Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG
Departamento de Geofísica

**Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP:
avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental
do problema**

Sergio Junior da Silva Fachin

São Paulo – SP
Agosto/2007

Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG
Departamento de Geofísica

**Ensaio geoeletrico 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP:
avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental
do problema**

Sergio Junior da Silva Fachin

Dissertação de mestrado apresentada ao
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Mestre em Ciências. Área
de concentração: Geofísica.

Orientador: Vagner Roberto Elis

São Paulo – SP
Agosto/2007

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

LISTA DE ASSINATURAS

MESTRANDO: Sergio Junior da Silva Fachin

ÁREA: Geofísica

TÍTULO: "Ensaios geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto - SP:
avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema"

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis (orientador)

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas - IGc/USP

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira - UFPR

MESTRANDO:

Sergio Junior da Silva Fachin

São Paulo, 14 de setembro de 2007.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Relatório de Defesa

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Sérgio Junior da Silva Fachin no Programa: Geofísica, do(a) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Aos 14 dias do mês de setembro de 2007, no(a) Sala de Congregação do IAG realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Sérgio Junior da Silva Fachin, apresentada para a obtenção do título de Mestre em Ciências - Área: Geofísica, intitulada:

"Ensaios geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto - SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Vínculo do Docente	Sigla da Unidade	Resultado
Vagner Roberto Elis	Presidente	IAG - USP	Aprovado
Jose Domingos Faraco Gallas	Titular	IGc - USP	APROVADO
Francisco Jose Fonseca Ferreira	Suplente	UFPR - Externo	Aprovado
Resultado Final: APROVADO			
Parecer da Comissão Julgadora *			

O candidato apresentou muito bem seu trabalho e respondeu satisfatoriamente às questões da banca.

Comentários da Defesa (opcional)

Eu, aprovado, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 14 dias do mês de setembro de 2007.

Jose D. Faraco Gallas
Jose Domingos Faraco Gallas

Francisco Jose Fonseca Ferreira
Francisco Jose Fonseca Ferreira

Vagner Roberto Elis
Vagner Roberto Elis
Orientador(a)

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

Nos termos do artigo 110, do RG-USP, encaminhe-se o presente relatório à CPG, para homologação.

*Dedico este trabalho com todo
carinho e amor aos meus pais e irmãos.*

Somos todos irmãos das rochas e filhos do universo.

Carl Sagan (1934 – 1996)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Vagner Roberto Elis pela orientação, conselhos e sugestões, muito importantes para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a Universidade de São Paulo (USP) e ao Coseas (Coordenadoria de Assistência Estudantil da Universidade de São Paulo) por ter me acolhido e cedido todo amparo estrutural e sócio-cultural.

Agradeço a Capes por ter me concedido à ajuda financeira durante o tempo de vigência da pesquisa e ao Departamento de Geofísica (IAG/USP) que me proporcionou a oportunidade de desenvolver a pesquisa e também por todo apoio estrutural e financeiro.

Ao Professor Lázaro Valentin Zuquette, professor do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) por ter cedido o equipamento de aquisição de campo, imprescindível para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Meng Heng Loke por ter cedido a licença (limitada e temporária) do *software* de inversão RES2DINV, também imprescindível para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Torleif Dahlin por ter enviado de tão longe a sua tese de doutoramento para que o auxílio na consulta bibliográfica.

À Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP pelo fornecimento de informações técnicas sobre o a área do antigo lixão de Ribeirão Preto.

Aos professores Shozo Shiraiwa, Alterêdo O. Cutrim e Antonio B. Vechiatto pelo incentivo e conselhos durante a época da graduação e que foram importantes na minha formação profissional como geólogo e agora como jovem pesquisador.

Ao professor Francisco Yukio Hiodo (Prof. Chiquinho) pelas conversas informais nos fins de tarde, que ajudaram na motivação, paciência e elaboração de idéias sobre as mais remotas teorias sobre qualquer assunto.

Ao técnico em geofísica Ernande Costa Santos, pela ajuda incondicional nos trabalhos de campo e também pelos papos descontraídos durante estes dois anos no IAG. Agradeço também a Andréa T. Ustra, Ivan M. Carlos, Juliana

Igarashi, Alexandre L. Lago, Welitom R. Borges e Ariathemis Bizuti pela ajuda e apoio nas etapas de aquisição de campo.

Agradeço a “Teca”, Virgínia e a Magda por toda a assistência, esclarecimentos e conselhos que precisei junto ao departamento.

Agradeço ao Welitom e Aline por terem me ajudado muito nos meus primeiros meses aqui nessa terra tão distante do MT, pelos almoços, jantares, “biritas” e pelas conversas descontraídas.

A todos os amigos que me fiz aqui em São Paulo, Alexandre L. Lago, Ernande, Jorge (quarta-feira), Gilmar, Leandro (cabelo), Dani (esposa do quarta-feira), Marina.

Aos amigos que estão em MT, que mesmo distantes me incentivaram sempre e sempre.

A “galera” do alojamento, que compartilharam comigo conversas e risadas e dos meus primeiros seis meses aqui em SP.

Aos amigos, colegas e companheiros da pós-graduação da Geofísica, Andréa, Maria Gileide, Danilo, Fábio “morcego”, Daniel, Everton “gaúcho”, Everton “baiano”, Sergio “bezerra”, Franklin, Marcos “brasilíia”, Álvaro “itu”, Klyedson “pezzzado!!!!”, Gelvan, Ivan “mamede”, Marcelo “rocha”, Marcelo “pamonha”, Marcelo “*sniper*”, Oleg “russo loco”, Robson “boca aberta”, Marcos “MF”, Nilton “MF”, Kleiton “ser do pântano”, Marcelo Bianchi, Manuelli, Allana, Selma, Élder “japa”, Eric “francês”, Taciana (esposa do Sergio “bezerra”), e aí vai...

A todos meus primos, tios e avós que mesmo longe, me apóiam incondicionalmente nesse meu caminho.

Agradeço a minha namorada, Patrícia, pois tu me proporcionaste muitas alegrias e felicidades durante esse tempo que estamos juntos. Obrigado pela sua paciência, carinho, dedicação e amor em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Sergio e Benedita, e aos meus irmãos Jean Marcel, Fernanda e Marcos Phelipe por todo amor, carinho, apoio e incentivo para que eu me tornasse o que sou hoje. A presença de vocês na minha vida sempre será muito importante para mim.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
Índice.....	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Quadros.....	xiii
Lista de Anexos.....	xiv
Capítulo 01 – Introdução & Objetivos.....	01
Capítulo 02 – Revisão bibliográfica.....	05
Capítulo 03 – Caracterização da área de estudo.....	18
Capítulo 04 – Métodos geofísicos.....	32
Capítulo 05 – Interpretação & Aquisição dos dados.....	70
Capítulo 06 – Apresentação & Discussão dos resultados.....	91
Capítulo 07 – Conclusão & Considerações finais.....	124
Referências Bibliográficas.....	129
Anexos.....	141

RESUMO

FACHIN, S. J. S. *Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema.* Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo – USP. 142 p. 2007.

Em razão da crescente preocupação com a proteção ao meio ambiente e preservação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, as áreas de disposição de resíduos, tanto domésticos como industriais, têm merecido especial atenção das instituições de pesquisa ligadas à proteção ambiental. Atualmente o uso dos métodos geoeletricos vem se destacando como metodologia indireta de investigação de áreas afetadas pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais pois fornecem, desde que adequadamente escolhidas as técnicas e os parâmetros de aquisição, informações importantes com respeito à localização e geometria dos depósitos de resíduos, extensão da pluma de contaminação, posição da zona saturada e sentido do fluxo subterrâneo, características litológicas e presença de estruturas geológicas. A integração de ferramentas como simulações e métodos de interpretação qualitativa e quantitativa também auxiliam na caracterização e monitoramento ambiental de áreas de disposição de resíduos sólidos. O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação de alguns parâmetros de aquisição 2D (arranjos eletródicos, espaçamento entre eletrodos e níveis de investigação) com os métodos da Eletroresistividade e da Polarização Induzida, para caracterização e monitoramento ambiental. Esta avaliação foi realizada através do uso de modelagens diretas bidimensionais e ensaios de campo, tendo como área de estudos o antigo lixão do município de Ribeirão Preto – SP. O uso das modelagens diretas permitiu escolher os melhores parâmetros de aquisição de acordo com as respostas obtidas pelo modelo geológico-geofísico simulado. Os parâmetros de aquisição testados em campo refletiram os resultados obtidos através das modelagens diretas. O arranjo Polo-dipolo ($a=5$ metros e $n=10$) apresentou os melhores resultados (melhor resolução lateral e maior profundidade de investigação). Os resultados obtidos com as investigações de campo comparados com resultados anteriores (1997), mostraram que ainda há contaminação, marcada por baixos valores de resistividade elétrica (1 à 30 Ohm.m) e altos valores de cargabilidade (15 à 50 mV/V).

Palavras-chave: Eletroresistividade, Polarização Induzida (IP), parâmetros de aquisição, inversão de dados, modelagem direta, contaminação, lixão, resíduos, Ribeirão Preto – SP.

ABSTRACT

FACHIN, S. J. S. *Geoelectrical 2D investigations in the old landfill site at Ribeirão Preto city, São Paulo, Brazil: Acquisition parameters evaluation and environmental monitoring.* Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo – USP. 142 p. 2007.

Due to the increasing concern with the environmental protection and preservation of the shallow water and groundwater aquifers quality, the areas of disposal of residues, have been special attention of the environmental protection agency. Currently the geoelectrical methods have been largely used as an investigation non-evasive methodology in affected areas by inadequate disposal of urban solid and industrial residues, because it provides information of the localization and geometrical characteristics of the waste disposal, contamination plume extent, saturated zone position, underground flow direction and geologic characteristic, if the techniques and the acquisition parameters are adequately chosen. The simulations and interpretation methods also assists during the characterization and environmental monitoring of landfill areas. The objective of this research was the evaluation of the acquisition field parameters (electrodes arrays, electrodes spacing and number of the investigations levels) and 2D investigations with the resistivity and induced polarization methods for characterization and environmental monitoring. This evaluation was carried through the use of 2D forward modeling and field investigations in old landfill site at Ribeirão Preto city, São Paulo, Brazil. The use of the forward modeling allowed to choose the best field acquisition parameters in accordance with the answers for the geologic-geophysical simulated model. The comparison between our results and previous results showed contamination marked for low electric resistivity values (1 – 30 Ohm.m) and high chargeability values (15 – 50 mV/V) and also that the tested parameters of acquisition in agreement with the results of the forward modeling. The Pole-dipole array ($a= 5$ meters and $n= 10$) show the best result (resolution image and investigation depth), forward modelling and field acquisition.

Keywords: Electrical Resistivity, Induced Polarization, contamination, landfill areas, urban residues, industrial residues, acquisition parameters, forward and inversion modelling.

