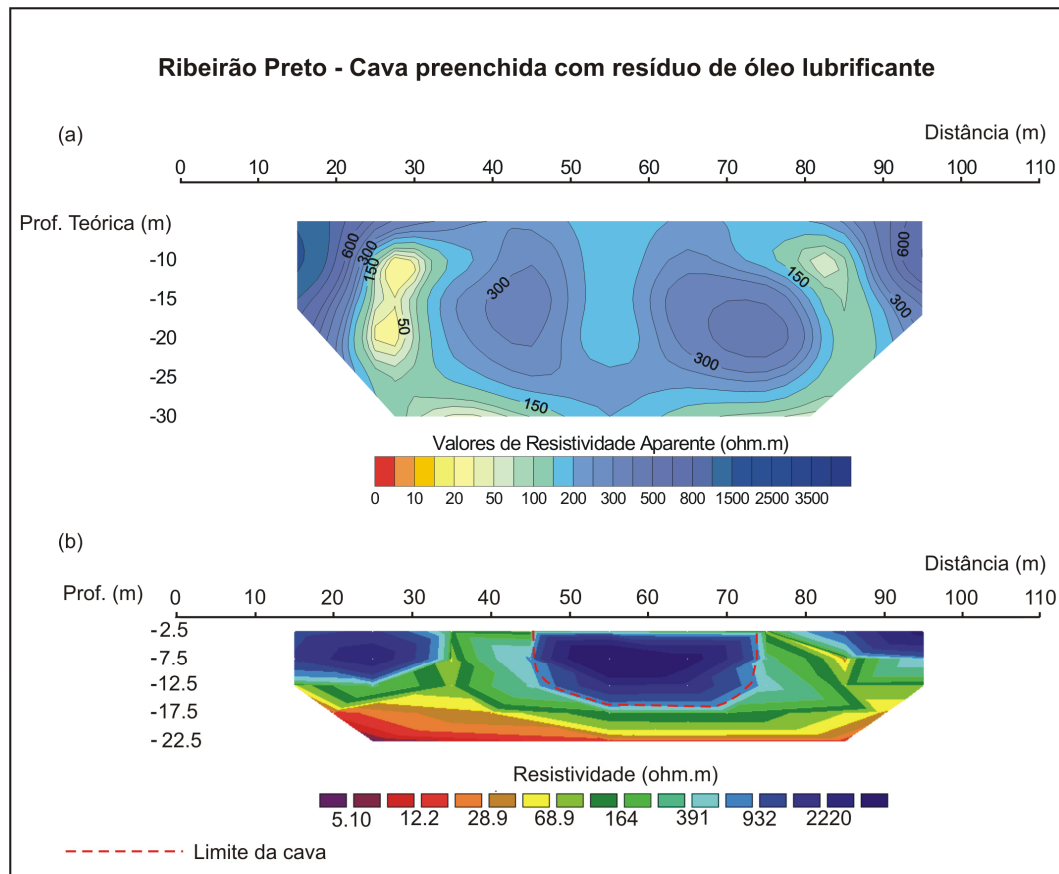


Figura 4.10 – (a) Pseudoseção de resistividade aparente. (b) Seção de resistividade.

4.1.6.1 Interpretação qualitativa

A interpretação qualitativa, em levantamentos 2D, procura relacionar as variações laterais do parâmetro físico resistividade a estruturas, corpos e camadas geológicas, como contatos, zonas de falha/fratura e áreas com contaminação. Levando em consideração que o parâmetro físico é aparente e sofre influência de todos os elementos adjacentes, é necessário atenção para definir a posição de corpos e estruturas verticais e subverticais (ELIS, 2000).

De acordo com Elis (op. cit., p.105),

Uma feição que merece atenção na interpretação qualitativa de pseudo-seções de caminhamento elétrico dipolo-dipolo é o **efeito da passagem dos eletrodos pela zona causadora de anomalia**. Esse efeito ocorre em razão da disposição dos eletrodos na superfície e é visível com maior intensidade em estruturas verticais e subverticais (zonas de falha/fratura) e outros corpos com extensão lateral definida, e **aparece nas pseudo-seções sob a forma de um arco invertido [...]** (grifo nosso).

Para mostrar este efeito, Borges (2007) simulou respostas de resistividade elétrica para seis configurações eletródicas, com a técnica de caminhamento elétrico, a partir de um modelo geológico/geofísico de um dique intrusivo. Segundo o autor, zonas anômalas sobre o dique intrusivo são evidenciadas e caracterizadas individualmente. Os arranjos dipolo-dipolo,

Wenner, Wenner-Schlumberger e gradiente mostram anomalias em forma de arco invertido; enquanto que, o arranjo pólo-pólo mostra uma assimetria de resistividade elétrica.

4.1.6.2 Interpretação quantitativa

Atualmente existem dois tipos de modelagem: a modelagem com vínculo de suavização e a modelagem poligonal. Na modelagem por suavização as pseudoseções modeladas obtidas são apresentadas sob a forma de isolinhas de resistividade, que assumem as formas aproximadas dos corpos investigados. Na modelagem poligonal, vários polígonos caracterizam os corpos e camadas existentes. Cada qual tendo um valor constante de resistividade.

Na presente pesquisa, utilizou-se os *softwares* Res2dinv versão 3.53 (GEOTOMO, 2003) para a inversão 2D e Res3dinv versão 2.1(GEOTOMO, 2001) para a inversão 3D. Estes *softwares* determinam automaticamente um modelo bidimensional e tridimensional de resistividade para o meio, através dos dados elétricos de campo. Eles são um programa de inversão para resistividade e polarização induzida (modelagem com vínculo de suavização).

A rotina de inversão usada pelos programas é baseada no método dos mínimos quadrados com suavização restringida (*smoothness-constrained least-squares method*). Este método é amplamente usado para inversão 2D e 3D, e é baseado na **Eq. 4.11**:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (\text{Eq. 4.11}), \text{ onde:}$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T;$$

f_x = Filtro de nivelamento horizontal;

f_z = Filtro de nivelamento vertical;

J = Matriz Jacobiana da derivada parcial;

J^T = Transposta de J ;

u = *Damping factor*;

d = Vetor perturbação nos parâmetros do modelo;

g = Vetor discrepância.

Uma vantagem deste método é que o *damping factor* e os filtros de nivelamento podem ser ajustados para combinar com os diferentes tipos de dados.

A matriz Jacobiana das derivadas parciais pode ser calculada pelos seguintes métodos:

1. Gauss-Newton;
2. quasi-Newton;
3. Combinação do Gauss-Newton e quasi-Newton.

Para Loke e Dahlin (2002) no método Gauss-Newton para a suavização da inversão por mínimos quadrados, a matriz Jacobiana das derivadas parciais é recalculada para todas as iterações, através do método dos Elementos Finitos. Uma possível desvantagem deste método é o grande tempo computacional necessário para o cálculo da matriz Jacobiana das derivadas parciais. Para reduzir o tempo computacional, usa-se o método quasi-Newton para calcular os valores da matriz Jacobiana na primeira iteração, e as matrizes Jacobianas das iterações subseqüentes são calculadas por uma técnica de atualização. Após cada iteração, a matriz Jacobiana é calculada pela **Eq. 4.12**. Neste método, é usado um modelo (Terra homogênea) para o cálculo analítico dos valores da matriz Jacobiana.

$$B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \quad (\text{Eq. 4.12}),$$

onde $u_i = (\Delta y_i - B_i p_i) / p_i^T p_i$, $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$ e B_{i+1} é a matriz Jacobiana aproximada para a iteração $(i+1)th$, y_i é a resposta do modelo para a iteração ith e Δy_i é a mudança na resposta do modelo para a ith iteração.

Visto que o método Gauss-Newton trabalha com derivadas parciais exatas, ele deve exigir menos iterações para convergir. No entanto, para muitos conjuntos de dados, o método quasi-Newton pode ser significativamente mais rápido do que o método Gauss-Newton. O terceiro método é uma combinação dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton, no qual as derivadas parciais são diretamente recalculadas para as primeiras duas ou três iterações, e então calculadas pela técnica de atualização para as subseqüentes iterações (LOKE e DAHLIN, op. cit.).

Os autores testaram esses três métodos de inversão com um número de conjuntos de dados de campo e sintético, e concluíram que, em áreas com contratos de

resistividade moderados (menos do que 10:1), os modelos de inversão obtidos pelos três métodos são semelhantes. Em áreas com contrastes de resistividades grandes, o método Gauss-Newton fornece resultados mais precisos do que o método quasi-Newton. Porém, mesmo para contrastes de resistividade grandes, as diferenças nos modelos obtidos pelo método Gauss-Newton e pelo método de inversão combinada são pequenas. Como o método de inversão combinada é mais rápido do que o método Gauss-Newton, ele representa um acordo satisfatório entre velocidade e acurácia para muitos conjuntos de dados.

O modelo 2D usado pelo programa de inversão divide a subsuperfície em uma série de blocos retangulares, cujo arranjo dos blocos é vinculado à distribuição de pontos na pseudoseção (**Figura 4.11**). A distribuição e tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa, de modo que o número de blocos não exceda o número de pontos de dados. O objetivo do programa é determinar a resistividade dos blocos retangulares que irão produzir uma pseudoseção de resistividade aparente concordante com os dados de campo. Os dados de campo são comparados com a pseudoseção sintética resultante da simulação feita pelo programa, e o modelo é considerado satisfatório quanto mais se assemelham as pseudoseções de campo e sintética.

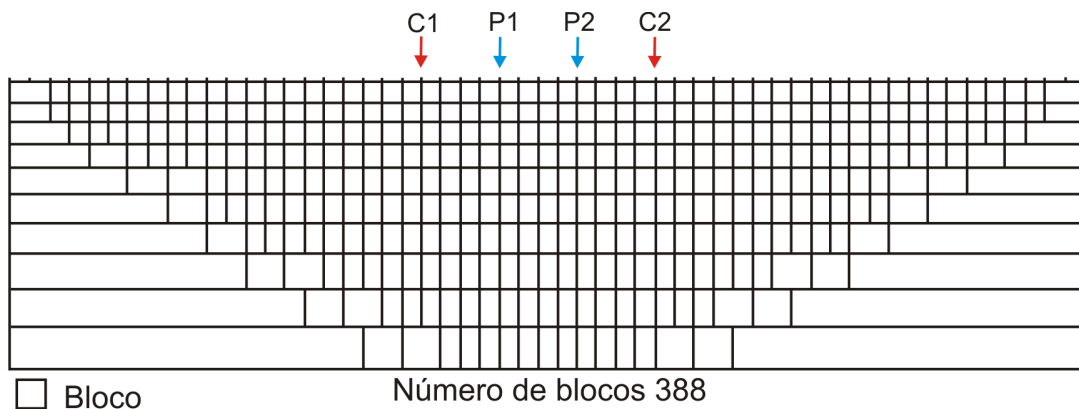


Figura 4.11 – Arranjo dos blocos usado no modelo 2D, mostrando as posições dos eletrodos (modificado de LOKE e DAHLIN, 2002).

O modelo 3D usado para interpretar os dados é mostrado na **Figura 4.12**, onde a subsuperfície é dividida em diversas camadas e cada camada é subdividida em um número de blocos retangulares, cada qual possuindo um determinado valor de resistividade (LOKE e BARKER, 1996). Os blocos que constituem as camadas possuem

o mesmo tamanho. A espessura da camada superior é de 0,7 vezes o espaçamento entre eletrodos, que é ligeiramente menor do que a profundidade mediana de investigação (0,87) do arranjo pólo-pólo para um semi-espaço homogêneo (EDWARDS, 1977). A espessura dos blocos aumenta à medida que aumentam os níveis em profundidade, e a espessura de cada camada inferior subsequente é aumentada de 15% em relação a superior. O número de camadas no modelo usado é ajustado de tal forma que a profundidade à superfície superior da camada inferior é menos do que a profundidade mediana de investigação do maior espaçamento entre eletrodos verificado na aquisição 3D (GANDOLFO e GALLAS, 2005).

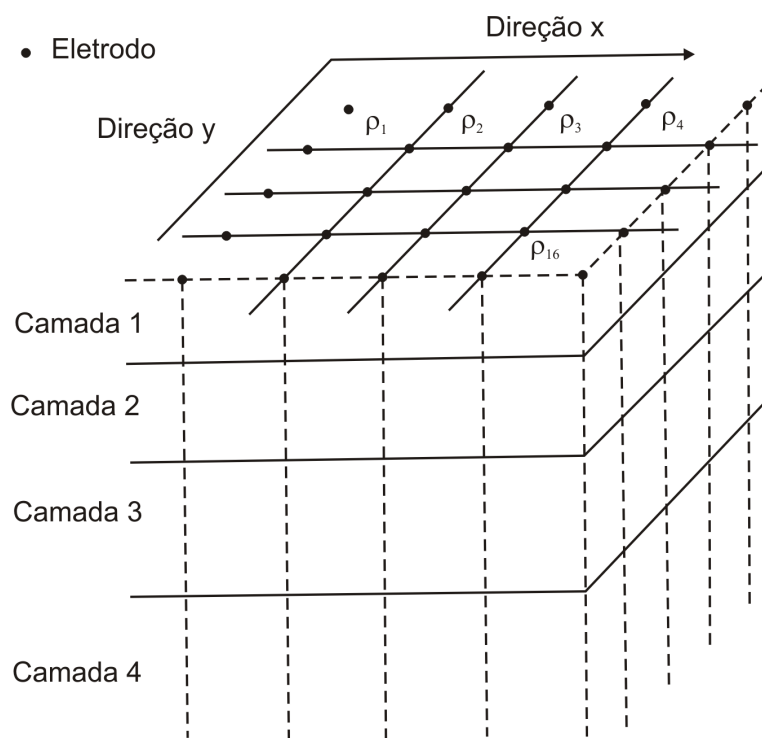


Figura 4.12 – Modelo 3D de discretização utilizado pelo programa de inversão (adaptado de LOKE e BARKER, 1996).

Além do modelo utilizado por Loke e Barker (op. cit.), mais dois modelos de inversão podem ser utilizados pelo programa (**Figuras 4.13a e 4.13b**). O primeiro subdivide as camadas superiores pela metade tanto na direção vertical como na direção horizontal; enquanto que, o outro modelo de inversão subdivide as camadas superiores pela metade somente na direção horizontal (GEOTOMO, 2001).

Para os dois modelos utilizados pelos programas de inversão, o método de otimização basicamente tenta reduzir a diferença entre os valores de resistividades aparentes medidos e calculados ajustando a resistividade dos blocos, e esta diferença é dada pelo erro *Root Mean Squared* (RMS). Entretanto, o modelo com o menor erro RMS pode às vezes mostrar variações irreais e grandes nos valores de resistividade e nem sempre é o melhor modelo geológico. O melhor procedimento é escolher o modelo para o qual o erro RMS da iteração anterior não muda significativamente, isto, geralmente ocorre entre a terceira e quinta iterações (GEOTOMO, 2001, 2003).

4.2 POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Conrad Schlumberger, em 1913, foi o primeiro a fazer medidas com o método da polarização induzida (ALLAUD e MARTIN, 1977 apud OLHOEFT, 1985). E somente, a partir dos anos 40 o método começou a ser, amplamente, aplicado para a exploração mineral (BRANDES, 2005).

Sumner (1976) em sua obra "*Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*", cita Conrad Schlumberger como sendo o primeiro a descrever conclusivamente a resposta IP, no ano de 1920, em sua monografia "*Étude sur la prospection électrique du sous-sol*".

A polarização induzida ou residual, também denominada de sobretensão, é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como uma resposta retardada de voltagem nos materiais terrestres (SUMNER, op. cit.). Em alguns corpos, como por exemplo, jazimentos de sulfetos, que são atravessados por uma corrente elétrica, quando esta corrente é interrompida, o campo elétrico não desaparece bruscamente, mas sim de uma maneira lenta (ORELLANA, 1974).

O fenômeno se observa quando se injeta uma corrente primária I_p , com uma variação temporal predeterminada (como por exemplo, três minutos), o potencial primário V_p não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos, mas é atenuada gradualmente com uma constante de tempo de várias dezenas de segundos, na forma de uma curva $V_{ip}(t)^{4.4}$. Esta curva liga a assíntota V_p em regime estacionário com a assíntota zero, após o corte da corrente (**Figura 4.14**) (ELIS, 1999; MOURA, 2002; BRAGA, 2006).

^{4.4} Curva conhecida na literatura geofísica como a curva de descarga ou transiente ou relaxação (MOURA, op. cit.).

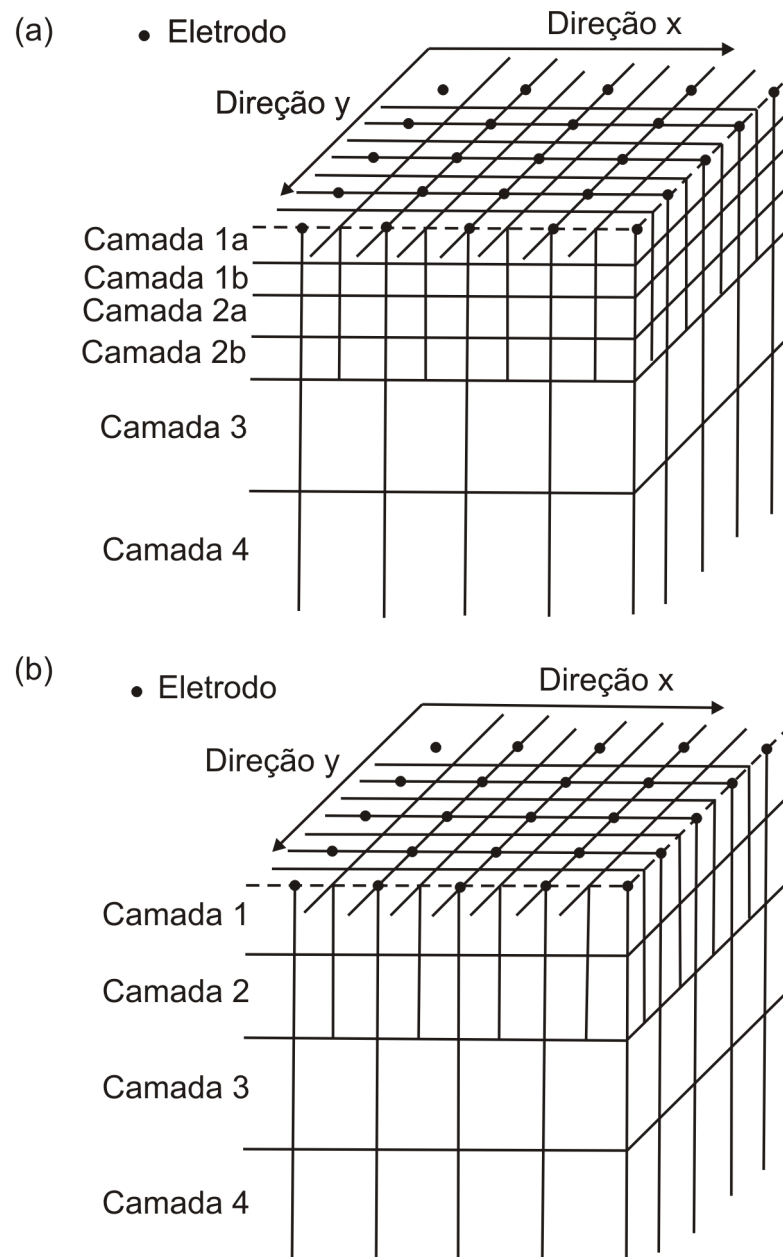


Figura 4.13 – Os modelos 3D utilizados na inversão. (a) Modelo onde as camadas superiores são divididas pela metade nas direções horizontal e vertical. (b) Modelo onde as camadas superiores são divididas somente na direção horizontal (adaptado de GEOTOMO, 2001).

A detecção e medida deste transiente estão diretamente ligadas à maior ou menor capacidade de polarização^{4.5} dos materiais em subsuperfície, constituindo-se, portanto, a base do método da polarização induzida. Segundo Sumner (1976), a magnitude da resposta IP aumenta com a quantidade de mineralização em corpos de sulfetos maciços, que podem dar efeito IP alto.

^{4.5} A capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais terrestres (BRAGA, 2006).

Entretanto, esta ocorrência geológica pode ser detectável pelos métodos eletromagnético, eletrorresistividade ou potencial espontâneo, que são menos caros. Contudo, o método da polarização induzida é utilizado em casos onde outros métodos geofísicos são ineficazes, como por exemplo, em áreas de mineralização disseminada. Em 1966, umas das maiores minas do mundo, *Lornex* na *British Columbia*, foi descoberta com o auxílio do método da polarização induzida (BROWN, 2002 apud BRANDES, 2005).

Segundo Sumner (1976) a relação entre resposta IP e quantidade de mineralização é complexa; porém, o método possui a vantagem de detectar quantidades de minerais metálicos, mesmo que estas quantidades sejam pequenas. Para o autor bastam somente 5% de metal/volume para a polarização eletrônica ser identificada com sucesso, como sendo a causa de uma anomalia IP. Este método é aplicado amplamente na prospecção de mineralizações metálicas disseminadas, especificamente, sulfetos metálicos como o cobre (MOURA, 2002).

4.2.1 Fontes dos efeitos IP

Durante o tempo do fluxo original de corrente, presume-se que algum armazenamento de energia ocorre no material. Esta energia armazenada, provavelmente, deve existir na forma mecânica, elétrica e química. Entretanto, estudo de laboratório de polarização induzida tem estabelecido que a energia química armazenada nas rochas seja a mais importante (TELFORD et al., 1990).

Para os autores, este armazenamento de energia química é o resultado de:

1. Variações na mobilidade de íons fluindo através da estrutura da rocha;
2. Variações entre condutividade iônica e eletrônica onde os minerais metálicos estão presentes.

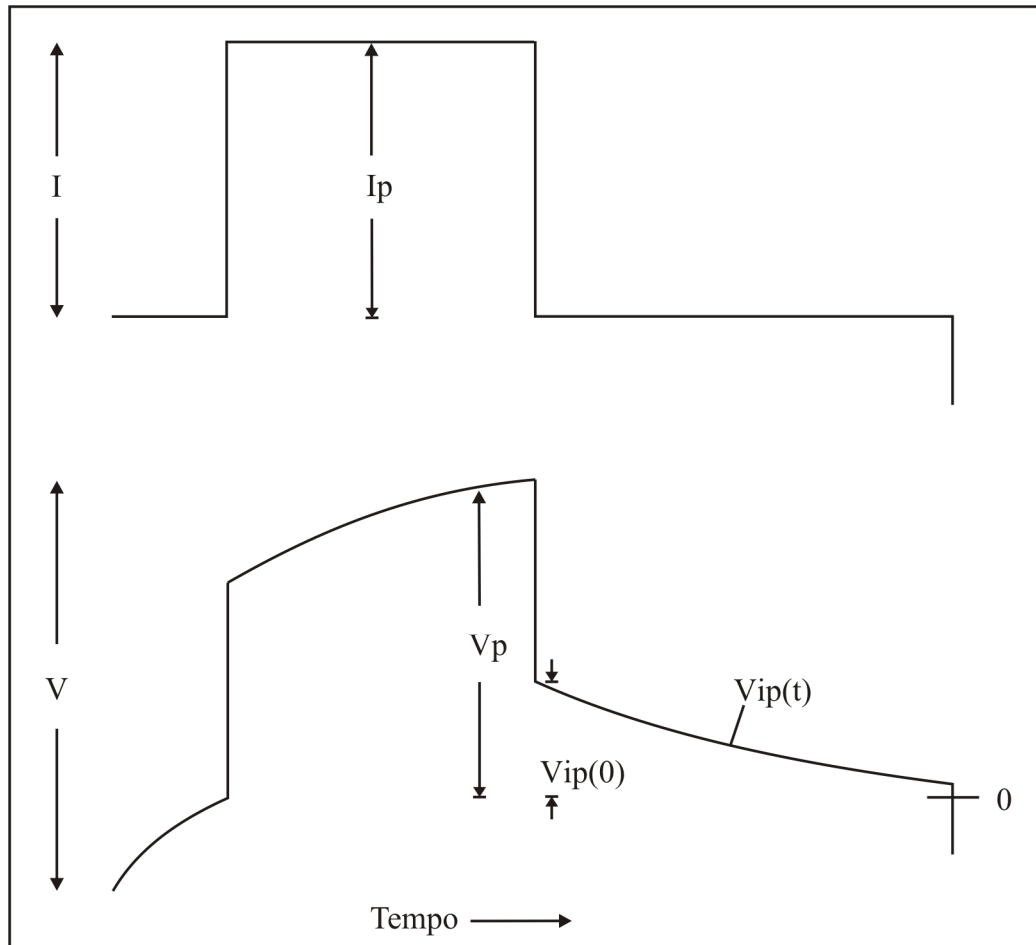


Figura 4.14 – Formas de ondas usadas no método IP – domínio do tempo, mostrando a corrente primária I_p aplicada, o potencial primário V_p máximo e a curva do potencial transiente $V_{ip}(t)$ (modificado de SUMNER, 1976).

O primeiro destes efeitos é conhecido como polarização de membrana ou polarização eletrolítica e constitui o *background*, ou então chamado efeito IP normal. O segundo é conhecido como polarização de eletrodo ou sobrevoltagem. É geralmente maior em magnitude que o IP normal e depende da presença de minerais metálicos na rocha. Os dois efeitos são indistinguíveis pelas medições de IP. Além disso, eles parecem ser independentes da estrutura molecular ou atômica em rochas e minerais, ou seja, IP é um efeito total (TELFORD et al., 1990).

Vacquier et al. (1975 apud BRAGA, 2006), em seus estudos sobre a aplicabilidade da polarização induzida em aquíferos concluíram que:

1. Em arenitos ou aluviões saturados com água, a polarização induzida aparece quando as superfícies da areia ou cascalhos são parcialmente revestidas com uma película de argila;

2. Areia quartzosa pura, saturada com água, não mostra quase nenhum efeito IP;
3. A magnitude da polarização induzida depende da resistividade da solução, da quantidade e espécie de argila, e do cátion que satura a argila;
4. Geralmente, a polarizabilidade diminui com a diminuição da resistividade, então camadas de argilas e águas salgadas dão pequenos efeitos IP.

Draskovits et al. (1990) elaboraram um gráfico (**Figura 4.15**) que mostra a correlação entre as resistividades aparentes e cargabilidades aparentes, onde se observam os campos de concentrações dos sedimentos. Os autores, após uma correlação geológica-geoelétrica, a partir de dados de sondagens elétricas verticais e perfilagens elétricas IP e eletrorresistividade aplicados para prospecção de águas subterrâneas, concluíram que:

1. A resposta IP, em camadas de areias e argilas, é bem maior que a resposta em camadas argilosas puras;
2. Argilas puras apresentam baixa resistividade e baixa polarização;
3. Camadas arenosas apresentam alta resistividade e cargabilidade intermediária;
4. Camadas siltosas, apresentam alta polarização e resistividade intermediária.

4.2.1.1 Polarização de membrana

Segundo Telford et al. (1990), a condução eletrolítica é o fator predominante na maioria das rochas, sendo a única forma de condução quando minerais não estão presentes e a frequência é baixa. Portanto, a estrutura da rocha deve ser um tanto porosa para permitir o fluxo de corrente quando minerais metálicos estão ausentes. A maioria dos minerais tem uma rede de cargas negativas na interface entre a superfície da rocha e o fluido do poro. Conseqüentemente, íons positivos são atraídos e negativos são repelidos dessa interface. Essa concentração de íons positivos pode estender-se dentro da zona de fluido a uma profundidade de aproximadamente 10^{-6} cm. Se isso é a ordem da largura do próprio poro, íons negativos irão se acumular em uma extremidade e deixar a outra quando uma corrente contínua é aplicada através dessa zona. Como resultado dessa distribuição polarizada, o fluxo de corrente é impedido. Posteriormente, quando a corrente é cortada os íons retornam para suas posições originais, levando um intervalo de tempo finito para isso. Esta situação é ilustrada na **Figura 4.16**.

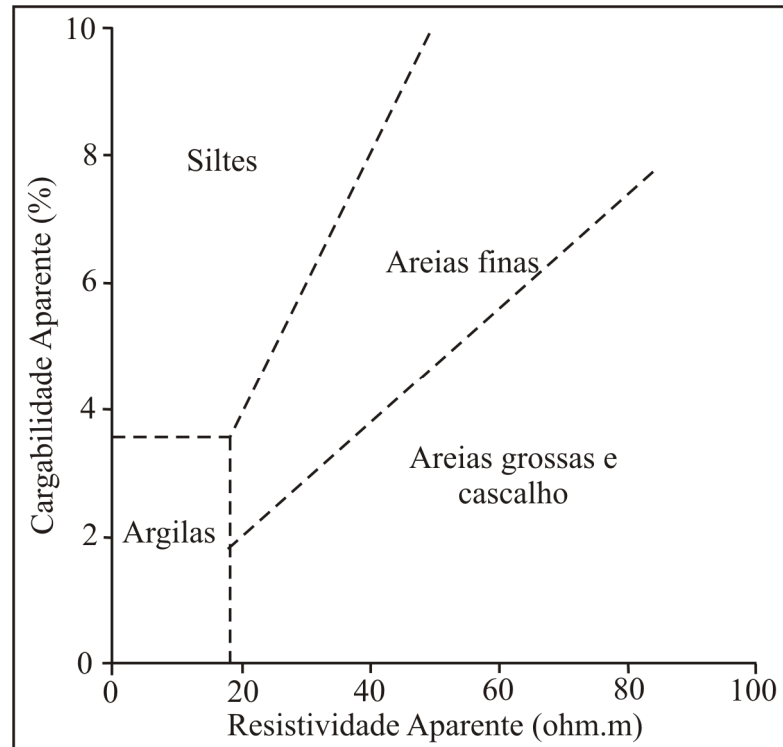


Figura 4.15 – Associação da resistividade e cargabilidade aparentes com a litologia (modificado de DRASKOVITS et al., 1990).

Ainda segundo Telford et al. (1990), o efeito IP de membrana é mais pronunciado na presença de minerais de argila, nos quais os poros são particularmente pequenos. A magnitude da polarização, entretanto, não cresce firmemente com a concentração de minerais de argila, mas atinge um máximo e então diminui outra vez. Isto é porque deve existir uma passagem alternativa no material onde não ocorre acumulação de íons; caso contrário, o fluxo de corrente e polarização são reduzidos. Concentrações ótimas variam em diferentes tipos de argilas, sendo baixa em montmorilonita e mais alta em caolinita. Os folhelhos, com uma percentagem alta de minerais de argila, têm uma polarização relativamente baixa. O efeito de membrana também aumenta com a salinidade do fluido dos poros. Como resultado desses fatores a polarização de membrana é geralmente um máximo em uma rocha que contem os minerais argilosos dispersos em uma matriz relativamente menor ($\leq 10\%$) e na qual o eletrólito tem baixa salinidade.

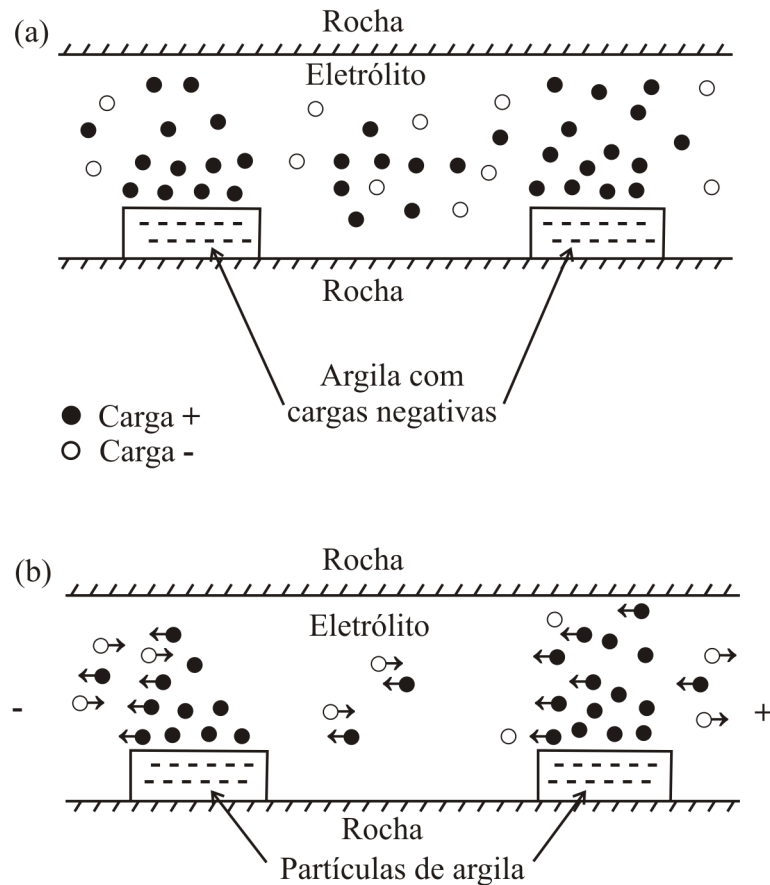


Figura 4.16 – Efeito de polarização de membrana. (a) Distribuição normal de íons em um arenito poroso. (b) Polarização de membrana em um arenito poroso devido à aplicação de tensão em corrente contínua (modificado de TELFORD et al., 1990).

Outras fontes de polarização padrão incluem efeitos dielétricos e eletrocinéticos normais, presença de minerais condutores em quantidades muito pequena e possível condução superficial em material normalmente não condutor. Destes, a resposta eletrocinética devido a variações nas seções dos poros afetando o fluxo de fluido é provavelmente mais significativa que as outras. Nenhuma dessas fontes, entretanto, é comparável em magnitude à polarização de membrana (TELFORD et al., op. cit.).

4.2.1.2 Polarização de eletrodo

Este tipo, similar em princípio a polarização de membrana, existe quando material metálico está presente na rocha e o fluxo de corrente é parcialmente eletrônico, parcialmente eletrolítico. Uma reação química ocorre na interface entre o mineral e a solução (TELFORD et al., op. cit.).

Considere as duas passagens porosas mostradas na **Figura 4.17**. Na superior o fluxo de corrente é inteiramente eletrolítico. Na inferior, a presença de um mineral metálico, tendo redes de cargas superficiais de sinais opostos em cada face, resulta em uma acumulação de íons no eletrólito adjacente a cada uma. A ação é de eletrólise, quando a corrente flui e ocorre uma troca de elétrons entre o metal e a solução iônica na interface; em físico-química este efeito é conhecido como sobrevoltagem^{4.6}. Como a velocidade do fluxo de corrente no eletrólito é muito menor do que no metal, o acúmulo de íons é mantido pela voltagem externa. Quando a corrente é interrompida, a voltagem residual decai conforme os íons difusos voltam ao seu estado de equilíbrio (TELFORD et al., 1990).

Para os autores, minerais que são condutores eletrônicos exibem polarização de eletrodo. Estes incluem quase todos os sulfetos (exceto a esfalerita e possivelmente cinábrio e estibinita), alguns óxidos como magnetita, ilmenita, pirolusita, cassiterita e grafita.

Ainda segundo os autores, a magnitude da polarização de eletrodo depende da fonte de corrente externa e também de um número de características do meio. Ela varia com a concentração mineral, mas devido ao fato de ser um fenômeno de superfície, deve ser maior quando um mineral ocorre de forma disseminada do que quando é maciço. O tamanho ótimo da partícula depende da porosidade da rocha hospedeira e sua resistividade. O fato de que mineralização disseminada dá boa resposta IP é uma atrativa característica a mais, porque outros métodos elétricos não trabalham muito bem nessas circunstâncias.

4.2.2 Medidas de polarização induzida

As medidas de IP podem ser realizadas no domínio de tempo e no domínio da frequência. No IP-domínio do tempo, as medidas são feitas após a interrupção do pulso de corrente.

^{4.6} É a energia potencial extra requerida para dar início a processos eletroquímicos, particularmente a transferência de elétrons. É principalmente um potencial devido a uma reação de oxidação-redução chamado de sobrevoltagem de ativação, e também contribui para a sobrevoltagem o gradiente de concentração da solução na interface. Ela é grande na interface onde a atividade química é grande, onde o modo de condução também muda de iônico no eletrólito para eletrônico no sólido (SUMNER, 1976).

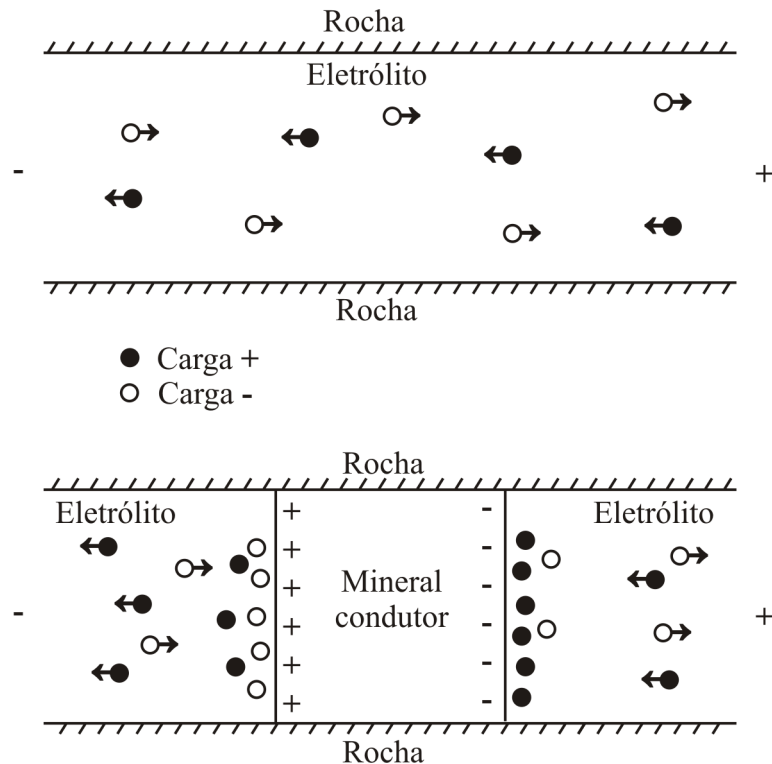


Figura 4.17 – Fluxo eletrolítico no poro superior e polarização de eletrodo no poro inferior (modificado de TELFORD et al., 1990).

4.2.2.1 Medida no domínio do tempo

Segundo Telford et al. (op. cit.), os parâmetros de medidas IP-domínio do tempo são determinados pela característica da forma da curva do potencial transiente, podendo ser:

1. Porcentagem IP;
2. Integral do tempo de caimento;
3. Cargabilidade.

Porcentagem IP (millivolts per volt)

A forma mais simples de medir o efeito IP com o equipamento domínio do tempo é comparar a voltagem residual $V(t)$ existente em um tempo t após o corte da corrente com a voltagem inicial V_c emitida durante o intervalo de fluxo de corrente. A razão $V(t)/V_c$ é expressa em mV/V , ou em porcentagem, $100.V(t)/V_c$. O intervalo tempo t pode variar entre 0,1 a 10 segundos.

Integral do tempo de decaimento

Integração das medidas do potencial sobre um intervalo de tempo. Se este tempo de integração é muito curto e se a curva de decaimento é amostrada em vários pontos, os valores da integral são efetivamente as medidas do potencial existente em diferentes tempos, como por exemplo, $V(t_1)$, $V(t_2)$, ..., $V(t_n)$. Essa medida é uma extensão da medida de porcentagem IP, da qual se pode obter a formada curva de decaimento.

Cargabilidade

O conceito de cargabilidade, como medida de IP, foi introduzido por Seigel (1959 apud MOURA, 2002). A cargabilidade é definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, sendo calculada através da **Eq. 4.13**:

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot dt \quad (\text{Eq. 4.13})$$

É o parâmetro mais comumente usado em IP-domínio do tempo. Quando $V(t)$ e V_c tem as mesmas unidades, a cargabilidade M é em milissegundos, mas geralmente é expressa em mV/V.

De acordo com Braga (2006, p.28),

Como ocorre no método da eletrorresistividade, se as medidas da polarização induzida são efetuadas sobre um terreno cujo subsolo é homogêneo, qualquer das magnitudes definidas acima podem ser utilizadas como medida de sua polarização verdadeira. Na prática, como o meio pode ser considerado heterogêneo, o parâmetro resultante das medidas, no IP-Domínio do Tempo, é denominado de **cargabilidade aparente (Ma)** (grifo do autor).

4.2.3 Técnicas de aquisição de dados

As medidas de IP geralmente são feitas de modo similar as de resistividade aparente, analisando as diferenças de polarizabilidade do meio tanto no sentido vertical (sondagem IP) como no sentido horizontal a profundidades constantes (caminhamento IP), e também, aquisição 3D. Os equipamentos utilizados para os ensaios de IP normalmente fazem simultaneamente medidas de resistividade, pois os dados utilizados para medir o efeito IP, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, são os mesmos usados para

calcular a resistividade. No caso do caminhamento IP os arranjos eletródicos são os mesmos utilizados no método da eletrorresistividade, já descritos anteriormente.

4.2.4 Interpretação

A interpretação dos resultados obtidos pelo método da polarização induzida é realizada da mesma forma que é feita para o método da eletrorresistividade, já mencionada anteriormente. Igualmente aos dados de resistividade, os dados de IP foram modelados através dos *softwares* Res2dinv versão 3.53 (GEOTOMO, 2003) para a inversão 2D e Res3dinv versão 2.1 (GEOTOMO, 2001) para a inversão 3D.

4.3 POTENCIAL ESPONTÂNEO

Potenciais elétricos naturais ou espontâneos ocorrem na subsuperfície terrestre causados por atividade eletroquímica e eletrocinética. De acordo com Telford et al. (1990), o fator de controle, em todos os casos, é a água subterrânea. Esses potenciais são associados com alteração de corpos de sulfetos, variações nas propriedades das rochas (conteúdo mineral) em contatos geológicos, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes termais e de pressão nos fluídos subterrâneos.

As anomalias de potencial espontâneo (SP) são geradas pelos fluxos de fluidos, calor e íons no subsolo, e seu estudo tem sido útil para ajudar a localizar e delinear fontes associadas a esses fluxos (CORWIN, 1990). O método foi utilizado pela primeira vez para a exploração mineral, sendo aplicado posteriormente em geotermia, engenharia e estudos ambientais. No caso de estudos ambientais, o SP pode ser útil como indicativo de direções preferenciais de fluxos contaminados por poluentes, como por exemplo, chorume e hidrocarbonetos.

Em contraste com os outros métodos geofísicos, o potencial espontâneo é um método de campo natural, porque não precisa de nenhum circuito de emissão. Este método se destaca por ser o mais antigo, já que sua origem se deu no ano de 1815, embora os primeiros resultados positivos não fossem obtidos até o ano de 1913 (ORELLANA, 1972). “[...] Desde 1920 o método tem sido empregado de maneira rotineira como método complementar na prospecção de metais-base” (GALLAS, 2005, p.134).

A principal vantagem é sua simplicidade, tanto instrumental como em trabalho de campo, além de ser o método mais barato. Este método baseia-se que, em determinadas condições, certas heterogeneidades condutoras do subsolo se polarizam, tornando-se verdadeiras pilhas elétricas, que geram no subsolo correntes elétricas. Estas correntes produzem uma distribuição de potenciais observáveis na superfície do solo, o que revela a localização do corpo polarizado (**Figura 4.18**) (ORELLANA, 1972).