Índice

Capítulo 01 – Introdução & Objetivos

1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Objetivos da pesquisa.....	2
1.2.1 Objetivos Gerais.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3

Capítulo 02 – Revisão bibliográfica

2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 O problema ambiental dos resíduos sólidos urbanos.....	7
2.3 Áreas para disposição de resíduos.....	9
2.4 Caracterização do percolado.....	11
2.5 Geofísica aplicada em áreas de disposição de resíduos.....	14

Capítulo 03 – Caracterização da área de estudos

3.1 Localização da área e histórico.....	18
3.2 Caracterização geológica regional.....	22
3.2.1 Formação Pirambóia.....	23
3.2.2 Formação Botucatu.....	23
3.2.3 Formação Serra Geral.....	24
3.3 Caracterização hidrogeológica.....	24
3.4 Caracterização geológico-geofísica da área.....	25

Capítulo 04 – Métodos geofísicos

4.1 Considerações gerais.....	32
4.2 Método da Eletorresistividade.....	
4.2.1 Introdução e histórico.....	35
4.2.2 Fundamentos teóricos.....	37
4.2.3 Dispositivo de fluxo de corrente e potencial elétrico em subsuperfície.....	38

4.2.4	Propriedades elétricas dos materiais geológicos.....	45
4.3	Método da Polarização induzida (IP)	
4.3.1	Introdução e histórico.....	48
4.3.2	Fundamentos teóricos.....	50
4.3.3	Fontes dos efeitos de Polarização Induzida.....	53
4.4	Técnicas de aquisição dos dados	57
4.5	Profundidade de investigação	63
4.6	Técnica do Caminhamento Elétrico	66

CAPÍTULO 05 – Interpretação & Aquisição dos dados

5.1	Interpretação dos dados	
5.1.1	Interpretação qualitativa – Pseudo-seção.....	70
5.1.2	Interpretação quantitativa – Método da inversão.....	71
5.1.2.1	Método Gauss-Newton.....	75
5.1.2.2	Método <i>quasi</i> -Newton.....	76
5.1.3	Modelagem direta de dados de resistividade elétrica.....	80
5.2	Aquisição dos dados	82
5.2.1	Equipamentos utilizados.....	85
5.2.2	Parâmetros de aquisição de campo.....	87

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

6.1	Apresentação dos resultados	91
6.1.1	Modelagens diretas.....	91
6.1.2	Resultados - Modelagens Diretas.....	103
6.2	Resultados – Dados adquiridos	
6.2.1	Resultados – Interpretação qualitativa.....	107
6.2.2	Resultados – Interpretação quantitativa.....	110

CAPÍTULO 07 – Conclusão & Considerações finais

7.1	Conclusão geral	124
7.1.1	Conclusão - Modelagens diretas.....	124
7.1.2	Conclusão – Aquisições de campo.....	125

7.2 Considerações finais.....	127
Referências bibliográficas.....	129
Anexos.....	141

Lista de Figuras

Figura 2.10 – Representação esquemática do ciclo hidrológico. E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial. (Modificado de FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).....	6
Figura 2.11 – Gráfico ilustrando o panorama brasileiro para o destino final dos resíduos (IBGE, 2000).....	10
Figura 3.10 – Localização da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP, a sudeste do perímetro urbano.	18
Figura 3.11 – Imagem aérea da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP ainda em atividade durante o ano de 1984, ilustrando as duas cavas de disposição dos resíduos e suas circunvizinhanças ainda não habitadas. (Imagem cedida pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP).....	20
Figura 3.12 – Imagem aérea obtida no ano de 2005, ilustrando a expansão urbana e industrial nas circunvizinhanças da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP (Imagem cedida pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP).....	21
Figura 3.13 – Contexto geológico do estado de São Paulo (Modificado de IPT, 1981).....	22
Figura 3.14 – Contexto geológico da região de Ribeirão Preto-SP (Modificado de IPT, 1981).....	26
Figura 3.15 – Mapa esquemático da área do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP, mostrando as duas cavas de disposição de resíduos, posição dos poços de monitoramento, sondagens a trado, CPTu, variação topográfica da área, Sondagens Elétricas Verticais (SEV's). (Adaptado de PETROBRÁS, 1997; ELIS, 1999).....	28
Figura 3.16 – Curvas de Sondagens Elétricas Verticais na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP (ELIS, 1999).....	29
Figura 3.17 – Seções geológico-geofísicas obtidas a partir da integração de resultados de perfis descritivos de poços de monitoramento, poços de coleta de chorume, CPTu, sondagens a trado e interpretação das SEV's.....	30
Figura 4.10 – Divisão das Geociências, dando ênfase a Geofísica e suas subdivisões e as seus métodos.....	33

Figura 4.11 – Faixa de frequência utilizada por alguns métodos geofísicos em relação com a profundidade de investigação (MT: Magnetotelúrico; TEM: <i>Transient Electromagnetic</i> - Eletromagnético Domínio do Tempo; CSEM: <i>Controlled Source Electromagnetic</i> - Eletromagnético de fonte controlada; RMT: Radio-magnetotelúrico; GPR: <i>Ground Penetrating Radar</i> – Radar de Penetração no Solo; VETEM: <i>Very Early Transient Electromagnetic</i>).....	34
Figura 4.12 – Ilustração da manifestação da Lei de Ohm e por conseguinte a resistividade elétrica de um cilindro homogêneo e isotrópico.....	38
Figura 4.13 – Fluxo de corrente elétrica através de somente um eletrodo na superfície, sendo desprezível a posição do segundo eletrodo de corrente ($B \rightarrow \infty$) (Adaptado de TELFORD <i>et. al.</i> , 1990).....	41
Figura 4.14 – Prospeção geoeletrica através do arranjo de quatro eletrodos. a) Disposição dos quatro eletrodos na superfície do terreno; b) Comportamento do fluxo de corrente elétrica e linhas equipotenciais, perspectiva 2D; c) Comportamento do fluxo de corrente elétrica e linhas equipotenciais numa perspectiva vista num plano.(Adaptado de ORELLANA, 1972; TELFORD, 1990; REYNOLDS, 1997).....	43
Figura 4.15 – Intervalo de valores de resistividade elétrica de alguns materiais geológicos e em materiais naturais (Adaptado de ORELLANA, 1972; PALACKY, 1987).....	48
Figura 4.16 – Formato da onda de corrente elétrica transmitido e o sinal recebido (Modificado de WARD, 1990).....	51
Figura 4.17 – Formato da onda de corrente elétrica (<i>On+/Off/On-/Off cycle</i>) e a representação do efeito IP - Variação de potencial elétrico ΔV em função do tempo t , ilustrando o momento de interrupção da passagem de corrente elétrica (<i>Off cycle</i>) e o retardamento da perda de voltagem (Modificado de SUMNER, 1976; BRAGA, 1997).....	52
Figura 4.18 – Efeito da polarização de membrana em escala dos poros dos materiais geológicos. a) Comportamento dos íons no poro da rocha antes de ser afetado por um determinado campo elétrico; b) Comportamento dos íons a um determinado campo elétrico. (Modificado de TELFORD <i>et. al.</i> , 1990).....	54
Figura 4.19 – Relação entre resistividade elétrica aparente e a resposta IP de alguns materiais geológicos (DRASKOVITS, 1990 <i>apud</i> MOURA, 2002)...	55
Figura 4.20 – Polarização de eletrodo. a) Comportamento dos íons no poro da rocha ao ser submetido a um determinado campo elétrico; b) Comportamento dos íons na interface do mineral ao ser submetido a um determinado campo elétrico. (Modificado de TELFORD <i>et. al.</i> , 1990).....	56

Figura 4.21 – Técnicas de aquisição de dados mostrando a relação da configuração dos eletrodos na superfície do terreno e os pontos investigados na subsuperfície: a) Técnica do Caminhamento Elétrico (CE) utilizado para investigar a variação lateral de resistividade elétrica e cargabilidade; b) Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) utilizado para investigar a variação vertical da resistividade elétrica e cargabilidade.....	58
Figura 4.22 – Modos de investigar a subsuperfície se utilizando da prospecção geoelétrica (Modificado de LOKE, 2000).....	59
Figura 4.23 – Arranjos de eletrodos utilizados em investigações geoelétricas, ilustrando as possíveis configurações dos eletrodos de injeção de corrente elétrica (A e B) e eletrodos de medida de potencial elétrico (M e N) (Modificado de LOKE, 2000).....	60
Figura 4.24 – Ilustração do eletrodo de injeção de corrente elétrica, feito a partir de material metálico.....	66
Figura 4.25 – Ilustração do eletrodo não-polarizável de sulfato de cobre (CuSO ₄) utilizado para medidas de potencial elétrico.....	67
Figura 4.26 – Ilustração de uma Tomografia Elétrica ou Imageamento Elétrico 2D se utilizando da técnica do Caminhamento Elétrico através de um resistímetro de aquisição multi-eletródica.....	69
Figura 5.10 – Representação gráfica para interpretações qualitativas utilizadas em investigações 2D de Eletrorresistividade e IP se utilizando o arranjo Dipolo-dipolo ($a= 1$ metro; $n= 5$): a) Relação entre o espaçamento entre eletrodos e a profundidade teórica de investigação; b) Representação gráfica de investigações 2D de Eletrorresistividade e IP (Pseudo-seção).....	71
Figura 5.11 – Rotina básica para um algoritmo de inversão de dados de resistividade elétrica (Adaptado de NARAYAN <i>et. al.</i> 1994).....	73
Figura 5.12 – Modelo bidimensional implementado no <i>software</i> RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2003a) onde o software reconhece a subsuperfície terrestre como um conjunto de células retangulares onde cada célula possui valores constantes de resistividade elétrica e cargabilidade. (Modificado de LOKE; BARKER, 1995; LOKE, 2002).....	75
Figura 5.13 – Fluxograma representando a rotina de inversão utilizada pelo <i>software</i> RES2DINV (Adaptado de LOKE; BARKER, 1996a).....	79

Figura 5.14 – Mapa esquemático da área do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP, mostrando as duas cavas de disposição de resíduos, posição dos poços de monitoramento, sondagens a trado, CPTu, variação topográfica da área, Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) e a posição das linhas C1, C2 e C3 (Adaptado de PETROBRÁS, 1997; ELIS, 1999).....	83
Figura 5.15 – Equipamentos utilizados para aquisição dos dados de campo. a) Resistivímetros Elrec PRO e Syscal R2 pertencentes ao Laboratório de Geofísica Aplicada do IAG-USP; b) Resistivímetro Syscal PRO pertencente ao Departamento de Geotecnia da EESC/USP.....	85
Figura 5.16 – Sistemas utilizados para aquisição dos dados de campo ilustrando os resistivímetros Elrec PRO (modo Tx conectados aos eletrodos de corrente elétrica)/Syscal R2 (modo Rx conectados aos eletrodos de medida de potencial elétrico) e o resistivímetro Syscal PRO (modo Tx --- Rx num único sistema de aquisição).....	87
Figura 5.17 – Curva de decaimento IP mostrando todos os intervalos para a integração dos valores de polarização induzida (Adaptado de IRIS INSTRUMENTS, 2003).....	88
Figura 5.18 – Rotina de aquisição em campo. a) Posicionamento do perfil e montagem dos equipamentos; b) Perfuração dos buracos para fixação dos eletrodos não-polarizáveis; c) Fixação dos eletrodos e conexão dos mesmos aos cabos; d) Checagem dos valores de resistência de contato e em seguida realização das medidas dos parâmetros da resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente.....	90
Figura 6.10 – Modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) a partir de resultados de resistividade elétrica 2D na linha C3 através do <i>software</i> RESIX IP2DI (INTERPEX, 1996.).....	92
Figura 6.11 – Modelo de blocos de resistividade elétrica elaborado a partir no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999).....	94
Figura 6.12 – Comparação entre diferentes níveis de ruídos se utilizando dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton através do processo de inversão dos dados.....	96
Figura 6.13 – Pseudo-seções de resistividade elétrica contaminadas com 5 % de ruído gaussiano, obtidas através do software de modelagem direta RES2DMOD a partir do bloco de entrada baseado no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) para os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 10 metros; n= 5).....	98