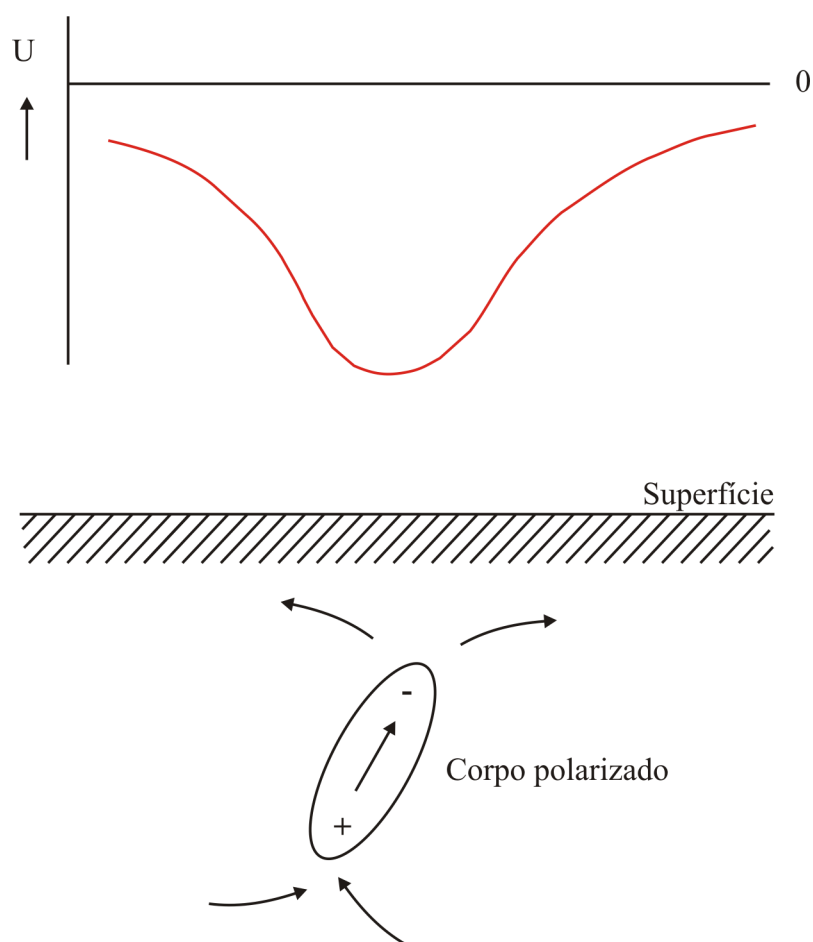


Figura 4.18 – Polarização espontânea. Localização dos pólos de um corpo polarizado. As setas indicam o sentido do movimento dos elétrons e íons negativos (modificado de ORELLANA, op. cit.).

4.3.1 Mecanismos causadores do SP

Existem quatro mecanismos principais que produzem esses potenciais: potencial de mineralização, potencial de difusão (junção líquida), potencial de Nernst (ou de folhelho, utilizado em perfilagens) e potencial eletrocinético (eletrofiltração). O último processo é

mecânico, e os outros são químicos. Como o potencial de Nernst é aplicado somente em perfilagens, neste trabalho o potencial de Nernst não será descrito.

4.3.1.1 Potencial de mineralização

O principal fenômeno causador do potencial espontâneo é, sem dúvida, de origem eletroquímica e conhecido como potencial de mineralização. Porém, o mecanismo exato de origem desse potencial não está ainda definitivamente esclarecido. Algumas teorias atribuem à polarização espontânea a oxidação de sulfetos, com diferenças de detalhes entre uns e outros autores. Outras teorias acham que o processo é mais complicado, e que a oxidação dá origem as condições que originam o potencial espontâneo. Estas teorias são fundamentadas principalmente na umidade do subsolo, ou na diferença de acidez das águas superiores ou inferiores do nível freático, ou outros fatores. Um terceiro grupo de autores acredita que a oxidação não influencia e que a polarização espontânea é devido ao corpo que a cria, produzindo uma pilha de concentração de oxigênio, ou outros fenômenos, como por exemplo, potenciais de eletro-osmose, potenciais de difusão, correntes telúricas, eletrofiltração, etc.

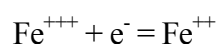
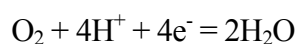
Sato e Mooney (1960 apud ORELLANA, 1972) publicaram um trabalho baseado no estudo crítico de cerca de 150 artigos sobre o tema, tendo suas teorias alcançado maior aceitação que as postuladas anteriormente. Os autores chegaram as seguintes conclusões:

1. Os corpos produtores de SP são sempre bons condutores eletrônicos, geralmente com continuidade elétrica em seu interior;
2. As anomalias de SP são quase sempre negativas nas partes superiores do corpo;
3. O valor da diferença de potencial total observada deve ser de algumas centenas de mV e pode chegar até 0,5 V, embora se tenha excepcionalmente registro com valores mais altos, de até 1,3 V.
4. O corpo deve fazer, ao menos em parte, na zona de oxidação ativa;
5. O potencial espontâneo é relativamente estável no tempo.

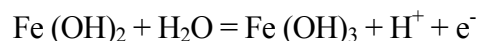
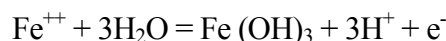
Os autores com base nestes fatos e nas argumentações anteriores, concluem que a polarização espontânea se deve a reações eletroquímicas com diferente caráter nas duas alturas da interface corpo/rocha encaixante, as quais se encontram acima e abaixo do lençol freático, com o corpo servindo de ligação elétrica entre elas. As substâncias dissolvidas ao redor da parte superior

do corpo sofrem redução, tomando elétrons do corpo, enquanto que na parte inferior as substâncias dissolvidas se oxidam, cedendo elétrons ao corpo, que serve como condutor para os elétrons. O fluxo de elétrons de baixo para cima com que as reações químicas possam manter-se indefinidamente, e não intervindo em tais reações, mantendo-se inalterada. A origem destas reações é explicada pela diferença do potencial de oxidação Eh (também chamado de potencial redox) entre as soluções próximas da parte superior e inferior do corpo. Acima do nível freático, as substâncias dissolvidas são relativamente oxidadas, e abaixo dele relativamente reduzidas; isto produz a diferença no Eh que é a causa do fenômeno.

Na zona superior, as reações mais prováveis são as que envolvem o oxigênio livre e o íon férrico, como:



Na zona inferior, as reações de oxidação mais prováveis são as que envolvem o íon ferroso e o hidróxido ferroso, como:



Os elétrodos necessários para as reações da zona superior são oriundos das reações da zona inferior através do corpo condutor. A energia necessária para manutenção do processo provém do oxigênio atmosférico, que penetra no subsolo dissolvido nas águas da chuva.

A **Figura 4.19** mostra de forma esquemática o movimento dos elétrons e íons através do subsolo. Observa-se, que os íons movimentam-se para ambos os lados do corpo. A **Figura 4.20** representa um exemplo de reações e suas localizações no espaço. Além das indicadas, podem ocorrer outras iguais.

Para quantificar a teoria, Sato e Mooney (1960 apud ORELLANA, 1972) utilizaram medidas diretas da variação do pH e do Eh no interior e proximidades de diversas mineralizações de sulfetos existentes em várias zonas mineiras de Arizona e Utah. Os autores concluíram que, na maioria dos casos, as condições naturais são tais que as mineralizações se encontram em seu *domínio de imunidade*, não participando das reações químicas que ocorrem, servindo apenas como condutores eletrônicos.

A teoria destes autores implica que o potencial espontâneo pode ocorrer em condições que anteriormente não eram consideradas favoráveis a ocorrência do fenômeno. Em particular, não é

necessário que o corpo forme uma faixa contínua de mineralização, parte acima e parte abaixo do nível freático. Essas condições são muito favoráveis, mas não necessárias. Uma disseminação de sulfetos pode gerar polarização espontânea, desde que a separação entre grãos minerais seja pequena, e a condução entre eles pode ocorrer ionicamente dentro de certas condições.

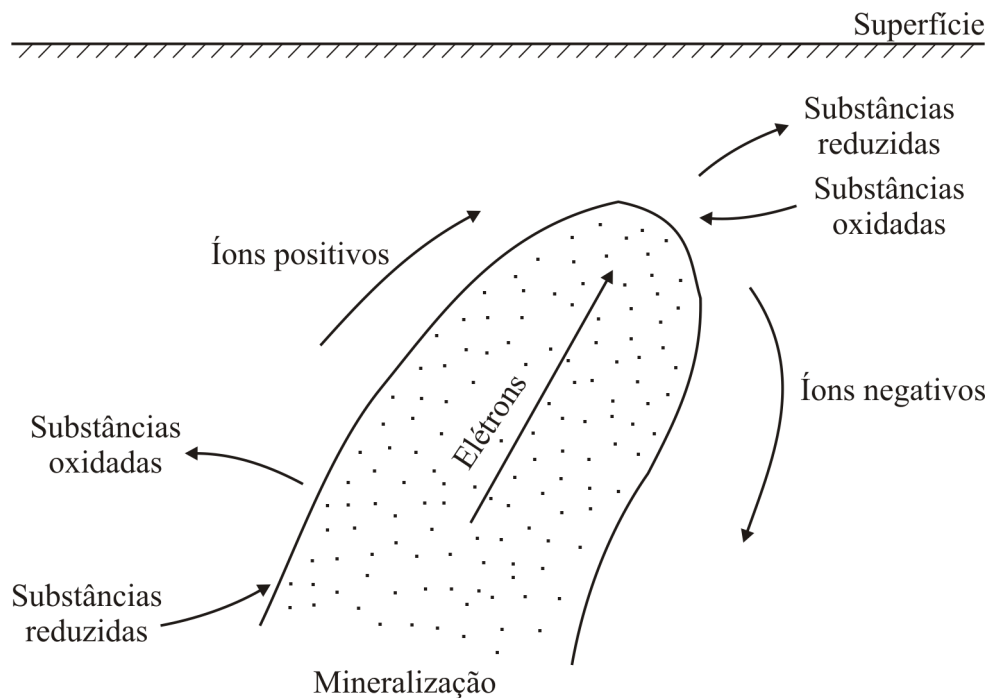


Figura 4.19 – Sentido do movimento de elétrons e íons no potencial espontâneo (modificado de ORELLANA, 1972).

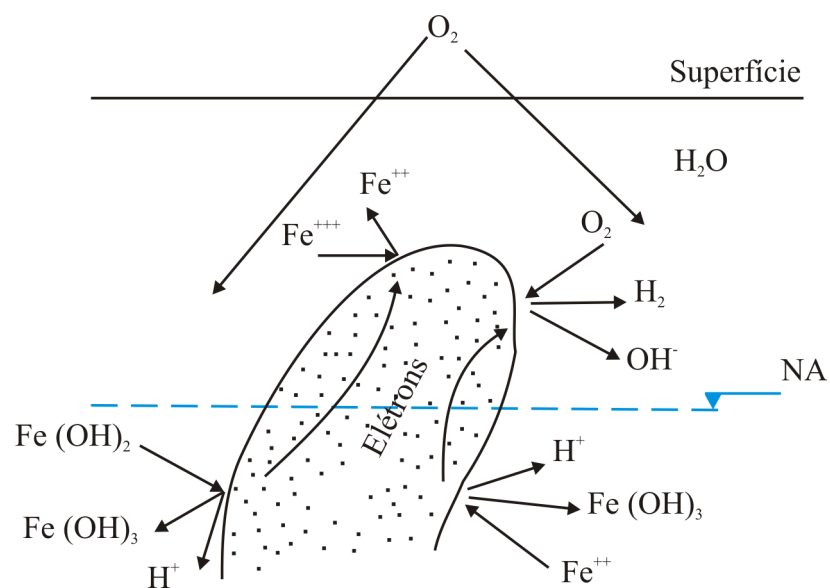


Figura 4.20 – Localização e natureza de algumas reações no potencial espontâneo (modificado de ORELLANA, op. cit.).

Uma condição necessária é, certamente, que a rocha encaixante esteja um pouco alterada, de modo que os íons possam deslocar-se adequadamente. Em rochas sãs e compactas, a polarização espontânea não pode ocorrer. O mesmo ocorre em zonas geladas, pois a baixa temperatura atrasa as reações e zonas de *permafrost*^{4.7} impedem o movimento iônico. As zonas desérticas também são desfavoráveis para a ocorrência do fenômeno, entre outros motivos, pela falta de umidade. Dessa forma, a polarização espontânea encontra as condições ideais em zonas temperadas.

4.3.1.2 Potencial de difusão

Esse potencial aparece quando eletrólitos diferentes são colocados em contato nos poros das rochas, ou se existe diferenças de concentração em um mesmo eletrólito. Os íons de diferentes polaridades possuem mobilidades distintas e os mais móveis se difundem com maior rapidez, formando duas zonas, onde haverá em cada uma a predominância de íons com sinais opostos, estabelecendo-se desta forma uma diferença de potencial ΔV (ORELLANA, 1972).

Esta diferença de potencial ΔV , devida ao surgimento das zonas de concentração de íons de sinais opostos, pode ser expressa pela **Eq. 4.14**:

$$\Delta V = \frac{u - v}{u + v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (\text{Eq. 4.14}), \text{ onde:}$$

u, v = Mobilidades dos cátions e ânions, respectivamente;

n = Valência dos íons;

R = 8,314 joules/C° (constante dos gases);

T = Temperatura absoluta;

F = 96.487 Coulombs/mol. (constante de Faraday);

C_1, C_2 = Concentrações dos eletrólitos em contato.

O potencial espontâneo originado pelo potencial de difusão, “[...] é fundamental nas perfilagens elétricas de poços onde estão em contato os eletrólitos contidos nas rochas com a lama da sondagem, servindo na determinação das porosidades das litologias” (GALLAS, 2005, p.135).

^{4.7} Designação dos solos permanentemente congelados que ocorrem nas regiões árticas (DUARTE, 2003).

4.3.1.3 Potencial de eletrofiltração

O fenômeno que origina este potencial, também denominado de eletrocínético, consiste fundamentalmente na produção de um campo elétrico pelo movimento de eletrólitos (águas subterrâneas) no subsolo (ORELLANA, 1972). Segundo o autor, quando um eletrólito passa através se produz entre os dois lados desta uma diferença de potencial. As rochas podem ser consideradas como tais membranas quando possuem, devido a sua porosidade, uma rede de capilares através da qual a água subterrânea pode ser filtrada. As paredes dos capilares podem absorver os ânions, os quais atraem cátions, formando-se uma capa elétrica dupla. Os ânions permanecem fixos, mas os cátions são arrastados pelo movimento do eletrólito através do capilar, concentrando-se junto à saída, e aparece uma diferença de potencial entre seus extremos, que obedece à **equação de Helmholtz**^{4.8}.

$$\Delta V = \frac{\zeta \varepsilon P}{\eta \sigma} \quad (\text{Eq. 4.15}), \text{ onde:}$$

ζ = Diferença de potencial na dupla camada;

ε = Constante dielétrica;

σ = Condutividade;

η = Viscosidade do eletrólito;

P = Diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar, responsável pelo movimento do eletrólito.

Segundo Orellana (op. cit.), o fenômeno da eletrofiltração é produzido em todos os tipos de terreno, porém o potencial gerado é muito fraco, e não é normalmente usado em estudos hidrológicos. Em alguns casos particulares, como zonas de fratura e arenitos alterados, fluxo intenso de águas subterrâneas em terrenos acidentados, ocorrem potenciais mais intensos, de algumas centenas de mV/km.

Existem dois tipos de eletrofiltração: *per ascensum* e *per descensum*. O primeiro caso corresponde à infiltração de águas de chuva através de terrenos permeáveis ou ao longo de falhas. Como a água carrega os cátions, aparecem centros negativos nas partes mais elevadas topograficamente. A **Figura 4.21** mostra esse fenômeno. Lasfargues (1957 apud ORELLANA,

^{4.8} O nome é uma homenagem ao cientista alemão Hermann Ludwig Von Helmholtz, 1821-1894 (DUARTE, 2003).

1972) chegou a observar potenciais de -3V em um morro de uma formação arenosa, valor considerado excepcional.

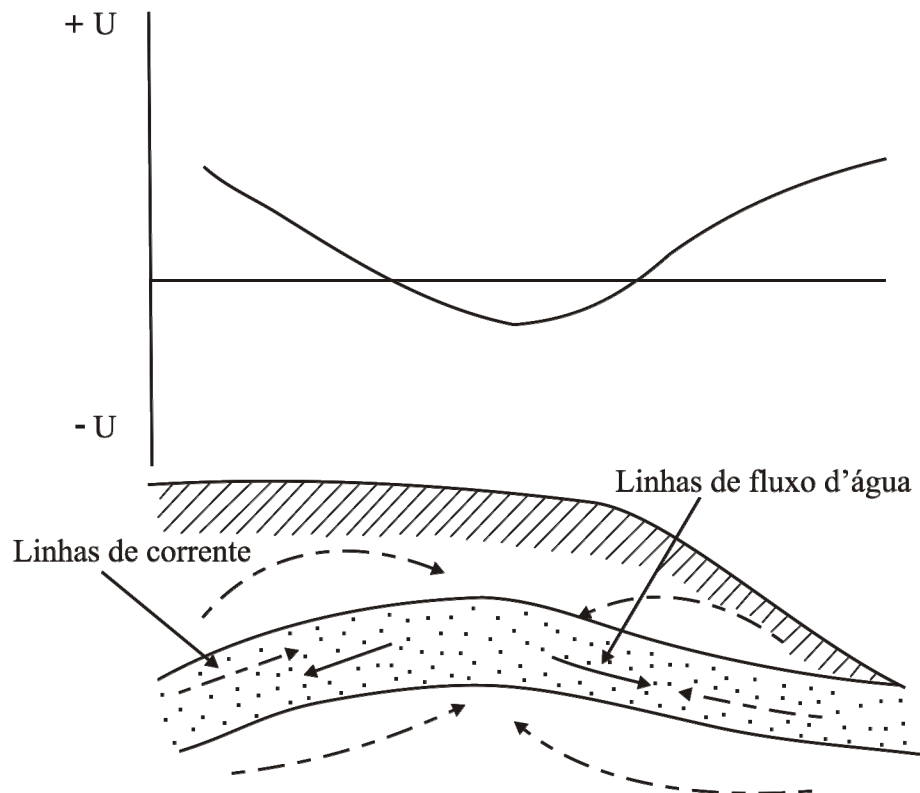


Figura 4.21 – Desenho esquemático de formação do potencial de eletrofiltração *per descensum* (modificado de ORELLANA, op. cit.).

Os potenciais de eletrofiltração *per ascensum* podem ser grandes, dependendo da pressão da água ascendente. Ocorrem, normalmente, potenciais dessa classe, da ordem de algumas dezenas de mV, em jazidas lavradas recentemente, devido a ascensão da umidade por capilaridade.

“O SP causado pelos potenciais de fluxo *per descensum* é utilizado nos estudos que visam a determinação dos fluxos subsuperficiais, como vazamentos em barragens e contaminações do lençol freático oriundas de aterros sanitários, lixões, produtos químicos etc.” (GALLAS, 2005, p.136).

4.3.2 Aquisição de dados

Existem duas maneiras básicas, que são o método de potenciais e o método de gradientes. São teoricamente equivalentes, porém, a prática de campo é bastante diferente, sendo o método de potenciais de uso mais recomendado. Na presente pesquisa foi utilizado o método de potenciais.

4.3.2.1 Método de potenciais

Este método consiste, essencialmente, em determinar diretamente a diferença de potencial observado em relação a um ponto fixo, em estações de medida distanciadas a intervalos regulares, em uma série de perfis paralelos entre si. Um dos eletrodos permanece fixo no início do primeiro perfil, junto com o equipamento de medida e o segundo eletrodo, móvel, é colocado sucessivamente nos pontos de observação previamente estaqueados sobre o perfil (ORELLANA, 1972). O deslocamento do eletrodo móvel é feito por meio de um cabo, geralmente contido em uma bobina, que é desenrolada ou enrolada à medida que avança o levantamento. A **Figura 4.22** mostra, através de um desenho esquemático, como é realizada a aquisição de dados com o método de potenciais, onde a estação base é o ponto do eletrodo M e as posições N1, N2,..., N28 e N29 referem-se às sucessivas posições do eletrodo móvel.

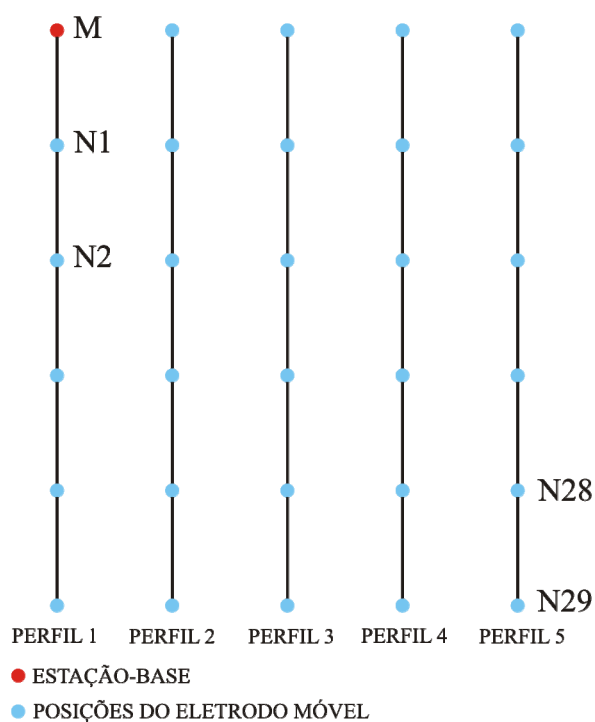


Figura 4.22 – Desenho esquemático de aquisição de dados de SP pelo método de potenciais.

No caso de levantamentos muito grandes com o método de potenciais, em geral, é preciso fazer a mudança da base, tomando como referência a base anterior. “[...] Também pode ser necessária a mudança de base devido ao fato de que ao aumentarmos o tamanho do fio das medidas, este torna-se uma espécie de antena que capta cada vez mais ruídos indesejáveis [...]” (GALLAS, 2005, p.137-138).

São necessários dois tipos de correções no método de potenciais: a correção da polarização de eletrodos e a correção entre os perfis. De acordo com Elis (1999, p.103-104),

A correção da polarização de eletrodos, que não é nula apesar do nome destes, que consiste em colocar-se os dois eletrodos a poucos centímetros de distância e medir o potencial entre eles, que deve ser descontado de todas as leituras do perfil. A outra correção deve ser feita entre os perfis, medindo-se o potencial entre o início de cada perfil ou em uma linha base. Os valores lidos em todos os perfis são então corrigidos em relação ao perfil inicial.

A principal vantagem desta modalidade é a considerável diminuição no erro acumulativo, além da boa qualidade dos dados obtidos e a menor possibilidade de anomalias causadas por ruídos espúrios.

4.3.2.2 Método de gradientes

Esta modalidade de trabalho consiste em medir sucessivamente as diferenças de potencial $\Delta V_1 = U_1 - U_0$, $\Delta V_2 = U_2 - U_1$, etc., entre as estacas contíguas do perfil (ORELLANA, 1972). Após a tomada da medida entre os pontos, o arranjo é deslocado no perfil de medidas, normalmente a intervalos regulares e iguais. O autor recomenda esse tipo de procedimento em áreas onde ruídos naturais ou de origem industriais tenham valores consideráveis. A **Figura 4.23** mostra, através de um desenho esquemático, como é realizada a aquisição de dados com o método de gradientes.

Da mesma forma que no método de potenciais, devem ser feitas às mesmas correções para o método de gradientes, e também, tomar o cuidado de não inverter a ordem dos eletrodos para não inverter o sinal do potencial. Os valores lidos devem ser somados para a obtenção do potencial total nas diferentes estações de medidas.

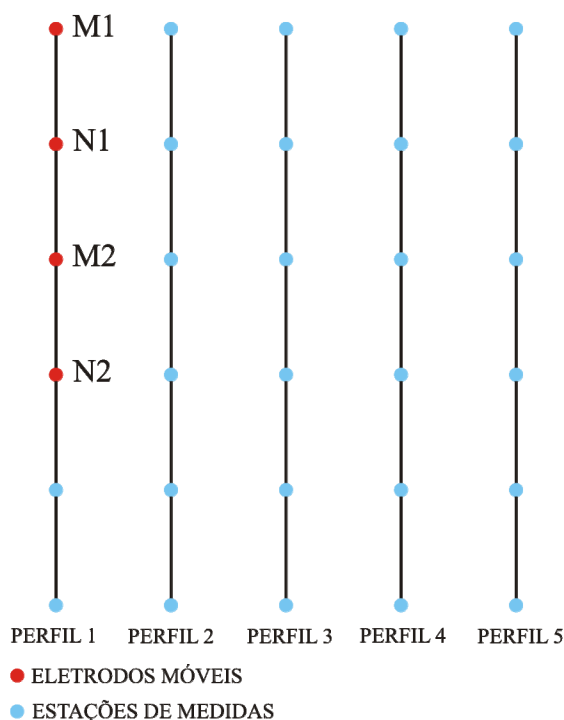


Figura 4.23 – Desenho esquemático de aquisição de dados de SP pelo método de gradientes.

O valor do SP de uma determinada estação é obtido pela sucessiva adição das medidas entre os pontos de medição. Se o comprimento do dipolo é pequeno em relação ao comprimento de onda da anomalia, a medida será o gradiente do potencial ou derivada do campo do SP total na direção do perfil (PARASNIS, 1966 apud CORWIN, 1990).

Esta modalidade oferece uma série de vantagens operacionais, como por exemplo, o uso de fios curtos, de fácil e rápido deslocamento, além de minimizar os ruídos indesejáveis devido ao uso de fios muito maiores. Segundo Corwin (op. cit.), o problema mais significativo com o método de gradientes é a sua extrema sensibilidade às anomalias espúrias geradas pelo erro acumulativo.

Segundo o autor, as principais causas são:

1. Efeitos do contato solo/eletrodos;
2. Polarização de eletrodos;
3. Derivas do potencial com o tempo.

Os efeitos de polarização de eletrodos podem ser reduzidos pelo uso da técnica *leapfrog*^{4.9}, mais os outros dois componentes são difíceis de quantificar ou corrigir. Estes componentes adicionais ao *random error*^{4.10} para cada valor medido, e porque estes valores são adicionados juntos no processo de redução do dado, os erros podem acumular para níveis significativos.

Além dessas fontes de ruídos, os dados obtidos pelo método do potencial espontâneo estejam sujeitos a um número de fontes de ruído que são estáveis ou mudam de forma devagar com o tempo. Estas incluem efeitos topográficos, aterramentos, corrosão de metal enterrado, corrosão de sistemas de proteção, potenciais eletroquímicos, potenciais de fluxo indesejáveis, efeitos de distorção do solo ou variações de resistividade lateral, depósitos minerais condutivos e atividade geotermal (CORWIN, 1990).

4.3.3 Interpretação

Os dados obtidos pelo método do potencial espontâneo são apresentados sob a forma de perfis e mapas de equipotenciais. “[...] Quando sob a forma de perfis isolados, o único tratamento aplicado aos dados é, quando necessário, as correções devidas a alguns dos ruídos citados nos itens anteriores” (GALLAS, 2005, p.139). Já no caso da apresentação dos resultados sob a forma de mapas, pode ser necessário filtrar os dados.

Segundo Corwin (op. cit.), os dados SP podem ser interpretados qualitativamente, geometricamente ou analiticamente. A interpretação dependerá dos objetivos da investigação, da qualidade do dado de campo, da quantidade de informações geológicas e geofísicas disponíveis e dados hidrológicos, bem como o tempo e recursos computacionais disponíveis para a fase de interpretação da investigação.

A interpretação qualitativa envolve a preparação de perfis, contornos e inspeção visual dos dados para procurar padrões conhecidos ou características de fontes desejadas. Por exemplo, os resultados de investigações anteriores, indicam que muitas anomalias SP negativas, frequentemente, são vistas em áreas onde o fluxo está entrando em uma barragem ou outra estrutura de contenção, e que anomalias positivas, frequentemente, são vistas acima de áreas onde o fluxo é ascendente em direção a superfície.

^{4.9} Procedimento de inversão dos eletrodos (GALLAS, op. cit.).

^{4.10} Erro cuja distribuição tem um caráter aleatório. Compare com o erro sistemático, que é um erro de caráter repetitivo como, por exemplo, o decorrente do uso de um instrumento mal calibrado (DUARTE, 2003).

Esta interpretação tem-se revelado útil em muitos casos onde os dados SP foram utilizados, primeiramente, para indicar localizações para investigações geotécnica ou geofísica mais detalhada. Porém, a utilização da técnica de interpretação geométrica, que requer um esforço adicional mínimo, pode ajudar a fornecer informação sobre a profundidade e configuração das fontes de anomalia, assim como sua localização.

A interpretação quantitativa é geométrica, envolvendo a utilização de curvas calculadas e contornos gerados por modelos de geometria simples. De acordo com Orellana (1972), a interpretação quantitativa baseia-se no estudo teórico do campo produzido por corpos polarizados de forma geométrica simples para permitir o seu cálculo matemático sem grandes dificuldades. As observações de campo comparam-se com os diversos modelos teóricos obtidos, entre eles é escolhido aquele que melhor se adequou. Estes modelos disponíveis incluem pontos polarizados, linhas, cilindros, esferas, lâminas, e outras formas geométricas (CORWIN, 1990).

Levando em consideração os ruídos e a pouca quantidade de dados, a interpretação é basicamente qualitativa, procurando associar as zonas anômalas a corpos ou estruturas de interesse. Felizmente, na maioria das vezes, esta interpretação basta para se obter sucesso nos trabalhos.

4.4 *GROUND PENETRATING RADAR*

Stern (1929 apud RODRIGUES, 2004), foi o primeiro a fazer medidas com o método *Ground Penetrating Radar* (GPR) para determinar a espessura de uma geleira. Posteriormente, Waite e Schmidt (1961 apud ANNAN, 2002) aplicaram o método GPR para identificar e mapear fissuras e espessuras de geleiras na Groenlândia. Um dos primeiros levantamentos com este método, envolvendo investigações do subsolo, foi aplicado por Cook (1973 apud DANIELS, 1996) para detectar depósitos de carvão.

Com o desenvolvimento tecnológico, a partir da década de 1980, o método GPR foi consolidado, passando a ser aplicado no estudo de diversas áreas, como por exemplo: geologia (na localização de fraturas em rochas graníticas), geotecnia (na localização de vazios em estruturas de concreto), hidrogeologia (na localização de paleocanais), meio ambiente (na localização de plumas de contaminação), arqueologia (na localização de sambaquis), planejamento urbano (na localização de objetos metálicos enterrados), investigação forense (na localização de cadáveres) e aplicações militares (na localização de minas explosivas).

No Brasil, os primeiros trabalhos sistemáticos de GPR foram realizados na década de 90 pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás. Nesta instituição, Iniciou-se uma série de publicações sobre o método GPR, sendo o primeiro trabalho de autoria de Porsani et al. (1994).

4.4.1 Propagação de ondas eletromagnéticas

O método GPR baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas em altas frequências (em geral entre 10 a 2500 MHz). De acordo com Porsani (1999, p.12),

O método GPR investiga as estruturas rasas de subsuperfície utilizando-se campos eletromagnéticos em altas frequências ($\geq 1\text{MHz}$), que por sua vez se propagam na Terra e podem ser descritos pela equação da onda. O campo eletromagnético (EM) varia no tempo, consistindo do acoplamento entre os campos elétricos e magnéticos. A interação entre os campos EM com os materiais terrestres controla como esses campos se propagam e são atenuados dentro da Terra. As variações nas propriedades elétricas, condutividade elétrica e constante dielétrica, permitem que as reflexões de subsuperfície da onda do radar possam ser observadas na superfície.

O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR são semelhantes à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que o GPR é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (PRADO, 2000). Para Annan (2002), este método destaca-se em investigações rasas, devido a sua elevada resolução e aquisição de um grande volume de dados tomados em um pequeno intervalo de tempo. Trata-se de um método relativamente novo em relação aos outros métodos geofísicos.

Uma antena transmissora colocada na subsuperfície emite pulsos de energia de alta frequência para dentro do subsolo, e encontrando mudanças das propriedades elétricas, em subsuperfície, o sinal é refletido e registrado em tempo duplo por outra antena receptora, também colocada na superfície da Terra. A energia refletida é então registrada em função do tempo de chegada, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador (DANIELS, 1996; RODRIGUES, 2004; BORGES, 2007). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície. A **Figura 4.24** mostra, através de um desenho esquemático, a reflexão de sinal EM em subsuperfície.

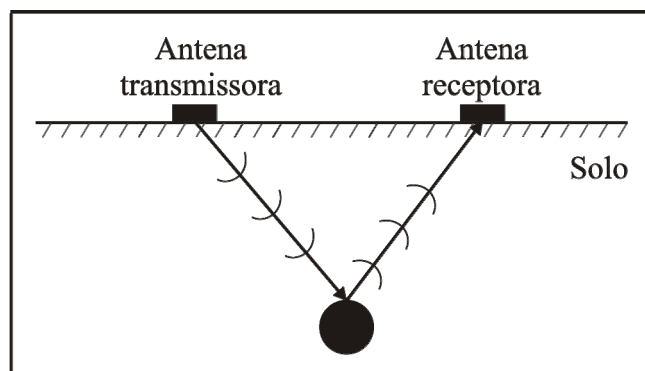


Figura 4.24 – Desenho esquemático da reflexão do sinal EM em subsuperfície.

A teoria eletromagnética está fundamentada nas equações de Maxwell, que são um conjunto de equações diferenciais que definem o comportamento de um campo eletromagnético.

Na primeira equação de Maxwell (**Eq. 4.16**), conhecida como **Lei de Ampère**, o campo magnético (\vec{H}) é produzido por correntes elétricas:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

sendo, \vec{J} a densidade de corrente de condução em ampère/metro quadrado (A/m^2), e $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ a corrente de deslocamento.

Na segunda equação de Maxwell (**Eq. 4.17**), conhecida como **Lei de Faraday**, o campo elétrico (\vec{E}) é produzido pela variação do campo de indução magnética (\vec{B}) em relação ao tempo:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

A introdução das relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell faz-se necessária para a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde atuam os campos elétricos e magnéticos.

Segundo Porsani (1999), as propriedades elétricas e magnéticas que caracterizam os materiais geológicos são:

1. Condutividade elétrica;
2. Permissividade dielétrica;
3. Permeabilidade magnética.

A primeira relação constitutiva do meio (**Eq. 4.18**), conhecida como **Lei de Ohm**, relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Nos materiais geológicos simples essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ), expressa em Siemens^{4.11} por metro (S/m). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987).

A **Tabela 4.3** mostra a condutividade elétrica e a constante dielétrica observada nos materiais comuns para as frequências do radar. Os intervalos de valores desta Tabela foram baseados nas Teses de Porsani (1999), Prado (2000) e Borges (2007).

A segunda relação constitutiva do meio (**Eq. 4.19**) relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento, ou à polarização (\vec{D}), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ). O deslocamento é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição de equilíbrio neutro para outra (polarizada), devido à influência de um campo elétrico externo (KELLER, op. cit.).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Segundo Annan (1996), a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica são importantes no método GPR, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar. Em geral, a condutividade elétrica é dominante para as ondas EM de baixas frequências (< 1 MHz); enquanto que, para altas frequências (≥ 1 MHz), a permissividade dielétrica é dominante (WARD e HOHMANN, 1987). Normalmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (**Eq. 4.20**),

^{4.11} Unidade SI de condutância elétrica equivalente ao inverso do ohm. O nome é uma homenagem aos inventores alemães Werner Von Siemens e Wilhelm Siemens (DUARTE, 2003).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\text{Eq. 4.20}), \text{ onde:}$$

ε = Permissividade dielétrica do material (F/m);

ε_0 = Permissividade dielétrica no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m).

A terceira relação constitutiva do meio (**Eq. 4.21**) relaciona diretamente o campo magnético (\vec{H}) com o campo indução magnética (\vec{B}) e a constante de proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material (μ).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

No método GPR, os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente ignorados (ANNAN, 1992), principalmente quando os alvos são metálicos, e a permeabilidade magnética relativa pode chegar a 100, no Sistema Internacional (SI).

Segundo Annan (1996), para estudos de radiação de ondas EM na Terra é suposto que:

1. A Terra é um meio isotrópico, horizontalmente estratificado, com extensão lateral finita;
2. ε e μ são constantes e independentes do tempo, sendo $\mu = \mu_0$ para a maioria das rochas, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ é a permeabilidade magnética do espaço livre.

Tabela 4.3 – Intervalo de valores de constante dielétrica e condutividade elétrica observadas em alguns materiais (PORSANI, 1999; PRADO, 2000; BORGES, 2007).

Materiais Secos	ε_r'	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	ε_r'	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia e cascalho	3 - 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito	5	1	Areia	10 - 30	0,1 - 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 - 10
Solo arenoso	4 - 6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	4 - 6	0,27	Solo arenoso	15 - 30	6,9
Sal	5 - 6	0,01 - 1	Solo argiloso	10 - 15	50
Granito	4 - 6	0,01	Arenito	20 - 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário	8	2
Aço	1	10^9	Granito	7	1
PVC	3 - 4	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 - 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	6 - 8	0	Concreto	10 - 30	0

ε_r' = Constante dielétrica, σ_0 = Condutividade dielétrica.

Considerando que as ondas esféricas podem ser representadas por uma superposição de ondas planas, combinando as equações de Maxwell com as relações constitutivas do meio, obtém-se a equação da onda plana para o campo elétrico (**Eq. 4.22**).

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (\text{Eq. 4.22})$$

sendo k definido como número de onda^{4.12}, expresso pela **Eq. 4.23**:

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i \omega \mu \sigma \quad (\text{Eq. 4.23})$$

^{4.12} Termo que agrupa as propriedades das rochas e a frequência (BORGES, op. cit.). Alguns autores usam a expressão como sinônimo de frequência espacial (DUARTE, 2003).

Para aplicações do método GPR, que atua em altas frequências, é usual reescrever o número de onda k (Eq. 4.24) como:

$$k = \alpha + i\beta \quad (\text{Eq. 4.24})$$

sendo α a constante de atenuação e β a constante de propagação dos campos eletromagnéticos, expressas pelas Eq. 4.25 e 4.26:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

Em materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade que depende, principalmente, da constante dielétrica dos materiais, expressa pela Eq 4.27:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Eq. 4.27})$$

sendo c a velocidade da luz e ϵ_r' é a constante dielétrica dos materiais.

A constante de atenuação é dada pela Eq. 4.28:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (\text{Eq. 4.28})$$

sendo α expressa em dB/m^{4.13} e σ_0 a condutividade em corrente em mS/m.

No caso do GPR, um outro parâmetro importante é a amplitude do coeficiente de reflexão da onda EM, que é normalmente escrita em termos da impedância elétrica, Z . A impedância é definida pela reação entre o campo elétrico (\vec{E}) e o campo magnético (\vec{H}) pela Eq. 4.29:

$$Z = \left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}_{\perp}} \right| \quad (\text{Eq. 4.29})$$

^{4.13} dB, decibel, é uma unidade usada para relacionar potência, razão da potência na fonte pela potência do ruído no receptor (PORSANI, 1999).

Na superfície, a impedância é expressa pela **Eq. 4.30**:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}} \quad (\text{Eq. 4.30})$$

Na prática, considerando uma incidência normal, a amplitude do coeficiente de reflexão GPR (r_{gpr} , **Eq. 4.31**) pode ser definida como:

$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}} \quad (\text{Eq. 4.31})$$

“Os valores teóricos calculados de coeficiente de reflexão auxiliam na identificação da polaridade do pulso do radar, possibilitando, deste modo, uma melhor identificação dos objetos no meio” (BORGES, 2007, p.77).

Profundidade de Investigação

A profundidade de investigação é uma das limitações do método GPR. Segundo Reynolds (1997 apud RODRIGUES, 2004), a profundidade em que o sinal atenua é de 1/e do valor inicial (37%), conhecido como *skin depth* (δ), inversamente proporcional à atenuação. Em materiais com alta condutividade elétrica, tem-se um baixo valor do δ ; enquanto que, em materiais com baixa condutividade elétrica ocorre um aumento do δ , proporcionando uma maior profundidade de investigação.

A profundidade de investigação do GPR pode ser influenciada pelos seguintes fatores: espalhamento geométrico, atenuação pelo terreno e partição da energia nas interfaces, todos relacionados à perda de energia durante a propagação da onda EM. A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação, e vice-versa.

4.4.2 Técnicas de aquisição de dados

No método GPR existem três técnicas de aquisição de dados de campo: perfis de reflexão, sondagens de velocidade e trans-iluminação ou tomografia de radar. As duas primeiras técnicas de aquisição de dados foram utilizadas na presente pesquisa, descritas a seguir:

Perfis de reflexão

É a modalidade mais utilizada pela técnica *constant offset* ou *common offset* (**Figura 4.25**).

“Nos perfis de reflexão, uma ou mais antenas de radar são movidas simultaneamente na superfície do solo, e os traços são adquiridos em intervalos de distância ou tempo contínuos [...]” (BORGES, 2007, p.78). O resultado é um perfil GPR, onde no eixo horizontal as posições das antenas mostrando as variações das propriedades dielétricas de subsuperfície em função do tempo duplo dos refletores no eixo vertical (PORSANI, 1999).

Sondagens de velocidade

As sondagens *Common Mid Point* (CMP) e *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR) são aplicadas no método GPR. Essas sondagens “[...] são usadas para obter uma estimativa da velocidade do sinal GPR versus a profundidade na terra, através da variação do espaçamento das antenas para uma localização fixa e medindo-se a mudança de tempo duplo das reflexões de subsuperfície [...]” (PORSANI, op. cit, p.54). Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo (**Figura 4.26a**). Já na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (**Figura 4.26b**).

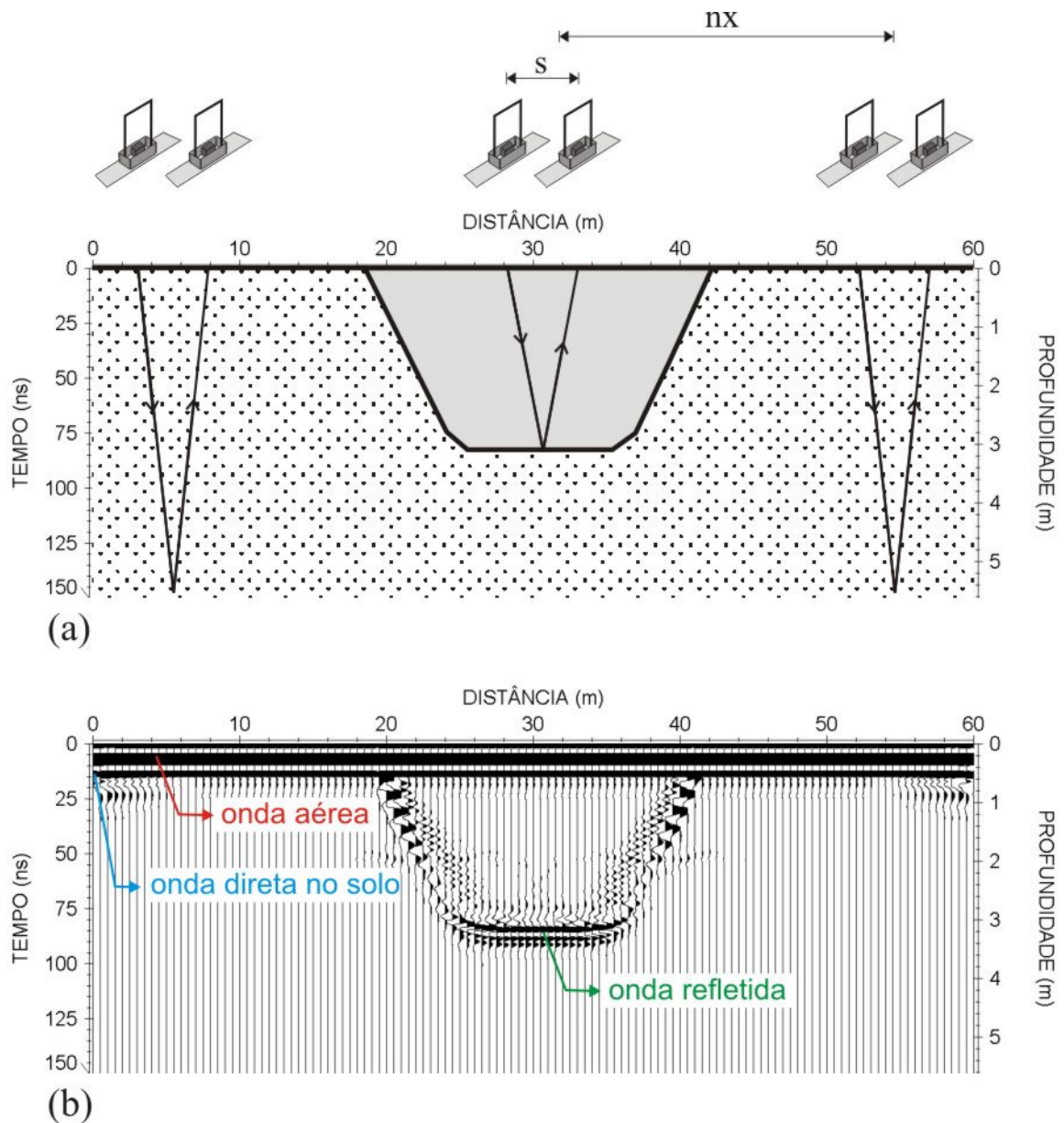


Figura 4.25 – (a) Desenho esquemático de aquisição de dados no modo *common offset*. (b) Traços mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta no solo e da onda refletida na subsuperfície. S é o espaçamento entre as antenas, e nX é o espaçamento entre os traços.

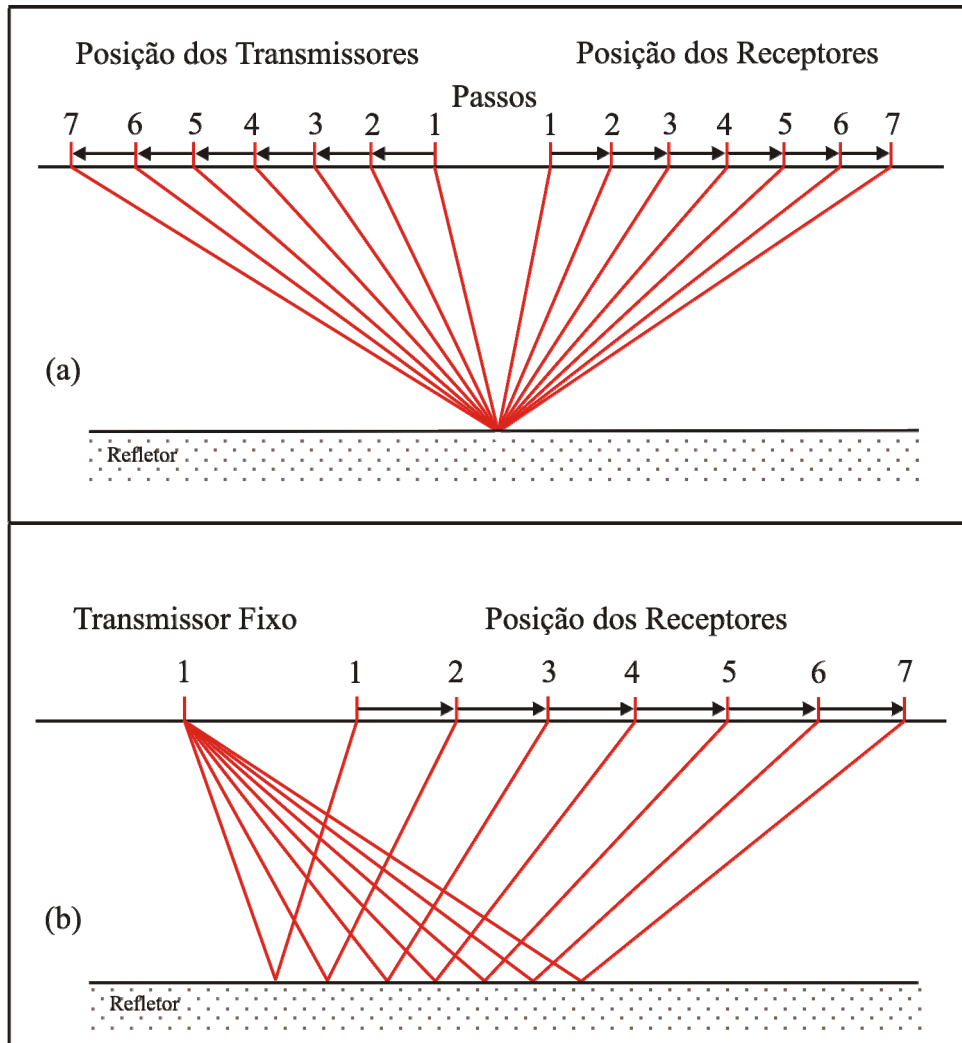


Figura 4.26 – Desenho esquemático dos tipos de sondagens de velocidade. (a) Sondagem CMP. (b) Sondagem WARR. (modificado de PORSANI, 1999).

Um bom detalhamento sobre o método GPR pode ser encontrado em Porsani (op. cit.) e Borges (2007).

4.5 INVESTIGAÇÃO DIRETA

4.5.1 Tecnologias *direct push*

Estas tecnologias serão descritas de acordo com Knödel et al. (2007). As tecnologias *direct push* são ferramentas utilizadas para realizar investigações em subsuperfície por trados ocos (tubos de aço) com pequenos diâmetros (*driving, pushing* e/ou *vibrating* no solo), permitindo coletar amostras de solo, solo-gás e água subterrânea. Os trados podem estar equipados com sondas que fornecem contínua medidas de propriedades em subsuperfície, *in situ*.

As tecnologias *direct push*, desenvolveram-se devido à necessidade crescente de avaliar locais contaminados mais rapidamente e completamente, do que é possível com os métodos convencionais. Com o desenvolvimento destas tecnologias, os poços de monitoramento permanente não são mais os únicos métodos para coletar amostras de água ou caracterizar o local. Estas tecnologias permitem amostragem múltipla de solo, solo-gás e água subterrânea de forma mais rápida. Portanto, as tecnologias *direct push* tem uma grande importância para uma avaliação rápida de um local.

Elas são mais aplicáveis em sedimentos não consolidados; porém, a sua utilização em sedimentos não consolidados com elevadas porcentagens de cascalhos pode ser uma limitação de penetração. As tecnologias *direct push* possuem limitações de penetração para sedimentos semi-consolidados e não é possível penetrar em formações consolidadas; entretanto, para corpos rochosos altamente intemperizados é possível fazer uso destas tecnologias.

Além de proporcionarem a coleta de amostras, as tecnologias *direct push* podem ser utilizadas para instalação dos poços de monitoramento permanente ou temporário e piezômetros, sendo todos de pequenos diâmetros. Elas também podem ser utilizadas na instalação de equipamentos de remediação, como: poço de extração de vapor de solo^{4.14} e pontos de injeção de *air sparging*^{4.15}.

^{4.14} Promove a extração, a vácuo, dos contaminantes voláteis presentes na zona não saturada concomitante ao estímulo das atividades bacterianas aeróbicas.

^{4.15} Utiliza o insuflamento de ar ou oxigênio na zona saturada com o objetivo de promover uma espécie de *stripping* na água subterrânea e desprendendo os compostos orgânicos voláteis a serem captados em superfície geralmente por sistema de extração de vapor. A injeção de ar no solo, também, promove a biodegradação dos contaminantes pela atividade bacteriana aeróbica.

No caso da não possibilidade do uso das tecnologias *direct push* devido à dificuldade de penetração no solo, outros métodos de perfuração são necessários na avaliação e remediação do local, onde condições geológicas são desfavoráveis para a utilização desta tecnologia ou onde são necessários poços de diâmetros grandes.

Uma vantagem destas tecnologias é a quantidade mínima de material de resíduo gerado, em função da pequena remoção do solo pelo trado de avanço e retração. Embora, esta característica resulte em alguma compactação do solo que poderia reduzir a condutividade hidráulica de argilas e siltes, existem métodos para minimizar estes problemas.

Por outro lado, embora os métodos convencionais de perfuração resultem em uma menor compactação do solo, estes métodos geram uma significativa quantidade de amostras contaminadas. Além disso, esses métodos têm o potencial de provocarem uma redistribuição da contaminação, como produto de fase livre e residual, trazendo-os a superfície.

A escolha de um método *direct push* (ou a combinação de métodos *direct push*), apropriado para um local específico, exige uma clara compreensão dos objetivos da coleta de amostras, porque muitas ferramentas são projetadas apenas para uma finalidade específica, como coleta de amostras de água subterrânea.

Tipos de equipamentos *direct push*

1. *Rod systems*;
2. Ferramentas de amostragens;
3. Medidas, *in situ*, usando sondas especializadas;
4. Equipamento para *advancing direct push rods*.

Existem dois tipos de *rod systems*, que são *single-rod* e *cased*. Esses sistemas permitem fazer a coleta de amostras de solo, solo-gás e água subterrânea. Os *single-rods systems* são os mais comuns usados em equipamentos *direct push*. Eles utilizam somente um *string rods* para conectar a sonda ou ferramenta de amostragem à torre. Feita a amostragem, o *string rods* normalmente é removido inteiro do furo de sonda. A coleta de amostras em profundidades maiores pode requerer novamente a entrada de um furo de sonda com um amostrador vazio e repetir o processo. Já no *cased systems* a amostragem é feita no interior dos rods, e as amostras podem ser coletadas sem a necessidade de remover o *string* de rods inteiro do solo.

Os amostradores de solo podem ser selados e não selados. Os amostradores de solo selados permanecem fechados até atingirem a profundidade da amostragem; enquanto que os amostradores não selados permanecem abertos até a profundidade alvo. Os amostradores de solo não selados são utilizados, em combinação com *single-rod systems*, quando é necessário fazer amostragem em grãos finos não contaminados e formações coesas. O amostrador *piston* é o único tipo de amostrador de solo selado disponível atualmente. Ele é similar ao amostrador de barril (tipo de amostrador não selado), exceto que a abertura do amostrador é selada com um *piston*. Assim, enquanto o amostrador é re-inserido em um furo de sonda aberto, solo contaminado e água podem ser impedidos de entrar no amostrador.

Problemas que interferem na seleção de amostradores de solo incluem a capacidade do amostrador fornecer amostras para descrição litológica, caracterização geotécnica ou análise química. Além disso, a possibilidade de contaminação de uma amostra com um amostrador específico deve ser considerada.

Os amostradores de água são *exposed-screen* e *sealed-screen*. Os amostradores *exposed-screen* são apropriados para amostragem multinível em sedimentos arenosos de grãos finos e material grosseiro. Estes amostradores são utilizados em um único evento de amostragem. Já os amostradores *sealed-screen* são mais apropriados para coletar amostras em uma única profundidade. As ferramentas de amostragens de água *direct push* permitem coletar amostras mais rapidamente e um custo menor do que os poços de monitoramento tradicionais. Esta vantagem sobre os poços de monitoramento resulta na possibilidade de coletar muito mais amostras em um período curto de tempo. Entretanto, os maiores problemas do equipamento *direct push* para água são a perda de compostos orgânicos voláteis e a estratificação dos contaminantes.

Sondas *direct push* especializadas, também, são utilizadas para fazer medidas geofísicas, geoquímicas e geotécnicas, *in situ*, em subsuperfície. Esses métodos são chamados de instrumentos de perfilagem, e fornecem informações objetivas (estratigrafia, profundidade da água subterrânea, condutividade hidráulica aproximada e localização da fase livre e residual), mas a interpretação das medidas ainda pode ser subjetiva e, portanto, requer correlação com amostras atuais. O *Cone Penetrometer testing* (CPT) é o método mais comum para coletar medidas. Os métodos de perfilagem são ideais para locais com geologia complexa, porque esses métodos podem rapidamente fornecer perfis contínuos da estratigrafia em subsuperfície.

CAPÍTULO 5

5 ENSAIOS REALIZADOS

Os levantamentos geofísicos foram realizados em uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto-SP. Nesta área, no período de agosto de 2005 a dezembro de 2005, realizaram-se ensaios geofísicos com os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e GPR. Em julho de 2006, realizou-se o levantamento geofísico com o método do potencial espontâneo.

A realização dos levantamentos geofísicos na área de estudo foi conduzida em perfis sobre os resíduos e fora desses, em áreas adjacentes, com a proposta de estudar as relações entre os resíduos e o ambiente natural, assim como a possível pluma de contaminação gerada. As posições dos 7 furos sondagens e 8 poços de monitoramento foram sugeridas com base nos resultados obtidos pelos ensaios geofísicos. Para caracterização bacteriana foram coletadas amostras de solo em um local específico, uma vez que a anomalia geofísica observada neste local pode estar associada à biodegradação.

A localização desses ensaios na área de estudo é apresentada na **Figura 5.1**.

5.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Os dados de eletrorresistividade e polarização induzida foram adquiridos através da técnica de caminamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento de 10 metros entre os eletrodos e cinco níveis de investigação. 20 perfis na direção N-S magnético, paralelos e equiespaçados foram realizados, denominados de Linhas C1 a C20.

As Linhas C1 e C2 foram executadas próximas da cava 1. As Linhas C3, C4, C5 e C6 foram realizadas de forma a atravessar a cava 1. A Linha C7 foi executada entre a cava 1 e a cava 2. As Linhas C8, C9, C10 e C11 foram executadas de forma a atravessar a cava 2. A Linha C12 foi realizada entre a cava 2 e 3. As Linhas C13 e C14 foram realizadas de forma a atravessar a cava 3. As Linhas C15 e C16 foram executadas entre a cava 3 e 4. A Linha C17

foi executada de forma a atravessar a cava 4. A Linha C18 foi realizada na borda leste da cava 4. As Linhas C19 e C20 foram realizadas depois da cava 4.

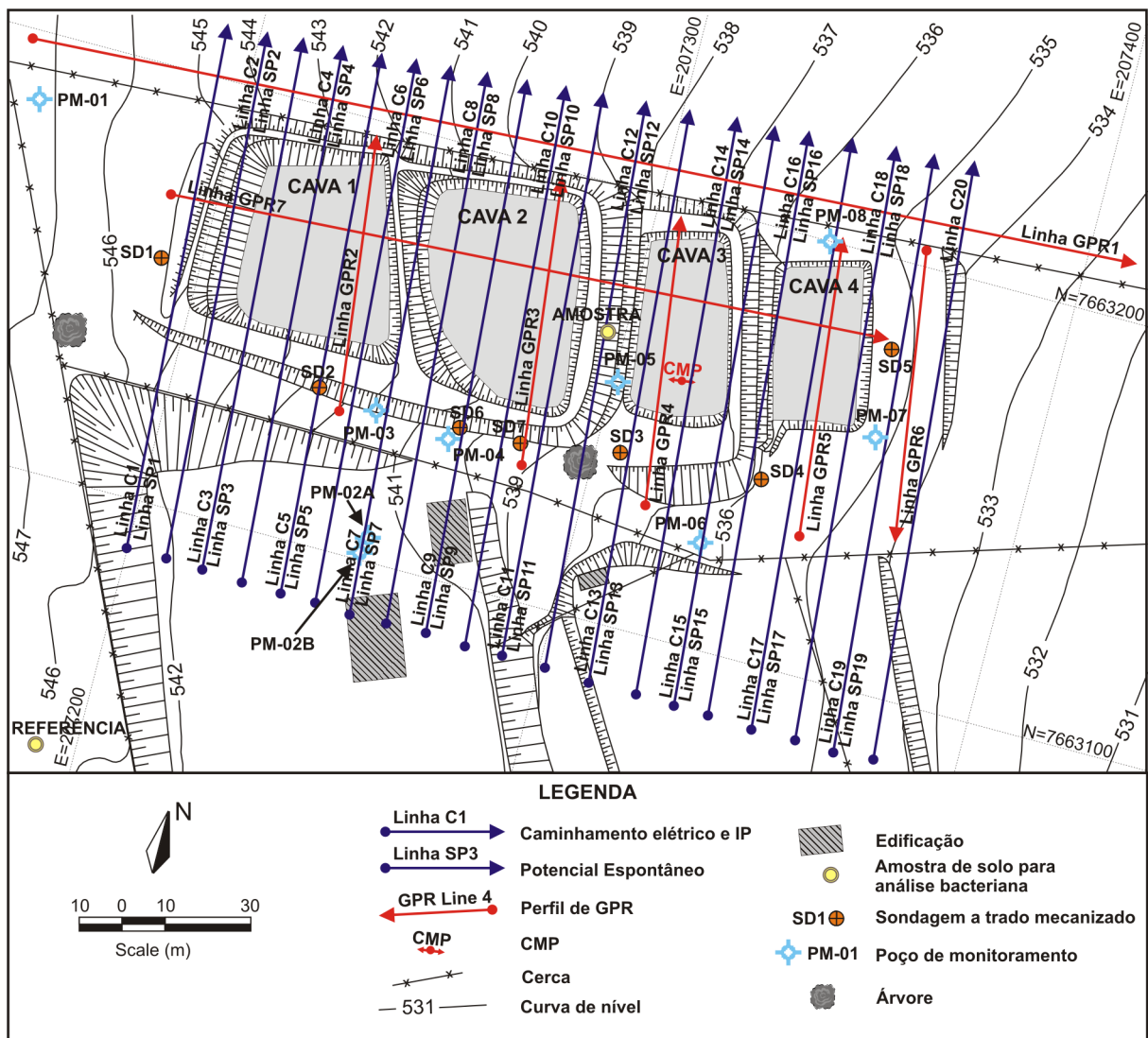


Figura 5.1 – Mapa de localização dos ensaios na área de estudo.

O conjunto de dados 3D foi construído a partir desses perfis (**Figura 5.2**), o que diminuiu o tempo de aquisição e tornou a metodologia viável. Em todos os perfis foram utilizados eletrodos metálicos, tanto como eletrodo de corrente como eletrodo de potencial.

Houve uma tentativa de realizar aquisições 3D com o arranjo pólo-pólo com recobrimento total e diagonal cruzado, com o objetivo de comparar os resultados obtidos para as três formas de aquisição. Entretanto, esta proposta foi desconsiderada na prática devido ao aumento excessivo no tempo de aquisição dos dados de campo, tornando inviável a realização do trabalho.

Sabe-se que a qualidade dos dados adquiridos e, conseqüentemente, a qualidade do modelo gerado podem ser afetadas por diversas fontes de ruídos, dentre as quais a resistência de contato, o que pode afetar seriamente a qualidade da medida. Em locais de resistência de contato superior a 20 kohm, sugere-se que as medidas não sejam realizadas, pois há uma grande interferência no fluxo da corrente injetada no solo e um aumento no nível de ruído nos dados (IRIS, 1993). Desta forma, procurou-se realizar as medidas com resistência de contato máxima de 10 kohm. Para minimizar o problema encontrado de altos valores de resistência de contato entre os eletrodos e o solo, foi necessário o uso de uma solução de água com NaCl para umedecimento do solo, com a finalidade de diminuir a resistência de contato e, assim, melhorar a razão sinal/ruído.

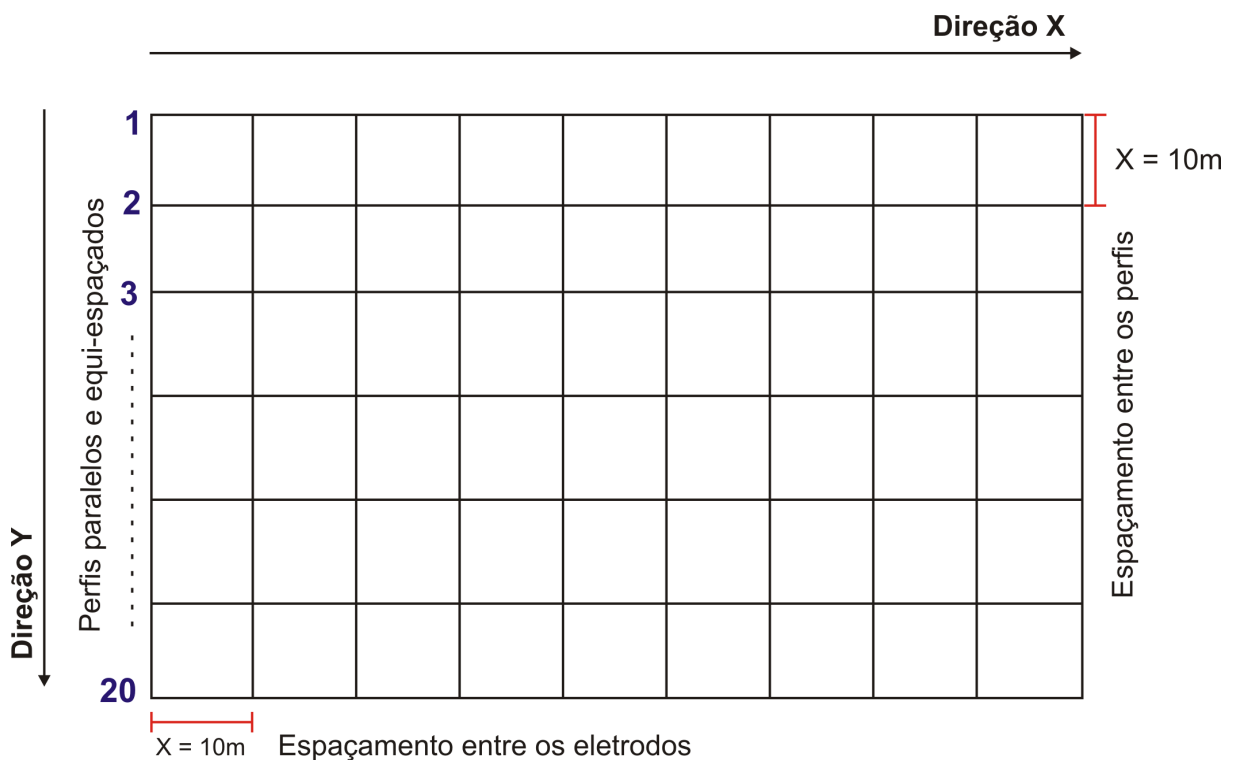


Figura 5.2 – Desenho esquemático da aquisição 3D a partir de uma série de seções 2D paralelas e equi-espaçadas.

O equipamento utilizado foi o Syscal R2, fabricado pela empresa francesa IRIS, de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP (**Figura 5.3**). Este equipamento consiste em um sistema de emissão e recepção, montados numa única unidade, acoplado a uma fonte de tensão controlada. Os dados IP foram adquiridos no domínio do tempo e os

parâmetros de aquisição de dados utilizados para os ensaios foram: intervalo de tempo de 2 segundos e tempo de atraso (*delay time*) de 0,2 segundos.



Figura 5.3 – Equipamento Syscal R2, fabricado pela IRIS.

Para diminuir o tempo de aquisição de cada perfil, foi utilizado um comutador eletrônico de eletrodos desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Geofísica do Departamento de Geofísica do IAG/USP (HIODO et al., 2001). Foi possível diminuir o tempo de aquisição de dados com a utilização deste comutador e de um sistema de conexão entre o eletrodo e o cabo de potencial. A **Figura 5.4** mostra fotos de algumas aquisições realizadas com a técnica de caminhamento elétrico na área de estudo.

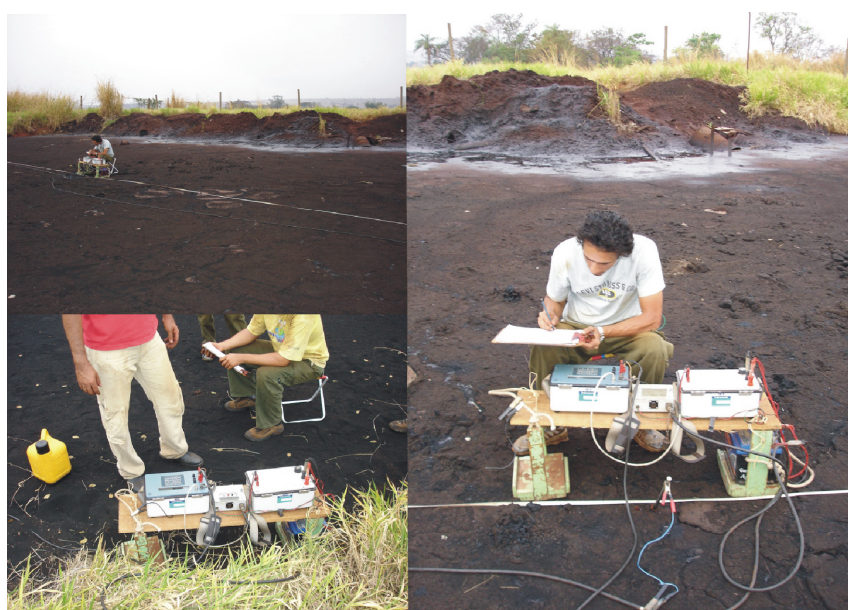


Figura 5.4 – Fotos mostrando aquisições com a técnica de caminhamento elétrico na área de estudo.

Os dados de eletrorresistividade e polarização induzida foram modelados nos *softwares* Res2dinv versão 3.53 (GEOTOMO, 2003) para a inversão 2D e Res3dinv versão 2.1(GEOTOMO, 2001) para a inversão 3D, que determinam automaticamente um modelo bidimensional e tridimensional de resistividade e/ou cargabilidade para o meio, através dos dados de campo. Ambos são programas de inversão para resistividade e polarização induzida (modelagem por suavização).

Primeiramente os perfis de caminhamento elétrico foram modelados individualmente, com a finalidade de avaliar a qualidade dos dados e, conseqüentemente, evitar feições errôneas que possam dificultar a interpretação dos modelos 3D. Foram removidos os dados de cargabilidade aparente considerados muito ruidosos pelo equipamento (desvio padrão superior a 3% no conjunto de medidas). Esses dados apresentavam-se discrepantes dos dados vizinhos, ora muito altos (por exemplo, 500 mV/V), ora negativos. Esses dados foram extraídos manualmente, pois poderiam criar falsas anomalias no modelo de cargabilidade e dificultar a interpretação do modelo gerado.

O método de otimização por mínimos quadrados, utilizado pelos programas de inversão, tenta reduzir a diferença entre os valores de resistividades aparentes medidos e calculados ajustando a resistividade dos blocos, e esta diferença é dada pelo erro *Root Mean Squared* (RMS). Entretanto, o modelo com o menor erro RMS pode às vezes mostrar variações irrealistas e grandes nos valores de resistividade e nem sempre é o melhor modelo geológico. O melhor procedimento é escolher o modelo para o qual o erro RMS da iteração anterior não muda significativamente. Isto ocorre, geralmente, entre a terceira e quinta iterações (GEOTOMO, op. cit.).

Face ao exposto, e partindo da observação que o erro RMS não diminuiu significativamente nos modelos após a terceira iteração, optou-se por considerar neste trabalho os modelos obtidos na terceira iteração das inversões 2D e 3D. O erro RMS obtido para os modelos de cargabilidade foi bem menor em relação ao erro obtido para os modelos de resistividade. Este fato está relacionado ao grande contraste de resistividade observado para o erro de ajuste dos dados, como constatado no trabalho de modelos sintéticos 2D de resistividade de Olayinka e Yaramanci (2000).

Posteriormente, os dados dos 20 perfis foram concatenados em um único conjunto de dados que foi submetido à rotina de inversão 3D. Após a inversão, os dados foram exportados para o programa *software* Surfer, versão 6.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1997) e foi feita uma interpolação com o método de triangulação linear, que é um método mais simples e mais fiel aos dados (o mesmo que o Res3dinv utiliza). Os modelados 3D de resistividade e cargabilidade são apresentados em “*slices*” correspondentes a cinco níveis de investigações nas profundidades de 1,75 metros, 5,5 metros, 9,8 metros, 14,8 metros e 20,5 metros.

5.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

As medidas de SP foram realizadas segundo o método de potenciais, que consiste na determinação da diferença de potencial de uma série de estações com relação a uma estação base (TELFORD et al., 1990). O eletrodo móvel percorreu uma malha com estações a cada 10 metros ao longo de 19 perfis paralelos, denominados de Linhas SP1 a SP19. A análise das medidas obtidas pelo método do potencial espontâneo foi feita de forma qualitativa através do *software* Surfer, versão 6.0 (GOLDEN SOFTWARE, op. cit.). Foi feita uma filtragem nos dados do SP, fazendo-se a correção de cada perfil e excluindo os dados que apresentaram valores espúrios. Após o tratamento preliminar dos dados, foi gerado o mapa de potencial espontâneo da área de estudo.

O equipamento utilizado foi o milivoltímetro (um módulo receptor para ensaios de resistividade) de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP. O método do potencial espontâneo requer o uso de um milivoltímetro com impedância de entrada grande o suficiente para que seja possível captar potenciais bastante fracos durante os trabalhos de campo. O valor de impedância deve ser superior a 10^8 ohm (TELFORD et al., op. cit.).

Em todos os perfis de SP foram utilizados eletrodos não-polarizáveis, pois o uso de eletrodos de metal convencionais pode gerar uma ação eletroquímica no contato com o solo, o que resultaria em potenciais da mesma magnitude daqueles que estão sendo medidos. Esses eletrodos não polarizáveis, que são mostrados na **Figura 5.5**, consistem em um metal imerso numa solução saturada de seu próprio sal, no caso o cobre (Cu) em sulfato de cobre (CuSO₄), dentro de um recipiente poroso que permite que a solução vase lentamente e faça contato com

o solo. Com o objetivo de melhorar o contato entre o eletrodo e o solo, foi necessário o uso de bentonita^{5.1}.

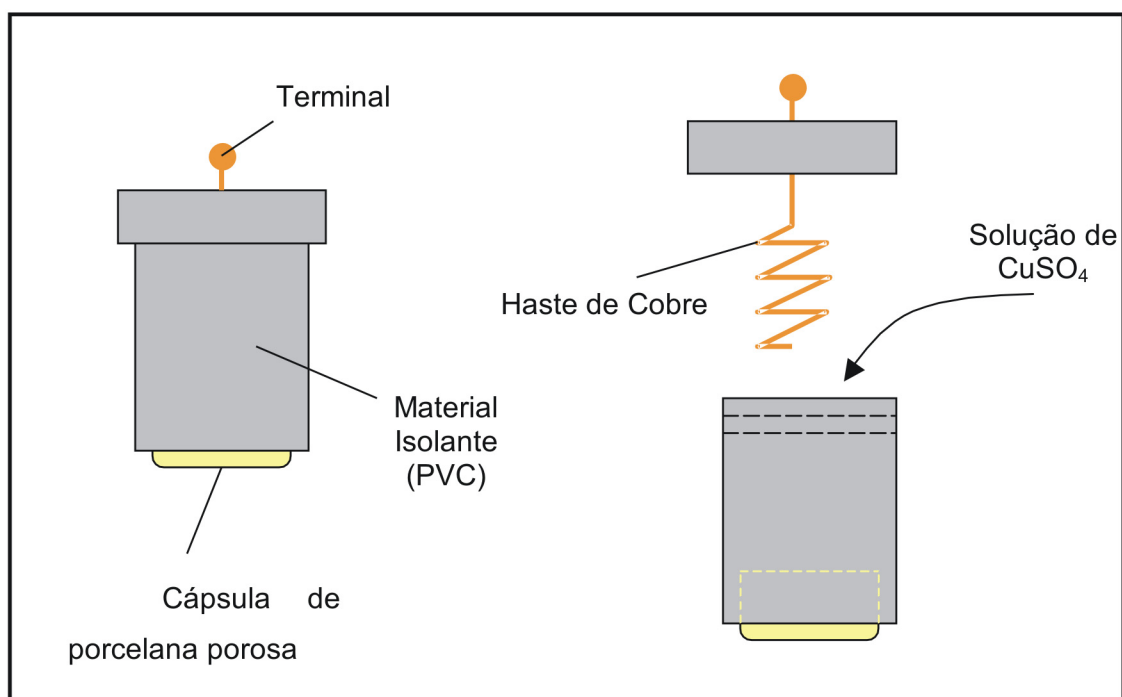


Figura 5.5 – Desenho esquemático de eletrodos não-polarizáveis.

5.3 GROUND PENETRATING RADAR

A aquisição de seções de GPR foi realizada dentro e próximo das cavas de disposição de resíduos de óleo lubrificante, com o intuito de verificar a existência e o comportamento do contaminante no subsolo. Os dados adquiridos no modo *common offset* perfazem 7 seções, denominadas Linhas GPR1 a GPR7. O equipamento utilizado foi o RAMAC I, fabricado pela empresa Mala Geoscience, de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP. Foi utilizado um par de antenas não-blindadas de 100 MHz sobre um trenó de PVC desenvolvido pelo Prof. Dr. Francisco Hiodo, no Laboratório de Instrumentação Geofísica do Departamento de Geofísica do IAG/USP. Os parâmetros de aquisição utilizados foram: espaçamento entre traços de 0,2 metros, frequência de amostragem de 1640 MHz, empilhamento de 32 traços, e os disparos e registros dos traços coletados continuamente com a utilização de um odômetro (**Figura 5.6**). Uma sondagem de velocidade do tipo CMP foi adquirida na cava 3 com um par

^{5.1} Argila plástica, de origem vulcânica, usada na preparação de lama de perfuração. Seu principal componente é a montemorilonita (DUARTE, 2003).

de antenas não blindadas de 200 MHz, espaçamento entre traços de 0,05 metros, empilhamento de 32 e frequência de amostragem de aproximadamente 2900 MHz.

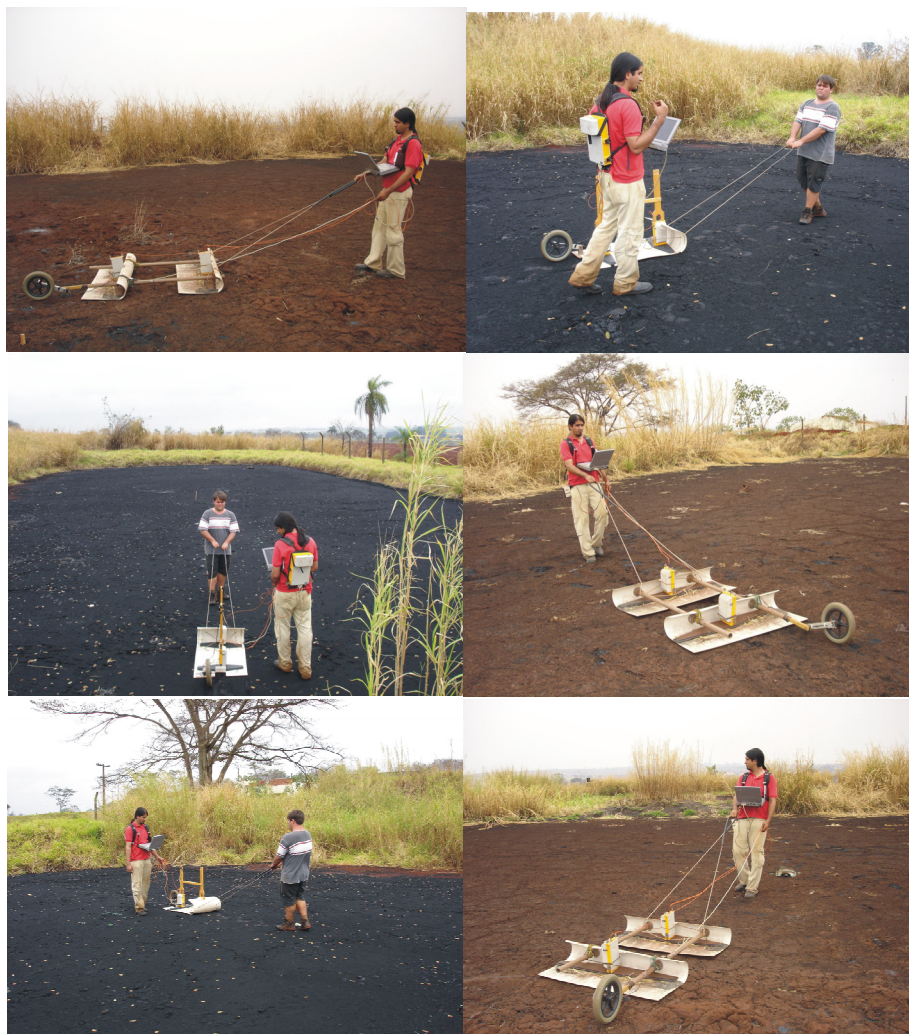


Figura 5.6 - Fotos de aquisições de dados GPR utilizando antenas não-blindadas de 100 MHz sobre um trenó de PVC e odômetro.

Os dados foram processados no software ReflexW, versão 4.0 (SANDMEIER, 2006). A rotina de processamento consistiu em conversão de formato do arquivo, ajuste do tempo zero, filtros temporal (*dewow* e passa-banda), ganhos (linear e exponencial), conversão em profundidade (velocidade constante) e correção topográfica. Os mesmos parâmetros de ganho e filtros foram aplicados a todas as seções com o intuito de comparação das amplitudes dos sinais.

A velocidade média de propagação da onda eletromagnética, dentro das cavas, foi determinada pelo método da *semblance*^{5.2} (YILMAZ, 1987). A **Figura 5.7a** mostra o modelo de velocidade obtido com o ajuste do refletor hiperbólico a 44 ns. A **Figura 5.7b** mostra o traço resultante do empilhamento da CMP após a correção *normal moveout* (NMO). A **Figura 5.7c** mostra a CMP e os principais eventos identificados (ondas aérea, direta no solo e refletida), e a **Figura 5.7d** mostra o espectro de velocidade indicando a máxima coerência do refletor na posição de 44 ns. Nota-se no espectro de velocidade que há um “estiramento” nos valores de máxima coerência de velocidade no intervalo entre 0,08 e 0,02 m/ns (**Figura 5.7d**). De acordo com Yilmaz (op. cit.), este efeito de “estiramento” é comumente provocado quando a correção NMO é realizada em CMP’s que possuem pequenos *offsets*. Entretanto, a máxima coerência de velocidade está centrada em 0,089 m/ns, a qual foi utilizada para conversão das seções em tempo para profundidade.

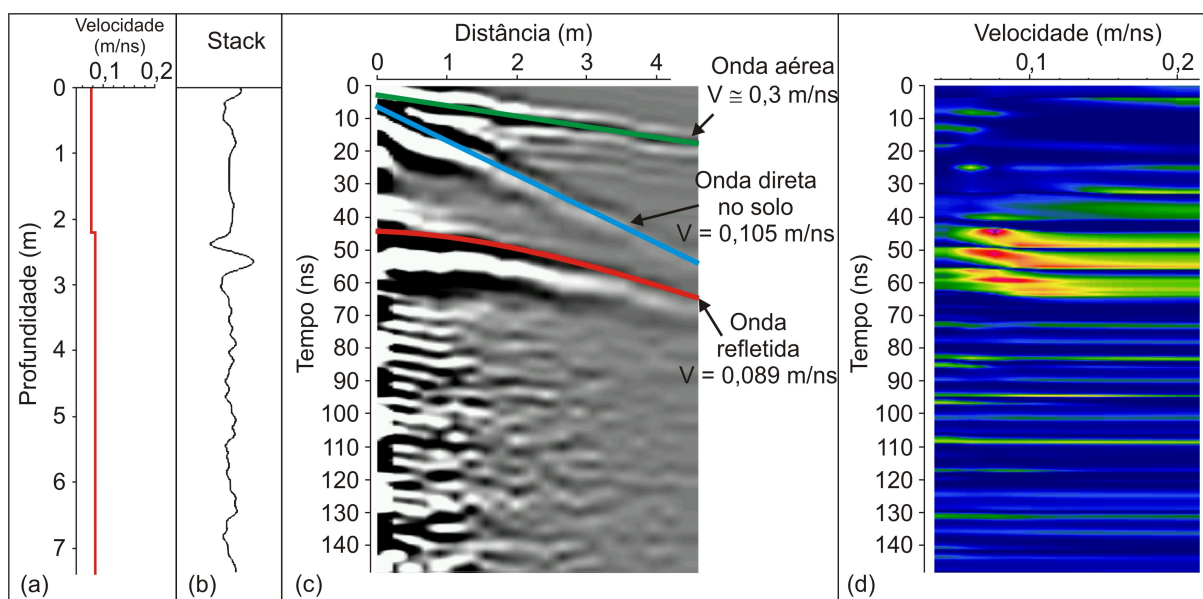


Figura 5.7 – Análise de velocidade de CMP realizada sobre a cava 3. (a) Modelo de velocidade. (b) Traço empilhado da CMP. (c) Sondagem de velocidade CMP com os principais eventos identificados. (d) Análise de semblance mostrando a velocidade de maior coerência do refletor hiperbólico.

^{5.2} Método de análise de velocidade dos dados de reflexão sísmica no qual o fator de coerência em cada ponto da matriz tempo x velocidade é proporcional à relação do quadrado da soma pela soma dos quadrados dos dados CMP (DUARTE, 2003).

5.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA

As posições dos furos de sondagens e poços de monitoramento foram sugeridas com base nos resultados obtidos dos ensaios geofísicos.

Os 7 furos de sondagens, denominados de SD1 a SD7, foram perfurados utilizando a tecnologia *direct push*. Foram feitas coletas de amostras de solo a cada mudança litológica. Os furos de sondagens foram feitos em locais onde é esperado encontrar a contaminação. As informações obtidas dos furos de sondagens servem para controlar a interpretação dos resultados geofísicos e coletar amostras para avaliação geotécnica e análises químicas (ATEKWANA et al., 2000).

8 poços de monitoramento foram instalados, sendo um deles um poço multinível, denominados de PM-01 a PM-08. O sistema de perfuração empregado foi o sistema rotativo, sem uso de fluido de perfuração, com brocas tipo “rabo de peixe”, com trados ocos^{5.3}. Os poços de monitoramento convencional e multinível foram construídos com os seguintes materiais:

1. Revestimento piezométrico em PVC geomecânico, DN 50, barras de 1 m e 2 m;
2. Filtro piezométrico em PVC geomecânico, DN 50, barras de 1 m e 2 m, abertura das ranhuras de 0,5 mm;
3. Tampa inferior roscável em PVC geomecânico, DN 50;
4. Luvas roscáveis em PVC geomecânico, DN 50;
5. Tampas (boca do tubo geomecânico) de alumínio de 2”, com borracha expansível;
6. Pré-filtro tipo peróla, granulometria de 1,0 a 2,0 mm;
7. Bentonita Compactolit;
8. Bentonita em pó;
9. Cimento;

^{5.3} Do inglês *hollow stem auger*. Os trados ocos são construídos com tubos de aço carbono, circundados por uma hélice que, introduzidos rotativamente no solo por uma perfuratriz hidráulica, permite a execução de manobras e colocação de tubulações no seu interior (PENNER, 2005).