Figura 6.14 – Pseudo-seções de resistividade elétrica contaminadas com 5 % de ruído gaussiano, obtidas através do software de modelagem direta RES2DMOD a partir do bloco de entrada baseado no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) para os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 5 metros; n=10).....	99
Figura 6.15 – Comparação entre os métodos Gauss-Newton e <i>quasi</i> -Newton utilizado pelo <i>software</i> RES2DINV para inversão dos dados de resistividade elétrica e cargabilidade em função do erro RMS para cada iteração.....	102
Figura 6.16 – Seções – Seções de resistividade elétrica 2D obtidas através do processo de inversão das pseudo-seções simuladas com os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 10 metros e n= 5).....	105
Figura 6.17 – Seções de resistividade elétrica 2D obtidas através do processo de inversão das pseudo-seções simuladas com os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 5 e metros e n= 10).....	106
Figura 6.18 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C1.....	108
Figura 6.19 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C2.....	109
Figura 6.20 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C3.....	110
Figura 6.21 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para linha C1 obtidas com o arranjo DD, a= 10 metros e n= 5.....	112
Figura 6.22 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para linha C1 obtidas com o arranjo DD (a= 5 metros e n= 10).....	113
Figura 6.23 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo (a= 10 metros e n= 5).....	116
Figura 6.24 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo (a= 5 metros e n= 10).....	117
Figura 6.25 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Polo-dipolo (a= 5 metros e n= 10).....	118
Figura 6.26 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo (a= 10 metros e n= 5).....	121

Figura 6.27 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo ($a= 5$ metros e $n= 10$).....	122
Figura 6.28 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Polo-dipolo ($a= 5$ metros e $n= 10$).....	123

Lista de Tabelas

Tabela 2.10 – Íons presentes no percolado e suas principais fontes (SEGATO; SILVA, 2002).....	12
Tabela 2.11 – Dados típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos (THCOBANOGLOUS <i>et. al.</i> ,1993).....	10
Tabela 3.10 – Resultados das análises químicas águas dos poços do antigo lixão de Ribeirão Preto (PEJON; ZUQUETTE, 1991).....	31
Tabela 4.10 – Avaliação de alguns arranjos eletródicos utilizados em investigações com o método da Eletrorresistividade e IP (WARD, 1990).....	62
Tabela 4.11 – Profundidades de investigação da subsuperfície para diversas configurações de eletrodo (EDWARDS, 1977).....	65
Tabela 5.10 – Parâmetros utilizados para aquisição dos dados de Polarização Induzida através dos equipamentos Syscal PRO e Elrec PRO (Adaptado de IRIS INSTRUMENTS, 2003, 2004).....	88

Lista de Quadros

Quadro 5.20 – Aquisições dos dados realizadas no antigo lixão de Ribeirão Preto - SP nos meses de junho e novembro de 2006.....	84
Quadro 6.20 – Resultados obtidos com a comparação dos métodos Gauss-Newton e quasi-Newton em relação ao Erro RMS e o tempo computacional para obtenção das seções de resistividade elétrica ($a=10$ metros e $n= 5$) a partir das modelagens diretas.....	100

Lista de Anexos

Anexo A – Tabela ilustrando análises físico-químicas realizadas ao longo dos anos de alguns poços localizados na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP.....	142
--	-----

CAPÍTULO 01

Introdução & Objetivos

1.1 Considerações gerais

Devido a crescente preocupação com a proteção ambiental e preservação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, as áreas de disposição de resíduos têm merecido especial atenção por parte dos órgãos públicos, instituições de pesquisa e os mais diversos profissionais relacionados ao meio ambiente no sentido de avaliar o nível de poluição causado por estes resíduos e procurar estabelecer procedimentos de remediação para minimizar seus impactos nocivos ao meio ambiente. Atualmente muitos métodos diretos e indiretos de investigação da subsuperfície vêm sendo utilizados nesse campo de aplicação para identificar e caracterizar a resposta dada pelo contaminante disposto em subsuperfície.

Dentro desse contexto, alguns métodos geofísicos - principalmente os métodos da Eletrorresistividade e Eletromagnético Indutivo - vêm sendo utilizados nesse campo de aplicação principalmente no mapeamento e monitoramento da pluma de contaminação (KELLY, 1976; COSTA; FERLIM, 1993). A aplicação desses e de outros métodos geoeletricos (Polarização Induzida e Potencial Espontâneo) poderão fornecer, desde que adequadamente escolhidos e dimensionados os ensaios, informações importantes com respeito a localização e geometria dos depósitos de resíduos (CARPENTER *et. al.*, 1990; DAHLIN, 1993; GREEN *et al.*, 1999), posição da zona saturada e sentido do fluxo subterrâneo, características litológicas e presença de estruturas geológicas.

Em razão das características não invasivas e não destrutivas dos métodos geofísicos possuem em relação aos métodos diretos de investigação, aliados a rapidez na aplicação dos ensaios de campo, os métodos geofísicos

podem ser utilizados para monitoramento temporal de áreas contaminadas. Uma possibilidade que se apresenta é o monitoramento de áreas submetidas a projetos de recuperação. Nesses casos a variação dos parâmetros geofísicos depois de instalado o processo de recuperação pode auxiliar na avaliação da sua eficiência.

Outro aspecto da utilização da geofísica é a escolha adequada da técnica de aquisição, de forma a otimizar as investigações em campo e obter resultados satisfatórios. Dentro das tecnologias existentes de instrumentação e interpretação de dados, deve-se buscar a melhor relação entre tempo de aquisição (mínimo possível), confiabilidade e detalhes do resultado obtido. Isso é especialmente importante quando se propõe utilizar a Geofísica para monitoramento ambiental.

A proposta deste trabalho é utilizar o método da Eletrorresistividade e o método da Polarização Induzida (IP) em um caso de problema ambiental causados por disposição inadequada de resíduos, comparando os resultados obtidos com resultados de nove anos atrás e também fazendo um estudo do desempenho de técnicas de aquisição 2D na caracterização do local.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivos Gerais

A proposta desta pesquisa consiste na aplicação dos métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP) na área do antigo lixão do município de Ribeirão Preto-SP. A aplicação destes dois métodos geofísicos tem por objetivo comparar os resultados adquiridos no ano de 2006 com resultados de anos anteriores realizados na área de estudo obtidos em 1997 por Elis (1999), podendo assim realizar uma avaliação atual sobre a contaminação do meio.

Outro objetivo deste estudo é uma avaliação metodológica para a melhor forma de aquisição de dados nesse tipo de problema ambiental. Serão comparados diferentes arranjos de aquisição de dados utilizando-se uma

mesma técnica de aquisição, com os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP).

Os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida foram escolhidos devido a sua vasta e satisfatória aplicabilidade em estudos que envolvem problemas ambientais causados pela disposição inadequada de resíduos na subsuperfície ou mesmo a céu aberto.

Inúmeros estudos geofísicos realizados no Brasil que fizeram uso da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida relacionados a problemas ambientais causados por disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais como Elis & Zuquette (1996; 2002), Moura (2002), Silva *et. al.* (2002), Santos (2005), Gallas *et al.* (2005), Fachin *et. al.* (2006) mostraram que o uso dessas metodologias de investigação é possível, de rápida aplicação, baixo custo financeiro e resultados satisfatórios, quando comparados com os demais métodos diretos de investigação da subsuperfície.

1.2.2 Objetivos Específicos

Esta pesquisa foi orientada pelo trabalho doutoramento de ELIS (1999), onde este, na área do antigo lixão, aplicou diversos métodos geofísicos entre os meses de março de 1995 e agosto de 1998, como é citado a seguir:

- ◆ 10 Sondagens Elétricas Verticais (SEV), utilizando arranjo Schlumberger, espaçamento AB = 300 metros;
- ◆ 1 Sondagem Dipolar Axial, espaçamento E de 100 metros;
- ◆ 9 linhas de Caminhamento elétrico (CE), arranjo Dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 10 metros;
- ◆ 4 linhas de CE com o arranjo Dipolo-dipolo, espaçamento de 20 m; CE com arranjo Dipolo-dipolo (Resistividade elétrica e Polariza Induzido - IP) com espaçamento de 10 m;
- ◆ 4 linhas de Potencial Espontâneo (SP) com a Técnica dos Gradientes com espaçamento de 10 metros, linhas espaçadas aproximadamente 75 metros;

- ♦ 1 linha de CE com arranjo Dipolo-dipolo de detalhe, com espaçamento de 2 m.

A partir da análise dos resultados destes levantamentos geofísicos citados acima, foram escolhidos os resultados obtidos no ano de 1997 através dos métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP) se utilizando da técnica de campo do Caminhamento Elétrico (CE). Foram escolhidos os resultados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente, obtidos em três linhas de ensaio (C1a, C2a e C3a). Os critérios para a escolha destas linhas foram os locais onde os levantamentos foram realizados (perpendicular as cavas) e fora da área de disposição de resíduos.

Para a avaliação da contaminação serão repetidos os ensaios geofísicos nas três linhas com o método da Eletrorresistividade e Polarização Induzida, utilizando-se da técnica do Caminhamento Elétrico (CE), se utilizando do arranjo eletródico Dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 10 metros e cinco níveis de investigação ($a = 10$ metros e $n = 5$). É de suma importância repetir os ensaios geofísicos com a mesma metodologia de aquisição utilizada por Elis (1999) para que se possa assim avaliar a contaminação atual.

Para realização da avaliação metodológica com intuito de verificar os melhores parâmetros de aquisição de dados se fará uso de modelagens diretas bidimensionais de dados de resistividade elétrica a partir de um modelo geológico-geofísico proposto por Elis (*op. cit.*). A partir dos resultados obtidos com as modelagens serão escolhidos conjuntos de parâmetros de aquisição (arranjo de eletrodos, espaçamento entre eletrodos e níveis de investigação em profundidade) para se aplicar ao longo das linhas selecionadas.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como pesquisas anteriores já realizadas na área do antigo lixão poderão ser úteis futuramente como referência para órgãos públicos ambientais e para instituições de pesquisas para estudos em áreas de disposição final de resíduos e também no contínuo monitoramento geofísico da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP.