10. Areia comum lavada;

11. Tampa de proteção de alumínio, com cadeado de segurança, com 0,60 metros de altura e pintadas em amarelo. Pois, trata-se de área abandonada, facilitando a localização.

Os PMs 01 e 04 são totalmente penetrantes, ou seja, foram perfurados até atingir a base do aquífero suspenso. O PM-02 é multinível, apresentando filtro a duas profundidades (próximo à superfície do lençol freático e próximo à base do aquífero suspenso). Os PMs 05 a 08 são parcialmente penetrantes devido à não identificação da base do arenito.

As amostras foram coletadas de acordo com os procedimentos sugeridos pela *United State Environmental Protection Agency* (USEPA) “*Guidance for Prospective Ground-Water Monitoring Studies*”, publicado em 1998.

Caracterização do resíduo

Realizaram-se medidas de concentração de compostos orgânicos voláteis com o detector de fotoionização em amostras do resíduo. O detector de fotoionização é utilizado para quantificar compostos orgânicos voláteis dentro do potencial de ionização de um detector de lâmpada. Neste caso, uma lâmpada de 11.7 eV é utilizada no detector de fotoionização, que é capaz de detectar uma grande quantidade de hidrocarbonetos voláteis incluindo todos Benzenos, Toluenos, Etil-benzenos e Xilenos (FELS, 1999).

Para a caracterização da fração orgânica nas amostras do resíduo, utilizou-se primeiramente o método analítico USEPA 8270C, que se refere à determinação de compostos orgânicos semi-voláteis por cromatografia gasosa seguida de espectrômetro de massa (GC/MS). O USEPA 3540C foi o método de extração utilizado e o USEPA 3610B foi o método de eliminação de interferentes utilizado, usando uma coluna de alumina.

Para caracterização da fração inorgânica (semi-quantitativa), as amostras do resíduo foram analisadas por Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva.

Caracterização do solo

Para a caracterização físico-química das amostras de solo, o potencial hidrogeniônico (pH) e o potencial redox (Eh), foram determinados segundo as recomendações de Camargo et al. (1986).

Para a caracterização dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) nas amostras de solo, utilizou-se a mesma metodologia para a caracterização da fração orgânica nas amostras do resíduo.

Para a caracterização da fração inorgânica, as amostras do solo foram secas em estufa (aproximadamente 105° C). Posteriormente, o solo seco foi macerado para homogeneização. Após o preparo, as amostras foram analisadas da mesma forma que as amostras do resíduo (por Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva).

Caracterização da água subterrânea

Foram coletadas duas amostras de água para cada ponto de amostragem, uma para determinação de metais totais e outra para metais dissolvidos. No campo, na segunda extração de água de cada poço de monitoramento, foram determinados os seguintes parâmetros: pH, Eh, condutividade, temperatura e oxigênio dissolvido.

Os metais zinco, ferro, cobre e manganês, foram analisados por espectrometria de absorção atômica por chama. Enquanto que, o chumbo, o titânio, o estrôncio e o alumínio, foram analisados por espectrometria de absorção atômica por forno de grafite.

É importante ressaltar, que esta etapa de investigação direta foi realizada pelo Dr. Giovanni Chaves Penner. Mais informações sobre investigação direta na área de estudo podem ser encontradas em Penner (2005).

Caracterização bacteriana

Foram coletadas seis amostras de solo, em um ponto de amostragem, entre as cavas 2 e 3. Uma vez que neste local são observadas anomalias geofísicas que sugerem contaminação pela biodegradação oriunda da atividade bacteriana. Para comparação, foi coletada uma amostra de solo (amostra de referência) em um ponto de amostragem localizado bem afastado das cavas. A localização dos pontos de amostragens pode ser vista na **Figura 5.1**.

Os materiais amostrados foram colocados em sacos plásticos e acondicionados em uma caixa térmica para posterior análise no laboratório. A análise das amostras de solo foi feita, no dia 05 de agosto de 2008, pela Dr. Adriana Parada Dias da Silveira do Instituto Agronômico, Campinas-SP.

CAPÍTULO 6

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

A seguir serão feitas as interpretações e discussões das Linhas C2, C3, C7, C8, C12, C14, C17 e C19.

A **Figura 6.1** mostra os resultados obtidos para a Linha C2, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 6,4% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.1c**) mostra que a tendência de menor resistividade a partir da profundidade de aproximadamente 14 metros, caracteriza a zona saturada no início do perfil. Esta interpretação está de acordo com a informação obtida pela sondagem SD1, feita próxima deste perfil, onde o nível d'água foi encontrado na profundidade de 13,46 metros. Os valores de resistividade acima de 130 ohm.m são interpretados como sendo o material natural presente na área (predominantemente solo residual de basalto não saturado, como constatado na sondagem SD1). Observa-se uma zona condutiva (< 95 ohm.m) em relação ao meio natural entre as distâncias de 55 e 96 metros, que pode sugerir a presença de contaminação gerada pela migração do contaminante proveniente da cava 1, visto que este perfil está localizado próximo desta cava. Esta zona de contaminação na seção é assinalada como uma linha pontilhada de cor preta.

A **Figura 6.2** mostra os resultados obtidos para a Linha C2, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 2,8% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.2c**) mostra que o solo residual de basalto não saturado é caracterizado por valores de cargabilidade entre 5 a 17 mV/V. O efeito IP é alto dentro da zona saturada. Observa-se a ocorrência de uma anomalia com baixos valores de cargabilidade (< 5 mV/V), entre as distâncias de 55 e 96 metros, que caracteriza a presença da contaminação, sendo identificada na seção por uma linha pontilhada de cor preta.

Os valores de resistividade superiores a 130 ohm.m, associados aos valores de cargabilidade entre 5 a 17 mV/V, são interpretados como sendo o material natural (solo residual de basalto não saturado). Os baixos valores de resistividade (< 95 ohm.m) associados aos baixos valores de cargabilidade (< 5 mV/V) em uma área específica na seção, sugerem contaminação do meio. Os baixos valores de resistividade associados aos altos valores de cargabilidade caracterizam a zona saturada, a partir da profundidade de 14 metros. O limite entre a zona não saturada e a zona saturada, também, foi bem definido pela cargabilidade.

A **Figura 6.3** mostra os resultados obtidos para a Linha C3, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 34,4% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.3c**) mostra que os valores de resistividade superiores a 486 ohm.m são interpretados como sendo o material natural (predominantemente solo residual de basalto não saturado, como constatado nas sondagens SD1 e SD2). A cava 1 é caracterizada por valores de resistividade de 45 a 180 ohm.m, localizada entre as distâncias de 65 e 95 metros, não sendo possível identificar a base desta cava. Nas zonas de maior aeração (laterais da cava), o meio passa a ser menos resistivo em relação ao meio natural. Provavelmente, reações químicas e/ou atividade biológica presente nestas zonas causam a diminuição na resistividade. Estas zonas identificadas na seção são assinaladas como retângulos de cor vermelha, situados na superfície do terreno.

Observa-se, uma anomalia condutiva (< 35 ohm.m) entre as distâncias de 80 e 90 metros, que sugere contaminação dentro da zona saturada. Esta anomalia identificada na seção é assinalada como uma linha pontilhada de cor preta.

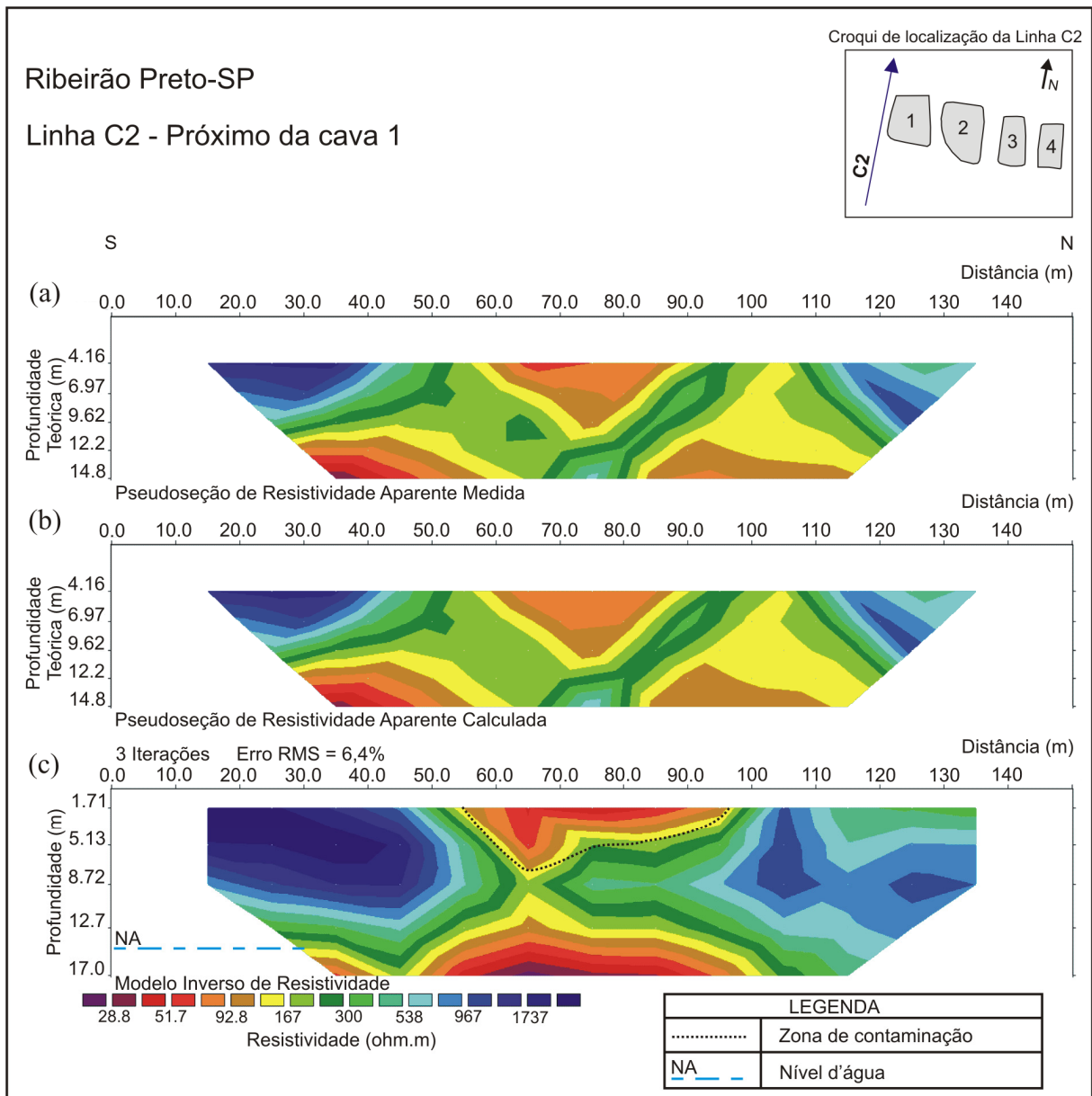


Figura 6.1 - Linha C2. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

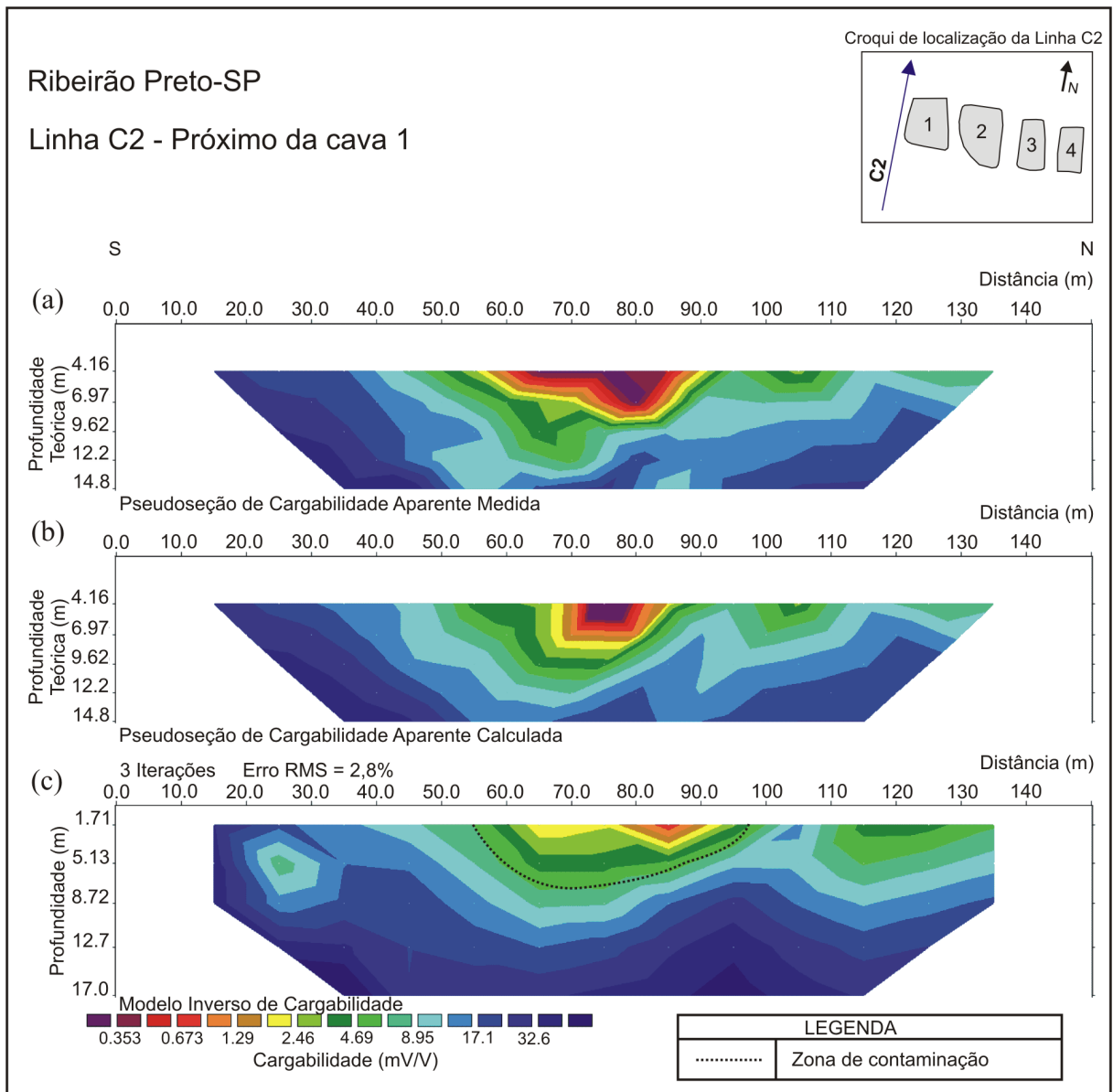


Figura 6.2 - Linha C2. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.4** mostra os resultados obtidos para a Linha C3, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 7,3% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.4c**) mostra que o material natural não saturado é caracterizado por valores de cargabilidade de 10 a 30 mV/V. Os baixos valores de cargabilidade (< 4 mV/V) entre as distâncias de 65 e 96 metros, caracterizam a presença do resíduo da cava 1 e, também, é possível identificar a base desta cava. A geometria da cava 1 é identificada na seção por uma linha pontilhada de cor vermelha. As zonas de maior aeração (laterais da cava), são caracterizadas por cargabilidades entre 4 a 10 mV/V, que são valores mais baixos que aqueles que caracterizam o meio natural. Estas zonas identificadas na seção são assinaladas como retângulos de cor vermelha, situados na superfície do terreno. Tal como a Linha C2, o efeito IP é alto dentro da zona saturada a partir da profundidade de 12 metros no final do perfil. O nível d'água varia de 11,05 a 13,46 metros de profundidade, como constatado pelas sondagens SD1 e SD2.

Nota-se, entre as distâncias de 80 e 90 metros, uma anomalia (valor de cargabilidade de 5 a 9 m V/V), que pode caracterizar contaminação dentro da zona saturada. Esta anomalia identificada na seção é assinalada como uma linha pontilhada de cor preta.

Os valores de resistividade acima de 486 ohm.m, associados aos valores de cargabilidade de 10 a 30 mV/V são interpretados como sendo o solo residual de basalto não saturado. Os valores de resistividade de 45 a 180 ohm.m associados aos baixos valores de cargabilidade (< 4 mV/V) caracterizam a cava 1. A cargabilidade definiu melhor a geometria da cava 1 do que a resistividade, podendo identificar os limites laterais e base da cava. O limite entre a zona não saturada e a zona saturada foi melhor definido pela cargabilidade do que pela resistividade. Tal como a resistividade, a cargabilidade identificou uma anomalia que pode ser interpretada como um caminho preferencial da contaminação, entre as distâncias de 80 e 90 metros.

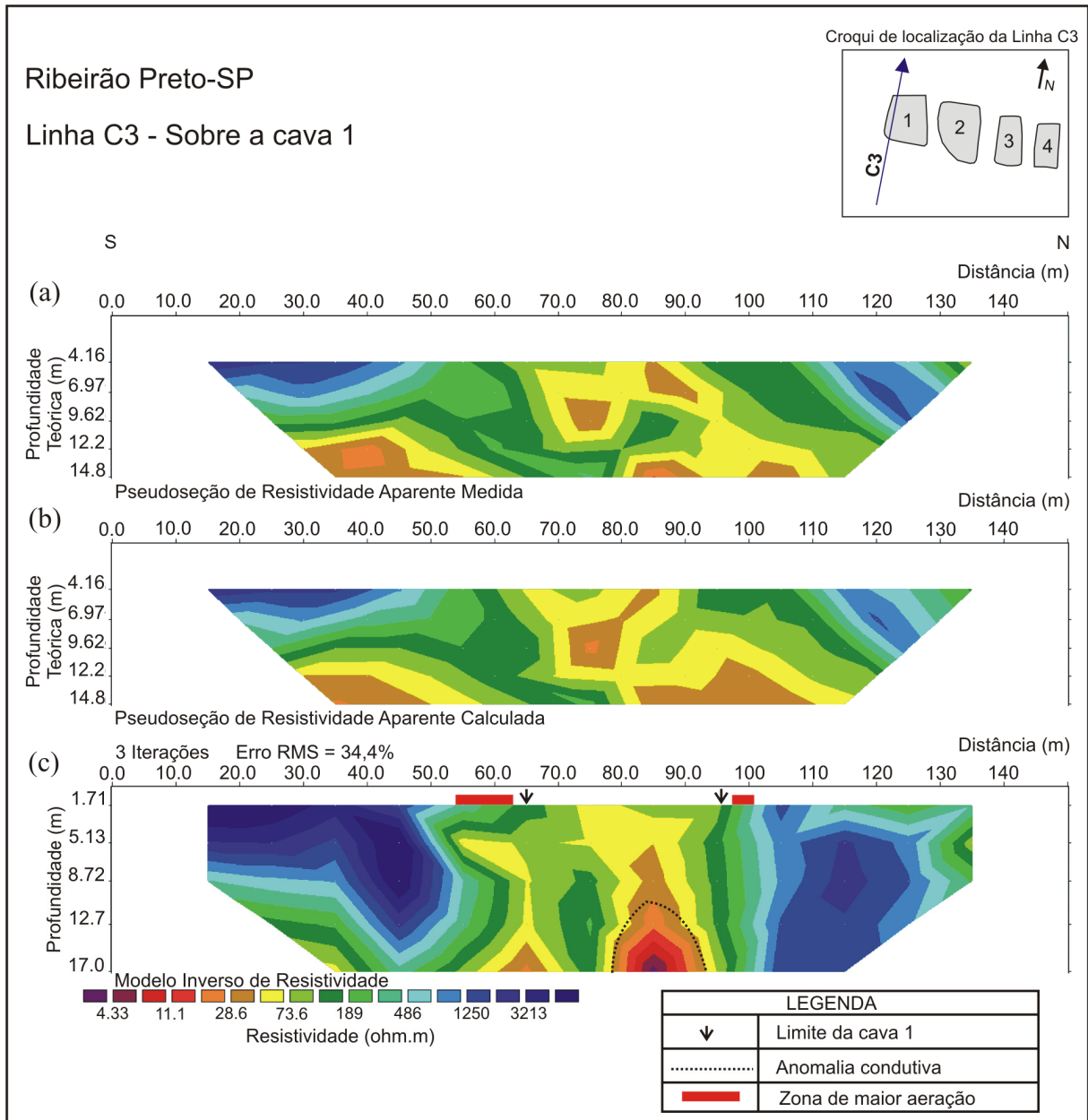


Figura 6.3 - Linha C3. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

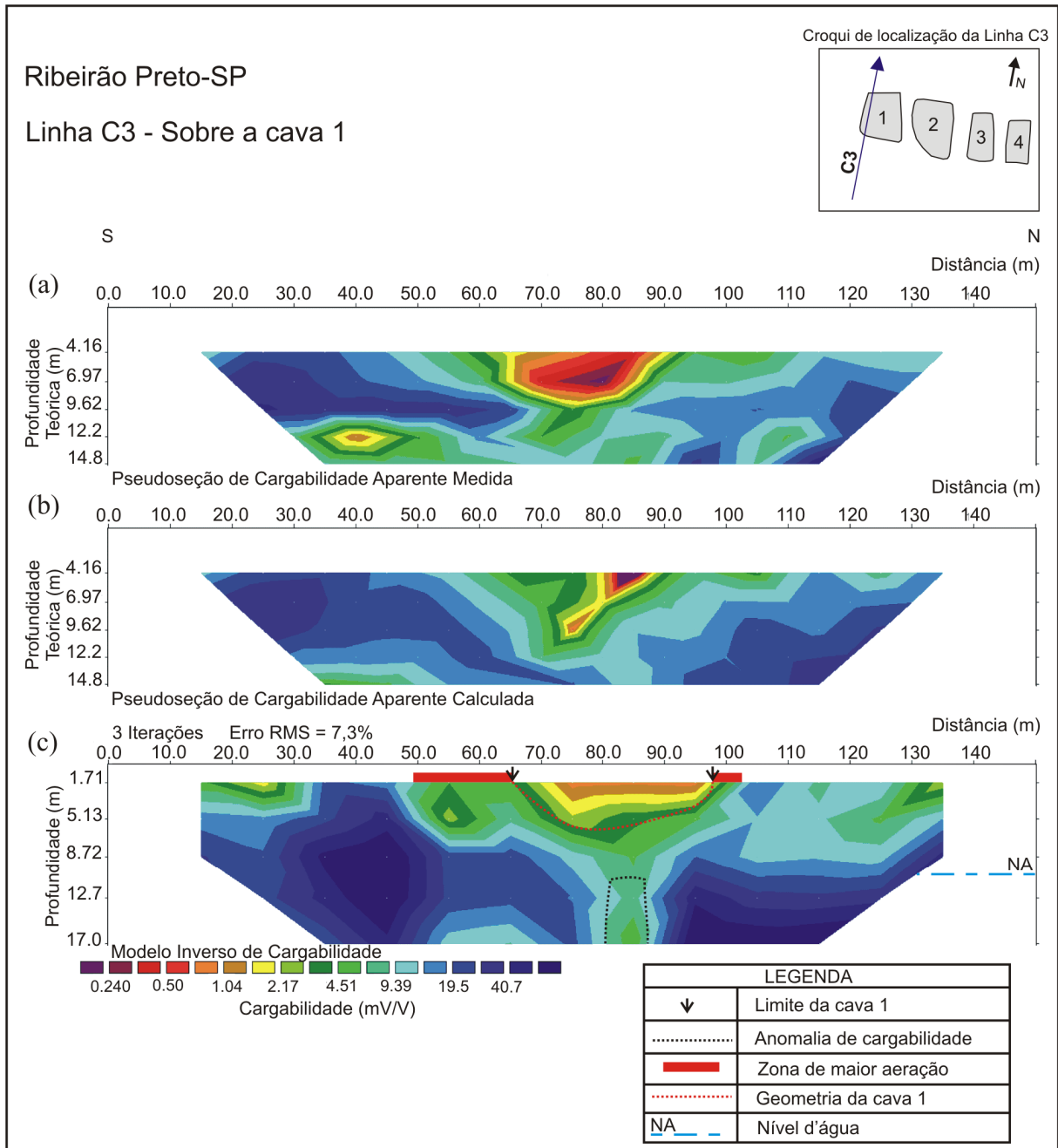


Figura 6.4 - Linha C3. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.5** mostra os resultados obtidos para a Linha C7, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 55,0% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.5c**) mostra que o meio resistivo acima de 210 ohm.m é interpretado como sendo o material natural (solo residual de basalto não saturado, como constatado pelo poço de monitoramento PM-03). Os baixos valores de resistividade (< 90 ohm.m) entre as distâncias de 64 e 90 metros, sugerem contaminação do meio. Observa-se, anomalias condutivas em mais dois pontos específicos na seção, que também, são interpretadas como zonas de contaminação no meio. Estas anomalias condutivas (zonas de contaminações), identificadas na seção, são assinaladas como uma linha pontilhada de cor preta. Levando em consideração que este perfil foi realizado entre as cavas 1 e 2, provavelmente, o perfil apresenta influência de contaminação proveniente de ambas cavas. A tendência de menor resistividade (< 110 ohm.m) a partir da profundidade de aproximadamente 12 metros caracteriza a zona saturada no início do perfil, sendo confirmada pela leitura da profundidade do nível d'água no poço de monitoramento PM-03, localizado próximo a este perfil, onde o nível d'água foi encontrado na profundidade de 11,36 metros.

A **Figura 6.6** mostra os resultados obtidos para a Linha C7, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 9,1% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.6c**) mostra que o material natural (predominantemente solo residual de basalto, como constatado pelo poço de monitoramento PM-03) é caracterizado por valores de cargabilidade superiores a 9 mV/V. Observa-se duas anomalias com valores de cargabilidade inferiores a 9 mV/V, localizadas entre as distâncias de 43 e 63 metros e entre as distâncias de 102 e 120 metros, que sugerem contaminação no meio. Estas anomalias (zonas de contaminações) identificadas na seção são assinaladas como uma linha pontilhada de cor preta.

A resistividade e a cargabilidade foram sensíveis à presença da contaminação, em posições específicas, caracterizada por valores de resistividade inferiores a 90 ohm.m associados aos valores de cargabilidade inferiores a 9 mV/V, como evidenciado na seção. Separando as zonas de contaminação do meio natural, este é caracterizado por altos valores de resistividade associados aos altos valores de cargabilidade, sendo que a partir da profundidade de 11,36 metros o material natural é interpretado como solo

residual de basalto saturado com base na informação obtida pelo poço de monitoramento PM-03.

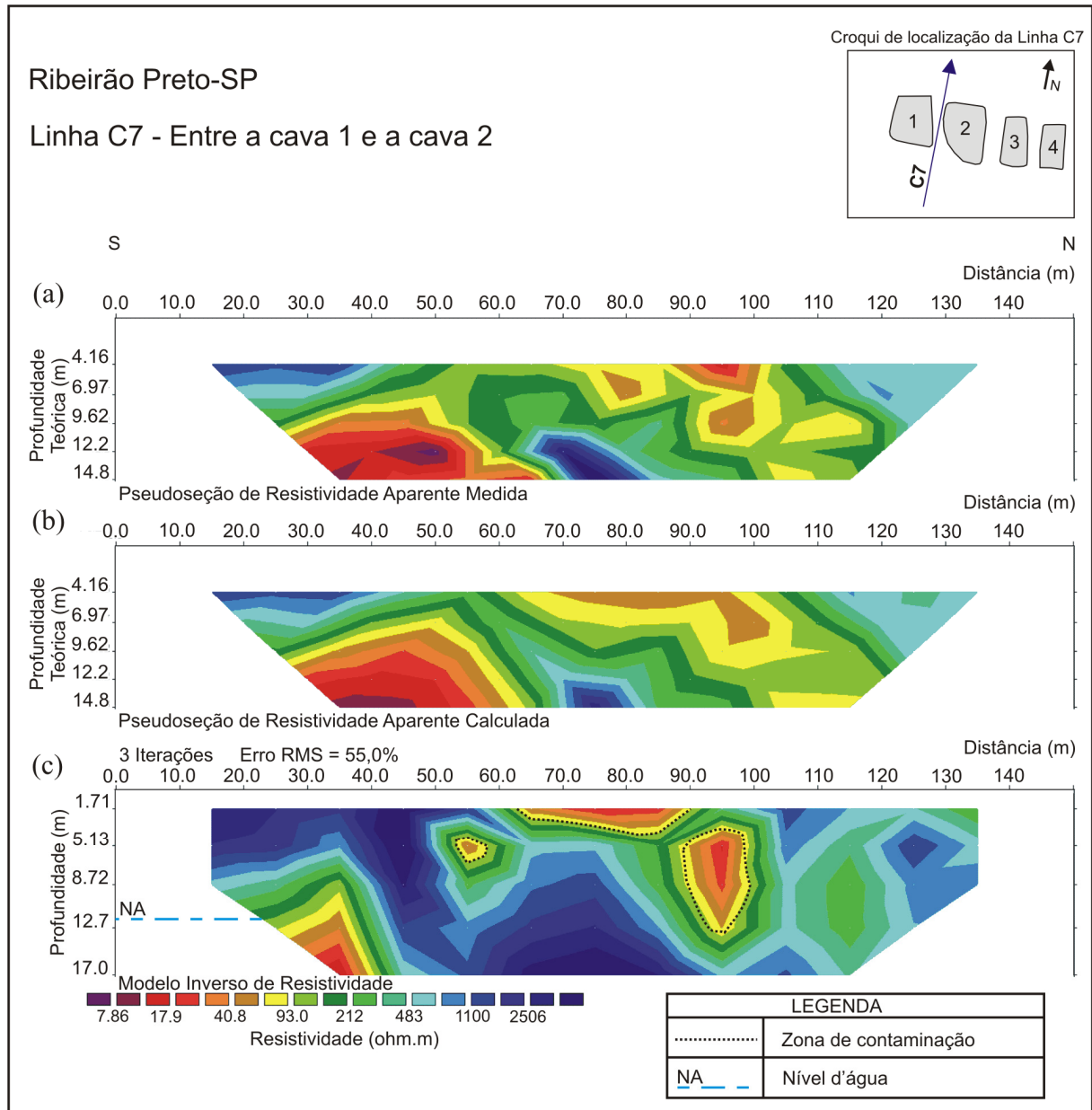


Figura 6.5 - Linha C7. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

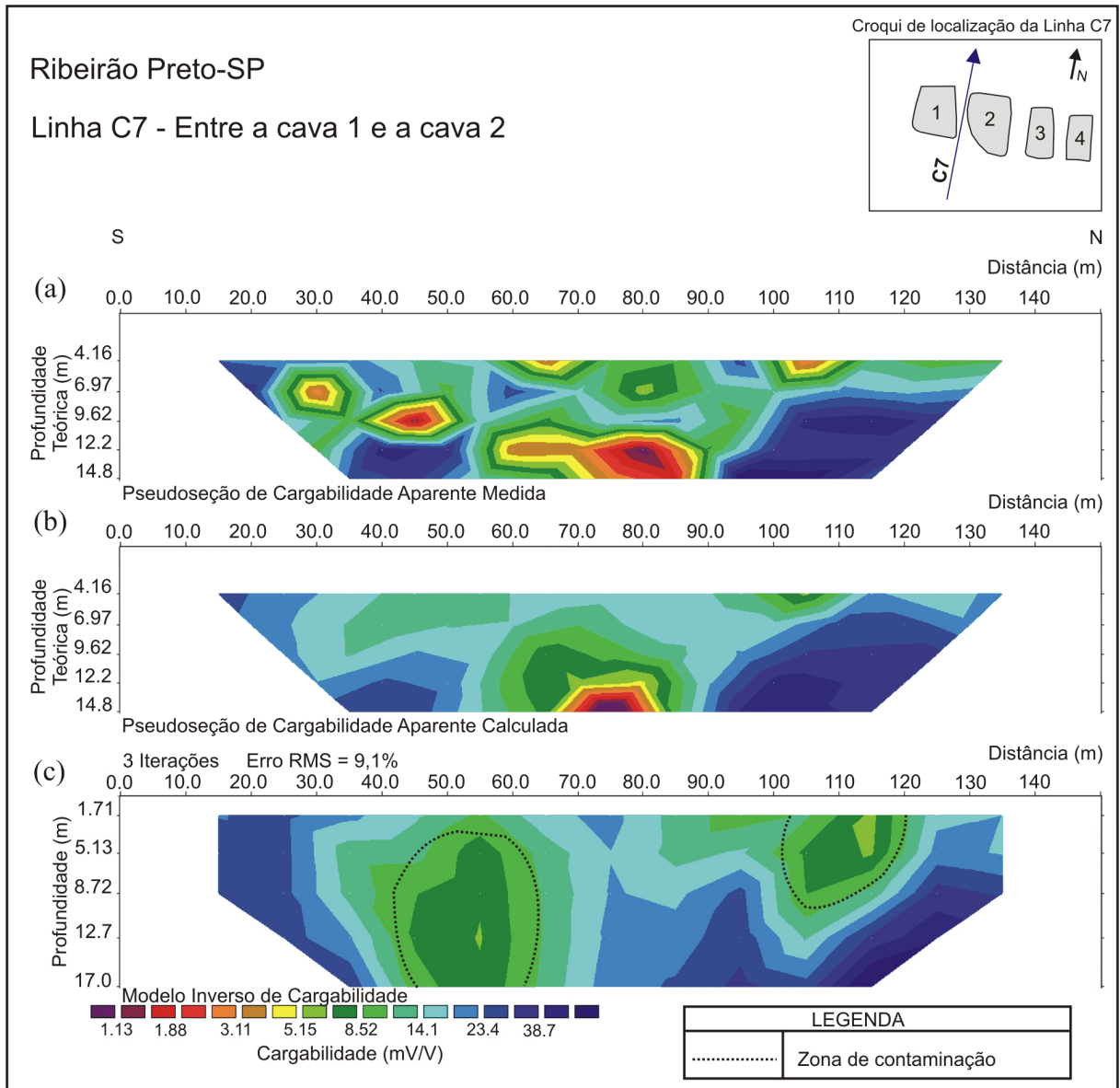


Figura 6.6 - Linha C7. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.7** mostra os resultados obtidos para a Linha C8, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 20,1% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.7c**) mostra que o material natural (predominantemente solo residual de basalto não saturado, como constatado pelo poço de monitoramento PM-04) é caracterizado por valores de resistividade superiores a 400 ohm.m. Os valores de resistividade inferiores a 400 ohm.m localizados entre as distâncias de 50 e 95 metros, caracterizam a área de influência dos resíduos da cava 2 e zonas de maior aeração. Sugere-se que processos de contaminação estão ocorrendo ao redor da cava. A tendência de menor resistividade a partir da profundidade de aproximadamente 13 metros caracteriza a zona saturada no início do perfil, sendo confirmada pela leitura da profundidade do nível d'água no poço de monitoramento PM-04, localizado próximo a este perfil, onde nível d'água foi encontrado a 10,42 metros de profundidade.

A **Figura 6.8** mostra os resultados obtidos para a Linha C8, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 5,6% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.8c**) mostra que o material natural é caracterizado por valores de cargabilidade superiores a 6,50 mV/V. A cava 2 é caracterizada por valores de cargabilidade inferiores a 4 mV/V, localizada entre as distâncias de 65 e 95 metros. Nas laterais da cava (zonas de maior aeração) e abaixo dela, sugere-se que a área, delimitada por uma linha pontilhada de cor preta na seção, esteja contaminada pelo material proveniente desta cava.

Os valores de resistividade acima de 400 ohm.m associados aos valores de cargabilidade superiores a 6,50 mV/V são interpretados como material natural. A cava 2 é caracterizada por valores intermediários de resistividade associados aos baixos valores de cargabilidade (< 4 mV/V). Os altos valores de IP associados à tendência de menor resistividade a partir da profundidade de 13 metros, caracterizam a zona saturada.

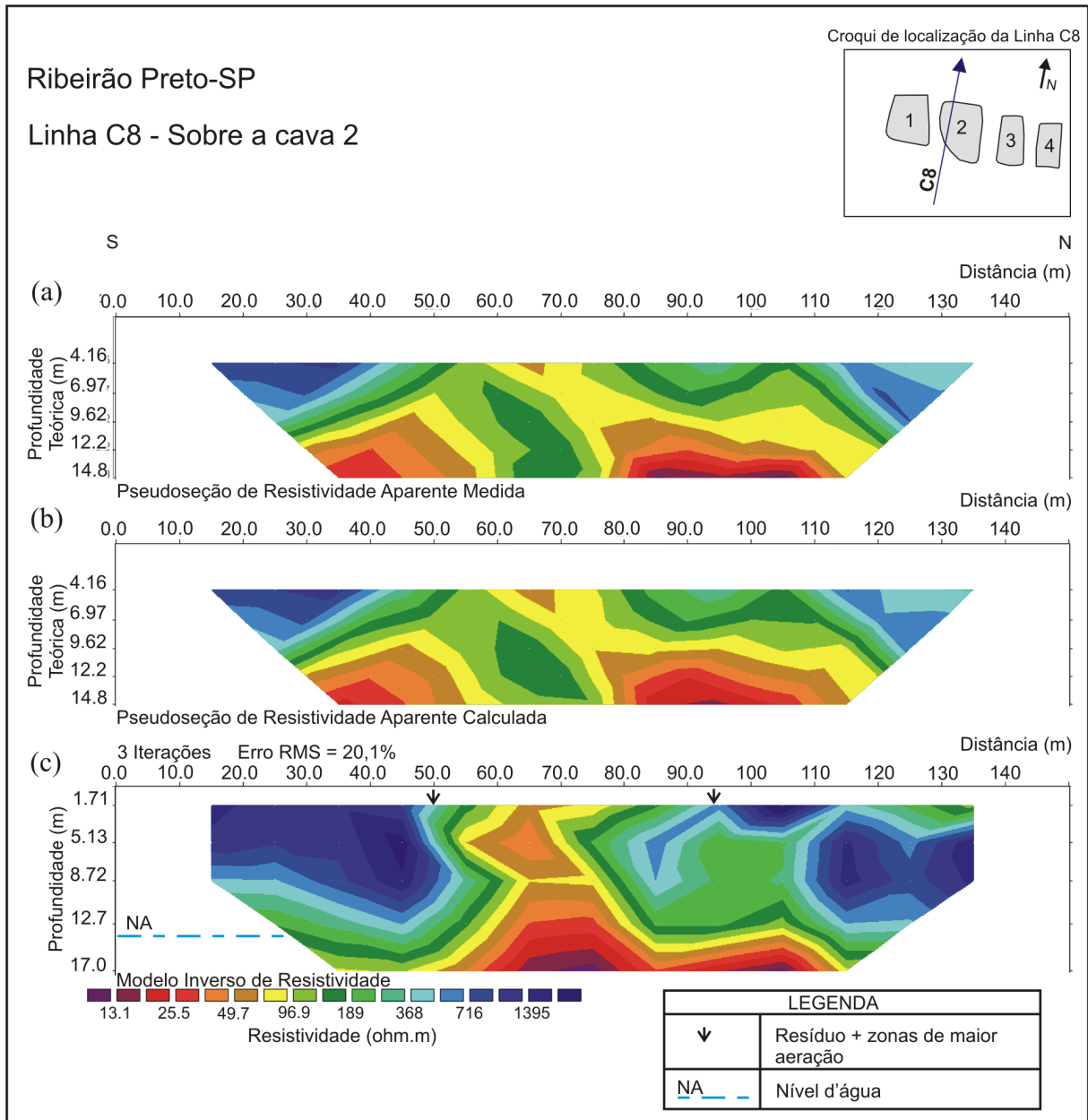


Figura 6.7 - Linha C8. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

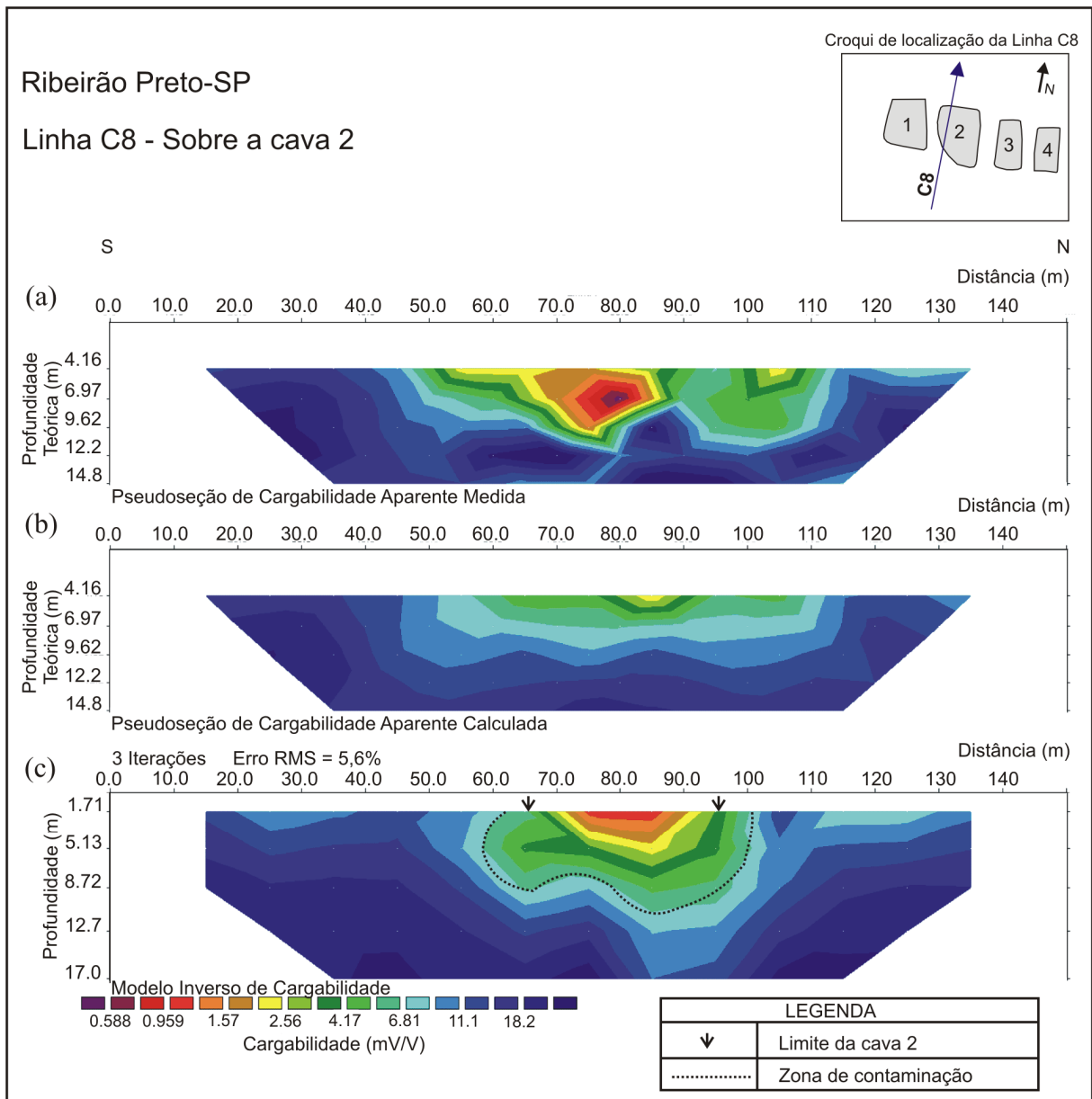


Figura 6.8 - Linha C8. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.9** mostra os resultados obtidos para a Linha C12, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 28,6% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.9c**) mostra que o meio resistivo acima de 160 ohm.m é interpretado como sendo o material natural. Ressalta-se que, na profundidade de 12 metros, encontrou-se, no poço de monitoramento PM-05, solo residual de arenito e, também, que o nível d'água foi encontrado a 28,30 metros de profundidade. A partir dessas informações, conclui-se que o posicionamento da zona saturada está abaixo dos 17 metros (limite da interpolação do modelo) e, portanto, a partir da profundidade de 12 metros o material resistivo é interpretado como solo residual de arenito não saturado sem a presença de contaminantes.