CAPÍTULO 02

Revisão bibliográfica

2.1 Considerações gerais

O homem desde sempre tem a sua total dependência aos recursos naturais para com as suas funções vitais, como todas as outras formas de vida presentes em nosso planeta. Recursos como a água e o solo são utilizados para um grande conjunto de atividades desenvolvidas pelo homem, atividades estas essenciais para a sobrevivência da espécie no mundo contemporâneo, tais como, produção de energia, produção de alimentos, o desenvolvimento industrial e comercial, agropecuário, social, econômico e muitas outras.

De acordo com Moraes (2004) a expansão econômica, o crescimento demográfico e urbano, a ocupação irregular do solo, o uso excessivo de agrotóxicos por consequência do aumento das fronteiras agrícolas, o tratamento sanitário irregular do lixo e a falta da conscientização do problema estão entre os fatores da crescente degradação dos recursos hídricos.

O rápido crescimento e o desenvolvimento destas atividades citadas ocorrido nas últimas décadas vêm gerando vários impactos frente à qualidade de vida das populações e aos recursos disponíveis na natureza. As ocupações, em sua maior parte inadequada, de espaços antes habitados pela flora e fauna dão lugar a favelas, complexos industriais, áreas de descarte final de resíduos como aterros sanitários, lixões, entre outras.

Cerca de 70% da superfície terrestre do nosso planeta encontra-se coberta por água. Segundo dados quantitativos 97,5% da água disponível em nosso planeta é salgada e 2,49% está concentrada em geleiras e em aquíferos em subsuperfície. Para uso humano há apenas 0,007% de água doce, disponível em rios, lagos, represas e na atmosfera (SHIKLOMANOV, 1998).

A disponibilidade de água, tanto subterrânea e superficial, para nosso uso e consumo é decorrente do ciclo hidrológico, como ilustra a Figura 2.10, através dos processos de precipitação, infiltração, evapotranspiração, precipitação, percolação, infiltração e drenagem.

Figura 2.10 – Representação esquemática do ciclo hidrológico. **E** = evaporação; **ET** = evapotranspiração; **I** = infiltração; **R** = escoamento superficial. (Modificado de FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).

Tanto as águas subterrâneas quanto as superficiais são importantes para o desenvolvimento das atividades humanas em seu uso diário e diverso, abrangendo o uso domiciliar, industrial, agrícola, piscicultura, navegação, lazer e outros.

A água, embora um recurso natural renovável, deve ser considerada um recurso finito e de ocorrência aleatória, pois se distribui de modo irregular, tanto no tempo e espaço, em função das condições geográficas, geológicas e meteorológicas (SETTI, 1996).

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (1997) as águas subterrâneas não apresentam maiores problemas de contaminação física ou biológica, sendo que as águas superficiais são muito mais vulneráveis a contaminações oriundas da atividade humana cujo tratamento é geralmente oneroso. Feitosa e Manoel Filho (*op. cit.*) relatam também que embora menos vulnerável, as águas subterrâneas podem ser afetadas por contaminantes provenientes de perdas de redes de esgotos, derramamentos de petróleo e seus derivados, intrusões de água de qualidade inferior.

Um problema ambiental que afeta atualmente de forma grave os recursos hídricos e as populações que dependem destes, são as áreas de disposição final de resíduos. Quaisquer cavidades na superfície como áreas de empréstimos de solo, ravinamentos, voçorocas, depressões naturais, leitos de rios e córregos, áreas de garimpos e áreas de minerações abandonados são utilizados para receber resíduos provenientes das atividades humanas. Até mesmo áreas pré-selecionadas para este fim impactam o meio físico, caso haja irregularidade na locação da área para tal fim ou mesmo na sua construção.

2.2 O problema ambiental dos resíduos sólidos urbanos

A poluição e a contaminação dos recursos hídricos, águas superficiais e águas subterrâneas, e dos solos, são atribuídos a alguma forma de atividade humana. A produção de resíduos no Brasil e no mundo é um processo inevitável que ocorre diariamente, onde a quantidade e composição dependem totalmente do perfil, tamanho da população e do seu desenvolvimento econômico. O conceito de lixo, resíduo ou rejeito varia de acordo com a abordagem tratada, dependendo de aspectos econômicos, sociais, jurídicos e ambientais, se confundindo na maioria das vezes.

A Organização das Nações Unidas (ONU) *in* Vieira (2002) define “resíduo” como todos os restos domésticos e resíduos não perigosos, tais como os resíduos comerciais e institucionais, o lixo da rua e os entulhos de construção. Quando há características perigosas dentre estes resíduos, a classificação e conceituação são alteradas para resíduos perigosos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT através da Norma Brasileira Registrada (NBR) n ° 10.004 (1987) trazem como definição para resíduos:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos provenientes de atividades industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição, sendo incluídos lodos de sistemas de tratamento de água, líquidos com características perigosas inviabilizando o lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’ água.”

Na classificação quanto à origem, estes resíduos podem ser caracterizados como domiciliares, comerciais e públicos, sendo de responsabilidade municipal. É possível também ter origem hospitalar, industrial, agrícola ou ser propriamente um “entulho”, de responsabilidade do gerador. Abaixo são descritos em linhas gerais vários tipos de resíduos, classificados quanto a sua origem:

- ◆ Domiciliares: originados pelas atividades humanas em suas residências (restos de alimentos, papéis em geral, embalagens plásticas e de papel);
- ◆ Comerciais: produzidos através de atividades comerciais e serviços (papéis, plásticos, embalagens diversas);
- ◆ Públicos: resíduos originados através de atividades de serviços públicos (limpeza urbana, logradouros, praças);
- ◆ Hospitalares: materiais descartáveis de atividades hospitalares e/ou de áreas de saúde (seringas, luvas, algodões, fitas adesivas, remédios com validade vencida, tecidos removidos, sangue, cadáveres de animais usados em testes);
- ◆ Industriais: resíduos produzidos através das atividades industriais (cinzas, escórias, papéis, metais, vidros, cerâmicas, lodo);
- ◆ Agrícolas: produzidos pelas atividades desenvolvidas pela Agricultura (embalagens de adubos, defensivos, ração, restos de safra produzida);
- ◆ Entulhos: resíduos originados pela construção civil, podendo ser chamados também de sobras de construção ou de demolição (ferros, tijolos, cimentos, embalagens, madeiras, pedras britadas).

Os resíduos também podem ser classificados quanto a sua composição química, sendo divididos em Orgânicos e Inorgânicos. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estes resíduos podem ser

classificados quando a sua toxicidade, trazendo riscos ao meio ambiente. A NBR 10.004 (1987) enquadra os resíduos sólidos em três classes:

- ♦ Classe I: Apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- ♦ Classe II (Não inertes): Esta classe enquadra resíduos que possuem as propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- ♦ Classe III (Inertes): Constituintes que não se solubilizam em concentrações superiores ao padrão de potabilidade das águas (tijolos, vidros, plásticos, borrachas).

Neste trabalho serão abordados os termos “lixo, resíduo ou rejeitos” como palavras sinônimas, designando restos de materiais de consumo da população, das indústrias, da construção civil, do comércio e entre outros.

2.3 Áreas para disposição de resíduos

Em grande parte dos casos os resíduos são dispostos em locais sem nenhum estudo e planejamento técnico.

Há várias formas para disposição final dos resíduos. A disposição final dos resíduos pode ser realizada em áreas específicas para cada tipo de resíduo ou disposto numa área qualquer sem nenhum planejamento técnico prévio. Há outras formas de disposição destino final para os resíduos além da disposição em subsuperfície ou a céu aberto, como o processo de compostagem, reciclagem ou incineração.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000) realizada pelo IBGE, ilustrado pela Figura 2.10, revela que 228.413 toneladas de lixo são geradas diariamente no Brasil, onde 21% vão para locais a céu aberto denominado de lixões, 37% dispostos em aterros controlados, 36% vão para aterros sanitários e 6% outras formas de destino final como

CAPÍTULO 02 – Revisão bibliográfica

compostagem, usinas de triagem (processo de separação e depois reciclagem) e incineração. No estado de São Paulo, no ano de 2006, a quantidade gerada de resíduos por dia foi de 28.397 toneladas, onde para 80,7 % eram dispostos adequadamente (CETESB, 2007).

Os resíduos podem ser dispostos em três tipos de áreas específicas, aterro sanitário, aterro controlado e os “lixões” ou vazadouros.

De acordo com a ABNT (1985) *in* IPT (1995) os aterros controlados se caracterizam como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos em subsuperfície que utilizam alguns poucos princípios de engenharia para confinar os resíduos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho.

Já os locais que recebem a nomenclatura de “lixões”, de acordo com ABNT (1989 *apud* IPT *op. cit.*) se caracterizam por ser uma forma inadequada de disposição final dos resíduos sólidos, caracterizada pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública.

E por final, os aterros sanitários são caracterizados como um processo para a disposição de resíduos sólidos no solo, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permitindo a confinação segura em termos de proteção ao meio ambiente e a saúde pública (ABNT 1979, *apud* IPT *op. cit.*).

Figura 2.11 – Gráfico ilustrando o panorama brasileiro para o destino final dos resíduos (IBGE, 2000).

Pejon & Zuquette (1991) enumeram vários itens que levam a má escolha de locais para destino final dos resíduos, tanto de ordem técnica e política, como a falta de conhecimento regional das características do meio físico e do meio ambiente como um todo; a não caracterização e separação dos tipos de resíduos pela população e órgãos responsáveis; poucos estudos realizados e incentivados em lixões, aterros sanitários existentes ou experimentais; falta de fiscalização pelos órgãos públicos e punição aos responsáveis pela disposição inadequada dos rejeitos.

Segundo IPT (1995) são necessárias etapas para a implantação de um aterro sanitário:

- ♦ Levantamento de dados gerais do município, como dados populacionais, sócio-econômicos, características dos resíduos, coleta e sistema de transporte destes resíduos;
- ♦ Pré-seleção de áreas: dados geológicos-geotécnicos, pedológicos, geomorfológicos, climatológicos, dados sobre os recursos hídricos, dados sobre a legislação ambiental vigente;
- ♦ Viabilização de áreas pré-selecionadas: levantamentos geológicos de caráter regional e local (levantamentos de dados do meio físico).

De acordo com a Zuquette *et. al.* (1995), a carta de zoneamento geotécnico do município de Ribeirão Preto - SP, elaborada na finalidade de identificar áreas propícias para a disposição de resíduos e rejeitos, verificou que não existem áreas caracterizadas como “totalmente favoráveis” à instalação desse tipo de empreendimento.

2.4 Caracterização do percolado

Os resíduos dispostos em subsuperfície ou em céu aberto, tanto de forma adequada ou não, são considerados um agente poluidor, proliferando vetores de doenças, poluindo e/ou contaminando o solo, os recursos hídricos e

CAPÍTULO 02 – Revisão bibliográfica

o ar, através de gases tóxicos e de percolados (lixiviados), todos derivados da decomposição e da queima dos resíduos.

Os percolados são originados pela decomposição dos resíduos através de processos físicos e bioquímicos, aeróbicos e anaeróbicos, onde após esse processo recebe a denominação de chorume.

De acordo com Schalch (1984), o chorume, também conhecido como sumeiro ou purina, possui as características de um líquido de odor desagradável, coloração escura, muito parecido com o esgoto doméstico quando se comparado à sua carga poluidora, porém bem mais concentrado, possuindo elevada concentração de metais pesados e alta DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).