Os valores de resistividade abaixo de 160 ohm.m, entre as distâncias de 65 e 92 metros, sugerem contaminação no meio. A zona de contaminação identificada na seção é assinalada com uma linha pontilhada de cor preta. Levando em consideração que há um desnível da ordem de 2 a 3 metros entre as cavas 2 e 3, provavelmente, o perfil apresenta influência dos líquidos percolados provenientes da cava 2.

A **Figura 6.10** mostra os resultados obtidos para a Linha C12, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 4,4% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.10c**) mostra duas zonas bem evidentes. A primeira zona, com valores de cargabilidade superiores a 5 mV/V que caracterizam o material natural não saturado (solo residual de basalto e solo residual de arenito, como constatado no poço de monitoramento PM-05). A segunda zona caracterizada por valores de cargabilidade inferiores a 5 mV/V, localizada entre as distâncias de 45 e 93 metros, sendo interpretada como a zona de contaminação proveniente da disposição de resíduos principalmente da cava 2. Esta zona de contaminação identificada na seção é delineada por uma linha pontilhada de cor preta.

Como nas seções anteriores, os altos valores de resistividade associados aos altos valores de cargabilidade são interpretados como o material natural. Neste caso, o material natural é formado por solos residuais de basalto e arenito não saturados, como evidenciados no poço de monitoramento PM-05. A resistividade e a cargabilidade foram

sensíveis à presença de contaminação no meio. A zona de contaminação é caracterizada por baixos valores de resistividade associados aos baixos valores de cargabilidade.

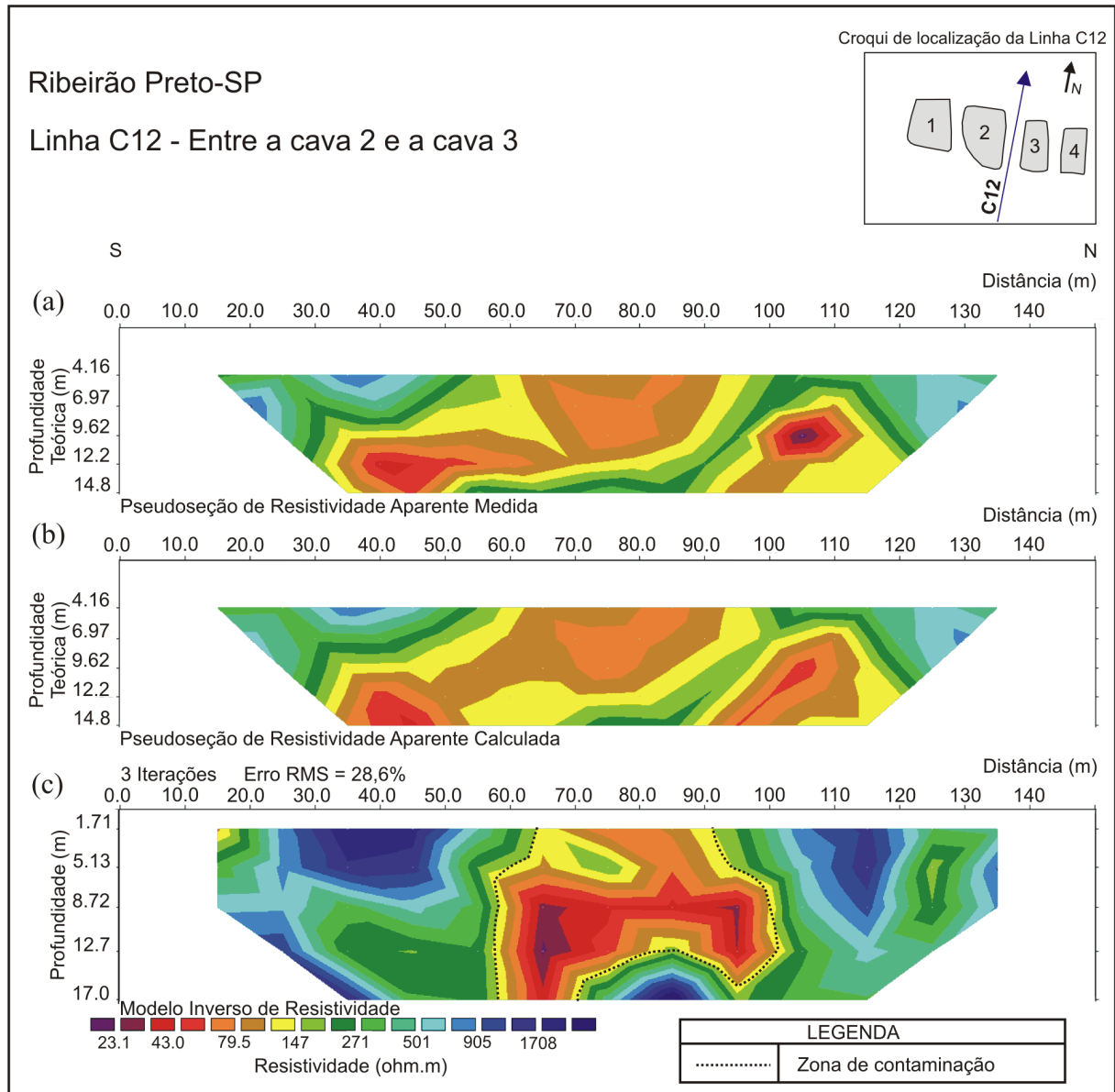


Figura 6.9 - Linha C12. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

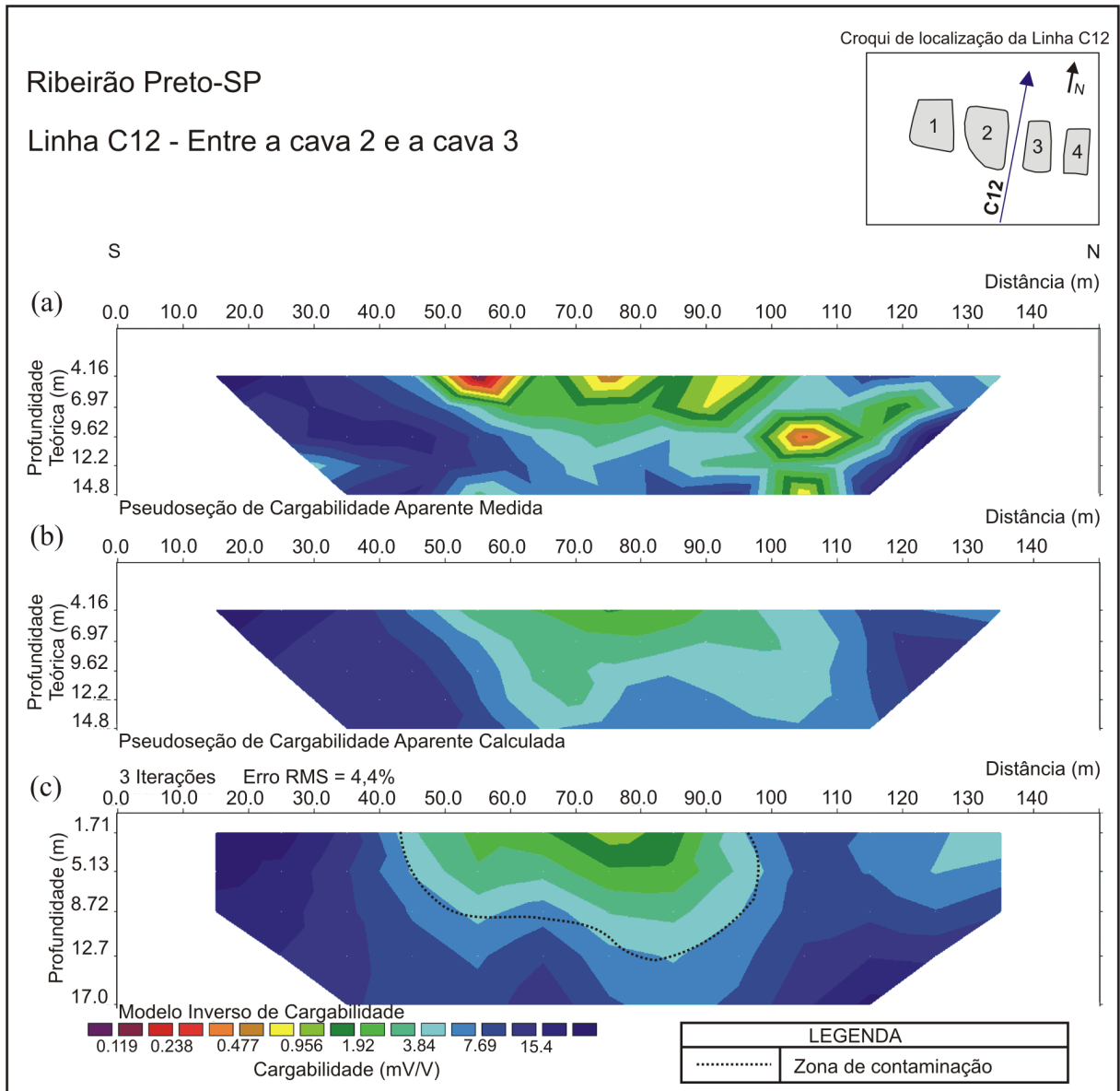


Figura 6.10 - Linha C12. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.11** mostra os resultados obtidos para a Linha C14, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 30,7% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.11c**) mostra uma zona com altos valores de resistividade entre as distâncias de 64 e 100 metros, que caracteriza a cava 3. Esta cava é mais recente cronologicamente em relação as cavas 1 e 2; portanto, acredita-se que o aumento do valor de resistividade deve ser explicado pelo fato do resíduo ser mais plástico. Sugere-se que esteja ocorrendo movimento descendente de líquidos percolados a partir da cava, observados pelas anomalias condutivas (< 100 ohm.m) delineadas na seção por linhas pontilhadas de cor preta. Ressalta-se, que na profundidade de 9 metros, encontrou-se, no poço de monitoramento PM-06, solo residual de arenito e, também, que o nível d'água foi encontrado a 27,30 metros de profundidade. A partir dessas informações, conclui-se que o posicionamento da zona saturada está abaixo dos 17 metros (limite da interpolação do modelo) e, portanto, a partir da profundidade de 9 metros, o material resistivo é interpretado como solo residual de arenito não saturado sem a presença de contaminantes.

A **Figura 6.12** mostra os resultados obtidos para a Linha C14, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 4,5% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.12c**) mostra que os valores de cargabilidade superiores a 4 mV/V caracterizam o material natural não saturado (solo residual de basalto e solo residual de arenito, como constatado no poço de monitoramento PM-06). Os valores de cargabilidade abaixo de 1 mV/V, entre as distâncias de 64 e 100 metros, caracterizam a presença do resíduo em seu estado mais bruto dentro da cava 3. Observa-se, a partir da área de disposição de resíduo, uma anomalia se desenvolvendo em profundidade e lateralmente, que caracteriza a área afetada pela contaminação. A zona de contaminação é delineada na seção por uma linha pontilhada de cor preta.

Diferentemente das cavas 1 e 2, a cava 3 é caracterizada por elevados valores de resistividade (acima de 1000 ohm.m). Levando em consideração que as duas primeiras cavas são cronologicamente mais antigas, o resíduo que preenche estas cavas tornou-se menos resistivo ao longo do tempo devido ao processo de biodegradação. Já o resíduo, que preenche a cava 3, mostra-se em seu estado mais bruto e plástico, tornando-o mais resistivo.

Da mesma forma que as cavas 1 e 2, a cava 3 é caracterizada por baixos valores de cargabilidade. A resistividade e a cargabilidade foram sensíveis à contaminação, permitindo imagear a área afetada pelo contaminante.

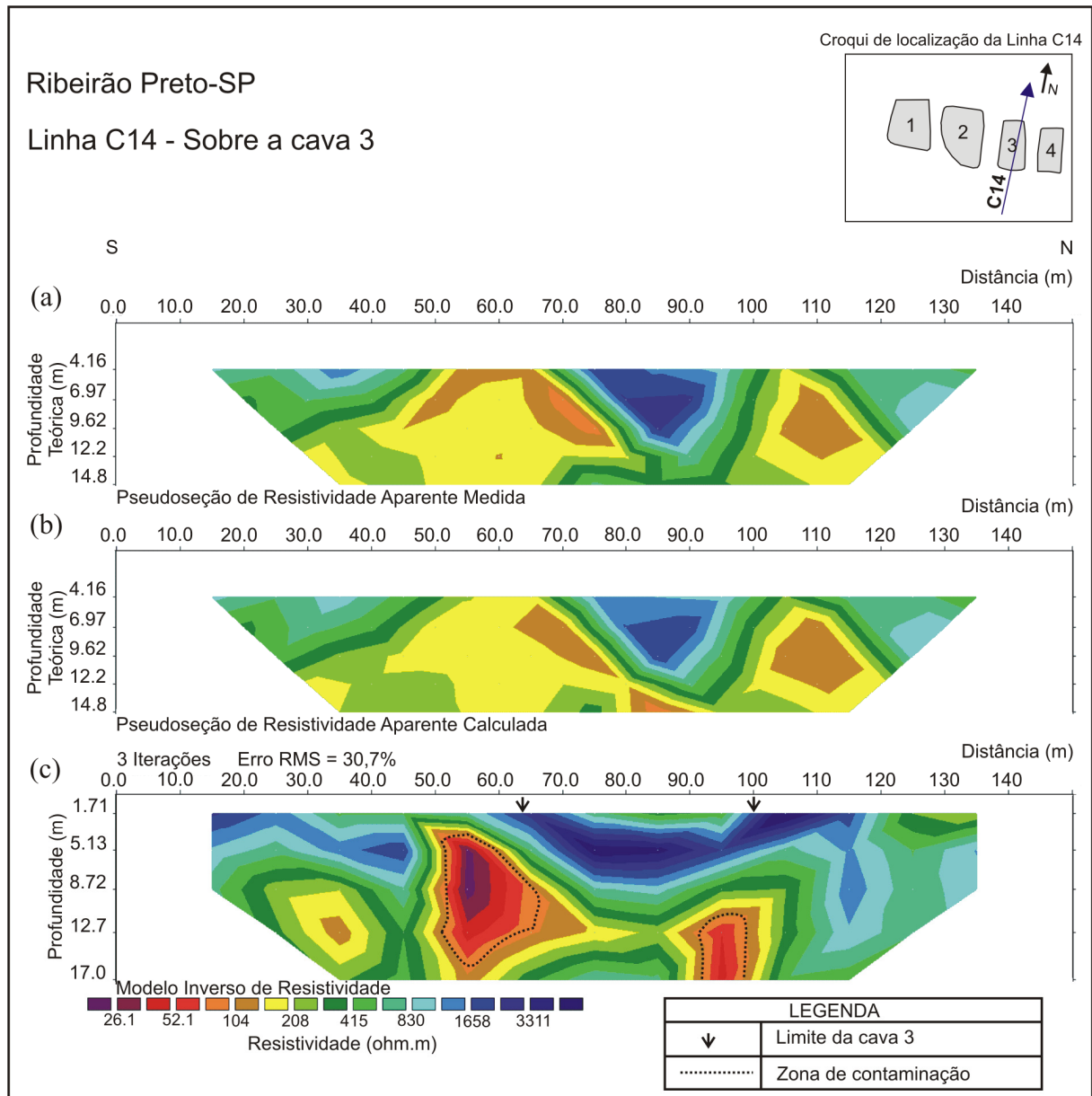


Figura 6.11 - Linha C14. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

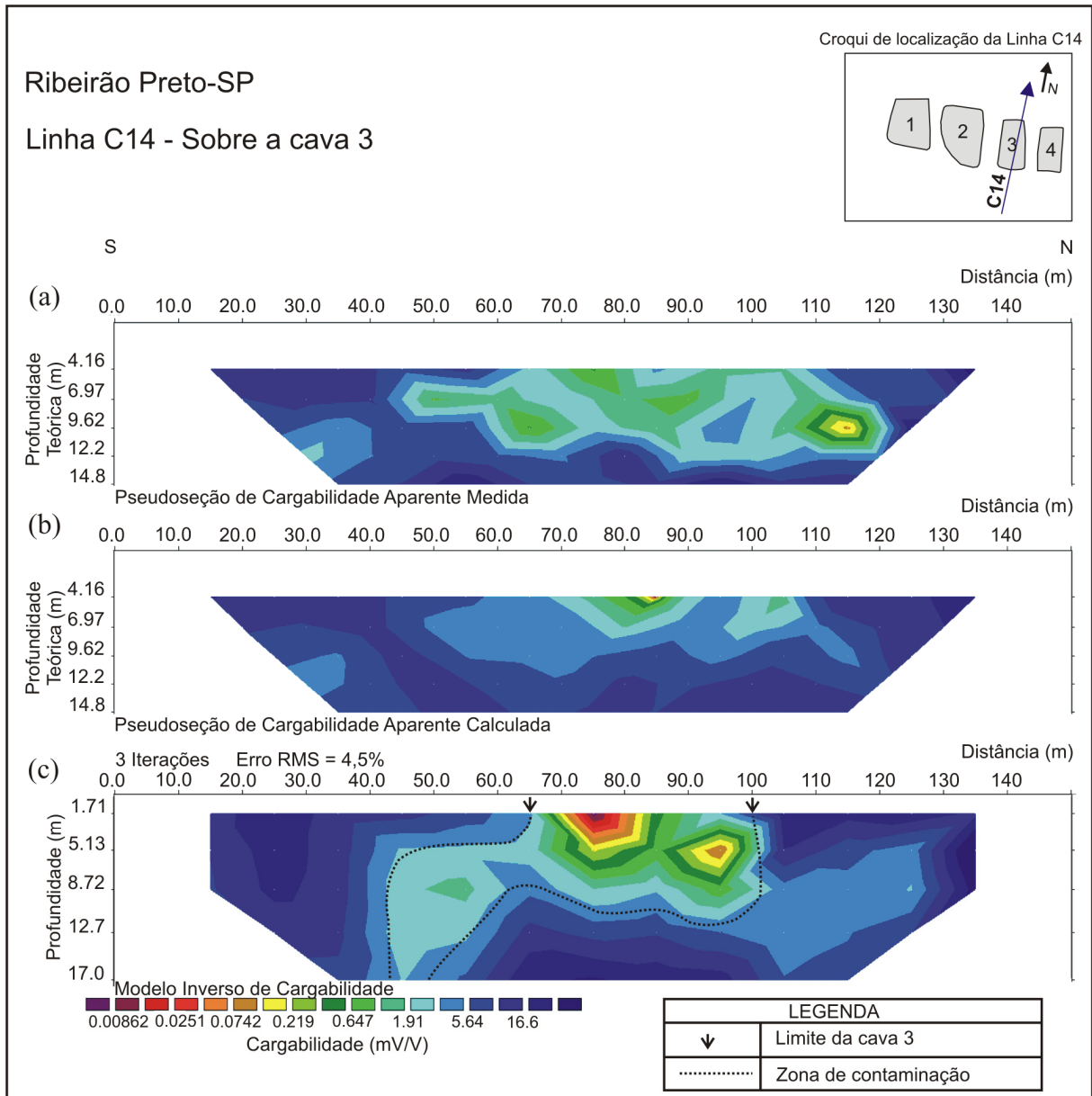


Figura 6.12 - Linha C14. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

A **Figura 6.13** mostra os resultados obtidos para a Linha C17, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 36,3% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.13c**) mostra 3 zonas de resistividade bem evidentes. A primeira zona, com resistividade superior a 3000 ohm.m (zona mais resistiva da seção) entre as distâncias de 75 e 112 metros, caracteriza a cava 4 preenchida com resíduo. É possível identificar a base desta cava e sua geometria é delineada na seção por uma linha pontilhada de cor vermelha. A segunda zona, com valores de resistividade entre 150 a 3000 ohm.m, é interpretada como o material natural não saturado. Ressalta-se que, na profundidade de 10,50 metros, encontrou-se, no poço de monitoramento PM-08, solo residual de arenito e o nível d'água foi encontrado a 27,21 metros de profundidade. A partir dessas informações, conclui-se que o posicionamento da zona saturada está abaixo dos 17 metros (limite da interpolação do modelo) e, portanto, a partir da profundidade de 10,50 metros, o material resistivo é interpretado como solo residual de arenito não saturado sem a presença de contaminantes.

A terceira zona caracterizada por valores de resistividade inferiores a 150 ohm.m abaixo da base da cava, sugere que esteja ocorrendo movimento descendente de líquidos percolados (contaminação). A zona de contaminação é delineada na seção por uma linha pontilhada de cor preta.

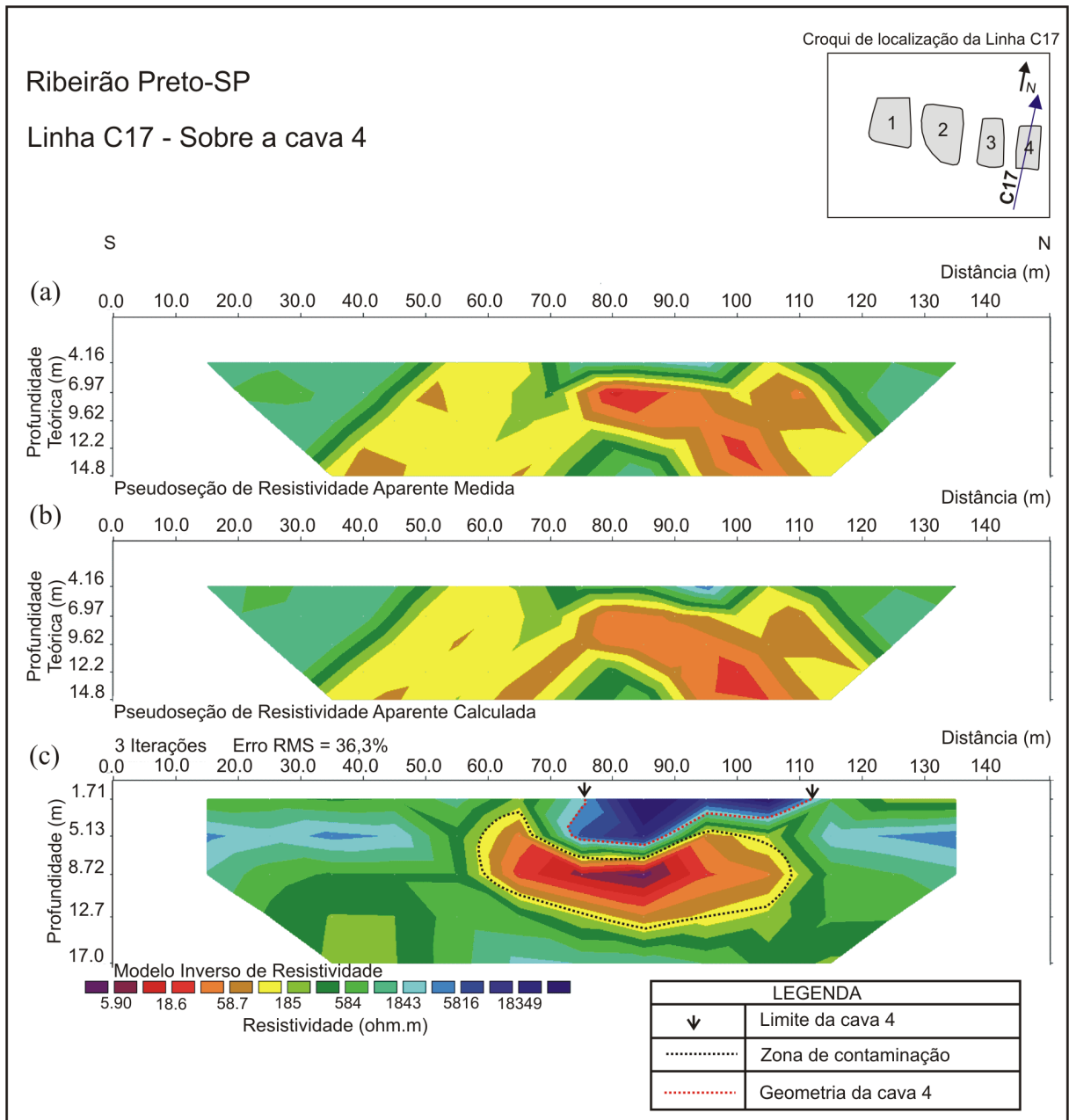


Figura 6.13 - Linha C17. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

A **Figura 6.14** mostra os resultados obtidos para a Linha C19, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de resistividade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 36,3% após três iterações. A seção de resistividade (**Figura 6.14c**) mostra 2 zonas de resistividade bem evidentes. A primeira zona, com valores de resistividade superiores a 120 ohm.m (zona mais resistiva da seção) é interpretada como o material natural. Ressalta-se que, na profundidade de 12 metros, encontrou-se, no poço de monitoramento PM-07, solo residual de arenito e o nível d'água foi encontrado a 27,48 metros de profundidade. A partir dessas informações, conclui-se que o posicionamento da zona saturada está abaixo dos 17 metros (limite da interpolação do modelo) e, portanto, a partir da profundidade de 12 metros, o material resistivo é interpretado como solo residual de arenito não saturado sem a presença de contaminantes.

A segunda zona caracterizada por valores de resistividade inferiores a 120 ohm.m, entre as distâncias de 65 e 95 metros, sugere contaminação gerada pelo resíduo disposto na cava 4. Esta zona de contaminação na seção é assinalada com uma linha pontilhada de cor preta.

A **Figura 6.15** mostra os resultados obtidos para a Linha C19, com os dados obtidos em campo (a), os dados sintéticos do ajuste do modelo (b), e o modelo de cargabilidade obtido após inversão (c). O erro RMS obtido foi de 2,95% após três iterações. A seção de cargabilidade (**Figura 6.15c**) mostra que os valores de cargabilidade superiores a 4 mV/V caracterizam o material natural não saturado, como evidenciado no poço de monitoramento PM-06. Ressalta-se que, a partir da profundidade de 12 metros, o material resistivo é predominantemente solo residual de arenito. Os valores de cargabilidade inferiores a 4 mV/V, entre as distâncias de 65 e 90 metros, caracterizam a contaminação no meio. A área afetada pela contaminação é delineada na seção por uma linha pontilhada de cor preta.

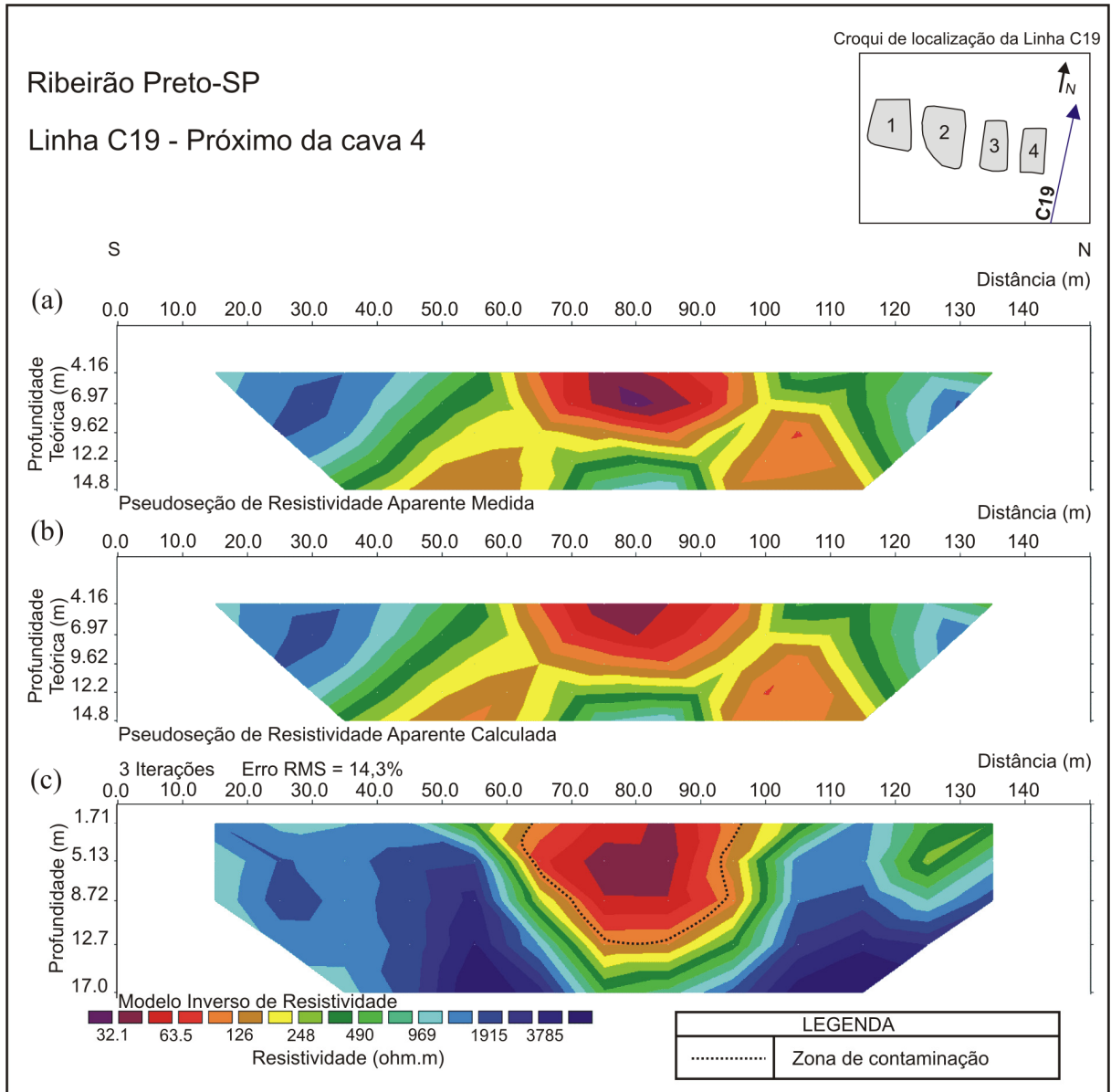


Figura 6.14 - Linha C19. (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade obtido após inversão.

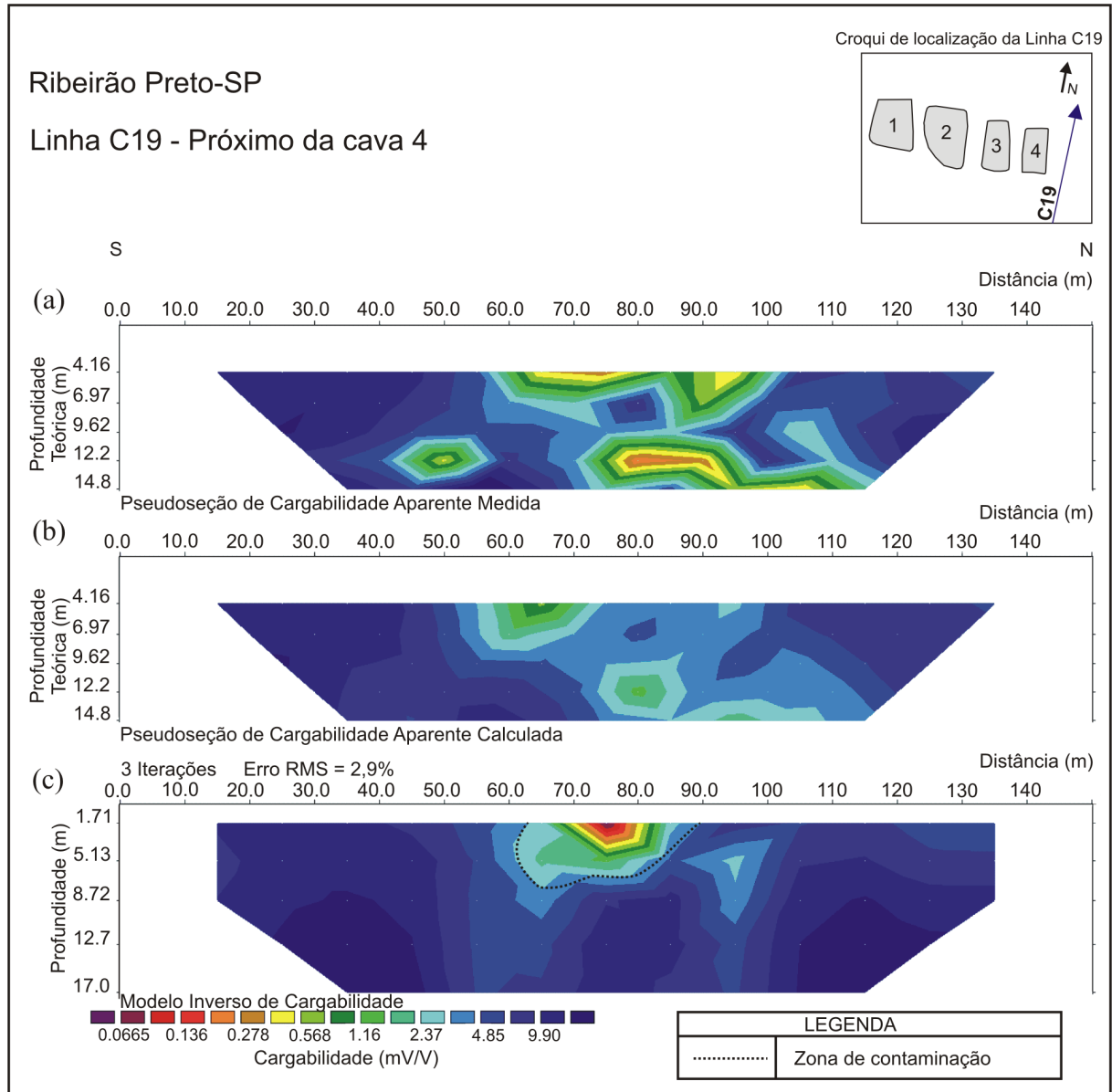


Figura 6.15 - Linha C19. (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após inversão.

Após a análise dos resultados obtidos pelo levantamento elétrico 2D, foi elaborado um quadro (**Quadro 6.1**), sintetizando os valores de resistividade e cargabilidade que caracterizam o material natural não saturado, o material natural saturado, as cavas com resíduo e o meio contaminado.

Quadro 6.1 - Síntese do levantamento elétrico 2D na área de estudo.

Levantamento elétrico 2D	Material natural não saturado	Material natural saturado	Cavas com resíduo	Meio contaminado
Linha C2	> 130 ohm.m 5 a 17 mV/V	Prof. de 14 metros < 130 ohm.m > 20 mV/V	-	< 95 ohm.m < 5 mV/V
Linha C3	> 486 ohm.m 10 a 22 mV/V	Prof. de 12 metros > 22 mV/V	Cava 1 45 a 180 ohm.m < 4 mV/V	< 35 ohm.m 5 a 9 mV/V Na zona saturada
Linha C7	> 210 ohm.m > 9 mV/V	Prof. de 12 metros < 110 ohm.m > 19 mV/V	-	< 90 ohm.m < 9 mV/V
Linha C8	> 400 ohm.m > 6,50 mV/V	Prof. 13 metros < 150 ohm.m > 17 mV/V	Cava 2 < 400 ohm.m < 4 mV/V	< 400 ohm.m 3,50 a 6,50 mV/V
Linha C12	> 160 ohm.m > 5 mV/V	-	-	< 160 ohm.m < 5 mV/V
Linha C14	> 150 ohm.m > 4 mV/V	-	Cava 3 > 1000 ohm.m < 1 mV/V	< 100 ohm.m < 4 mV/V
Linha C17	150 a 3000 ohm.m	-	Cava 4 > 3000 ohm.m	< 150 ohm.m
Linha C19	> 120 ohm.m > 4 mV/V	-	-	< 120 ohm.m < 4 mV/V

Como já mencionado, o modelo 3D foi feito a partir de uma série de ensaios 2D paralelos e equi-espaçados. A **Figura 6.16** e a **Figura 6.17** mostram os modelos 3D de resistividade e cargabilidade obtidos após inversão dos dados. Os valores modelados de resistividade e cargabilidade são apresentados em “*slices*” correspondentes a cinco níveis de investigação em profundidade.

No primeiro nível de investigação (profundidade de 1,75 metros), segundo nível de investigação (profundidade de 5,5 metros) e terceiro nível de investigação (profundidade de 9,8 metros), observa-se que o material natural não saturado (predominantemente solo residual de basalto, como constatados nas sondagens e poços de monitoramento) é caracterizado por valores de resistividade superiores a 100 ohm.m associados aos altos valores de cargabilidade ($> 12,5$ mV/V). O resíduo disposto nas cavas 2, 3 e 4 é bastante resistivo; enquanto que, o resíduo disposto na cava 1 é menos resistivo. Então, a cava 1 é caracterizada por baixos valores de resistividade (região oeste da área) em relação as demais cavas. Sabe-se, que a cava 1 foi o primeiro local a receber resíduo e, portanto, a mais antiga cronologicamente. Face ao exposto, sugere-se que esta cava esteja liberando ou liberou quantidade maior de soluto. Por outro lado, o aumento da resistividade nas outras cavas, pode ser explicado pelo fato do resíduo que preenche as cavas ser mais plástico.

Em relação à polarização induzida, as cavas são caracterizadas por baixíssimos valores de cargabilidade, com exceção da cava 4 onde ocorreu problemas de leituras. O baixo efeito IP, dentre outros fatores que podem diminuir o valor da cargabilidade, está relacionado ao fato de que o resíduo de óleo lubrificante disposto nas cavas não é um material polarizável como latas, papéis, pilhas e fragmentos de metais polarizáveis.

Observa-se anomalias condutivas, nas zonas de maior aeração (laterais das cavas). As anomalias condutivas, localizadas em regiões específicas da área (como por exemplo, na parte sul e oeste), sugerem contaminação do meio. Estas anomalias são observadas em profundidade, sugerindo que esteja ocorrendo movimento descendente de líquidos percolados.

As anomalias condutivas (< 100 ohm.m) podem estar relacionadas a processos de biodegradação do resíduo disposto nas cavas e, conseqüentemente, a contaminação do meio. Este fato pode ser explicado por reações químicas e/ou atividade biológica presente nestas zonas que causam a diminuição da resistividade. Nas mesmas regiões com características condutivas, observa-se um crescimento nos valores de cargabilidade, reafirmando a possibilidade de contaminação do meio. Neste caso, a contaminação é caracterizada por valores de cargabilidade maiores que os valores que caracterizam as cavas e menores que os

valores que caracterizam o meio natural, ou seja, por valores intermediários de cargabilidade (2,5 a 12,5 mV/V). O aumento do valor da cargabilidade pode estar associado ao aumento de partículas polarizáveis (biominerais) que acompanham o metabolismo e o crescimento microbial.

No quarto nível de investigação (profundidade de 14,8 metros) e quinto nível de investigação (profundidade de 20,5 metros), os valores de resistividade inferiores a 100 ohm.m caracterizam a zona saturada e, também, é possível observar dentro desta zona anomalias de menores valores de resistividade (< 50 ohm.m), sugerindo contaminação da água subterrânea. Já a cargabilidade mostra que o efeito IP é alto dentro da zona saturada e, também, que a área afetada pela contaminação é delimitada por valores intermediários de cargabilidade.

É do conhecimento que a área de estudo é constituída por dois sistemas de aquíferos. Um aquífero suspenso na região centro-oeste da área e um aquífero profundo na região centro-leste da área. Portanto, esta interpretação está restringida a região centro-oeste da área.

Para a região centro-leste da área os altos valores de resistividade (> 100 ohm.m) associados aos altos valores de cargabilidade ($> 12,5$ mV/V) caracterizam o material natural não saturado, como evidenciado nas sondagens e poços de monitoramento. A partir da profundidade de 14,8 metros o material natural é interpretado como solo residual de arenito não saturado. As anomalias condutivas sugerem contaminação na zona não saturada, da mesma forma que os valores intermediários de cargabilidade.

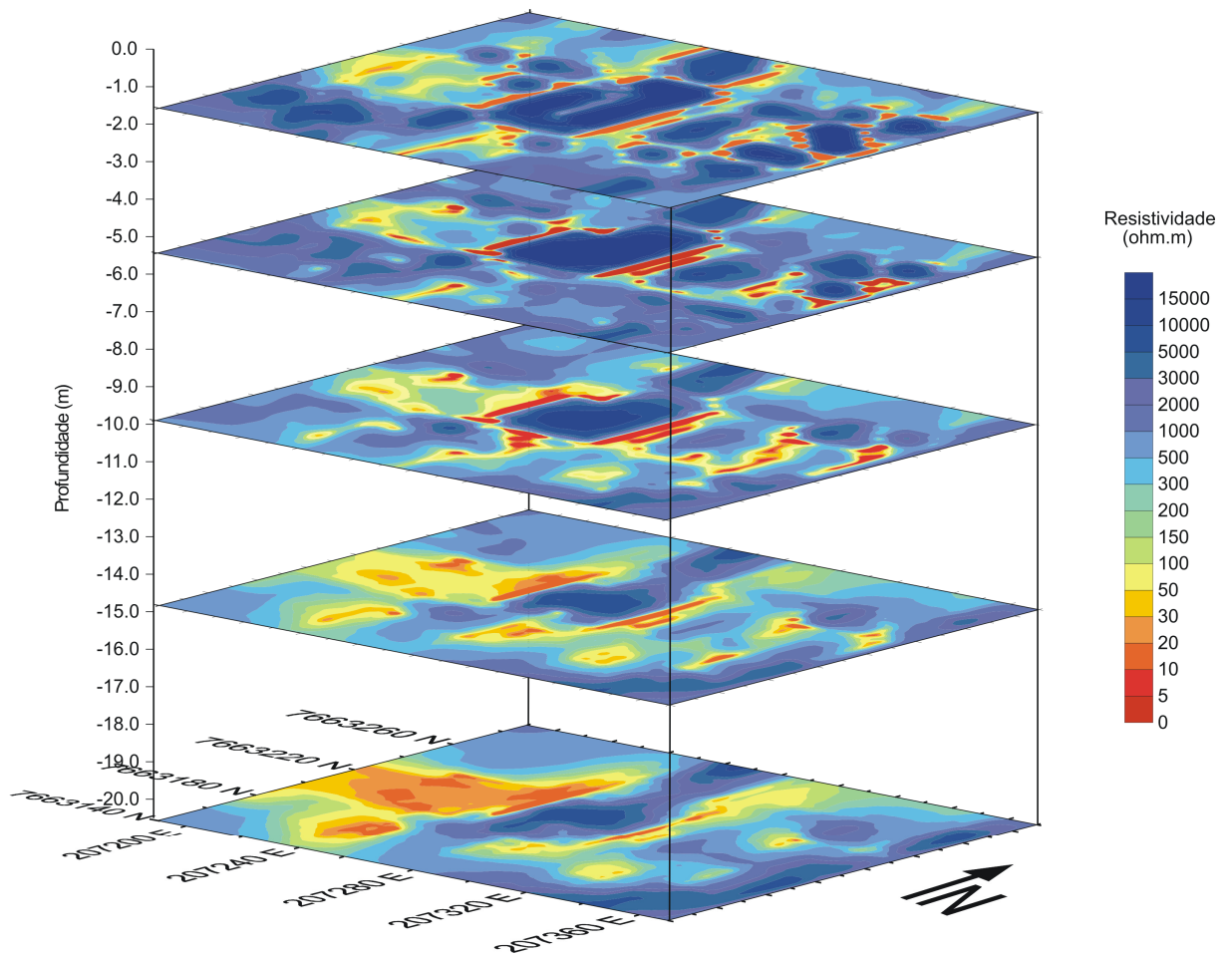


Figura 6.16 - Modelo 3D de resistividade da área de estudo.

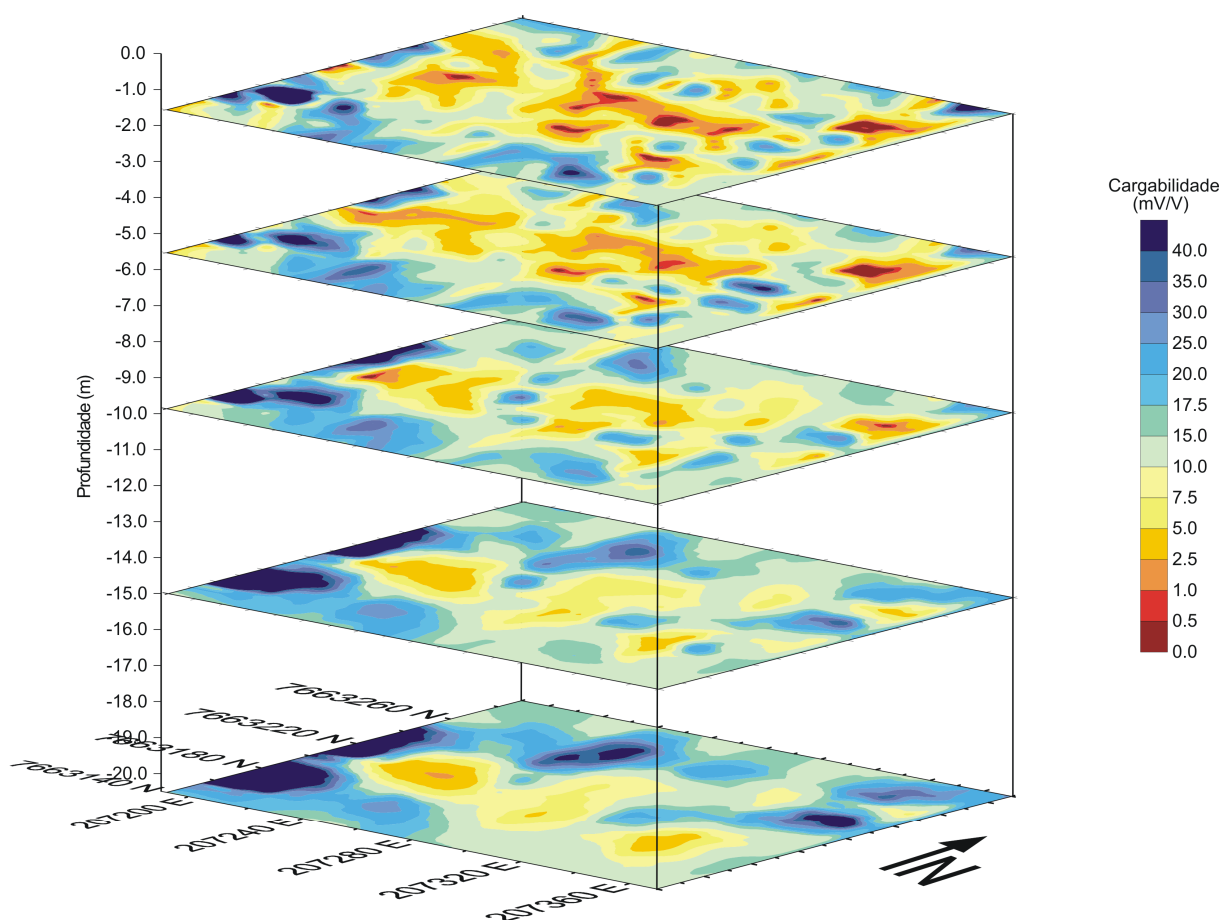


Figura 6.17 - Modelo 3D de cargabilidade da área de estudo.

Para visualizar o comportamento da resistividade e cargabilidade na área de estudo foram construídos blocos 3D de resistividade e cargabilidade. A **Figura 6.18a** mostra o comportamento geral da resistividade; enquanto que a **Figura 6.18b** mostra os valores de resistividade entre 1 a 40 ohm.m, que sugerem a contaminação do meio. A **Figura 6.19a** mostra o comportamento geral da cargabilidade e a **Figura 6.19b** mostra os valores de cargabilidade entre 0,1 a 5 mV/V, que podem caracterizar a área afetada pela contaminação.

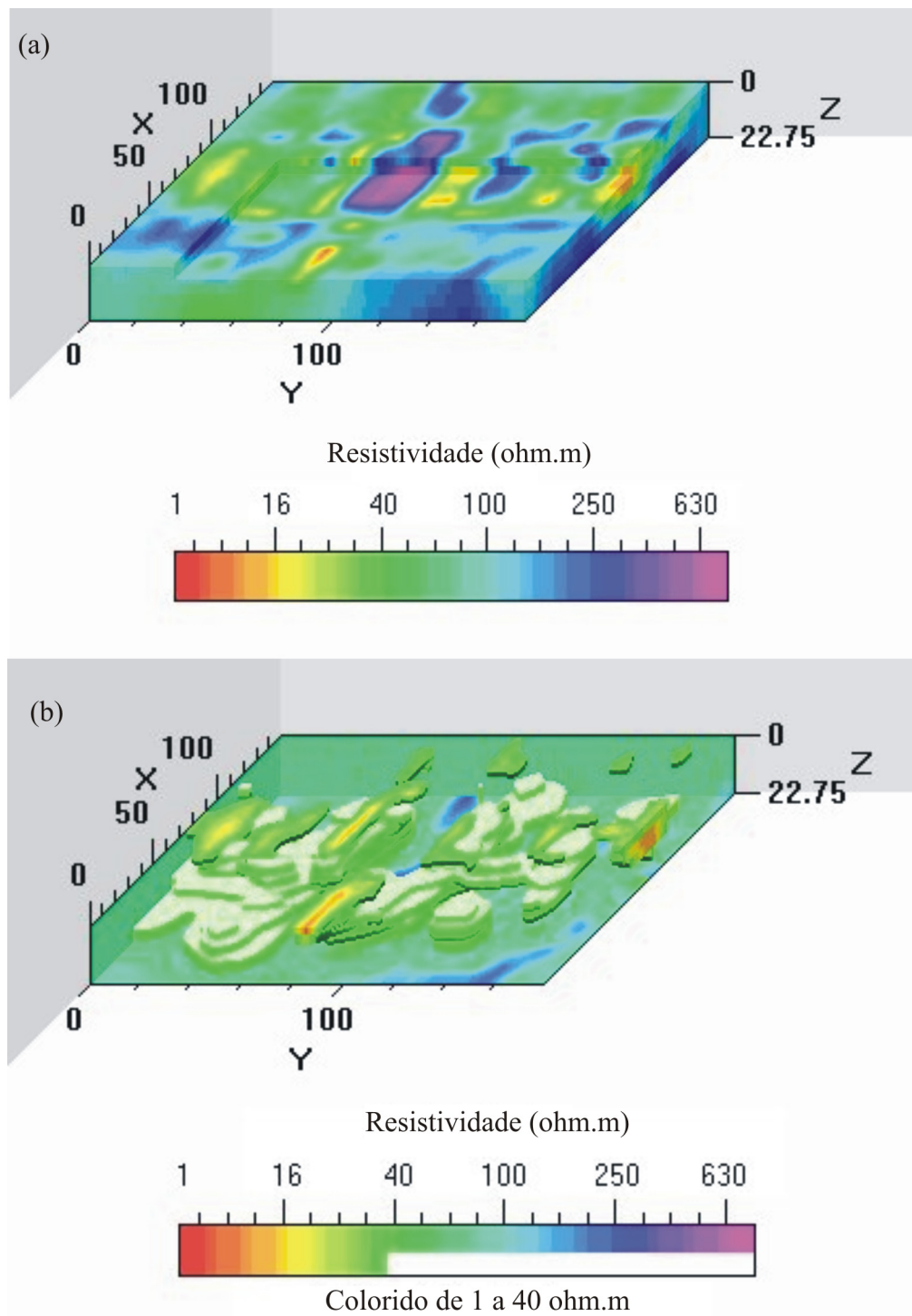


Figura 6.18 - Bloco 3D de resistividade da área. (a) Comportamento geral da resistividade. (b) Valores de resistividade entre 1 a 40 ohm.m.

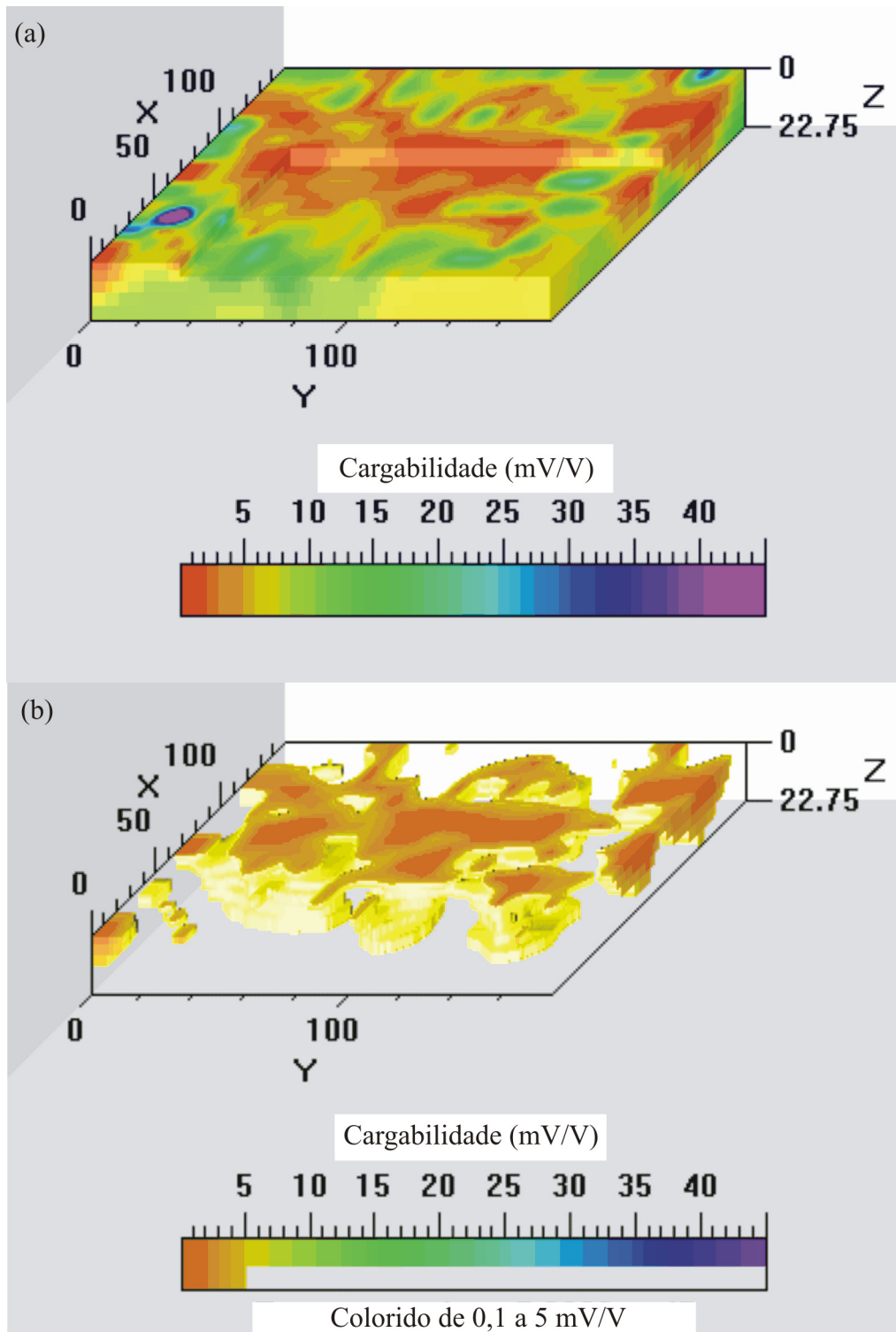


Figura 6.19 - Bloco 3D de cargabilidade da área. (a) Comportamento geral da cargabilidade. (b) Valores de cargabilidade entre 0,1 a 5 mV/V.

À luz dos modelos, as anomalias condutivas sugerem contaminação na área de estudo. Estas anomalias condutivas estão diretamente relacionadas com o processo de biodegradação de hidrocarbonetos que, ao longo do tempo, torna o meio menos resistivo, como postulado por Sauck (2000). O autor propôs o modelo geoeletrico condutivo de pluma de LNAPL e, posteriormente, este modelo foi corroborado pelos trabalhos de Atekwana et al. (2000, 2002, 2004), Shevvin et al. (2003), Werkema Jr. et al. (2003, 2004), Braga e Cardinali (2005) e Allen et al. (2007). Então, o modelo de anomalia condutiva é aplicável na área de estudo, onde o contaminante é um resíduo de óleo lubrificante.

A biodegradação de hidrocarbonetos é uma reação de oxi-redução. Microorganismos em ambientes aeróbicos oxidam os hidrocarbonetos aromáticos e, conseqüentemente, quebram suas cadeias mais eficientemente. Em condições anaeróbicas os receptores de elétrons são: nitrato (NO_3^-), manganês (Mn^{4+}), ferro (Fe^{3+}), sulfato (SO_4^{2-}) e dióxido de carbono (CO_2). Estas reações produzem dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), receptores de elétrons reduzidos, energia para os microorganismos, calor e ácidos orgânicos.

Na biodegradação aeróbica os microorganismos utilizam o oxigênio para oxidar o composto orgânico a dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 produzido como produto metabólico dos organismos se combina com a água formando ácido carbônico (H_2CO_3). Os ácidos, com redução concomitante de pH na umidade do solo, causam a dissolução de sais do solo natural. A redução de pH das soluções aquosas nas micro-localidades de biodegradação gera a lixiviação de sais solúveis dos revestimentos dos grãos dos sedimentos, assim como uma forte lixiviação dos próprios grãos minerais. Com isso, as águas de formação na zona de produção de ácidos se tornam bastante enriquecidas por Sólidos Totais Dissolvidos (STD). O efeito imediato da dissolução dos grãos minerais é um aumento da condutividade elétrica da água dos poros dentro e abaixo das zonas de biodegradação. Então, forma-se uma pluma inorgânica derivada da reação dos solos naturais com os ácidos orgânicos produzidos pela biodegradação.

Em síntese, o material resistivo é biodegradado pela ação bacteriológica. Como resultado do processo de biodegradação ocorre a produção dos STD, que tornam o material condutivo ao longo do tempo.

Com relação à polarização induzida, ficou claro que as cavas são caracterizadas por baixíssimos valores de cargabilidade e a possível contaminação é caracterizada pelo aumento da polarização à medida que se afasta da fonte de contaminação, embora ainda caracterizada

por baixos valores de cargabilidade. A polarização ocorrida na área afetada pela contaminação deve estar associada ao metabolismo microbial.

O mecanismo de polarização está associado à interface célula microbial/fluido e à interface mineral metálico precipitado/fluido (NTARLAGIANNIS et al., 2005). Os autores em seu experimento consideram o uso de medida elétrica para observar o processo de biomineralização que causa a precipitação mineral e a alteração mineralógica. A partir desse estudo, eles sugerem que a anomalia de polarização é primeiramente associada à interface mineral metálico precipitado/fluido que existe como resultado da formação de sulfeto. O aumento da polarização está associado ao aumento de partículas polarizáveis (biominerais) que acompanham o metabolismo e o crescimento microbial. As altas taxas metabólicas são assumidas como sendo resultado de alta concentração de células microbiais, alta respiração e alta concentração de biominerais. O início do aumento da polarização é relacionado com o início do consumo de lactado (metabolismo microbial).

Diferentes estágios do processo de biomineralização, com respostas elétricas distintas, foram observados pelos autores. No primeiro estágio, os precipitados de sulfeto estão dispersos nas células microbiais; enquanto que, no estágio final, os precipitados de sulfeto estão compactados, formando biofilmes nas superfícies dos grãos. Nessa etapa, a área superficial total do precipitado mineral é maior que no primeiro estágio; porém, é somente a superfície em contato com o fluido do poro que contribui para a polarização e como resultado do preenchimento do espaço do poro pelo mineral a área superficial deve diminuir. Então, a polarização cresce com a área superficial da interface biomineral/fluido, onde a polarização é alta para biominerais dispersos e decai à medida que esses biominerais se agrupam na fonte nutriente preenchendo o espaço do poro e promovendo condução eletrônica.

Para a confirmação da contaminação sugerida, realizou-se a coleta de amostras de solo em um ponto específico da área para uma análise biológica (contagem de bactérias). De fato a contaminação existe, ocasionada pelo processo de biodegradação, como constatado nas análises do solo para contagem bacteriana. No ponto amostrado, foram encontradas bactérias até a profundidade de 4 metros. Na amostra de referência o resultado é a ausência de bactérias.

6.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

Os ensaios de potencial espontâneo foram realizados com a finalidade de auxiliar na definição do sentido do fluxo subterrâneo e avaliar o nível de interação entre o resíduo e o meio físico. A **Figura 6.20** mostra o mapa de potencial espontâneo da área de estudo no município de Ribeirão Preto-SP. O mapa SP mostra valores de potencial espontâneo entre -150 e 250 mV. Esta grande variação de potencial espontâneo sugere intensa atividade geoquímica no local (HYOUNG-SOO e YEONGHWA, 1997).

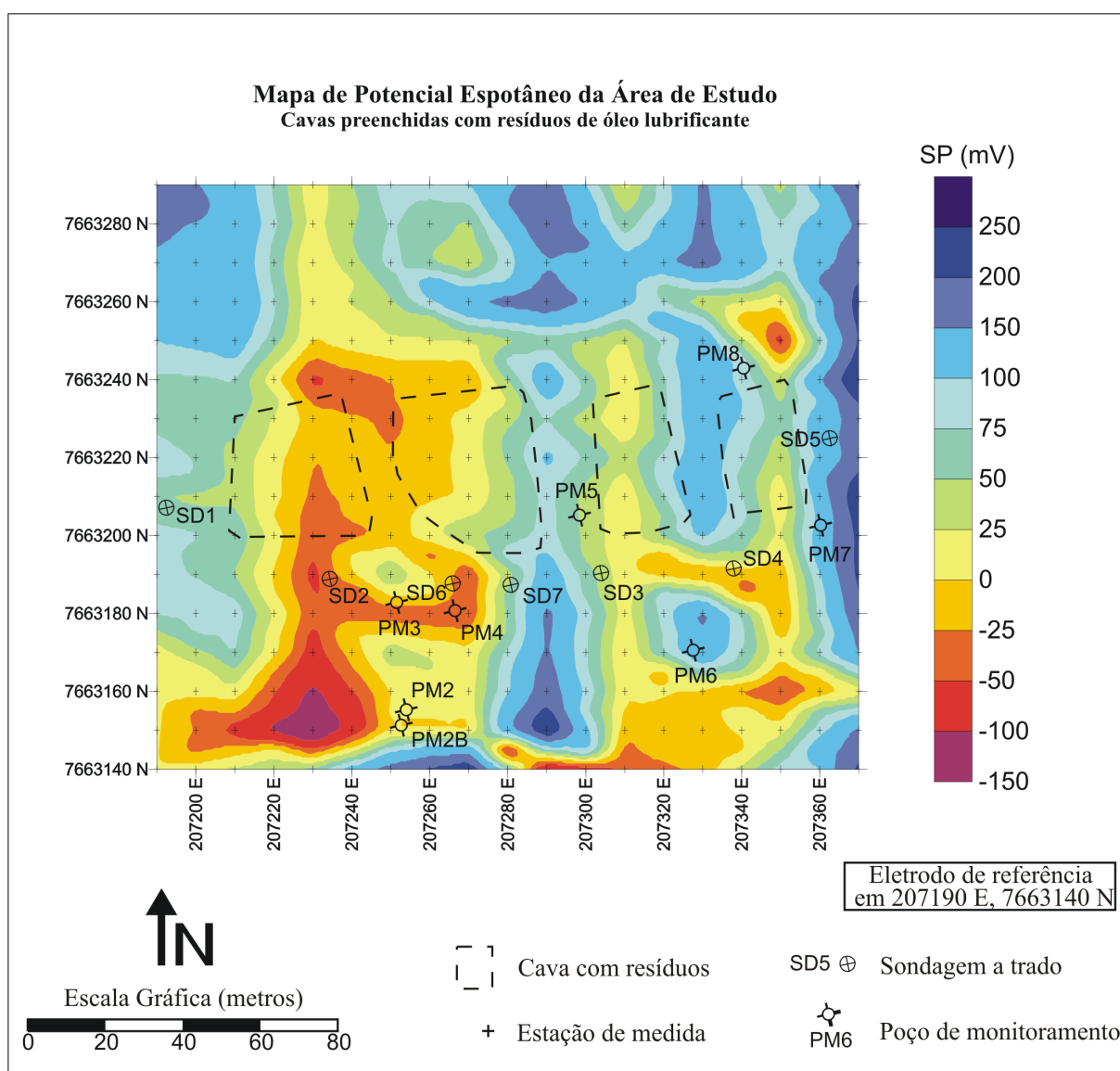


Figura 6.20 - Mapa de potencial espontâneo da área de estudo.

De acordo com Gallas (2005), em locais onde há um maior conteúdo de argilominerais, espera-se valores positivos de potencial espontâneo. Considerando a ocorrência de solo residual de basalto na área de estudo, as anomalias positivas observadas no mapa de SP são associadas à presença de materiais argilosos. Para o autor, as anomalias negativas de potencial espontâneo são observadas em locais de maior concentração de materiais detríticos ou de maior porosidade. Entretanto, acredita-se que as anomalias negativas observadas no mapa SP da área devem estar relacionadas à ação microbiológica, o que deve refletir em um aumento do potencial redox.

Há casos registrados na literatura que associam anomalias negativas de potencial espontâneo à contaminação por derivados de hidrocarbonetos. Segundo Nyquist e Corry (2002), as anomalias negativas SP podem ser explicadas pelo potencial redox (Eh), causado pela degradação do hidrocarboneto por atividade bacteriana. Para os autores, a biodegradação ocorre enquanto há oxigênio para o consumo de bactérias aeróbicas. Após o consumo de oxigênio pelas bactérias, a bioatenuação ocorre anaerobicamente no centro da pluma de contaminação, e aerobically nas bordas onde o oxigênio ainda é disponível. A bactéria anaeróbica utiliza aceptores de elétrons (como por exemplo, ferro, sulfato, nitratos) para metabolizar os hidrocarbonetos, criando uma zona de redução no centro da pluma de contaminação. O contraste entre a zona de redução e a água subterrânea não contaminada (enriquecida em oxigênio) gera uma anomalia SP.

Conclui-se que a biodegradação causa o empobrecimento de oxigênio dissolvido na pluma de contaminação e possibilita a criação de um ambiente de redução.

Tomando como referência o valor de 4,4 mg/L de oxigênio dissolvido obtido para amostra de água no poço vizinho a área de estudo e que nesta área ocorreu uma diminuição na concentração do oxigênio dissolvido (valores de 3,9 mg/L, 3,0 mg/L e 3,0 mg/L para as águas nos poços de monitoramento PM-03, PM-04 e PM-06, respectivamente), confirma-se que as anomalias negativas de potencial espontânea na referida área caracterizam a contaminação do meio a partir de processos de biodegradação. Da mesma forma, o aumento do Eh obtido nas amostras de águas nos poços de monitoramento também é indicativo desse processo.

Cuidados foram tomados na escolha do local da estação base, no uso de eletrodos não-polarizáveis, e como não ocorreu registro de chuvas na área no período do levantamento e considerando a influência dos resíduos, logo o potencial medido deveria estar associado ao comportamento do fluxo da água subterrânea. Todavia, devido à influência dos resíduos e da contaminação, a associação não fica clara dos potenciais medidos ao comportamento do fluxo

da água subterrânea. O sentido do fluxo subterrâneo identificado por Penner (2005) para a área é de NW para SE, porém pode ser observado no mapa que a influência da contaminação é superior ao potencial devido ao movimento das águas subterrâneas.

6.3 GROUND PENETRATING RADAR

A aquisição de dados de GPR na área de estudo foi realizada com antenas não-blindadas de 100 MHz, possibilitando uma profundidade de investigação máxima de 7 metros. Sabe-se, que o nível d'água foi encontrado a partir da profundidade de 9,50 metros (profundidade encontrada na sondagem SD6); portanto, as interpretações referem-se a zona não saturada.

A Linha GPR1 mostra o perfil de GPR realizado fora das cavas (**Figura 6.21**). Nesta seção, o sinal eletromagnético foi bem atenuado, não permitindo investigar profundidades superiores a 10 metros. A seção GPR da **Figura 6.21** apresenta várias seqüências de refletores plano-paralelos lateralmente descontínuos, as quais revelam a estruturação interna do solo argilo-siltoso até aproximadamente 10 metros.

A **Figura 6.22** mostra a Linha GPR2. Esta seção foi realizada sobre a cava 1 e possui 58 metros de extensão. Os refletores entre as posições 20,8 e 52 metros mostram um aumento na amplitude a partir da cota de 543 metros. Este aumento é provocado pelo aumento da resistividade elétrica do resíduo. Abaixo do resíduo, a partir da cota de 540 metros, a amplitude dos refletores vai diminuindo, não permitindo identificar a base da cava. Nota-se que este comportamento só ocorre abaixo da cava, não se estendendo para as laterais. A eletrorresistividade mostrou que o resíduo é caracterizado por altos valores de resistividade, e que abaixo das cavas a resistividade diminuiu (anomalias condutivas). Estes baixos valores de resistividade explicam o comportamento do sinal eletromagnético dentro das cavas. Abaixo das cavas a condutividade elétrica do meio é maior, o que dificulta a penetração da onda EM. De acordo com Sauck (2000), o ataque de bactérias a hidrocarbonetos pode causar o aumento da condutividade elétrica do meio. Como já mencionado, esta hipótese é confirmada pela presença de bactérias nas análises de amostras de solo na área.

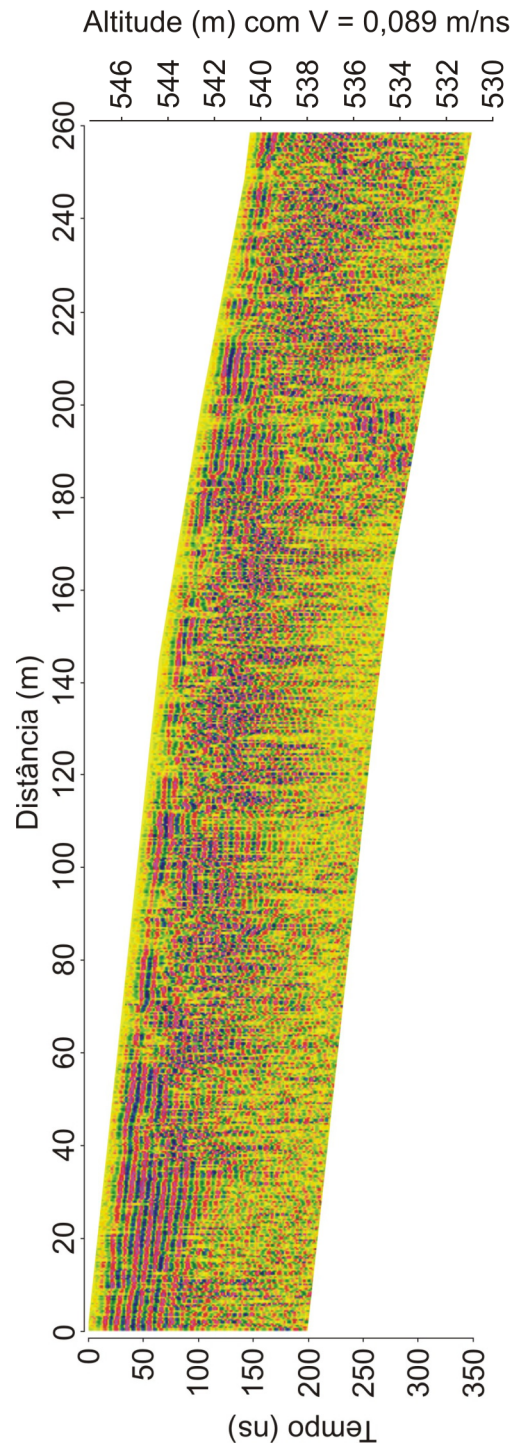


Figura 6.21 - Seção da Linha GPR1, realizada fora da área de disposição dos resíduos.

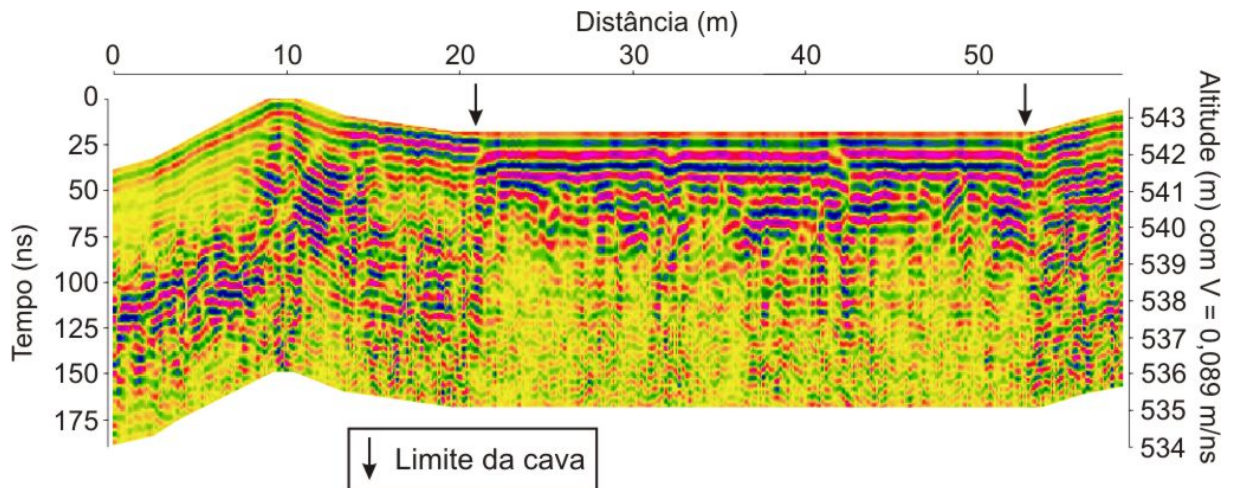


Figura 6.22 - Seção da Linha GPR2 realizada sobre a cava 1.

A **Figura 6.23** mostra a seção da Linha GPR3, que foi realizada sobre a cava 2. A cava é bem marcada no intervalo de 21,7 a 61 metros. O resíduo apresenta um comportamento horizontal e com forte reflexão, evidenciando sua homogeneidade. A base da cava 2 é bem marcada por um forte refletor irregular que ocorre na cota de 538 metros (linha pontilhada de cor preta). Na posição de 26 metros, na cota de 538 metros, ocorre um expressivo refletor hiperbólico. Este refletor pode ser provocado por um tanque disposto na área ou por qualquer outro objeto pontual que cause difração do sinal GPR. A velocidade do meio, obtida através do ajuste hiperbólico da difração, foi de 0,089 m/ns, confirmando o aumento da condutividade elétrica abaixo da cava.

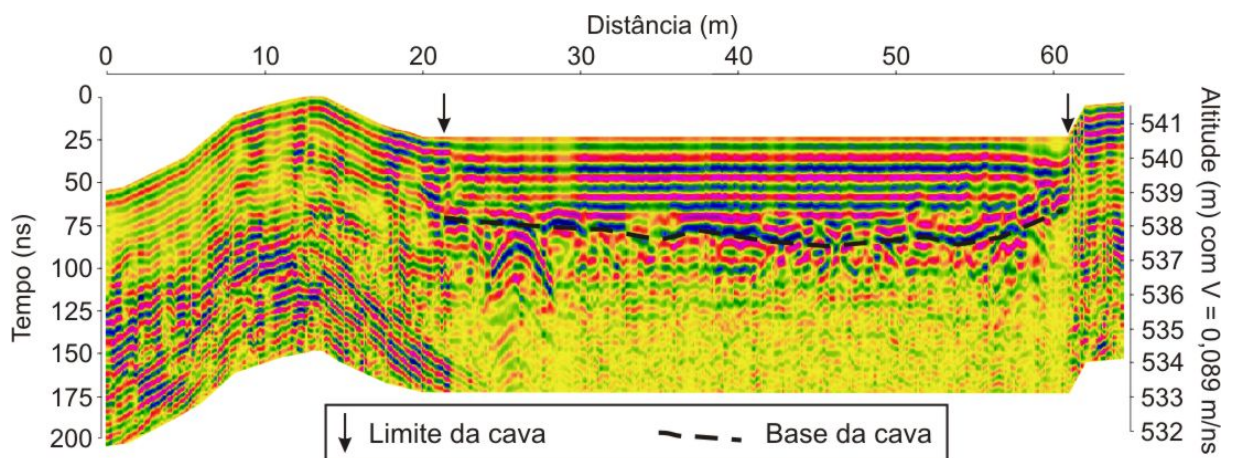


Figura 6.23 - Seção da Linha GPR3 realizada sobre a cava 2, mostrando limites da cava, refletores correlacionados a tanques/tambores e atenuação do sinal EM abaixo da cota de 538 metros.

A Linha GPR4 foi realizada sobre a cava 3, como mostra a **Figura 6.24**, onde se identifica o resíduo entre as posições de 26 e 57 metros. Nesta seção, além da verificação da base da cava na cota de 534,7 metros (linha pontilhada de cor preta), percebe-se também variações na amplitude dos refletores dentro da cava, sugerindo heterogeneidades no resíduo. Nota-se reflexões hiperbólicas no interior do resíduo nas posições de 40,5 metros (cota 536,5 metros), 51 e 52,5 metros (cota 536,5 metros), podendo ser provocadas por tambores metálicos, comumente utilizados para transporte de resíduos e bem evidenciados na superfície da cava 4 (**Figura 6.25**).

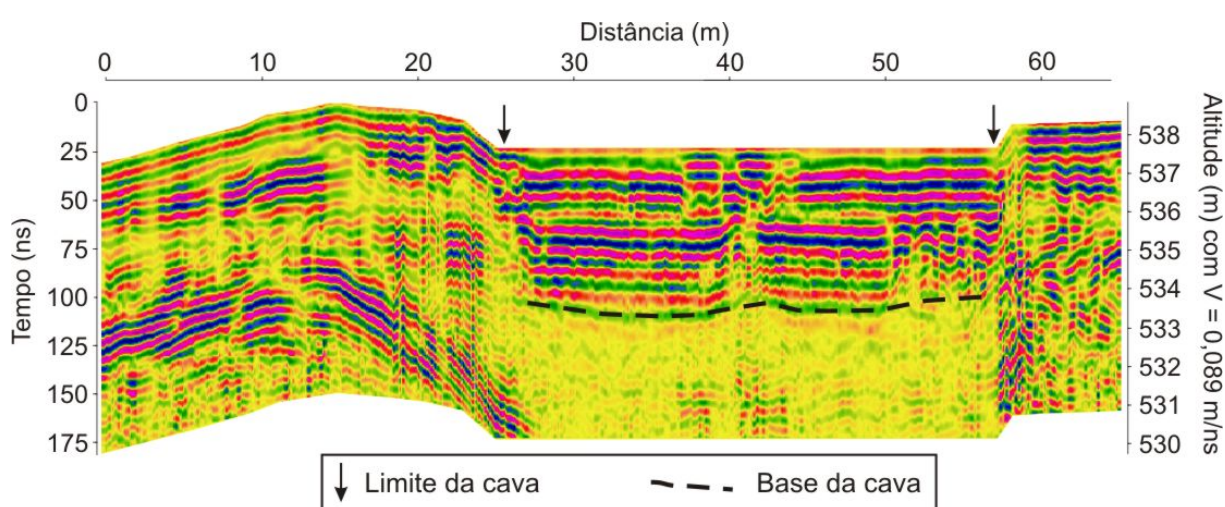


Figura 6.24 - Seção da Linha GPR4 realizada sobre a cava 3, mostrando limites da cava e atenuação do sinal EM abaixo da cota de 534,5 metros.



Figura 6.25 - Cava 4 preenchida com resíduos e alguns tambores dispostos em superfície.

A **Figura 6.26** mostra o perfil de GPR realizado sobre a cava 4 (Linha GPR5). A base da cava é bem marcada por um refletor em forma de vale que ocorre entre as posições de 31 a 60 metros, alcançando a profundidade máxima de 5,45 metros na posição de 48 metros (linha pontilhada de cor preta). Nas posições de 46 e 47,8 metros, na profundidade de 0,5 metros, nota-se dois refletores hiperbólicos que podem indicar a presença de tambores metálicos. Abaixo da base da cava, semelhante a todas as cavas, o sinal eletromagnético (EM) é fortemente atenuado.

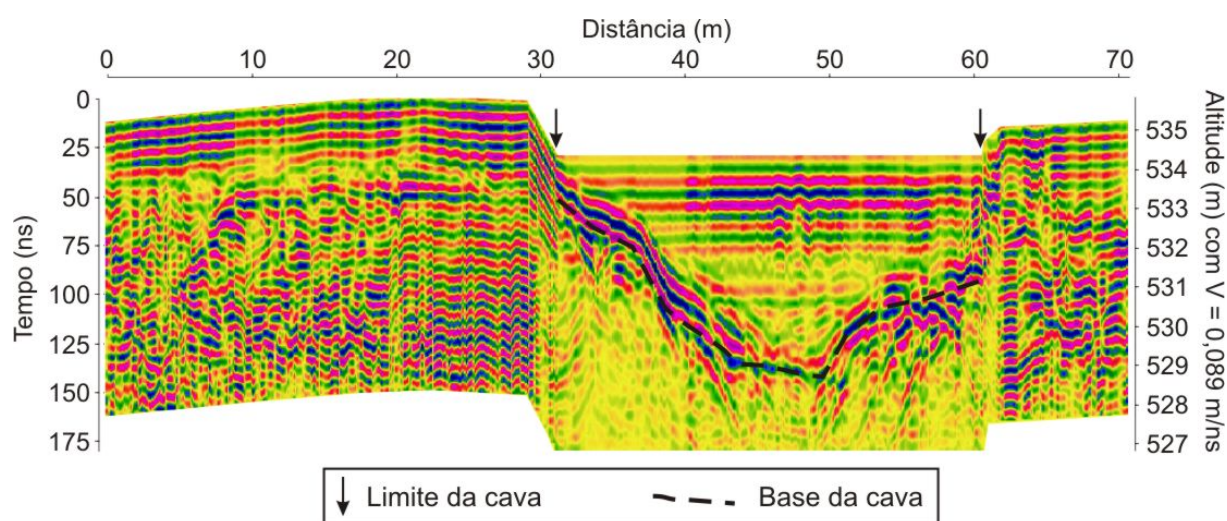


Figura 6.26 - Seção GPR realizada sobre a cava 4 (Linha GPR5), marcando limites e base da cava (profundidade máxima de 5,45m) representada por um refletor em forma de vale.

Com o intuito de verificar se existe fluxo de contaminante subterrâneo na zona não saturada em função do desnível topográfico, foi adquirida uma seção GPR próximo a cava 4 (Linha GPR6). Na seção GPR (**Figura 6.27**), os refletores apresentaram o mesmo comportamento e amplitude da seção da Linha 1, não evidenciando a presença de contaminantes orgânicos na zona aerada do solo, confirmando o resultado de análises químicas de solos coletados nas sondagens, exceto para os valores anômalos de pH e condutividade nas sondagens SD1 e SD5.

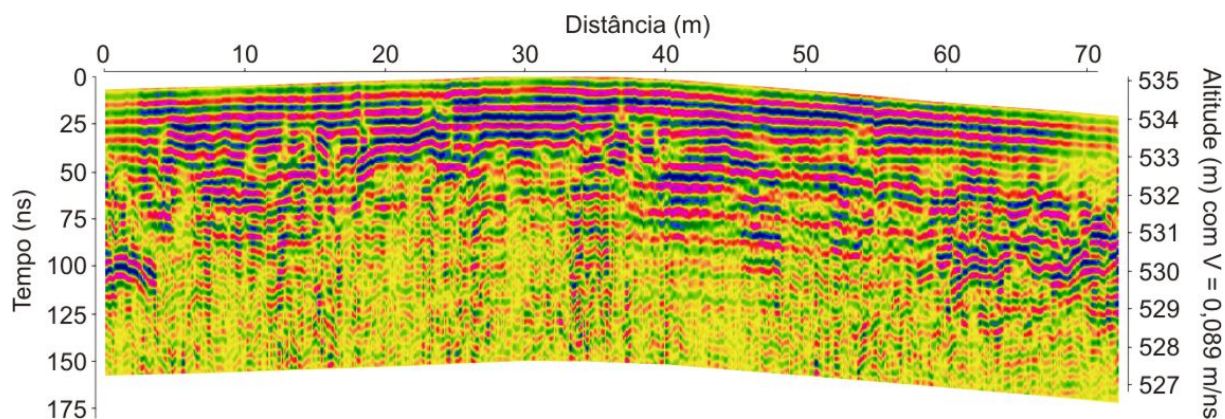


Figura 6.27 - Seção da Linha GPR6 (fora das cavas). Não há indícios de atenuação nesta seção, provocada por contaminação.

Para definir a geometria e verificar a existência de contaminação abaixo das cavas, foi realizada uma seção GPR (Linha GPR7) perpendicular a todas as cavas, mostrada na **Figura 6.28**. Com exceção da cava 1, todas as bases das demais cavas foram bem marcadas no perfil. A base da cava 2 vai aprofundando em direção leste e a cava 3 e 4 tem a base da cava retilínea (**Figura 6.28b**). Em toda a seção, o sinal eletromagnético GPR foi atenuado abaixo das cavas, corroborando os resultados das seções anteriores.

Após verificar o comportamento do sinal GPR dentro e abaixo das cavas, nota-se que a cava 1 possui comportamento distinto das demais, da mesma forma que, observa-se para o modelo geológico desta cava (Linha C3), onde é difícil distinguir a cava preenchida com resíduo do meio contaminado, pois mostram valores de resistividade iguais.