De acordo com a ABNT chorume é definido como líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e elevada DBO.

A composição do chorume depende muito da composição dos materiais que geraram o lixiviado, ou seja, a composição dos resíduos que foram descartados. De acordo com Lins (2003) a composição do chorume depende da composição dos resíduos e das condições de acondicionamento final destes resíduos.

Segundo Segato & Silva (*op. cit.*) a composição química do percolado varia muito dependendo muito das suas fontes e materiais de composição e idade do aterro, podendo ser observado pela Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Íons presentes no percolado e suas principais fontes (SEGATO; SILVA, 2002).

Íons	Fontes
Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Material orgânico, entulhos de construção, cascas de ovos;
PO_4^{3-} , NO_3^- , CO_3^{2-}	Material orgânico;
Cu^{2+} , Fe^{2+} , Sn^{2+}	Material eletrônico, latas, tampas de garrafas;
Hg^{2+} , Mn^{2+}	Pilhas comuns e alcalinas, lâmpadas fluorescentes;
Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+}	Baterias recarregáveis (celular, telefone sem fio, automóveis);
Al^{3+}	Latas descartáveis, utensílios domésticos, embalagens laminadas;
Cl^- , Br^- , Ag^+	Tubos de PVC, negativos de filmes de raio X;
As^{3+} , Sb^{3+} , Cr^{2+}	Embalagens de tintas, vernizes, solventes orgânicos.

CAPÍTULO 02 – Revisão bibliográfica

Segundo Thcobanoglous *et. al.* (1993) a composição química do chorume varia dependendo da idade do aterro e dos eventos que ocorreram antes da amostragem do mesmo. O chorume coletado durante a sua fase ácida, o pH será baixo, já os parâmetros como DBO, (Demanda Bioquímica de Oxigênio), COT (Carbono Orgânico Total), DQO (Demanda Química de Oxigênio), nutrientes e metais pesados deverão ser altos. Contudo durante a fase metanogênica o pH varia entre 6,5 e 7,5 e os valores de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio após 5 dias), COT, DQO e nutrientes serão significativamente menores. A biodegradabilidade do chorume varia com o tempo e pode ser determinada pela relação DBO₅/ DQO, onde essa relação apresenta-se em torno de 0,5 ou maior, e relações entre 0,4 e 0,6 são indicadores da melhor biodegradabilidade. A Tabela 2.11 ilustra dados representativos das características de chorume, tanto para aterros novos e aterros antigos.

Tabela 2.11 – Dados típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos segundo Thcobanoglous *et. al.*, (1993).

Características	Valores (mg/l)		
	Novos aterros (> de 2 anos)		Aterros antigos (< 10 anos)
	Faixa de variação	Típico	
DBO ₅	2.000 – 30.000	10.000	100 – 200
COT	1.500 – 20.000	6.000	80 – 160
DQO	3.000 – 60.000	18.000	100 – 500
Sólidos Suspensos	200 – 2.000	500	100 – 400
Nitrogênio Orgânico	10 – 800	200	80 – 120
Nitrogênio amoniacal	10 – 800	200	20 – 40
Nitrato	5 – 40	25	5 – 10
Fósforo total	4 – 100	30	5 – 10
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /l)	1.000 – 10.000	3.000	200 – 1.000
pH	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
Dureza (mg CaCO ₃ /l)	300 – 10.000	3.500	200 – 500

Paschoalato *et. al.* (2001) recomenda em seu trabalho que o procedimento para verificar a existência de contaminação das águas subterrâneas por líquidos percolados através de disposição de resíduos sólidos

sejam realizadas regularmente análises físico-químicas dos parâmetros que se apresentaram com mobilidade de percolação, sendo eles: alcalinidade de bicarbonato, cobalto, condutividade, cor aparente, cromo total, dureza total, ferro, fósforo total, magnésio, manganês, nitrogênio amoniacal, nitrogênio albuminóide, nitrato, nitrito, oxigênio consumido, potássio, sódio, sulfito e zinco.

2.5 Geofísica aplicada em áreas de disposição de resíduos

A preocupação com a contaminação e poluição dos recursos hídricos, águas superficiais e subterrâneas, decorridas de áreas de disposição de resíduos, têm merecido especial atenção por parte dos órgãos públicos e instituições de pesquisa relacionadas à conservação do meio ambiente, no sentido de avaliar o nível de poluição e contaminação causado pela disposição inadequada destes resíduos, procurando estabelecer procedimentos e decisões para minimizar os impactos causados ao meio físico e à sociedade.

A partir desta preocupação há uma busca de novos métodos e aperfeiçoamento de técnicas que possam identificar e caracterizar os problemas ambientais decorridos das atividades humanas, estabelecendo meios, critérios e parâmetros para minimizar os danos causados, auxiliando assim uma posterior remediação destas áreas.

De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (2001), para o diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de investigações geofísicas tem por objetivo a identificação da presença de contaminação em subsuperfície e definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Como forma indireta de investigação da subsuperfície, a Geofísica Aplicada, através dos seus métodos, avanço tecnológico da informática e da eletrônica ocorrido após os anos 1990, vem sendo utilizada por instituições de pesquisas e empresas em estudos de problemas ambientais, geotecnia, hidrogeologia e em levantamentos geológicos básicos (mapeamento geológico), pois consegue caracterizar a subsuperfície em extensas áreas sem a interferência direta no meio para a investigação da subsuperfície.

O uso de investigações geofísicas vem se mostrando hábil na identificação e caracterização de problemas ambientais causados por derivados de hidrocarbonetos, resíduos sólidos urbanos (domésticos e comerciais), resíduos industriais (efluentes líquidos e sólidos), rejeitos de mineração e resíduos das atividades agrícolas, devido a sua rápida aplicabilidade, baixo custo financeiro e resultados satisfatórios comparados a outros métodos de investigação da subsuperfície.

A Geofísica Aplicada, em casos de problemas ambientais, tem como objetivo identificar e delinear espacialmente a pluma contaminante, identificar a posição do nível d' água, direção e sentido do fluxo das águas subterrâneas, assim podendo sugerir locais mais apropriados para se instalar poços de monitoramento, barreiras hidráulicas e posteriores levantamentos geofísicos para contínuo monitoramento da evolução da contaminação.

Uma problemática de destaque atualmente no Brasil e principalmente no estado de São Paulo são as áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, também chamado de lixões, aterros sanitários e aterros controlados.

O Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares de 2006 (CETESB, 2007) mostra a evolução entre os anos de 1997 – 2006 do panorama destas áreas de disposição final de resíduos. No ano de 1997, o total de resíduos gerados em todos os municípios do estado de São Paulo foi de 18.232 t/dia e em 2006 foi de 28.397 t/dia, onde a disposição adequada passou de 10,9% do total gerado em 1997 para 80,7% em 2006. Apesar do aumento para o acondicionamento adequado dos resíduos, os dados demonstram um grande passivo ambiental gerado ao longo desses anos.

Inúmeros trabalhos científicos foram desenvolvidos no estado de São Paulo com o objetivo de caracterizar, com o uso da Geofísica Aplicada, áreas de disposição de resíduos sólidos, citando os trabalhos de Elis & Zuquette (1996, 2002) Malagutti Filho *et. al.* (1997), Elis (1999), Dourado *et. al.* (2001), Moura (2002), Silva *et. al.* (2002), Mondelli (2004), Lago (2004), Porsani *et. al.* (2004) e Hatae (2005).

Elis & Zuquette (1996, 2002), Elis (1999) e Silva *et. al.* (2002) aplicaram diversos métodos geofísicos na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP, na finalidade de avaliar a contaminação gerada pela disposição inadequada de resíduos sólidos. Elis & Zuquette (1996, 2002) e Elis (1999) ao longo dos anos aplicaram diversos métodos geofísicos (Eletrorresistividade 1D e 2D,

Eletromagnético Indutivo - EM-34, Potencial Espontâneo, Polarização Induzida 1D e 2D) na finalidade caracterizar a contaminação gerada pela disposição inadequada de resíduos ao longo dos anos na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP, caracterizando assim a pluma de contaminação (geometria espacial), as cavas de resíduos (geometria e profundidade), caracterização geológico-geofísica através da integração de dados diretos e as investigações geofísicas e sentido do fluxo de água subterrânea. Silva *et. al.* (2002) repetiu alguns ensaios geofísicos (Eletrorresistividade 2D e Eletromagnético Indutivo – EM-34) para algumas linhas realizadas anteriormente por Elis (1999), com objetivo de verificar a percolação em profundidade do contaminante nas cavas.

Foram obtidos bons resultados por Malugutti Filho *et. al.* (1997) através da aplicação integrada dos métodos da Eletrorresistividade, Polarização Induzida, Sísmica de Refração e Eletromagnético Indutivo (EM-34) numa área de disposição de resíduos sólidos urbanos situada em Rio Claro – SP. Os resultados obtidos pelos autores permitiram caracterizar os materiais geológicos, posição dos resíduos, posição do nível d'água e sentido do fluxo da água subterrânea.

Diversos métodos geofísicos (Eletrorresistividade e Radar de Penetração no Solo – GPR) foram aplicados no aterro sanitário de Judiai - SP na finalidade de identificar a profundidade do nível d'água e o topo do substrato rochoso, a direção do fluxo da água subterrânea e por final as zonas de percolação do chorume que estaria associado ao fraturamento das rochas que ocorrem na área (DOURADO *et. al.*, 2001).

No aterro sanitário de Rio Claro – SP, Moura (2002) e Porsani *et. al.* (2004) aplicaram diversos métodos geofísicos para caracterizar a contaminação a partir dos resíduos ali depositados. Moura (2002) aplicou os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida na finalidade e avaliar as potencialidades da integração dos métodos na caracterização geofísico-geológico da área. Os resultados permitiram determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e identificar os diferentes litotipos das rochas que ocorrem na área do aterro. Porsani *et. al.* (2004) aplicou os métodos de Radar de Penetração no Solo (GPR) e Eletrorresistividade (investigação 1D), onde a integração dos resultados de ambos os métodos identificaram a base do aterro 14,5 metros de profundidade.

Mondelli (2004) aplicou investigações diretas através do piezocone de resistividade elétrica (RCPTu) na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP e no aterro sanitário de Bauru – SP, caracterizando a contaminação nestas áreas e as características físicas dos solos tropicais. Os ensaios com piezocone de resistividade foram orientados através de investigações geofísicas (Eletrorresistividade 1D e 2D) realizadas antes dos ensaios de RCPTu em ambas as áreas.

Lago (2004) aplicou os métodos da Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo (investigações 1D e 2D) no aterro sanitário de Bauru – SP. A integração destes métodos de investigação possibilitou obter características do meio físico e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição, recomendando-se assim as melhores locais para instalações de poços de monitoramento permanente, locais para investigações diretas (RCPTu) e outros métodos de investigação.

Hatae (2005) aplicou os métodos da Eletrorresistividade 1D e Eletromagnético Indutivo (EM-34) no antigo lixão de Mogi das Cruzes – SP, com objetivo de caracterizar principalmente quanto à existência e espessura dos resíduos sólidos depositados, para o subsidio de investigações arqueológicas.