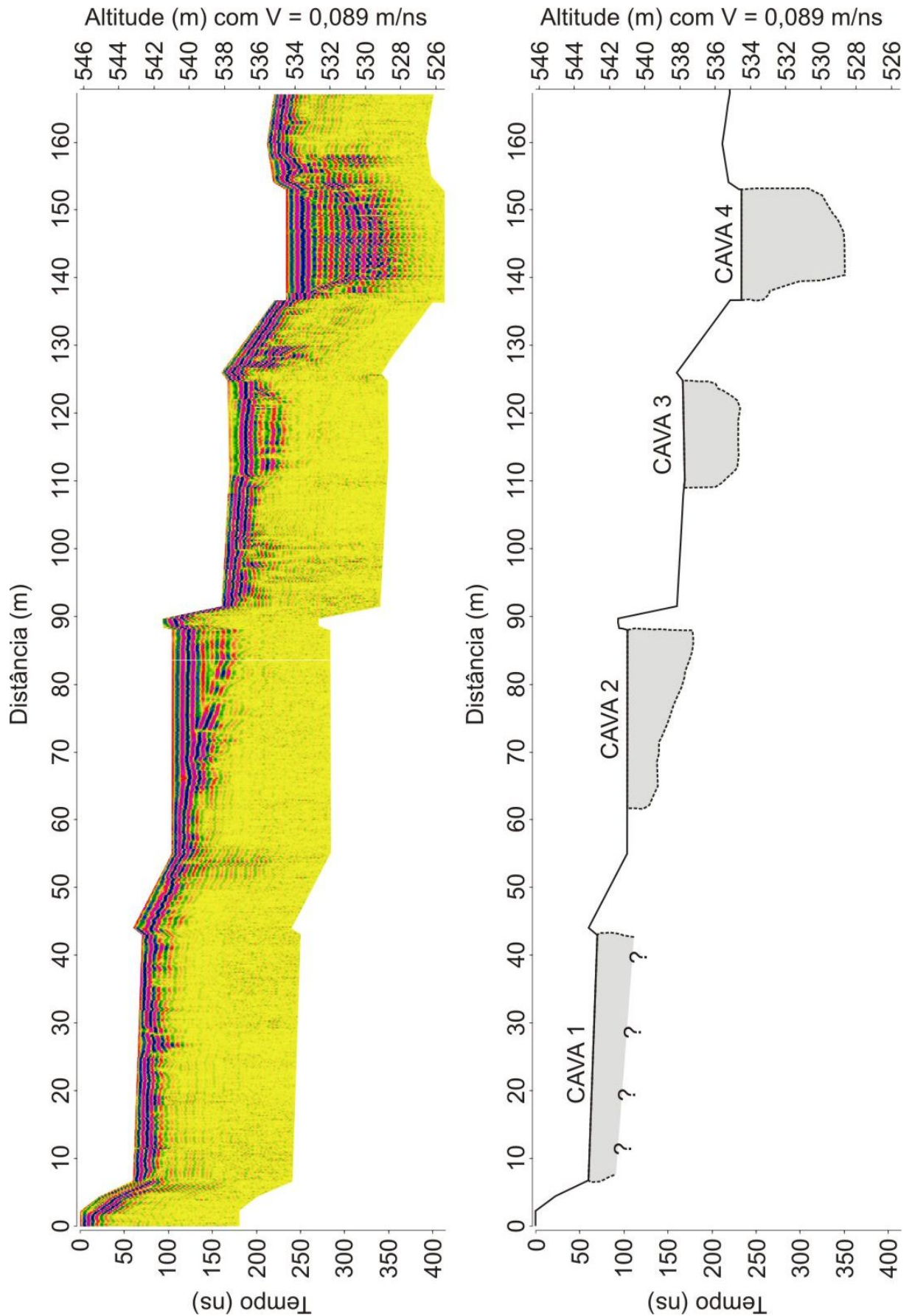


Figura 6.28 - (a) Seção GPR realizada perpendicularmente a todas as cavas. (b) Modelo interpretado a partir da atenuação do sinal EM, marcando assim os limites e a base das cavas.

Após a análise de todos os resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e GPR, foi elaborado um quadro comparativo de aplicabilidade destes métodos (**Quadro 6.2**), para identificar o limite lateral das cavas, a geometria das cavas, a pluma de contaminação e a profundidade do nível d'água na área de estudo.

Quadro 6.2 – Síntese comparativa de aplicação dos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e GPR na área de estudo.

Método Geofísico	Limite lateral das cavas	Geometria da cavas	Pluma de contaminação	Prof. do nível d'água
Eletrorresistividade	2	2	1	1
Polarização induzida	2	2	1	1
Potencial espontâneo	3	4	2	4
GPR	1	1	2	4

NOTAS: (1) Excelente. (2) Bom. (3) Regular. (4) Não foi possível identificar.

6.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA

Em um programa de caracterização ambiental é essencial o uso do método de coleta e análise de solo e/ou água para identificar os contaminantes e suas concentrações. Na área de estudo foi amostrado o resíduo, o solo e a água dos furos de sondagens e poços de monitoramento. Análises químicas do material retirado de dentro das cavas mostraram que a fração inorgânica do resíduo apresenta elevados percentuais de enxofre (19,8 a 56,8%), de cálcio (23,8 a 35,7%), além de elevados percentuais de silício e quantidades não desprezíveis de titânio e chumbo. Provavelmente, os elevados percentuais de enxofre são provenientes do processo de re-refino com ácido e argila, que utiliza o ácido sulfúrico.

Em análises de solo do local, em geral, foram encontradas baixas concentrações de alguns Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), principalmente naftaleno na SD1

(0,004 ppm, referência de 0,2 ppm da CETESB, 2001) e o fenantreno no PM-08 (0,004 ppm, sem padrão de comparação).

Nas análises de água coletada em poços de monitoramento na área verificou-se contaminação da água subterrânea por chumbo (Pb). Em geral, devido às altas concentrações medidas (17,5 µg/L no PM-08, 23,4 µg/L no PM-05 e 30,5 µg/L no PM-07), a área pode ser considerada contaminada (nível de intervenção de 10,0 µg/L da CETESB, 2001).

A fonte de contaminação neste sítio (cavas com resíduo de óleo lubrificante) é diferente dos casos registrados na literatura de anomalias condutivas em zonas contaminadas por LNAPL's de vazamentos de tanques em subsolo (Atekwana et al., 2004; Werkema Jr. et al., 2003, 2004). Porém os resultados obtidos para parâmetros físico-químicos de solos e águas subterrâneas mostram alterações compatíveis com aquelas observadas por esses autores. Esse modelo de anomalia condutiva, consagrado na literatura, correlaciona à anomalia geofísica com os subprodutos das reações de oxidação-redução e da biodegradação do hidrocarboneto. Nesse sítio os principais contaminantes são HPAs, que são degradados por ação bacteriológica. A biorremediação é considerada o método mais eficaz para recuperação de áreas contaminadas por HPAs (ERIKSSON et al, 2000).

De acordo com Werkema Jr. et al. (2003) as principais alterações causadas pela ação das bactérias são:

1. Aumento da população microbiana na fase residual, localizada na zona não saturada;
2. Produção de biosurfactantes e biofilme na porção superior da fase livre;
3. Produção de ácidos orgânicos e carbônicos, provenientes da biodegradação do hidrocarboneto, ocasionando redução no pH;
4. Diminuição do Oxigênio Dissolvido (OD) devido ao consumo do mesmo durante a biodegradação em condições aeróbicas, e aumento de metano (CH₄) em condições anaeróbicas (metanogênese);
5. Aumento na concentração ou presença de Fe (II), Mn (II), NH₄, H₂S e CH₄, provenientes das reações de degradação dos compostos orgânicos;
6. Aumento dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), provenientes da dissolução dos minerais pela ação dos ácidos e bactérias, gerando alterações na força

iônica da água, na porosidade, na geometria dos poros, na permeabilidade, no fator de formação e na molhabilidade.

Os valores de pH e potencial redox medidos em amostras de solo da zona não saturada, e os valores de pH, potencial redox, condutividade e oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas mostram relações com as anomalias geofísicas compatíveis com as alterações esperadas.

Na **Tabela 6.1** são resumidos os valores dos parâmetros obtidos para os solos nas sondagens SD1 a SD5.

Os resultados obtidos para as amostras de solo mostram valores anômalos de pH e condutividade para a SD1 (profundidade de 3,0 metros) e SD5 (profundidade de 3,5 metros). De uma maneira geral todas as amostras de solo apresentaram pH ácido ou levemente ácido. Porém valores de pH mais baixos associados a altos valores de condutividade podem ser indicativos da existência de ácidos orgânicos e carbônicos, subprodutos da ação das bactérias no hidrocarboneto.

Valores anômalos de pH, condutividade e concentração de oxigênio dissolvido são observados em amostras de água de alguns poços de monitoramento. Na **Tabela 6.2** são resumidos os valores dos parâmetros obtidos para as águas nos poços de monitoramento.

Altos valores de condutividade (acima de 400 mS/cm) são observados nos PM-05, PM-06 e PM-07. Valores baixos (em relação ao poço de referência) de concentração de oxigênio dissolvido (OD) são observados nos PM-03, PM-04 e PM-06. Amostras de água dos PM-05 e PM-06 apresentam pH ácido (próximo de 4.0). Todos esses poços estão próximos das cavas, na região onde se observam as anomalias condutivas nos dados de resistividade e GPR, exceto o PM-08. Isso pode ser explicado por esse poço estar a montante das cavas, pois o sentido de fluxo subterrâneo identificado por Penner (2005) é de NW para SE.

Esses valores anômalos associados às anomalias geofísicas indicam uma possível degradação dos hidrocarbonetos por ação bacteriológica. As anomalias, tanto geofísicas como de parâmetros físico-químicos de amostras de água, indicam contaminação e ação bacteriana nos dois aquíferos identificados no local. A análise dessas anomalias mostra também uma relação com a idade das cavas, sendo as anomalias mais marcadas na região das cavas 3 e 4, mais recentes. Isso pode ser devido à atividade bacteriana ter atuado mais tempo na região das cavas 1 e 2, o que resulta em maior atenuação da contaminação.

Tabela 6.1 – Resultados das análises de solo.

Sondagem	Prof. (m)	pH	Eh (mV)	Condutividade (mS/cm)
SD1	3,0	5,41	553	265,0
SD1	16,2	6,59	512	39,0
SD2	3,3	6,17	503	24,6
SD2	15,0	6,42	513	25,5
SD3	3,0	5,79	545	27,3
SD3	12,1	5,75	558	23,8
SD4	3,5	6,0	560	21,8
SD4	11,0	5,7	546	20,5
SD5	3,5	4,45	616	865,0
SD5	10,7	5,89	556	25,2

NOTAS: (1) A cor vermelha destaca as sondagens que apresentaram valores anômalos para os parâmetros pH e condutividade. (2) A cor amarela destaca os valores anômalos dos parâmetros pH e condutividade.

Tabela 6.2 - Resultados dos parâmetros obtidos para as águas nos poços de monitoramento.

Amostra	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (mS/cm)	Concentração de OD (mg/L)	pH	Eh (mV)
Poço de referência	27,1	49,0	4,4	5,8	122,5
PM-01	26,2	60,0	4,9	6,3	105,7
PM-02A	26,4	55,0	5,6	6,2	90,7
PM-02B	26,7	138,0	4,5	6,4	86,2
PM-03	26,3	37,0	3,9	5,9	127,8
PM-04	26,7	44,0	3,0	5,8	123,4
PM-05	27,2	816,0	4,8	3,9	217,5
PM-06	27,7	504,0	3,0	4,2	192,6
PM-07	26,9	484,0	4,6	5,8	136,9
PM-08	26,5	5,2	5,7	6,0	113,7

NOTAS: (1) A cor vermelha destaca os poços de monitoramento que apresentaram valores anômalos para os parâmetros condutividade, oxigênio dissolvido (OD) e pH. (2) A cor amarela destaca os valores anômalos dos parâmetros condutividade, OD e pH.

Para o fechamento da discussão sobre a contaminação da área, é necessário a comprovação da existência de bactérias. Para tanto, foram feitas amostragens de solo em um ponto específico da área (até a profundidade de 4 metros), onde investigações geofísicas sugerem contaminação e, também, foi feita uma amostragem de referência. A **Tabela 6.3** mostra o resultado obtido pela análise biológica (contagem bacteriana) em amostras de solo. De fato existe a presença de bactérias na zona da anomalia geofísica, com até $4,20 \cdot 10^5$ UFC/g (unidades formadoras de colônia por grama de solo) e, portanto, está ocorrendo um processo de bioatenuação natural na área de estudo. A amostra de referência mostra ausência de bactérias.

Tabela 6.3 - Resultados da análise biológica para solo.

Amostra	Prof. (m)	Bactéria (UFC/g)
AM-R*	1,5	0
AM-1	1	$0,94.10^5$
AM-2	2	$1,73.10^5$
AM-3	2,5	$2,15.10^5$
AM-4	3	$4,20.10^5$
AM-5	3,5	$2,71.10^5$
AM-6	4	$3,45.10^5$

NOTA: (1) * Amostra de referência.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Levantamentos de campo foram realizados, em uma área de disposição de resíduo de óleo lubrificante, no município de Ribeirão Preto-SP, com a finalidade de avaliar as potencialidades dos métodos eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e GPR. Os resultados obtidos mostram o grande potencial de aplicação integrada destes métodos na caracterização geoambiental da área de estudo. Os métodos utilizados forneceram uma grande quantidade de dados e informações que permitiram uma análise da área de estudo quanto às relações entre os resíduos e o meio físico. As principais conclusões obtidas nesta pesquisa estão descritas a seguir:

7.1 ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA

A interpretação quantitativa, modelagem com vínculo de suavização, dos dados obtidos pelo levantamento elétrico 2D (resistividade e IP) permitiu uma primeira aproximação para o formato das cavas e valores de resistividade e cargabilidade, tornando os resultados mais precisos e confiáveis e, também, mostrou-se um processo de interpretação simples e rápido.

Em geral, as cavas preenchidas com resíduos de óleo lubrificante são caracterizadas por valores intermediários de resistividade (cavas 1 e 2) e altos valores de resistividade (cavas 3 e 4) associados aos baixos valores de cargabilidade. Levando em consideração que as duas primeiras cavas são cronologicamente mais antigas, o resíduo que preenche estas cavas se tornou menos resistivo ao longo do tempo devido ao processo de biodegradação. Já o resíduo, que preenche as cavas 3 e 4, mostra-se em seu estado mais bruto e plástico, o que o torna mais resistivo. O baixo efeito IP observado nas cavas, dentre outros fatores que podem diminuir o valor da cargabilidade, está relacionado ao fato de que o resíduo de óleo lubrificante disposto nas cavas não é um material polarizável como latas, papéis, pilhas e fragmentos de metais polarizáveis.

A cargabilidade definiu melhor o limite lateral das cavas 1 e 2 e suas geometrias do que a resistividade, como mostram as Linhas C2 e C8. Nestas cavas é difícil distinguir entre o resíduo e o meio contaminado, pois mostram valores de resistividades iguais. Todavia os resultados obtidos sobre as cavas 3 e 4 permitem diferenciar, através do contraste de resistividade, o resíduo do meio contaminado, da mesma forma, que definem o limite lateral e a geometria destas cavas (Linhas C14 e C17). Apesar dos resultados obtidos com o levantamento elétrico 2D, com o dipolo de 10 metros, em áreas com cavas com dimensões semelhantes a deste trabalho, recomenda-se a realização de aquisições com espaçamento entre os dipolos de 5 metros, para resolver melhor a geometria das cavas.

Na área de estudo os valores de resistividade superiores a 130 ohm.m e os valores de cargabilidade superiores a 5 mV/V caracterizam o material natural não saturado (predominantemente solo residual de basalto). A zona de menor resistividade a partir da profundidade de 12 metros caracteriza a presença de água dentro do material natural (zona saturada), como constatado pelas Linhas C2, C3, C7 e C8. O efeito IP é alto dentro da zona saturada, com valores de cargabilidade superiores a 17 mV/V. As unidades geológicas que ocorrem na área são os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu que constituem dois sistemas de aquíferos, sendo um aquífero suspenso na região centro-oeste da área e um aquífero profundo na região centro-leste da área. Nos perfis das Linhas C12, C14, C17 e C19, a partir da profundidade de 9 metros, o material natural está relacionado ao solo residual de arenito não saturado, como evidenciado nos poços de monitoramento.

Estas unidades geológicas são cobertas por um colúvio silto-arenoso a silto-argiloso na área. Devido à mistura de materiais que constituem o solo superficial na área, este é caracterizado por uma grande variação de valores de resistividade e cargabilidade, como observados em todos os perfis.

A resistividade e a cargabilidade foram sensíveis à presença da contaminação na zona não saturada (como por exemplo, no perfil da Linha C14) e na zona saturada (como por exemplo, no perfil da Linha C3). A contaminação é caracterizada por baixos valores de resistividade e pelo aumento da polarização à medida que se afasta da fonte de contaminação, embora ainda caracterizada por baixos valores de cargabilidade. O aumento da polarização está associado ao aumento de partículas polarizáveis (biominerais), que acompanham o metabolismo e o crescimento microbial. As altas taxas metabólicas são assumidas como sendo resultado de alta concentração de células microbiais, alta respiração e alta concentração de biominerais. O início do aumento da polarização é relacionado com o

início do consumo de lactado (metabolismo microbiano). As anomalias condutivas estão diretamente relacionadas ao processo de biodegradação gerado pela atividade bacteriana, que ao longo do tempo, torna o meio menos resistivo, devido à produção dos STD.

A aquisição de dados 3D, a partir de uma série de levantamentos elétricos 2D, com o arranjo dipolo-dipolo, diminuiu o tempo de aquisição e tornou a metodologia viável. Os resultados obtidos comprovam a eficácia desta metodologia em mapear variações de resistividade e cargabilidade tridimensionalmente, com potencial de aplicação em estudos ambientais. Os resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida, em três dimensões, mostraram uma melhor avaliação da área de estudo, permitindo identificar a zona não saturada, zona saturada, materiais geológicos e o comportamento dos contaminantes (pluma de contaminação).

No modelo geoeletrico 3D a zona não saturada é caracterizada por valores de resistividade superiores a 100 ohm.m e por valores de cargabilidade superiores a 12,5 mV/V. Já a zona saturada é caracterizada por altos valores de cargabilidade associados aos valores de resistividade inferiores a 100 ohm.m. A contaminação é evidenciada tanto na zona não saturada como na zona saturada (valores de resistividade inferiores a 50 ohm.m).

Houve uma tentativa de realizar aquisições 3D, com o arranjo pólo-pólo com recobrimento total e diagonal cruzado, com o objetivo de comparar os resultados obtidos para as três formas de aquisição. Entretanto, esta proposta foi desconsiderada na prática devido ao aumento excessivo no tempo de aquisição dos dados de campo, tornando inviável a realização do trabalho. Para viabilizar aquisições 3D, com o arranjo pólo-pólo com recobrimento total e diagonal cruzado na área de estudo, recomenda-se a utilização de sistemas multi-eletrodos e aquisição automatizada.

Os blocos 3D de resistividade e cargabilidade mostraram uma boa visualização do comportamento da pluma de contaminação na área de estudo. Em geral, os valores de resistividade entre 1 a 40 ohm.m sugerem contaminação, e os valores de cargabilidade entre 0,1 a 5 mV/V corroboram esta hipótese.

7.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

A partir da interpretação qualitativa dos dados obtidos pelo método potencial espontâneo, conclui-se que na área de estudo está ocorrendo intensa atividade geoquímica, visto que os valores de SP mostram uma considerável variação, entre -150 a 250 mV/V, como observado no mapa de potencial espontâneo da área de estudo.

Levando em consideração a ocorrência de solo residual de basalto na área de estudo, as anomalias positivas de potencial espontâneo são associadas à presença de materiais argilosos. Já as anomalias negativas de potencial espontâneo estão relacionadas à ação microbiológica (processo de biodegradação), que causa o aumento do potencial redox e empobrecimento da concentração de oxigênio dissolvido. Na área de estudo, em geral, as anomalias negativas de potencial espontâneo são coincidentes com as anomalias de resistividade e cargabilidade, que caracterizam a contaminação do meio físico.

Normalmente o fluxo subterrâneo é caracterizado pelo crescimento dos valores de potencial natural no sentido do fluxo, porém a influência da contaminação é superior ao potencial devido ao fluxo, o que impossibilitou sua identificação no mapa de SP. De acordo com Penner (2005), o sentido do fluxo subterrâneo na área de estudo segue de NW para SE. O potencial espontâneo, além de ser um método de operação simples e de baixo custo, fornece informações úteis para a caracterização geoambiental da área de estudo.

7.3 *GROUND PENETRATING RADAR*

O método GPR mostrou eficiência no mapeamento da geometria das cavas, identificando os limites e a base das cavas preenchidas com resíduos de óleo lubrificante. A zona de absorção de energia eletromagnética localizada abaixo das cavas é coincidente com o aumento da condutividade elétrica do meio, gerada pelo processo de biodegradação, como constatado pelo método da eletrorresistividade. Além disso, os dados GPR possibilitaram a identificação de objetos difratores (talvez tambores e/ou tanques) dentro do resíduo, confirmando a sua aplicabilidade na área.

Em síntese, a aplicação integrada dos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e GPR, são ferramentas de grande potencialidade na caracterização geoambiental da área de disposição de resíduos de óleo lubrificante ou casos similares. Como este estudo de caso não é comumente registrado na literatura geofísica, esta pesquisa de doutorado representou uma oportunidade ímpar para testar e avaliar métodos geofísicos, contribuindo para o entendimento de respostas geofísicas na investigação deste passivo ambiental. Espera-se, que esta contribuição seja inserida no contexto brasileiro de avaliação de locais de disposição de resíduos de derivados de petróleo, uma vez que este trabalho representa uma abordagem original. Todos os métodos aplicados na área de estudo mostram eficiência no imageamento da pluma de contaminação.

7.4 INVESTIGAÇÃO DIRETA

As análises diretas confirmam a existência da contaminação e atividade bacteriana na área de estudo. Concentrações anômalas de metais pesados e alterações de valores de alguns parâmetros físico-químicos foram observadas em locais indicados pelos resultados geofísicos, mostrando a importância do uso de geofísica em programas de caracterização geoambiental. Da mesma forma fica claro que em um programa de caracterização geoambiental é essencial o uso do método de coleta e análise de solo e/ou água para identificar os contaminantes e suas concentrações.

7.5 RECOMENDAÇÕES

Por ser um passivo ambiental e considerando a possibilidade de risco à saúde humana ou ecossistema, recomenda-se o isolamento da área e monitoramento contínuo por técnicos especializados para tomar as medidas necessárias para solucionar o problema.

Sugere-se que as cavas sejam cobertas por mantas impermeáveis, minimizando a lixiviação do resíduo devido às águas de chuvas, como também um sistema de drenagem superficial, evitando que estas águas fiquem retidas no local. Dentro das técnicas utilizadas para remediação, recomenda-se a Atenuação Natural Monitorada, que exige monitoramento e avaliação cuidadosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J.P.; ATEKWANA, E.A.; ATEKWANA, E.A.; DURIS, J.W.; WERKEMA Jr., D.D.; ROSSBACH, S. 2007. The microbial community structure in petroleum-contaminated sediments corresponds to geophysical signatures. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 73(1): 2860-2870.

ANNAN, A.P. 1992. Ground penetration radar workshop notes. Sensor; Software, Inc., Internal Report, 130p.

ANNAN, A.P. 1996. Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 0(2): 125-136.

ANNAN, A.P. 2002. GPR – History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. Vol. 3(4): 253-270.

ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; WERKEMA, D.D. Jr. 2000. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal Applied Geophysics*, Vol. 44: 167-180.

ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; ABDEL AAL, Z.G; WERKEMA Jr., D.D. 2002. Geophysical investigation of vadose zone conductivity anomalies at a hydrocarbon contaminated site: implications for the assessment of intrinsic bioremediation. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 7: 103-110.

ATEKWANA, E.A.; WERKEMA Jr., D.D.; DURIS, J.W.; ROSSBACH, S.; ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; CASSIDY, D.P.; MEANS, J.; LEGALL, F.D. 2004. In-situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site. *Geophysics*, Vol. 69(1): 56-63.

AZAMBUJA, E.; COSTA, A.F.U.; NANNI, A.S. 1999. O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. In: IV Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, SP.

BAEDECKER, M.J.; COZZARELLI, I.M.; EGANHOUSE, R.P.; SIEGEL, D.I.; BENNETT, P.C. 1993. Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer: III. Biogeochemical reactions and mass balance modeling in anoxic groundwater. *Applied Geochemistry*, Vol. 8: 569-586.

BAESSA, M.P.M. 2007. Assinaturas geolétricas em área contaminada por hidrocarboneto no pólo industrial de Cubatão-SP. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 87p.

BARKER, R.D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, Vol. 54(8): 1031-1037.

BENNETT, P.C.; SIEGEL, D.E.; BAEDECKER, M.J.; HULT, M.F. 1993. Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer: I. Hydrogeology and inorganic geochemistry. *Applied Geochemistry*, Vol. 8: 529-549.

BENSON, A.K. 1995. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, and cavities. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33: 177-193.

BERMEJO, J.L.; SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A. 1997. Geophysical discovery of a new LNAPL plume at the former Wurtsmith AFB. *Ground Water Monitoring Remediation*, Vol. 17(4): 131-137.

BHATTACHARYA, B.B.; DUTTA, I. 1982. Depth of investigation studies for gradient arrays over homogeneous isotropic half-space. *Geophysics*, Vol. 47: 1198-1203.

BORGES, W.R.; LAGO, A.L.; FACHIN, S.J. da S.; SANTOS, E.; ELIS, V.R. 2006. GPR utilizado na detecção da geometria de cavas usadas para disposição de resíduos de óleos lubrificantes. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24(4): 483-494.

BORGES, W.R. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. *Tese de Doutorado*, Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 256p.

BRAGA, A.C. de O. 1997. Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro-SP. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 173p.

BRAGA, A.C. de O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. *Livre Docência*, Instituto de Geociências e Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 123p. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br>, acessado em 26/10/2008.

BRAGA, A.C. de O. 2008. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 26(1): 61-68.

BRAGA, A.C. de O.; CARDINALI, M.T. 2005. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(2): 181-190.

BRANDES, I.M. 2005. The negative chargeability of clays. *Thesis of doctorate*, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia, 153p.

CARMAGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. 1986. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do instituto Agrônômico de Campinas – Boletim Técnico. Campinas, 97p.

CASTRO, D. L. de ; BRANCO, R.M.G.C. 2003. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 54: 127-144.

CAVAGUTI, N.; SILVA, F.P. 1992. Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru-SP, face as características hidrogeológicas especiais da região. In: VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte, p.74-79.

COMMITTEE ON SOURCE REMOVAL OF CONTAMINANTS IN THE SUBSURFACE. 2004. Contaminants in the subsurface: source zone assessment and remediation. National Research Council, 372 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2006. Geologia e recursos minerais do Estado de São Paulo. CD-ROM.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 2001. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Projeto de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha/CETESB-GTZ. 2. ed., São Paulo, 398p.

CORWIN, R.F. 1990. The self-potential method for environmental and engineering applications. *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysicists, 1:127-145.

COZZARELLI, I.M.; EGANHOUSE, R.P.; BAEDECKER, M.J. 1990. Transformation of monoaromatic hydrocarbons to organics acids in anoxic groundwater environment. *Environmental Geology and Water Science*, Vol. 16: 135-141.

COSTA, J.A.; FERREIRA, J.C. 1997. Lixão de Serrana: Caracterização do Problema Ambiental e Proposição de Soluções. Contrato Petrobrás/Unaerp n.º650.2.010.978 (Relatório Final), 91p.

CUTRIM, A.O.; RUIZ, A.S.; LIPORONI, L.M.; MEDEIROS, F.A. de; BARROSO, U.C.; NASCIMENTO, A.L. 2007. Sonadagem elétrica vertical aplicada em pesquisa hidrogeológica na Bacia do Parecis-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 25(2): 131-140.

DANIELS, J.J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33: 195-207.

DANIELS, J.J. 1996. **Surface Penetrating Radar**. The institution of Electrical Engineers, London, united Kingdom, 300p.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, Vol. 52: 379-398.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. 1989. Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of oil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, Vol. 37: 531-551.

DEHAINE, J. 2001. Detecção de pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157p.

DOBRIN, M.B.; SAVIT, C.H. 1988. Introduction to geophysical prospecting. 4ed. Singapore: McGraw-Hill, 867p.

DRASKOVITS, P.; HOBOT, J.; VERŐ, L.; SMITH, B. 1990. Induced-polarization survey applied to evaluation of groundwater resources, Pannonian Basin, Hungary. USA. *Investigations in Geophysics*, nº 4. Induced Polarization Applications and Case Histories. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, p.379-396.

DUARTE, K.S. 2003. Avaliação do risco relacionado à contaminação dos solos por hidrocarbonetos no Distrito Federal. *Tese de Doutorado*, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 259p.

DUARTE, O.O. 2003. **Dicionário Enciclopédico de Inglês-Português de Geofísica e Geologia**. Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, 352p.

EDWARDS, L.S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, Vol. 42(3): 1020-1036.

EGANHOUSE, R.P.; BAEDECKER, M.J.; COZZARELLI, I.M.; AIKEN, G.R.; THORN, K.A.; DORSEY, T.F. 1993. Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer: II. Organic geochemistry. *Applied Geochemistry*, Vol. 8: 551-567.

ELIS, V.R. 1993. A aplicação geofísica para análise do meio físico. Importância para a elaboração de mapeamento geotécnico. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 120p.

ELIS, V.R. 1999. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 264 p.

ELIS, V.R. 2000. Modelagem 2D de ensaios de caminhamento elétrico dipolo-dipolo realizados em áreas de disposição de resíduos. *Geociências*, Vol. 19(1): 103-112.

ELIS, V.R.; MENDONÇA, C.A.; PORSANI, J.L.; STROBINO, E. de F. 2008. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 26(3): 317-325.

ENDRES, A.L.; REDMAN, J.D. 1996. Modelling the electrical properties of porous rocks and soils containing immiscible contaminants. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 0(2): 105-112.

ERIKSSON, M.; DALHAMMAR, G.; BORG-KARLSON, A.K. 2000. Biological degradation of selected hydrocarbons in an old PAH/creosote contaminated soil from a gas work site. *Appl Microbial Biotechnol*, Vol. 53: 619-626.

EVJEN, H.M. 1938. Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, Vol. 3: 78-95.

FACHIN, S.J. da S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES, W.R.; MIGLIORINI, R.B. 2006. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24(1): 129-138.

FARIA, P.M.; ROSA, H.V.D. 2004. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs): uma revisão de seus aspectos toxicológicos. *Revista Brasileira de Toxicologia*, Vol. 17(2): 61-70.

FELS, J.B. 1999. Source-identification investigations of petroleum contaminated groundwater in the Missouri Ozarks. *Eng. Geol.*, Vol. 52: 3-13.

FETTER, C.W. 1998. *Contaminat Hydrogeology*. Macmillan Publissing Company, New York, 458p.

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979. *Grondwater*. Prentice-Hall International Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 604p.

FREEMAN, H.M. 1998. Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. McGraw Hill, New York, 992p.

GALLAS, J.D.F. 2000. Principais métodos geométricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 258p.

GALLAS, J.D.F. 2005. O método do potencial espontâneo (SP) – uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(2): 133-144.

GALLAS, J.D.F.; TAIOLI, F.; SILVA, S.M.C.P. da; COELHO, O.G.W.; PAIM, P.S.G. 2005. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(1): 51-59.

GANDOLFO, O.C.B. 2007. Um estudo do imageamento geoeétrico na investigação rasa. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências, USP, Campus de São Paulo –SP, 215p.

GANDOLFO, O.C.B.; GALLAS, J.D.F. 2005. Eletroresistividade 3D – Uma avaliação preliminar da técnica. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(2): 191-198.

GANDOLFO, O.C.B.; GALLAS, J.D.F. 2007. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletroresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 25(3): 227-235.

GEOTOMO. 2001. RES3DINV Version 2.1 for Windows 95/98/ME/2000/NT/XP. Rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares methods. *User's Manual*, 50p.

GEOTOMO. 2003. RES2DINV Version 3.53 for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares methods. *User's Manual*, 129p.

GOLDEN SOFTWARE, INC. 1997. Surfer 6.0 for Windows. *User guide*. 340p.

GUIGUER, N. 1996. Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamento em postos de abastecimento. Waterloo Hydrogeologic, 356p.

HIODO, F.Y.; SILVA, N.; ELIS, V.R.; GALHARDO FILHO, L.; SILVA, J.E. da. 2001. Projeto de um sistema semi-automatizado de medidas de potencial elétrico natural ou induzido do solo para aplicações geoeétricas. In: VII International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador. **Anais eletrônico...** Salvador. CD-ROM.

HYOUNG-SOO, K.; YEONGHWA, K. 1997. Geoelectrical monitoring in Nanji Waste Landfill. In: V International Congress of the Brazilian Geophysical Society, São Paulo. **Anais...**São Paulo, Vol. 1: 417-420.

IRIS INSTRUMENTS. 1993. *Syscal R2: Operating Manual*. Orleans, France. 72p.

KELLER, G.V. 1987. Rock and mineral properties. **Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1: 13-51.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.-J. 2007. Environment geology handbook of field methods and case studies. *Springer*, 1358p.

LAGO, A.L.; ELIS, V.R.; GIACHETI, H.L. 2006. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24(3): 357-374.

LIMA, O.A.L. de; SATO, H.K.; PORSANI, M.J. 1995. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 34: 93-108.

LOKE, M.H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 136p. Disponível em: <http://www.geoelectrical.com>, acessado em 04/11/2006.

LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, Vol. 44: 499-523.

LOKE, M.H.; DAHLIN, T. 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49: 149-162.

MAZÁC, O.; BENES, L.; LANDA, I.; MASKOVA, A. 1990. Determination of the extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 2: 107-112.

MOREIRA, C.A. 2005. Aplicação do método eletromagnético transiente em área contaminada sob atenuação natural. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 161p.

MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C.; BRAGA, A.C. de O. 2006. Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24(3): 383-392.

MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C. 2007. Monitoramento da atenuação natural de pluma de contaminação pelo método de radar de penetração no solo (GPR). *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 25(4): 389-398.

MOURA, H.P., 2002. Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 231p.

NADIM, F.; HOAG, G. E.; LIU, S.; CARLEY, R. J.; ZACK, P. 2000. Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 26: 169-178.

NASCIMENTO, C. T. C. do; FERREIRA, F.J.F.; ANDRADE, L. R.M. de; GASPAR, J.C.; PIRES, A.C.B. 2008. Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 26(1): 21-29.

NTARLAGIANNIS, D.; WILLIAMS, K.H.; SLATER, L.; HUBBARD, S. 2005. Low-frequency electrical response to microbial induced sulfide precipitation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, G02009, doi: 10.1029/2005JG000024.

NYQUIST, J.E.; CORRY, C.E. 2002. Sel-potential: the ugly duckling of environmental geophysics. *The Leading Edge*, may issue, p.446-451.

OLAYINKA, A.I.; YARAMANCI, U. 2000. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospection*, Vol. 48: 293-316.

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

OLIVEIRA, E. 1992. Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 112 p.

OLIVEIRA, E. 2000. Transferência de fases. Boletim da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, n. 100, p.8.

ORELLANA, E. 1972. **Prospeccion geoelectrica em corriente continua**. Madrid: Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523p.

ORELLANA, E., 1974. **Prospeccion geoelectrica por campos variables**. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 571p.

PENNER, G.C. 2005. Estudo de caso da contaminação do solo e da água subterrânea por deposição no solo de resíduos vinculados a óleos lubrificantes. *Tese de Doutorado*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP, 193p.

PORSANI, J.L.; RODRIGUES, A.R.; CALLARI, R.; ANTUNES, P.T. 1994. O método GPR. *Comunicação Técnica Interna*, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ.

PORSANI, J.L. 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 145p.

PORSANI, J.L.; FILHO, W.M.; ELIS, V.R., SHIMELES, F.; DOURADO, J.C.; MOURA, H.P. 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 55 (3): 199-209.

PRADO, R. L. 2000. A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: Um estudo na cidade de São Paulo-SP, Brasil. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 174p.

REDMAN, J.D.; RYCK, S.M. de; ANNAN, A.P. 1994. Detection of LNAPL of pools with GPR: theoretical modeling and surveys of a controlled spill. In: Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, Kitchener, Ontário, p. 1283-1294.

RODRIGUES, S.I. 2004. Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 89p.

ROSSELI, M.L. 1995. Avaliação hidrogeológica e programa de monitoramento da água subterrânea. Córrego do Campo, Ribeirão Preto, SP, 22p.

ROY, A. 1972. Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, Vol. 20: 329-340.

ROY, A.; APPARAO, A. 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, Vol. 36(5): 943-959.

SANDMEIER, K.J. 2006. REFLEXW Version 4.0 for Windows 9x/2000/NT/XP. *Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data*. Manual do Software, 192p.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. 1998. High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 2: 203-212.

SAUCK, W.A. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 44: 151-165.

SCHNEIDER, G.W.; GREENHOUSE, J.P. 1992. Geophysical detection of perchloroethylene in a sandy aquifer using resistivity and nuclear logging techniques. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Oakbrook, IL. **Proceedings...SAGEEP**, p. 619-628. CD-ROM.

SHEVNIN, V. et al. 2003. Study of pollution in airports with resistivity soundings. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, **Proceedings...Environmental & Engineering Geophysical Society**, p. 180-189. CD-ROM.

SHERIFF, R.E. 2002. *Encyclopedic dictionary of applied geophysics*. 4ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 429p.

SUMNER, J.S. 1976. Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge university Press, 770p.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1998. Guidance for prospective ground-water monitoring studies. Environmental Fate and Effects Division. Office of Pesticide Programs. USEPA, Washington, D.C., 79p.

USTRA, A.T. 2008. Utilização dos métodos eletrorresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP. **Dissertação de Mestrado** (Departamento de Geofísica), IAG/USP, São Paulo, SP, 182p.

WARD, S.H.; HOHMANN, G.W. 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1: 131-311. (**Investigations in Geophysics, n. 3**).

WARD, O.S.H. 1990. **Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics**, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p.147-189.

WERKEMA Jr., D.D.; ATEKWANA, A.E.; ENDRES, A.L.; SAUCK, W.A.; CASSIDY, D.P. 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, n. 12, 1647, doi: 10.1029/2003GL017346.

WERKEMA Jr., D.D. et al. 2004. Laboratory and field results linking high bulk conductivities to the microbial degradation of petroleum hydrocarbons. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. **Proceedings...** Environmental & Engineering Geophysical Society, p. 363-373. CD-ROM.

YILMAZ, O. 1987. *Seismic Data Processing*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 526p.

ZHDANOV, M.S.; KELLER, G.V. 1994. *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Co, 873p.

APÊNDICE – Artigo publicado em Revista Internacional, conforme exigência complementar do Programa de Pós-Graduação em Geofísica do IAG/USP, para a obtenção do Título de Doutor.

Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil

Alexandre Lisboa Lago · Vagner Roberto Elis ·
Welitom Rodrigues Borges · Giovanni Chaves Penner

Received: 4 June 2008 / Accepted: 5 August 2008
© Springer-Verlag 2008

Abstract Geophysics has been shown to be effective in identifying areas contaminated by waste disposal, contributing to the greater efficiency of soundings programs and the installation of monitoring wells. In the study area, four trenches were constructed with a total volume of about 25,000 m³. They were almost totally filled with re-refined lubricating oil waste for approximately 25 years. No protection liners were used in the bottoms and laterals of the disposal trenches. The purpose of this work is to evaluate the potential of the resistivity and ground penetrating radar (GPR) methods in characterizing the contamination of this lubricant oil waste disposal area in Ribeirão Preto, SP, situated on the geological domain of the basalt spills of the Serra Geral Formation and the sandstones of the Botucatu Formation. Geophysical results were shown in 2D profiles.

A. L. Lago (✉)
CPRM, Serviço Geológico do Brasil,
Avenida Pasteur, 404/1114, Urca,
Rio de Janeiro 22290-240, Brazil
e-mail: alago@rj.cprm.gov.br

V. R. Elis
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo (IAG/USP), Rua do Matão,
1226, Cidade Universitária, São Paulo 05508-090, Brazil
e-mail: vagnelis@iag.usp.br

W. R. Borges
SIGEO, Soluções Integradas em Geotecnologias,
Rua Engenheiro José Amadei, 450,
São Paulo 05565-060, Brazil
e-mail: welitom@sigeo.srv.br

G. C. Penner
Instituto de Ensino Superior Colégio Oswaldo Cruz (COC),
Rua Abraão Issa Halack, 980, Ribeirânia,
Ribeirão Preto, 13566-590, Brazil
e-mail: giovannipenner@yahoo.com.br

The geophysical methods used enabled the identification of geophysical anomalies, which characterized the contamination produced by the trenches filled with lubricant oil waste. Conductive anomalies (smaller than 185 Ωm) immediately below the trenches suggest the action of bacteria in the hydrocarbons, as has been observed in several sites contaminated by hydrocarbons in previously reported cases in the literature. It was also possible to define the geometry of the trenches, as evidenced by the GPR method. Direct sampling (chemical analysis of the soil and the water in the monitoring well) confirmed the contamination. In the soil analysis, low concentrations of several polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were found, mainly naphthalene and phenanthrene. In the water samples, an analysis verified contamination of the groundwater by lead (Pb). The geophysical methods used in the investigation provided an excellent tool for environmental characterization in this study of a lubricant oil waste disposal area, and could be applied in the study of similar areas.

Keywords Applied geophysics · Electrical methods · GPR · Lubricant oil

Introduction

In Brazil, until the 1970s, industrial and urban waste was directly disposed of in the soil, as it was believed that the soil was an unlimited receptor for disposable and noxious substances (CETESB 2001—Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). However, this capability was overestimated, causing irreparable damage to the environment.

Ground contamination is of great concern because this is where most of the food required for human survival is

cultivated. Besides the soil, the contaminant can also reach the water-bearing stratum, and make water inappropriate for consumption.

The contaminants in the subsurface are in the liquid phase, as well as in diluted aqueous solution, concentrated aqueous solution (leachate), and organic liquid (NAPL—nonaqueous phase liquid) immiscible with water. The contaminants' characteristics influence the migration direction, the plume extension, and its stability (Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface 2004).

The NAPLs are classified as LNAPLs (light nonaqueous phase liquids) and DNAPLs (dense nonaqueous phase liquids). The difference between them is mainly their density; the former is an immiscible NAPL lighter than water while the latter is heavier than water.

Hydrogeological studies show that the contaminants' migration and dispersion mechanisms are complex, making it difficult to properly estimate their quantity or extension in the subsurface using only monitoring wells (Freeze and Cherry 1979). The “Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo—CETESB” recommend monitoring wells as the method of choice for geophysical surveys in the diagnosis of contaminated areas. Their purpose is to identify the ground contamination as well as to define geological and hydrogeological features of the investigated site (CETESB 2001). The use of non-invasive geophysical methods avoids infiltration of the contaminant to non-contaminated layers and does not impact the environment. In addition, geophysical methods can investigate larger areas with lower cost as compared to direct investigation methods.

Geophysical methods show excellent results in identifying areas contaminated by NAPLs (Davis and Annan 1989; Benson 1995; Daniels et al. 1995; Sauck et al. 1998; Vickery and Hobbs 1998; Azambuja et al. 1999; Atekwana et al. 2000; Sauck 2000; Dehaine 2001; Castro and Branco 2004; Braga and Cardinali 2005; Penner 2005).

Hence, the integration of geophysical methods can provide important information and also reduce the ambiguity of data interpretation. In this context, the main objective of this work is to integrate the resistivity and ground penetrating radar (GPR) methods, aiming at an appropriate environmental characterization of the re-refined lubricating oil waste disposal area in Ribeirão Preto, SP.

Site description

The study site received wastes generated by an oil company from mid-1970s to 1995.

Lubricating oils are composites consisting mainly of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and inorganic additives, such as sulphur, nitrogen and trace metals

(Freeman 1998). These constituents are also present in the residues. The PAHs are considered hazardous contaminants by the National Institute of Occupation Safe and Health (NIOSH 1998).