A partir disso, dentre os vários métodos geofísicos de investigação da subsuperfície existentes se destacam atualmente em estudos de problema ambientais os métodos da Eletrorresistividade e o da Polarização Induzida (IP), como foi visto nos trabalhos acima.

A Eletrorresistividade permite a obtenção da distribuição espacial das propriedades elétricas do meio (resistividade elétrica), já o método da Polarização Induzida dará informações sobre o quanto o meio tem capacidade de se polarizar (cargabilidade), dependendo da composição mineralógica ou do grau de saturação de íons dissolvidos no meio. As investigações em campo para ambos os métodos podem ser unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D).

CAPÍTULO 03

Caracterização da área de estudo

3.1 Localização da área e histórico

A área a ser estudada é o antigo lixão do município de Ribeirão Preto-SP, também conhecido como Lixão de Serrana, que está localizado no quilômetro 53,1 da rodovia estadual Abrão Assed (SP-333), sudeste do perímetro urbano, ilustrado na Figura 2.10.

Figura 3.10 – Localização do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP, a sudeste do perímetro urbano.

CAPÍTULO 03 – Caracterização da área de estudo

A área do antigo lixão teve função de receptora de resíduos entre os anos de 1978 e 1989, e de acordo com o trabalho de Elis & Zuquette (2002) o lixão recebeu diariamente 300 toneladas de resíduos, recebendo os mais variados tipos de resíduos. Os resíduos eram dispostos em duas cavas alongadas de direção N-S de cerca de 300 m de comprimento por 40 a 60 m de largura (ZUQUETTE *et al.*, 1990, *apud* ELIS, 1999), totalizando um volume de cerca de 600.000 m³ (ELIS, 1999).

De acordo com dados cedidos pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP, até o ano de 1984 todo tipo de resíduos gerado no município, domiciliares, comerciais, industriais, hospitalares, animais mortos e os resíduos da construção civil, eram dispostos todos juntos nas cavas, sem algum tipo de acondicionamento técnico. A Figura 3.11 ilustra uma imagem da época que o lixão encontrava-se em plena atividade.

Após o ano de 1984 os resíduos hospitalares e os animais mortos foram depositados separadamente dos demais, em trincheiras localizadas na parte sul da cava menor. A área do antigo lixão, antes de ter esta função de área de recebimento de resíduos, servia como área de empréstimos de areia e solo destinados à construção civil.

Figura 3.11 – Imagem aérea da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP ainda em atividade durante o ano de 1984, ilustrando as duas cavas de disposição dos resíduos e suas circunvizinhanças ainda não habitadas. (Imagem cedida pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP).

De acordo com Vieira (2002) a CETESB e a “Carta Ambiental de Ribeirão Preto – SP” consideraram o antigo lixão de Ribeirão Preto como o maior problema ambiental do município devido à carga de poluição recebida durante sua atividade, e assim oferecer perigo de contaminação e poluição das águas superficiais e subterrâneas.

CAPÍTULO 03 – Caracterização da área de estudo

Após a desativação do lixão, diversas instituições de pesquisa ao longo dos anos vêm estudando os impactos gerados pelos resíduos dispostos inadequadamente, fazendo uso de métodos diretos e indiretos de investigação de subsuperfície. São citados os trabalhos de Pejon & Zuquette (1991), Zuquette *et. al.* (1994), Petrobrás (1997), Elis (1999), Elis & Zuquette (1996, 2002), Silva *et. al.* (2002), Paschoalato (2000), Mondelli (2004) e outros trabalhos com objetivos sócio-ambientais como o de Vieira (2002) e Santos (2004). A Figura 3.12 ilustra uma imagem aérea atual das circunvizinhanças da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP.

Figura 3.12 – Imagem aérea obtida no ano de 2005, ilustrando a expansão urbana e industrial nas circunvizinhanças da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP (Imagem cedida pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP).

3.2 Caracterização geológica regional

O estado de São Paulo tem três domínios geológicos bem definidos (Figura 2.13), as coberturas recentes de idade Cenozóica, rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia Sedimentar do Paraná e o embasamento cristalino.

O local de nosso estudo, situado no município de Ribeirão Preto-SP, está inserida nos domínios N-NE da Bacia Sedimentar do Paraná, tendo localmente ocorrências rochas do Grupo São Bento (arenitos da Formação Botucatu e da Formação Pirambóia, rochas vulcânicas da Formação Serra Geral) e sedimentos recentes (IPT, 1981).

Figura 3.13 – Contexto geológico do estado de São Paulo (Modificado de IPT, 1981).

O Grupo São Bento, composto pelas formações geológicas citadas acima, evidenciam um processo de sedimentação continental, em clima árido à semi-árido, encerrado por amplo vulcanismo basáltico. Segundo Monteiro

(2003) na parte nordeste do município de Ribeirão Preto há a ocorrência, concordante aos arenitos da Formação Botucatu, de soleiras de diabásio.

3.2.1 Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia caracteriza-se por uma sucessão de camadas arenosas mais comumente de cor vermelha, granulação fina, possuindo maior fração argilosa na parte inferior. Na parte superior há a ocorrência de fração mais arenosa, conglomeráticos. Há a predominância de estratificações plano-paralela, destacando a alternância de laminações ricas em conteúdo argiloso, outrora siltoso. Há ocorrências de estratificações cruzadas de médio a grande porte. Possuem espessuras aflorantes de até 270 metros, observada na região de Anhembi - São Pedro e em subsuperfície cerca de 350 metros (IPT, 1981).

3.2.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu constitui-se quase que inteiramente de arenitos com granulação fina a média, uniforme, com boa seleção de grãos foscos com alta esfericidade. São avermelhados e exibem estratificação cruzada de médio a grande porte. No topo do pacote, o contato com a Formação Serra Geral é interdigitado, recobrimdo-se os arenitos pelos derrames basálticos. Na base do pacote intercalam-se arenitos de deposição sub-aquosa, apresentando formas lenticulares (IPT, 1981).

As maiores espessuras encontradas para a Formação Botucatu no estado de São Paulo varia entre 50 à 100 metros, mas dados de sondagens diretas afirmam que estas espessuras ultrapassam os 200 metros de espessura (IPT, *op cit.*). De acordo com Monteiro (2003), a área aflorante e sub-superficial dos arenitos que compreendem a Formação Botucatu somente no estado de São Paulo é 16.665 km² ao longo de 400 km, num total de 150 km².

3.2.3 Formação Serra Geral

As rochas que caracterizam a Formação Serra Geral compreendem um conjunto de derrames basálticos de origem toleítica, intertrapeados por arenitos da Formação Botucatu. Associado a esse derrame basáltico ocorrem rochas intrusivas básicas, em forma de *sills* e diques (IPT, 1981).

Os derrames de basalto são formados por rochas de cor cinza escura a negra, afanítica, com espessuras variando de dezenas a centenas de metros, e extensão de âmbito regional, compreendendo não somente o estado de São Paulo, mas também os estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, parte de Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais (IPT, *op. cit.*).

Os diques e *sills* apresentam-se com espessura variada ao longo da bacia, variando de centimétrica a centenas de metros (IPT, *op. cit.*).

3.3 Caracterização hidrogeológica

A Bacia Sedimentar do Paraná abriga formações rochosas sedimentares que formam o maior aquífero em extensão que se tem conhecimento no mundo, chamado de Aquífero Guarani ou Aquífero Mercosul, reservatório de águas subterrâneas que compreende países como o Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai (MAYNARD, 2001 *apud* MONTEIRO, 2003). No Brasil, o Aquífero Guarani compreende os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e pequenas extensões do estado de Mato Grosso do Sul, Goiás e Mato Grosso. O aquífero Guarani no Brasil tem ocorrência nas rochas das Formações Pirambóia e Botucatu.

O Aquífero Guarani é um aquífero poroso, formado por arenitos de idade mesozóica e característicos de depósitos eólicos e flúvio-eólicos das formações Botucatu e Pirambóia, sotoposto discordantemente por unidades lamíticas da Formação Corumbataí e sobreposto pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (MONTEIRO, 2003).

Para Fili et al (1998) as estimativas preliminares da reserva de água doce do aquífero estimam que seria suficiente para abastecer uma população

CAPÍTULO 03 – Caracterização da área de estudo

de 5,5 bilhões de pessoas, com uma razão de 100 litros/dia por habitante durante 200 anos.

No estado de São Paulo, o aquífero Guarani é formado principalmente pelas formações Botucatu e Pirambóia, possuindo uma espessura de até 450 metros na porção central da Bacia do Paraná, confinada pelos espessos derrames basálticos (ROCHA, 1996 *apud* MONTEIRO, 2003).

O município de Ribeirão Preto está em sua maior parte estabelecido sobre as rochas da Formação Botucatu e os derrames basálticos que compreendem a Formação Serra Geral, onde uma dessas formações geológicas, a Formação Botucatu, integra o Aquífero Guarani.

Segundo estudos da CETESB (1998b) mais de 47% dos municípios do estado de São Paulo são abastecidos por águas subterrâneas. O município de Ribeirão Preto se enquadra nesse grupo, tendo sua total dependência aos recursos hídricos subterrâneos.

De acordo com Monteiro (2003) e também através de dados do Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto – SP (DAERP) o município de Ribeirão Preto é 100% abastecido por mananciais subterrâneos (uso público e industrial).

A exploração de água subterrânea tanto se dá nos arenitos da Formação Botucatu e também nos arenitos da Formação Pirambóia. As porções mais fraturadas dos derrames basálticos também contribuem para extração de água subterrânea, fazendo parte assim de sistema reservatório importante para a o município de Ribeirão Preto.

3.4 Caracterização geológico-geofísica da área

A área do lixão é caracterizada litologicamente por rochas da Formação Botucatu capeadas por sedimentos cenozóicos (colúvios) e afloramentos de basaltos da Formação Serra Geral (PETROBRÁS, 1997).

A Figura 3.14 mostra a ocorrência das rochas da Formação Botucatu e da Formação Serra Geral na maior parte da região de Ribeirão Preto-SP.

CAPÍTULO 03 – Caracterização da área de estudo

Coberturas aluvionares recentes ocorrem ao longo das drenagens e resquícios dos arenitos da Formação Pirambóia, aflorantes a leste do município.

Figura 3.14 – Contexto geológico da região de Ribeirão Preto-SP (Modificado de IPT, 1981).

Segundo CETESB (*op.cit.*) o município de Ribeirão Preto possui uma área estimada de afloramentos das rochas das formações Pirambóia e Botucatu de 14 % da área total do município, assim o restante pode ser entendido como aquíferos confinados ou semi-confinados. Ferreira (1996 *apud* MONTEIRO, 2003) indicou que a faixa de afloramentos das formações Botucatu e Pirambóia, consideradas zonas de recargas do Aquífero Guarani, como altamente vulnerável à contaminação.