The residue is characterized by a pasty black material with absolute density between 0.9907 and 1.2616 g/cm³ (average of 1.1095 g/cm³). A photoionization detector (PID) in situ measured the concentration of volatile organics between 1.7 and 2.5 ppm.

The waste was disposed of in four trenches with approximate dimensions of 41–49 m length, 24–36 m width and a mean depth of 6 m, with a total volume of about 25,000 m³. The pits were almost totally filled with re-refined lubricating oil waste for about 25 years. No protection liners were used in the bottoms and laterals of the disposal trenches.

The area is located close to 334 km of the “Rodovia Alexander Balbo” (SP 328), city of Ribeirão Preto, state of São Paulo (Fig. 1).

Geological aspects

The area is situated in the Sedimentary Basin of Paraná, represented by two distinct geologic units, the Botucatu and Serra Geral Formations.

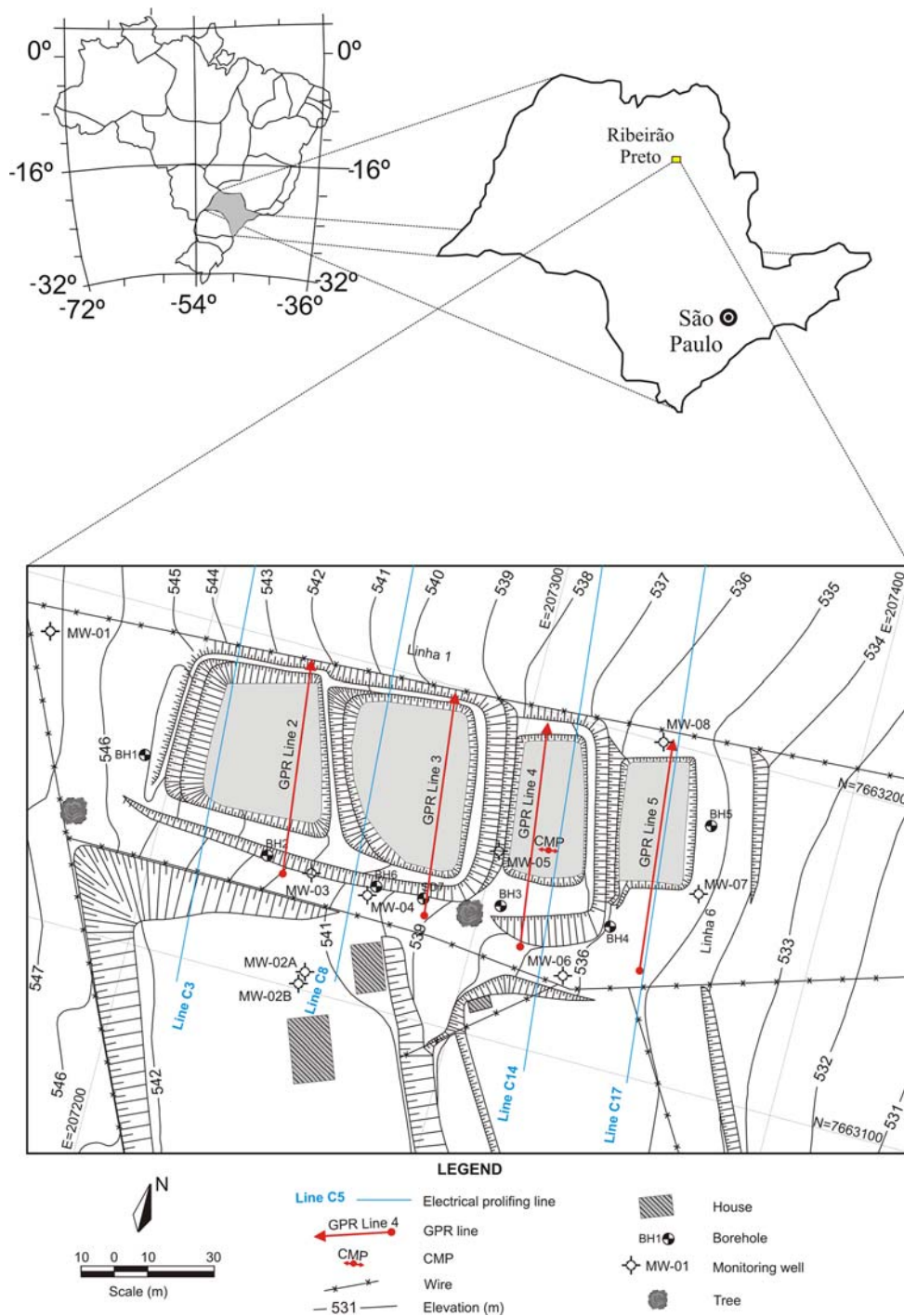
The Botucatu Formation is the main unit of the Guarani Aquifer, which is mainly responsible for most of the water supply of the city Ribeirão Preto. It is mainly characterized by reddish sandstone layers, fine to medium, with well selected frosted grains, highly spherical. The region is generally covered by the basalts of the Serra Geral Formation. This outcropping constitutes a recharge zone for the Guarani Aquifer (Costa and Ferreira 1997).

The Serra Geral Formation basalts are dark gray to black in color, fine grained in texture and solid in structure. They occur in the form of spills (dikes and sills), sometimes with sandstone similar to the Botucatu Formation.

Residual sandy soil of the Botucatu Formation was identified in boreholes to the east of the area, at a depth greater than 12 m. The Serra Geral Formation, on the other hand, is characterized in this area by rock fragments of basalt and residual clayey silt soil. The boreholes showed a silt-sandy clay colluvium layer of dark red color up to the depth of 6 m, followed by clayey silts from the basalt alteration (Penner 2005). This superficial colluvium layer covers other units. The relationships between these units in the study area are visualized in Fig. 2.

Two aquifers can be identified: a superficial one (at a depth of about 15 m) supported by the residual less permeable basalt soil occurring in the west part of the area, and another occurring inside the permeable arenaceous materials, at a depth of 27 m.

Fig. 1 Study area and geophysical surveys locations



Methodology

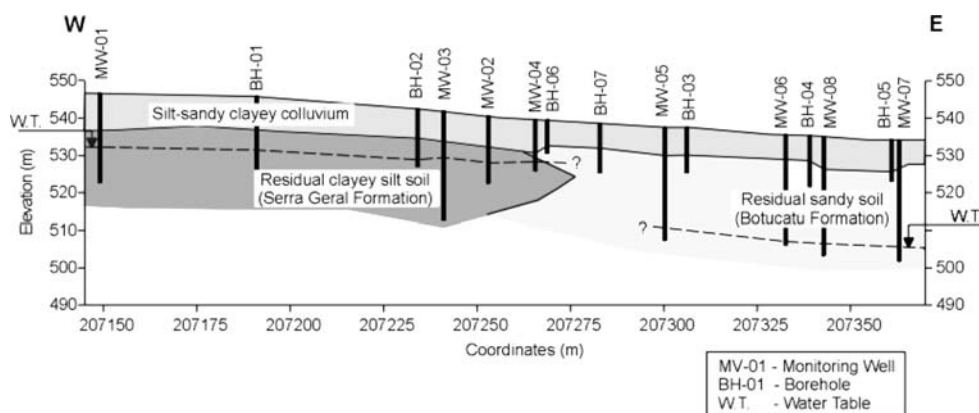
Acquisition and processing of geophysical data

In the study area, geophysical surveys were carried out with the resistivity and GPR methods. The location of the surveys in the study area is presented in Fig. 1.

The resistivity method is widely used due to its application in several research fields, i.e. mining, engineering,

geology, hydrogeology and environmental. This method of geophysical prospecting makes use of an artificial electrical current introduced into the soil through two electrodes (A and B), with the purpose of measuring the potential generated at two other electrodes in the vicinity of the current flow (M and N) in order to calculate the apparent resistivity of the subsurface and consequently the true resistivity through the inversion process. The resistivity (and its inverse, the conductivity) of soils and rocks are affected by

Fig. 2 E–W profile obtained from borehole and well information



their composition, porosity, water content, and dissolved salts, thus enabling the wide application of this method in environmental and hydrogeological studies. There are many techniques using the resistivity method. For example, vertical electrical sounding and electrical profiling provide a great variety of geometric configurations and therefore have an excellent versatility level.

The technique used in this work was electrical profiling. 20 dipole–dipole electrical profiling lines (C1–C20) were set up with a spacing of 10 m between electrodes. The results of lines C3, C8, C14 and C17 are presented in this paper.

The apparent resistivity data were processed with RES2DINV software (Loke 2004a), which uses the field data to automatically determine a two-dimensional model of resistivity for the medium. The RES2DINV is an inversion program for resistivity and induced polarization (smoothing modeling).

The GPR is a geophysical method that uses electromagnetic (EM) waves in frequencies from 50 to 2,000 MHz to locate shallow structures and geological features (Davis and Annan 1989; Annan 1992).

This method consists of the emission and reception of reflected EM waves from the boundaries of the medium, resulting in a high-resolution image of the subsurface. The GPR signal is controlled by the frequency and velocity of the EM wave in the medium, the reflection coefficient (the contrast of dielectric permittivity inside the medium) and the medium's attenuation of the waves. The wave attenuation is proportional to the electrical conductivity of the medium so that the higher the conductivity, the higher the attenuation of the EM wave (Annan 1992).

The conventional techniques of data acquisition are the common offset and velocity sounding. The technique used most often is the common offset, where a pair of antennas (transmitter and receiver) are moved at the same time along a profile. The most common velocity soundings are CMP (common mid point) and WARR (wide angle reflection and refraction). In the CMP technique, the spacing between the antennas (transmitter and receiver) is increased in opposite

directions from a fixed central point. In the WARR technique, one of the antennas is kept fixed while the other is moved away from the first.

The acquisition parameters were: 0.2 m trace spacing, 1,640 MHz sampling frequency, and 32 traces stacking. The shoots and trace records were registered continuously with the use of a calibrated wheel. GPR data were acquired in seven lines in the common offset mode (lines 1–7). The results of lines 2–5 are presented in this paper.

The data was processed with the ReflexW software, version 4.0 (Sandmeier 2006). The processing routine consisted of converting the data format, set time zero, filters 1D (dewow and bandpass frequency), gains (linear and exponential), conversion time to depth (constant velocity) and topography correction. The same parameters for gain and filters were applied to every section with the intention of comparing the signal amplitudes.

The velocity used for converting the sections from time to depth was 0.1 m/ns, obtained by the analysis of a CMP velocity sounding carried out inside cell 3.

Direct investigation methods

The positions of the boreholes and monitoring wells were suggested based on the results obtained from the geophysical tests

Boreholes are drilled using direct-push technology by auger drilling. All boreholes are drilled to the bedrock surface, saturated zone, or equipment limit, whichever is encountered first. Boreholes are placed in locations where contamination is expected to be found, such as surrounding the trenches. Soil gas was analyzed every 1.0 m in the borehole by inserting the probe of a PID in a plastic bag contain a soil sample. A PID is used to quantify volatile organic compounds within the ionization potential of the detector lamp. In this case, an 11.7 eV lamp is used in the PID, which is capable of detecting a large amount of volatile hydrocarbons including all benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) (Fels 1999). This was

accomplished to provide controls for interpreting the geophysical results and to collect samples for geotechnical evaluation and chemical analyses (Atekwana et al. 2000).

Eight polyvinyl chloride (PVC) geomechanic monitoring wells were installed, one of which was multilevel, with an internal diameter of 51.60 mm and a 1-m long filter (with 0.5 mm slot openings). This method maps in greater detail the site hydrogeology and, more specifically, obtains samples of unaffected groundwater and groundwater affected by contaminant. The samples were collected according to procedures suggested by the United State Environmental Protection Agency—USEPA (1998) “Guidance for Prospective Ground-Water Monitoring Studies”.

The soil and groundwater samples were analyzed for semivolatile organic compounds using USEPA method 8270 (gas chromatography) followed by mass spectrometry. The Standard Methods for Water and Wastewater (section 3030 E nitric acid digestions) were used to measure the heavy metals in the groundwater. The samples were read by flame atomic absorption spectroscopy (Clesceri et al. 1998).

The physical–chemical parameters of the soil (pH and potential redox) and of the underground water (pH, potential redox, electrical conductivity, dissolved oxygen) were also determined.

Presentation of results and discussion

Resistivity data interpretation

Twenty lines of resistivity were set up, whose localizations were selected in order to uniformly cover the area of

interest. The resistivity sections of lines C3, C8, C14 and C17 were selected. These lines were carried out to cross trenches 1, 2, 3 and 4, respectively, with the objectives of identifying anomalous zones that could characterize the development of a probable contamination below the trenches and of defining their geometry.

Measures of resistivity in situ (trench 3) had shown that the residue, in its upper portion (0–2 m of depth), is extremely resistive (189.000–509.000 Ω m).

Figure 3 shows the results obtained for line C3: the field data (a), the synthetic pseudo-section (b), and the resulting inverted model (c). The root mean square (RMS) error achieved was 33.1% after three interactions. The resistivity section (Fig. 3c) shows two resistive zones. The first zone, with resistivity above 800 Ω m, characterized natural soil, and the second zone, with lower resistivity values at the distances between 55 and 105 m characterized the trenches filled with residue. It was observed that inside the saturated zone, (characterized by a trend of lower resistivity values below a depth of 12.7 m) there is a zone of even smaller resistivity (resistivity values smaller than 38 Ω m) between 80 and 90 m, suggesting that contamination is occurring due to the migration of the waste trench materials.

Figure 4 shows the results for line C8, including the field data (a), the synthetic pseudo-section (b), and the resulting inverted model (c). The RMS error was 9.1% after three interactions. The resistivity section (Fig. 4c) shows two resistive zones. The first zone (with resistivity above 700 Ω m) characterized natural soil and a second zone (with smaller resistivity values between 50 and 95 m) characterized the trench filled by waste. It was observed that inside the saturated zone (characterized by a trend of

Fig. 3 Resistivity section of the line C3

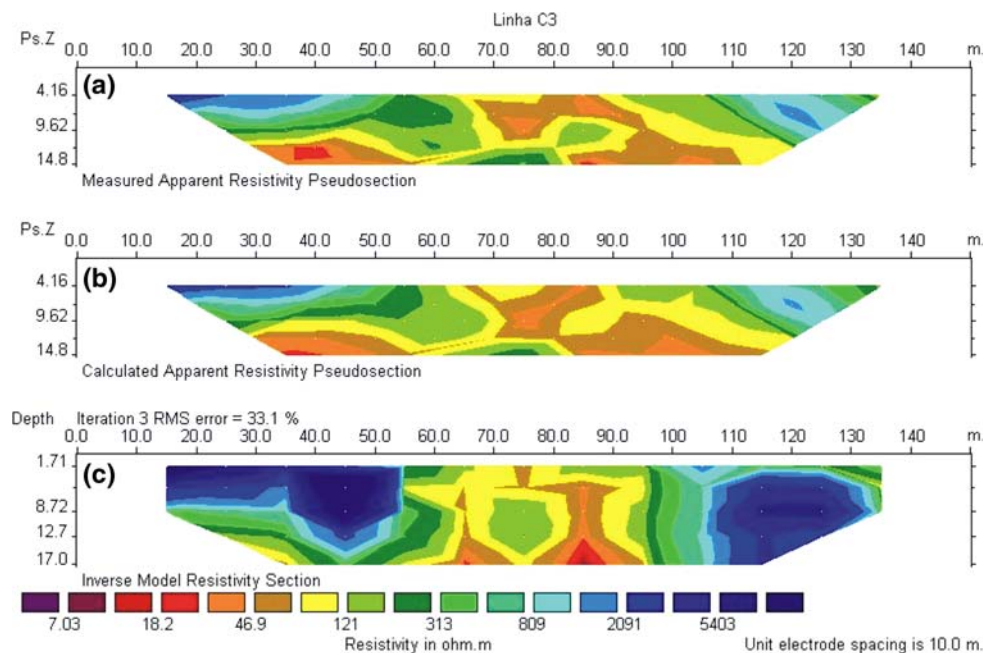
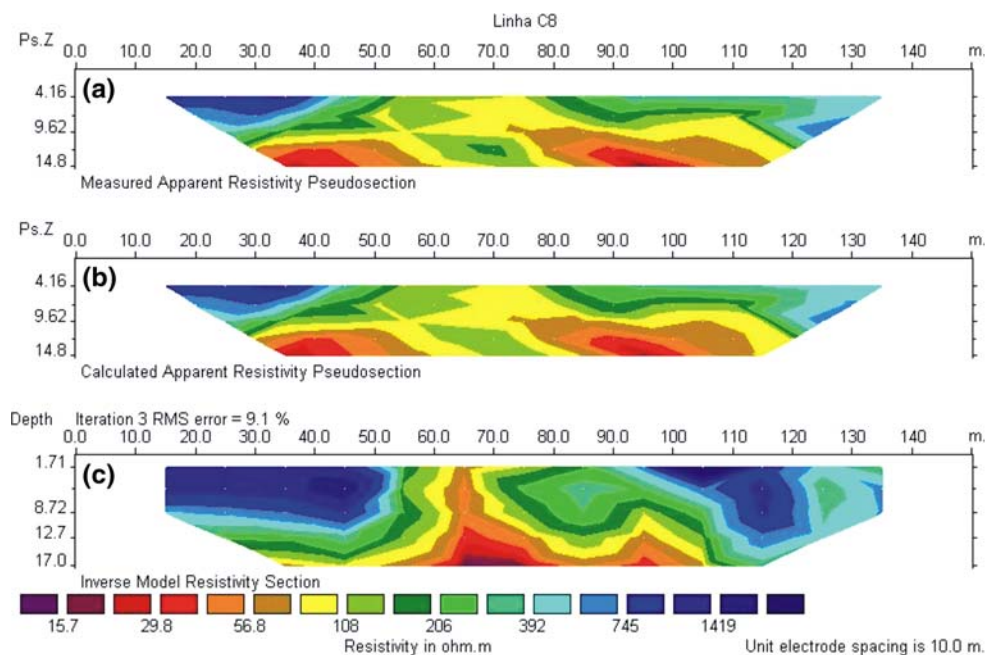


Fig. 4 Resistivity section of the line C8



lower resistivity from a depth of 14 m) there was a zone of lower resistivity (values smaller than 40 Ω m) at a distance between 60 and 70 m. This zone suggests that contamination processes from the migration of the waste trench materials are occurring.

Figure 5 shows the results for line C14, with the field data (a), the synthetic pseudo-section (b), and the resulting inverted model (c). The RMS error was 25.9% after three interactions. The resistivity section (Fig. 5c) showed a zone of high resistivity (above 2,900 Ω m) between 65 and 85 m, characterizing the trench filled by waste. It is

believed that the increase of resistivity must be explained by the fact that this trench is chronologically more recent than trenches 1 and 2. The conductive anomaly observed below the trench (resistivity values smaller than 100 Ω m) suggests that a descending movement of the contaminant to the trench base is occurring.

Figure 6 shows the results for line C17, with the field data (a), the synthetic pseudo-section (b), and the resulting inverted model (c). The RMS error was 36.3% after three interactions. The resistivity section (Fig. 6c) shows three resistivity zones. The first zone, with resistivity higher than

Fig. 5 Resistivity section of the line C14

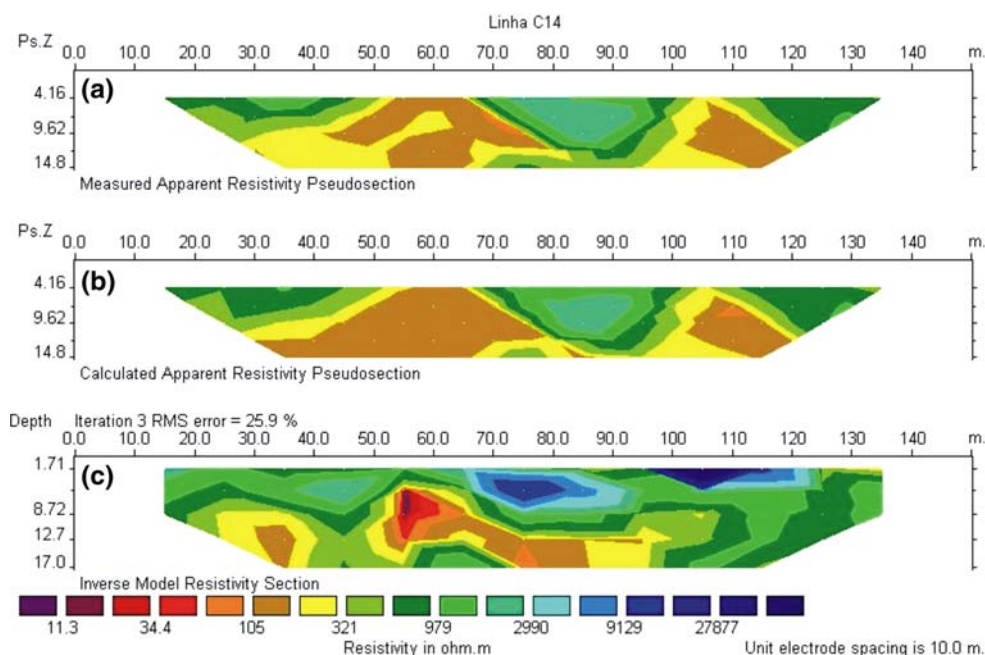
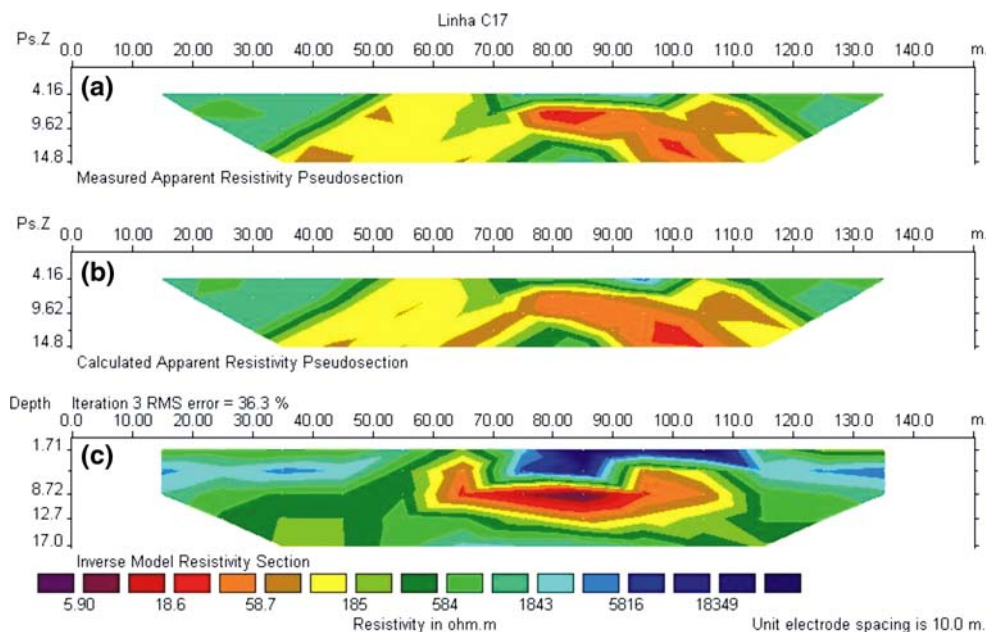


Fig. 6 Resistivity section of the line C17



3,000 Ω m between 75 and 110 m, characterizes the trench filled by waste. The second zone, with resistivity values between 185 and 3,000 Ω m, is interpreted as the natural soil. The third zone, observed by the low resistivity anomaly below the base of the trench (smaller than 185 Ω m) suggests that a descending movement of the contaminant is occurring.

GPR data interpretation

The GPR collection data was conducted inside and outside the trenches, with the intention of verifying the existence and behavior of the contaminant in the subsoil. The data acquired in the common offset mode consists of seven sections. The resistivity sections (lines 2–5) were selected with the purpose of making a comparative study of the results using the resistivity method.

Figure 7 shows the GPR line 2. This profile was made through trench 1 (the oldest) and was 58 m of extension.

The reflectors between the positions at 20.8 and 52 m show an increase in wavelength and amplitude in first the 50 ns. This is caused by the increase in velocity of the EM wave propagation inside the waste in relation to the clay–silt soil. Below the waste, from 70 ns, the reflector’s amplitude starts to reduce, making it impossible to establish the trench’s base. It was observed that this behavior occurs only below the trench, not extending to the laterals.

This amplitude reduction is caused by the enhancement of the medium’s electrical conductivity. In accordance with Sauck (2000), bacterial activity on hydrocarbons can cause the enhancement of the environment’s electrical conductivity. This activity causes dissolution of minerals, thus enhancing the amount of total dissolved solids (TDS) and the environment’s electrical conductivity. It was observed that below the trenches the electrical conductivity of the environment was higher, blocking the penetration of the EM wave.

Fig. 7 Ground penetrating radar section of the line 2

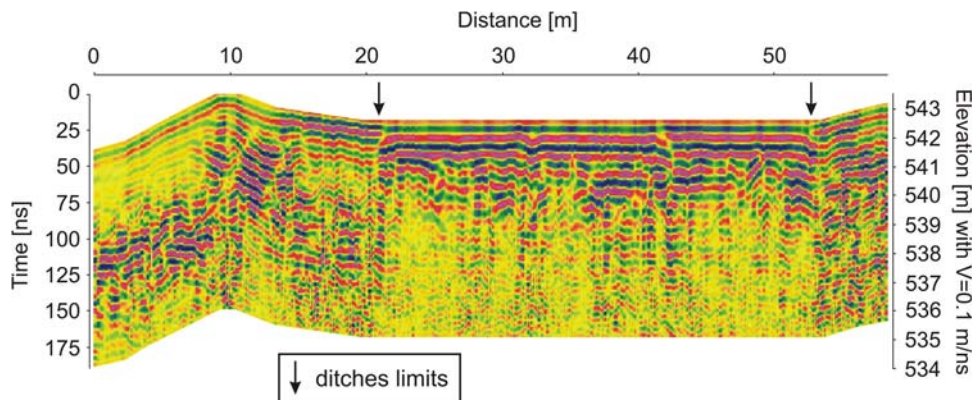


Figure 8 shows the GPR line 3 made through trench 2. The trench is well marked between 21.7 and 61 m. The waste forms a horizontal pattern and shows strong reflection, showing its homogeneity. The trench 2 base is well marked by a strong irregular reflector that occurs at approximately 54 ns (2.7 m). At 54 ns, a large hyperbolic reflector occurs at a distance of 26 m. This reflector could be caused by a buried tank in the area or by basalt block, but this cannot be confirmed as it is at the base of the trench.

GPR line 4 was made through trench 3, as shown in Fig. 9, where the waste is identified between 26 and 57 m.

In this profile, apart from the verification of the base of the trench at 86 ns (4.3 m depth), variations in the reflectors' amplitude inside the trench are also observed, indicating heterogeneities in the waste. Hyperbolic reflections inside the waste are observed at 40.5 m and 46 ns, 51 m and 34 ns, and 52.5 m and 34 ns. This could be caused by metallic drums, commonly used for waste transport and present at the surface of trench 4.

Figure 10 shows the GPR profile made through trench 4 (line 5). The base of this trench is well marked by a wedge-shaped reflector that occurs between 31 and 60 m, reaching the maximum depth of 5.45 m at a distance of 48 m. At 46

Fig. 8 Ground penetrating radar section of the line 3

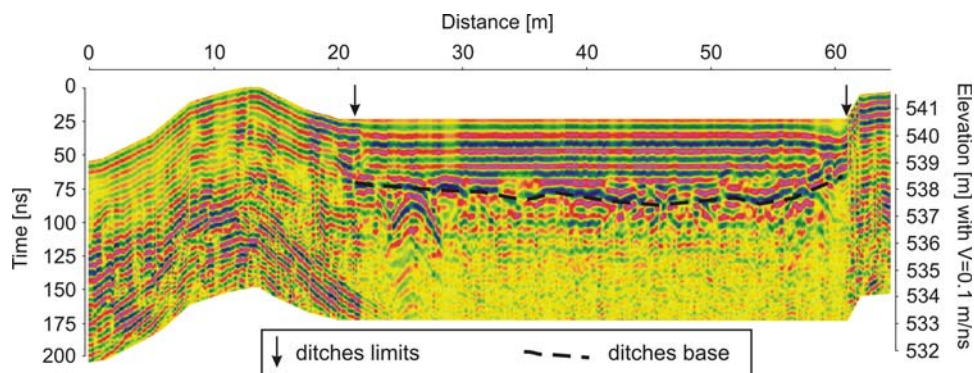


Fig. 9 Ground penetrating radar section of the line 4

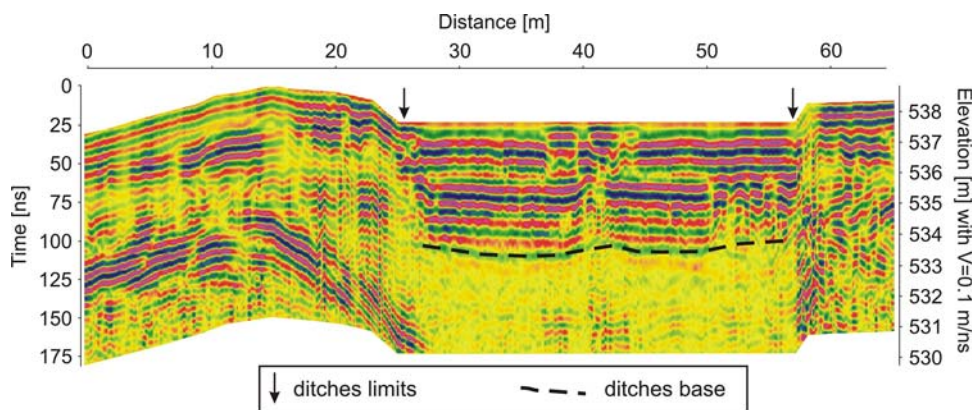
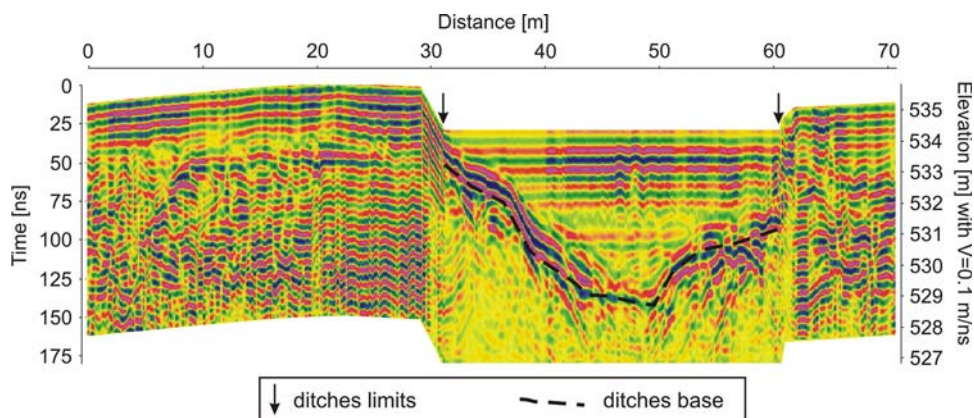


Fig. 10 Ground penetrating radar section of the line 5



and 47.8 m and a depth of 0.5 m, two hyperbolic reflectors are observed that could indicate the presence of metallic tanks. Below the base of the trench, similar to all the trenches, the EM signal is strongly attenuated.

Direct investigation methods results

In an environmental characterization program, it is essential to collect and analyze the soil and/or water samples to identify the contaminants and their concentrations. The waste, soil, and water from eight monitoring wells in the study area were sampled. Chemical analysis of material removed from inside the trenches showed that the inorganic fraction of the residue has high percentages of sulphur (20.56%) and calcium (23.35%), as well as high percentages of siliceous, and not negligible amounts of titanium and lead. In soil analysis of the area in general, low concentrations of several PAHs were found, mainly naphthalene in BH-01 (0.004 ppm, without comparison pattern) and phenanthrene in MW-08 (0.004 ppm, below the CETESB intervention level of 0.2 ppm). In water collected from monitoring wells in the area, an analysis verified contamination of the groundwater by lead (Pb). In general, because of the measured concentrations (17.5 µg/l in MW-08, 23.4 µg/l in MW-05, 30.5 µg/l in MW-07) the area can be considered contaminated (the CETESB intervention level is 10.0 µg/l).

The source of contamination at this site (trenches with re-refined lubricating oil waste) is different from the conductive anomalies in zones contaminated for LNAPL's from leaking underground storage tanks as shown in the literature (Atekwana et al. 2004; Werkema Jr et al. 2003, 2004). However, the results obtained by the physical-chemical parameters of the soil and underground water show alterations compatible with those observed by the authors. This model of conductive anomaly, confirmed in the literature, correlates the geophysical anomaly with the subproducts of the oxi-reduction reactions and of the hydrocarbon biodegradation. At this site, the main contaminants are PHAs degraded by bacteriological action. Bioremediation is considered the more efficient method for the recovery of areas contaminated for PHAs (Eriksson et al. 2000).

The principal alterations caused by bacterial action are (Werkema Jr et al. 2003):

1. increase of the microbial population in the residual phase located in the unsaturated zone;
2. production of biosurfactants and biofilm in the top portion of the free phase;
3. production of organic and carbonic acids, as a result of the biodegradation of the hydrocarbon, causing a reduction in the pH;

4. decrease in the dissolved oxygen (DO) during the biodegradation in aerobic conditions and an increase of methane (CH₄) in anaerobic conditions (methanogens);
5. increase in the concentration or presence of iron (FeII), manganese (MnII), ammonium (NH₄), hydrogen sulfide (H₂S) and CH₄, as a result of the degradation reaction of the organic compounds;
6. increase in the TDS as a result of the dissolution of minerals by the action of the acids and bacteria, causing alterations in the ionic force of the water, in the porosity, in the geometry of the pores, in the permeability, in the formation factor and in the wettability.

The pH values and potential redox measurements in samples of the soil from the unsaturated zone, and the pH values, redox, conductivity and dissolved oxygen in the underground water show a relationship with the geophysical anomalies compatible with the expected alterations.

Table 1 shows a summary of the values of the parameters obtained from the soils from boreholes 1 to 5.

The results obtained from the samples of soil show anomalous values of pH and conductivity for BH-01 (depth 3.0 m) and BH-05 (depth 3.5 m). Generally, all the soil samples show an acid or slightly acidic pH. However, the lower pH values associated with the high conductivity values could be indicative of the existence of organic and carbonic acids, subproducts of the bacterial action on the hydrocarbons.

Anomalous pH values, conductivity and concentration of dissolved oxygen were observed in samples of water from some of the monitoring wells (Table 2).

High values of conductivity (more than 400 mS/cm) were observed in the reference wells MW-05, MW-06 and MW-07. Low values (in relation to the reference well) of the concentration of dissolved oxygen were observed in the MW-03, MW-04 and MW-06. Water samples of MW-05 and MW-06 show an acid pH (close to 4.0). All the wells

Table 1 Results of soil analysis

Borehole	Depth (m)	pH	Eh (mV)	Conductivity (mS/cm)
BH-01	3.0	5.41	553	265.0
BH-01	16.2	6.59	512	39.0
BH-02	3.3	6.17	503	24.6
BH-02	15.0	6.42	513	25.5
BH-03	3.0	5.79	545	27.3
BH-03	12.1	5.75	558	23.8
BH-04	3.5	6.0	560	21.8
BH-04	11.0	5.7	546	20.5
BH-05	3.5	4.45	616	865.0
BH-05	10.7	5.89	556	25.2

Table 2 Shows a summary of the values of the parameters obtained from the water from the monitoring wells

Sample	Temperature (°C)	Electrical conductivity (mS/cm)	Dissolved oxygen concentration (mg/l)	pH	Eh (mV)
Reference well	27.1	49.0	4.4	5.8	122.5
MW-01	26.2	60.0	4.9	6.3	105.7
MW-02A	26.4	55.0	5.6	6.2	90.7
MW-02B	26.7	138.0	4.5	6.4	86.2
MW-03	26.3	37.0	3.9	5.9	127.8
MW-04	26.7	44.0	3.0	5.8	123.4
MW-05	27.2	816.0	4.8	3.9	217.5
MW-06	27.7	504.0	3.0	4.2	192.6
MW-07	26.9	484.0	4.6	5.8	136.9
MW-08	26.5	5.2	5.7	6.0	113.7

are close to the trenches, in the area where the conductive anomalies of resistivity and GPR can be observed, except the MW-08. Since the direction of the underground flow is from NW to SE (as identified by Penner 2005), this could be explained by the fact that this well is upstream the area of the trenches.

These anomalous values associated with the geophysical anomalies indicate a possible degradation of the hydrocarbons by bacterial action. The geophysical anomalies as well as the physical–chemical parameters from the water samples indicate contamination and bacterial action in the two aquifers identified at this locale. An analysis of the most marked anomalies also shows a relation to the age of the trenches, since the most marked anomalies are in the region of the most recent trenches (3 and 4). This could be because the bacterial activity was greater in the area of trenches 1 and 2, which resulted in a greater attenuation of the contamination.

Conclusions

The results have shown the great potential for the application of the combined resistivity and GPR methods in an environmental characterization of the lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, SP, making it possible to identify the processes of contaminant percolation below the trenches, and also to define the geometry of the trenches.

The resistivity clearly defined the lateral limits between the trenches filled with residue and the natural soil, as observed in all resistivity sections. The natural soil is characterized with resistivity values above 700 Ωm , and the trenches filled with residue are characterized with smaller resistivity values, as evidenced in lines C3 and C8. Resistivity values smaller than 40 Ωm were observed in both resistivity sections, suggesting that contamination

processes from the migration of the waste trench materials are occurring.

Other data showed zones of high resistivity values (above 2,900 Ωm), characterizing the trench filled by waste, as evidenced in lines C14 and C17. Both the resistivity sections show a low resistivity anomaly below the base of the trench (smaller than 185 Ωm) suggesting that a descending movement of the contaminant is occurring.

The results indicate that electrical resistivity is influenced by the presence of lubricant oil residues disposed of in the soil. In accordance with Penner (2005), trench 1 is the oldest and stopped receiving waste before the others. Sauck (2000) shows that organic residues suffer a greater bacteriological activity when the exposition time is increased, resulting in an enhancement of the electrical conductivity of the environment. This phenomenon is observed in the electrical resistivity of the trenches, where trench 1 (the oldest) is less resistive in relation to trenches 2, 3 and 4 (which are younger and more resistive).

The GPR shows efficiency in mapping the trenches' geometry and in identifying their limits and bases, as evidenced in line 4. The GPR data enable the identification of objects (drums and/or tanks) inside the waste. The results show that there is attenuation of the EM signal due to the enhancement of the electrical conductivity underneath the trenches (for example, the observed conductive anomaly below trench 4, evidenced by the electrical profiling in line C17), possibly caused by the bacteriological activity inside the contaminant.

The direct analysis confirms the existence of contamination and suggests the existence of bacteriological activity in the soil samples and water from the monitoring wells. Anomalous concentrations of heavy metals and altered values of some physical–chemical parameters were observed in the locations indicated by the geophysical results, showing the importance of the use of geophysics in environmental characterization programs.

Acknowledgments Thanks to Mr. Sérgio Barbieri for the permission to access the area. Thanks to CNPq and CAPES for the financial support in the field stage and to IAG/USP for the opportunity to develop this research project.

References

- Annan AP (1992) Ground penetration radar workshop notes. Sensors and Software Inc., Mississauga, p 130, internal report
- Atekwana EA, Sauck WA, Werkema DD Jr (2000) Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *J Appl Geophys* 44:167–180
- Atekwana EA, Werkema DD Jr, Duris JW, Rossbach S, Atekwana EA, Sauck WA, Cassidy DP, Means J, Legall FD (2004) In-situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site. *Geophysics* 69:56–63
- Azambuja E, Costa AFU, Nanni AS (1999) O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. Paper presented at the “IV Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental”, São José dos Campos, São Paulo, 2–4 Dec 1999
- Benson AK (1995) Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, and cavities. *J Appl Geophys* 33:177–193
- Braga ACO, Cardinali MT (2005) Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. *Rev Bras Geofís* 23:181–190
- Castro DL, Branco RMGC (2004) 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *J Appl Geophys* 54:127–144
- Clesceri LS, Greenberg AE, Eaton AD (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater. Section 3030 E Nitric Acid Digestion, American Public Health Association, American Waterworks Association and Water Environment Federation, United Book Press Inc., Baltimore, p 2134
- Committee on Source Removal of Contaminants in the Subsurface (2004) Contaminants in the subsurface: source zone assessment and remediation. National Research Council, The National Academies Press, Washington DC, p 372
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-CETESB (2001) Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, 2a. ed. Projeto de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha/CETESB-GTZ, São Paulo, p 398
- Costa JA, Ferreira JC (1997) Lixão de Serrana: Caracterização do Problema Ambiental e Proposição de Soluções. Contrato Petrobrás/Unaerp no. 650.2.010.978 (Relatório Final), p 91
- Daniels JJ, Roberts R, Vendl M (1995) Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *J Appl Geophys* 33:195–207
- Davis JL, Annan AP (1989) Ground penetrating radar for high resolution mapping of oil and rock stratigraphy. *Geophys Prospect* 37:531–551
- Dehaine J (2001) Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração. PhD, University of São Paulo, São Paulo, (in Portuguese)
- Eriksson M, Dalhammar G, Borg-Karison AK (2000) Biological degradation of selected hydrocarbons in an old PAH /creosote contaminated soil from a gas work site. *Appl Microbiol Biotechnol* 53:619–626
- Fels JB (1999) Source-identification investigations of petroleum contaminated groundwater in the Missouri Ozarks. *Eng Geol* 52:3–13
- Freeman HM (1998) Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. McGraw Hill, New York, p 992
- Freeze RA, Cherry JA (1979) Groundwater. Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, p 604
- Loke MH (2004a) Res2Dinv versão 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity and IP Inversion using the least-squares method. Software Manual. p 133. <http://www.geoelectrical.com>
- National Institute for Occupational Safety Health—NIOSH (1998) NIOSH manual of analytical methods. Polynuclear Aromatic Hydrocarbons by HPLC: Method 5506. NIOSH, Cincinnati, p 9
- Penner GC (2005) Estudo de caso da contaminação do solo e da água subterrânea por deposição no solo de resíduos vinculados a óleos lubrificantes. PhD, University of São Paulo, São Paulo, (in Portuguese)
- Sandmeier KJ (2006) REFLEXW Version 4.0 for Windows 9x/2000/NT/XP. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, Karlsruhe, Germany, p 192
- Sauck WA (2000) A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J Appl Geophys* 44:151–165
- Sauck WA, Atekwana EA, Nash MS (1998) Elevated conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *J Environ Eng Geophys* 2–3:203–212
- United State Environmental Protection Agency (1998) Guidance for prospective ground-water monitoring studies. Environmental Fate and Effects Division. Office of Pesticide Programs. USEPA, Washington DC, p 79
- Vickery AC, Hobbs BA (1998) Contributions of surface geophysics to environmental site investigation of former oil distribution terminals. *J Environ Eng Geophys* 3:101–109
- Werkema DD Jr, Atekwana EA, Endres A, Sauck WA, Cassidy DP (2003) Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophys Res Lett* 30:1647–1651
- Werkema DD Jr et al (2004) Laboratory and field results linking high bulk conductivities to the microbial degradation of petroleum hydrocarbons. Paper presented at the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Environmental and Engineering Geophysical Society, Denver, pp 363–373, CD-ROM