Pejon & Zuquette (1991) através de estudo geológico-geotécnico realizado na área do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP caracterizaram que a área está localizada num divisor topográfico e que 30% da área que compreende os arredores do antigo lixão se caracterizam como zona de recarga do Aquífero Botucatu. Os autores ainda citaram a ocorrência de materiais inconsolidados de origem coluvionar, sobrepostos a materiais

CAPÍTULO 03 – Caracterização da área de estudo

residuais arenosos originados da Formação Botucatu. Esta formação composta por arenitos friáveis formaria o substrato rochoso do local. Análises granulométricas efetuadas por eles nas áreas de recarga, mostraram predominância de silte mais argila (com domínio de 60%) até 10 metros de profundidade (colúvio). A partir daí, aumenta a proporção da fração areia, que cresce de 65% para 92% até 18 metros de profundidade (solo residual do arenito).

Zuquette *et. al.* (1994), de acordo com as características geológico-geotécnicas, classificou a área do antigo lixão quanto à adequabilidade para depósitos de resíduos, como desfavorável ou restritiva.

Inúmeras investigações diretas e indiretas foram realizadas na área do antigo lixão (PETROBRÁS, 1997; ELIS, 1999). A Figura 3.15 ilustra o mapa esquemático da área do lixão, mostrando as duas cava alongadas com orientação N-S, posição dos poços de monitoramento e coleta de chorume, sondagens a trado e CPTu, ensaios geofísicos (SEVs) e o desnível topográfico da área.

Figura 3.15 – Mapa esquemático da área do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP, mostrando as duas cavas de disposição de resíduos, posição dos poços de monitoramento, sondagens a trado, CPTu, variação topográfica da área, Sondagens Elétricas Verticais (SEV's). (Adaptado de PETROBRÁS, 1997; ELIS, 1999).

Elis (1999) realizou vários ensaios geofísicos na área do antigo lixão entre os anos de 1995 e 1998. Dentre os métodos aplicados, destaca-se o método da Eletroresistividade com a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), que investiga a variação de resistividade elétrica verticalmente, correlacionada aos diversos tipos de materiais. O conjunto de sondagens realizadas na área do lixão definiu a espessura da camada de resíduos (SEV's 6 e 8), e as demais caracterizaram a posição da zona saturada, o fluxo subterrâneo (predominantemente NE) e as ocorrências litológicas (espessuras das camadas) na área do antigo lixão. A Figura 3.16 ilustra os resultados das SEV's realizadas na área do antigo lixão.

Figura 3.16 – Curvas de Sondagens Elétricas Verticais na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP (ELIS, 1999).

O trabalho realizado em parceria entre a Petrobrás e a UNAERP (PETROBRÁS, 1997) a pedido da Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto, teve a finalidade de avaliar os impactos ambientais causados pelo antigo lixão, decorrida pela atividade da área como receptora de resíduos. De acordo com o relatório final, entre os anos de 1991 e 1998 foram perfurados 23 poços de monitoramento na área do lixão e vizinhanças com objetivo de avaliar a qualidade de água subterrânea. Foram também executados e instalados sondagens a trado e CPTu, poços de monitoramento da águas subterrâneas e poços de coleta de chorume e por final a realização de levantamentos geofísicos.

A partir dos resultados obtidos através dos métodos de investigação aplicados na área do lixão, por Petrobrás (*op. cit.*) e Elis (*op. cit.*), perfis descritivos de alguns poços de monitoramento, sondagens a trado, CPTu (*Piezocone Penetration Test*), nível da zona saturada e a interpretação das SEV's, foi possível a construir três seções geológico-geofísicas na área do lixão, A–A', B–B' e C–C', ilustradas na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Seções geológico-geofísicas obtidas a partir da integração de resultados de perfis descritivos de poços de monitoramento, poços de coleta de chorume, CPTu, sondagens a trado e interpretação das SEV's.

De acordo com dados cedidos pela Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto – SP, entre os anos 1991 e 1998 foram perfurados 23 poços de monitoramento na área do antigo lixão de Ribeirão Preto e suas imediações.

Foram realizadas análises em águas coletadas em 1991 (PEJON; ZUQUETTE, 1991) nos poços 1, 2, 3, 4 e 5 (Tabela 3.10) existentes na área do lixão.. Os resultados das análises dos poços 1, 2, 3 e 4 não apresentaram variações nos parâmetros medidos que caracterizassem seguramente contaminação. O poço 2 apresentou valores anômalos em relação aos demais quanto às concentrações dos íons Na^+ , Cu^{2+} e Mn^{2+} e valor mais alto de condutividade. Segundo Elis (1999) o poço 2 está locado em uma posição, que, segundo os resultados geofísicos, estaria sob efeito de contaminação. Análises físico-químicas realizadas em 1997 (PETROBRAS, *op. cit*) e em 2004 (ANEXO A), apresentam pra alguns poços elevados valores para alguns parâmetros em relação (Sólidos Totais Dissolvidos, amônia, nitrato, etc.), confirmando assim a presente contaminação.

Tabela 3.10 – Resultados das análises químicas águas dos poços do antigo lixão de Ribeirão Preto (PEJON; ZUQUETTE, 1991).

Parâmetros	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Poço 4	Poço 5*
Temperatura (°C)	22,0	22,5	24,0	20,0	22,0
Condutividade (mho's/cm)	3.3×10^{-5}	6.9×10^{-4}	1.5×10^{-4}	7.2×10^{-5}	3.3×10^{-5}
pH	5.87	5.14	6.87	6.44	7.05
Ca^{2+} (mg/l)	1.66	3.49	5.76	1.48	2.88
Mg^{2+} (mg/l)	1.10	5.56	6.06	1.78	1.26
Na^+ (mg/l)	2.00	70.00	3.00	5.00	1.00
K^+ (mg/l)	1.40	2.75	2.50	1.50	2.75
Zn^{2+} (mg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu^{++} (mg/l)	0.00	0.586	0.00	0.00	0.00
Cd^{++} (mg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn^{++} (mg/l)	0.48	12.50	0.00	0.40	0.01
Pb^{++}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr^{+6}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*Anterior à disposição dos resíduos

CAPÍTULO 04

Métodos geofísicos

4.1 Considerações gerais

As Geociências são um conjunto de ciências voltadas para o estudo do nosso planeta, a Terra. Dentre essas ciências destacam-se a Geologia, Geografia, Geofísica e outras não menos importantes. Nesta pesquisa o foco principal é a Geofísica, então somente esta será discutida e caracterizada.

A Geofísica como ciência é caracterizada por se utilizar dos fenômenos físicos, naturais ou artificiais, que se manifestam no nosso planeta, a fim de investigar e compreender a subsuperfície terrestre, ou seja, a estrutura física e composição dos materiais geológicos no interior do planeta.

Esta ciência está dividida em Geofísica Global, podendo ser chamada também de Geofísica da Terra Sólida, e Geofísica Aplicada ou Geofísica de Prospecção ou Exploração. Há outras divisões para a Geofísica, como a Geofísica da Hidrosfera, Geofísica da Atmosfera e a Geofísica Espacial, que não foram descritos e caracterizados por não serem importantes para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, mas não irrelevantes para a Geofísica como ciência. A Figura 4.10 ilustra a divisão das Geociências, dando ênfase nas subdivisões (metodologias) referentes a Geofísica Global e a Geofísica Aplicada.

A Geofísica Global estuda o meio físico do nosso planeta numa escala global, tendo como exemplo o estudo da Tectônica de Placas e da Deriva Continental. O enfoque principal da Geofísica Global é a pesquisa básica, importantes para o desenvolvimento de novas técnicas para a própria Geofísica Aplicada e também a outras ciências correlacionadas. Dentro desta divisão destacam-se estudos voltados ao Geomagnetismo, Paleomagnetismo, Sismologia, Geotermia, Geofísica Nuclear e a Gravimetria Terrestre.

A Geofísica Aplicada se caracteriza por estudos do meio em pequena escala quando se comparado com a Geofísica Global. Ela se volta a estudos de escala regional à local, citando estudos voltados à mineração (bens minerais), recursos hídricos (águas subterrâneas e superficiais), geologia (mapeamento), meio ambiente (contaminação do meio físico), engenharia (maciço rochoso) entre outras aplicações.

Figura 4.10 – Divisão das Geociências, dando ênfase a Geofísica e suas subdivisões e as seus métodos.

Na Geofísica Aplicada alguns métodos utilizados se repetem quando se comparado aos da Terra Sólida, o que varia é a faixa de frequência utilizada, inversamente proporcional a profundidade de investigação, e a utilização de fontes artificiais ou induzidas. Para investigações de profundidades rasas se utiliza métodos que utilizam faixas de frequências variando de médios a altos valores (MHz à GHz). Investigações geofísicas onde o objetivo é obter informações a grandes profundidades, se aplicam métodos que utilizam baixas frequências, variando de Hz à kHz, como ilustra a Figura 4.11.

CAPÍTULO 04 – Métodos geofísicos

A utilização da Geofísica, tanto a Geofísica Global ou a Aplicada, como método de investigação da subsuperfície é possível devido às propriedades físicas dos materiais geológicos (permissividade dielétrica, resistividade elétrica, velocidade de propagação de onda, permeabilidade magnética, densidade, onde estas possuem intervalos de variação interdependente a fatores como a composição mineralógica, grau de intemperismo, porosidade, teor em fluidos, temperatura, entre outros. A partir do conhecimento das propriedades físicas dos materiais, através de simulações em laboratório ou através de aquisições em campo, e das características dos materiais geológicos (estruturas, mineralogia), pode-se utilizar a Geofísica como metodologia indireta para investigações (caracterização e identificação) da subsuperfície terrestre.

Figura 4.11 – Faixa de frequência utilizada por alguns métodos geofísicos em relação com a profundidade de investigação (MT: Magnetotelúrico; TEM: *Transient Electromagnetic* - Eletromagnético Domínio do Tempo; CSEM: *Controlled Source Electromagnetic* - Eletromagnético de fonte controlada; RMT: Radio-magnetotelúrico; GPR: *Ground Penetrating Radar* – Radar de Penetração no Solo; VETEM: *Very Early Transient Electromagnetic*)

Atualmente, a Geofísica Aplicada vem tendo maior destaque devido à preocupação da sociedade em geral para com a conservação dos recursos hídricos e a contaminação do meio físico através das atividades industriais, comerciais e domésticas. Neste capítulo se dará maior enfoque a fundamentação teórica, metodologias e técnicas de aquisição de dados referentes à Geofísica Aplicada, os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP), na avaliação de problemas ambientais decorridos da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, foco principal deste trabalho.

Os métodos relacionados à Geofísica Aplicada, utilizados em estudos de problemas ambientais, contribuem na forma de identificar, delimitar e monitorar as áreas possivelmente afetadas por algum agente poluidor ou contaminante, tanto orgânico ou inorgânico.

4.2 Método da Eletrorresistividade

4.2.1 Introdução e histórico

O método geofísico da Eletrorresistividade é caracterizado por se utilizar da resistividade elétrica (ρ) dos materiais geológicos, solos e rochas, a fim de investigar e caracterizar a subsuperfície terrestre.

A Eletrorresistividade se destaca como um dos principais métodos existentes na Geofísica Aplicada, já que este, como todos os outros métodos geofísicos existentes conseguem caracterizar a subsuperfície sem a utilização de métodos diretos de investigação, como sondagens (trado manual, trado mecânico, percussão, SPT), trincheiras, poços de amostragem, tendo vantagens como agilidade na aplicação da metodologia, resultados satisfatórios, custos reduzidos entre outros quando se comparado aos métodos diretos de investigação da subsuperfície terrestre.

Vários trabalhos exemplificam a vasta aplicação do método da Eletrorresistividade, investigações 1D, 2D e 3D, como na prospecção mineral, geologia complexa (GRIFFITHS; BARKER, 1993; NGUYEN *et. al.*, 2005),

CAPÍTULO 04 – Métodos geofísicos

hidrogeológicos (GALLAS, 2003), paleontológicos (PAPADOPOULOS *et. al.*, 2005), arqueológicos e aplicações pedológicas (GRIFFITHS; BARKER, 1994; HESSE *et. al.*, 1986; CASANDANSAYAR; BASEOKUR, 2001), planejamento urbano (VALLIANATOS *et. al.*, 2006), estudos geotécnicos (PARI *et. al.*, 2006), estudos de problemas ambientais (BERNSTONE *et. al.*, 2000; ATEKWANA *et. al.*, 2000; KAMURA, 2002; PORSANI *et. al.*, 2004; GALLAS *et. al.*, 2005; CHAMBERS *et. al.* 2006), problemas de engenharia (GALLAS *et. al.*, 2001) estudos botânicos (NICLOTTI *et. al.*, 2003; HAGREY *et. al.*, 2004; HAGREY, 2007), agricultura de precisão (PANISSOD *et. al.*, 2001), entre outros.

A utilização da Eletorresistividade como método de investigação da subsuperfície, historicamente, não é recente pelas instituições de pesquisas ou empresas. Destaca-se o trabalho de Gray & Wheller no ano de 1720 (ORELLANA, 1972), sobre a resistividade elétrica das rochas. No mesmo século, em 1746, Watson (ORELLANA, *op. cit*) descobre que o solo é condutor de corrente elétrica.

Um dos primeiros sistemas de prospecção elétrica (fonte induzida) foi desenvolvido por Brown no ano de 1883 (ORELLANA, *op. cit*), onde este sistema se utilizava de quatro eletrodos.

Contribuições significativas para com método da Eletorresistividade (fonte natural e induzida) foram dadas pelo engenheiro francês Conrad Schlumberger e o norte-americano Frank Wenner. O engenheiro francês, em meados de 1913, desenvolveu estudos voltados a identificar estruturas tectônicas se utilizando da Eletorresistividade (fonte natural). Ambos no ano de 1915 desenvolvem o arranjo de quatro eletrodos para realizações de resistividade elétrica (ORELLANA, *op. cit*).

Nessa época a Eletorresistividade foi muito utilizada pelos russos (ex-União Soviética), através dos serviços prestados pelo francês Conrad Schlumberger, com finalidade de caracterizar e identificar variações estratigráficas e estruturas tectônicas (prospecção de petróleo e de bens minerais) cujas dimensões variavam de metros até quilômetros em profundidade (ORELLANA, *op cit*).

Através dos estudos e pesquisas relacionados a levantamentos geofísicos se utilizando do método da Eletorresistividade, surgem duas “escolas”, a Escola Francesa e a Escola Americana, ambas iniciadas

respectivamente por Conrad Schlumberger e Frank Wenner. Muitas das metodologias e técnicas desenvolvidas por estes são utilizadas nos dias atuais e algumas até aprimoradas e modificadas, através do desenvolvimento de novas tecnologias, tanto de equipamentos geofísicos e métodos interpretativos.

4.2.2 Fundamentos teóricos

O método da Eletroresistividade se baseia na propriedade física da resistividade elétrica (ρ) que os diversos materiais, geológicos ou não, possuem. A resistividade elétrica é dita como a resistência da passagem de corrente elétrica num determinado meio, sendo essa dependente do estado físico do material e de sua natureza. A resistividade elétrica (ρ) é inversamente proporcional à condutividade elétrica (σ).

Telford *et al.* (1990) define a resistividade elétrica como a resistência elétrica R de um prisma condutor e homogêneo de comprimento L e seção transversal S , ambos de valor unitário. Para melhor ilustrar representa-se este prisma pela forma geométrica de um cilindro, como mostra a Figura 4.12.

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

ρ = Resistividade elétrica (Ohm.m)

R = Resistência elétrica (Ohm)

S = Área da seção transversal do cilindro (m²)

L = Comprimento do cilindro (metros)

Este cilindro, ao ser atravessado por uma corrente elétrica será submetido a uma diferença de potencial elétrico, onde sua resistência elétrica, dada pela Lei de Ohm, é:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 4.2})$$

R = Resistência elétrica (Ohm)

ΔV = Diferença de potencial elétrico (Volt)

I = Corrente elétrica (Ampere)

Figura 4.12 – Ilustração da manifestação da Lei de Ohm e por conseguinte a resistividade elétrica ρ de um cilindro homogêneo e isotrópico.

4.2.3 Dispositivo de fluxo de corrente e potencial elétrico em subsuperfície

Neste tópico serão abordados os fundamentos teóricos, a partir de Orellana (1972), Telford *et. al.* (1990), Ward (1990), conceitos e os princípios fundamentais do comportamento do fluxo de corrente elétrica e do potencial elétrico em subsuperfície.

CAPÍTULO 04 – Métodos geofísicos

Consideramos a subsuperfície um semi-espço homogêneo e isotrópico de resistividade elétrica ρ , onde por meio de eletrodos e um gerador de tensão se injeta corrente elétrica na subsuperfície (Figura 4.13).

Considerando uma corrente elétrica fluindo nesse semi-espço, é possível descrevê-la a partir da Lei de Ohm na sua forma diferencial para meios homogêneos e isotrópicos, como pode ser observado na Equação 4.3:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{Equação 4.3})$$

J = Densidade de corrente (Ampere/área)
 σ = Condutividade elétrica (Siemens/metro)
 E = Campo elétrico (Volt/metros)

A densidade de corrente J pode ser definida como a corrente elétrica I dividida pela área em que a corrente está sendo distribuída em subsuperfície, supondo a forma de uma semi-esfera de área S igual a $2\pi.r^2$. O aumento da distância da fonte emissora de corrente elétrica faz com que diminua o valor da densidade de corrente J_r , nesse caso, é possível calcular a voltagem na distância de um simples ponto de injeção de corrente elétrica, ou seja, numa distância r em relação ao eletrodo A de corrente elétrica, sendo definido pela Equação 4.4. A densidade de corrente J_r num ponto determinado da subsuperfície, tem a mesma direção, sentido e é proporcional ao campo elétrico E_r .

$$\vec{J}_r = \frac{I}{2\pi.r^2} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Então, substituindo, descrevemos a Equação 4.5:

$$\vec{J}_r = \sigma \vec{E}_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde podemos definir:

$$\vec{E}_r = \vec{J}_r \rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 4.6})$$

Sendo E_r , o valor da intensidade do campo elétrico numa distância r do eletrodo A de injeção de corrente elétrica, pode-se então definir o potencial elétrico V , nas mesmas condições, pela integral do campo elétrico E_r entre r e o infinito (∞), ou seja, entre r e a posição em relação ao eletrodo B de corrente elétrica, como ilustra a Figura 4.13 (Equação 4.7).

$$V = \int_r^\infty E_r dr = \frac{I\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r} \quad (\text{Equação 4.7})$$

Simplificando, temos:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r} \quad (\text{Equação 4.8})$$

Figura 4.13 – Fluxo de corrente elétrica através de somente um eletrodo na superfície, sendo desprezível a posição do segundo eletrodo de corrente ($B \rightarrow \infty$) (Adaptado de TELFORD *et. al.*, 1990).

Para dois eletrodos de corrente posicionados na superfície do terreno, as linhas de fluxo de corrente elétrica são perpendiculares, 90° , às linhas de igual valor de potencial elétrico V . Nestas condições, onde dois eletrodos de injeção de corrente elétrica estão posicionados próximos, podendo considerar posições finitas, o potencial elétrico será afetado por ambos os eletrodos de corrente A e B , como ilustra a Figura 4.14.

Nesta nova disposição dos eletrodos de corrente na superfície, o potencial elétrico em algum ponto em subsuperfície é igual à soma das voltagens dos dois eletrodos A e B , onde:

$$V_P = V_A + V_B \quad (\text{Equação 4.9})$$

Onde V_A e V_B são as contribuições do potencial elétrico referentes aos dois eletrodos de corrente elétrica A e B.

Os potenciais elétricos nos eletrodos M e N são descritos pelas Equações 4.10 e Equação 4.11 onde, r_1 é a distância entre os eletrodos $\overline{AM}$, r_2 a distância entre $\overline{NB}$ e $\overline{MB}$, r_3 a distância entre $\overline{AM}$ e $\overline{AN}$, e por final r_4 a distância entre os eletrodos $\overline{NB}$.

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (\text{Equação 4.10})$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right] \quad (\text{Equação 4.11})$$

Figura 4.14 – Prospecção geolétrica através do arranjo de quatro eletrodos. a) Disposição dos quatro eletrodos na superfície do terreno; b) Comportamento do fluxo de corrente elétrica e linhas equipotenciais, perspectiva 2D; c) Comportamento do fluxo de corrente elétrica e linhas equipotenciais numa perspectiva vista num plano. (Adaptado de ORELLANA, 1972; TELFORD, 1990; REYNOLDS, 1997).

Substituindo nas duas equações as respectivas distâncias, temos:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}, \quad \text{por final}$$

temos:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right] \quad (\text{Equação 4.12})$$

Na Equação 4.13, isolamos a variável resistividade elétrica ρ , temos a equação que se pode calcular a resistividade elétrica de um meio homogêneo e isotrópico:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (\text{Equação 4.13})$$

Considerando uma constante K , simplificamos a Equação 4.14, onde obtemos:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} K \quad (\text{Equação 4.14})$$

Onde K é definido como:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$$

A constante K é denominada de fator geométrico, para um arranjo de quatro eletrodos, onde este somente depende das posições dos eletrodos de

injeção de corrente elétrica (A e B) e das posições dos eletrodos de medida de potencial elétrico (M e N).

Num meio homogêneo e isotrópico, se mudarmos as distâncias dos eletrodos (A, B, M, N), obteremos iguais valores de resistividade elétrica, então o potencial elétrico ΔV e a corrente elétrica I se ajustam ao fator geométrico K para produzir o mesmo valor de resistividade elétrica.

Para um meio heterogêneo, como é a realidade da subsuperfície terrestre, um alvo ou corpo a ser investigado não possui dimensões regulares, como área, comprimento e volume. A partir disso não podemos considerar que o meio possui um único valor de resistividade elétrica e sim valores médios de resistividade elétrica, chamado de resistividade elétrica aparente (ρ_a).

Então para meios heterogêneos, temos a Equação 4.15:

$$\rho_a = \frac{\Delta V_{MN}}{I} K \quad (\text{Equação 4.15})$$

Onde K é definido como:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{NB}} \right]^{-1}$$

4.2.4 Propriedades elétricas dos materiais geológicos

É de fundamental importância para os métodos de prospecção geoeletrica conhecer as propriedades eletromagnéticas dos materiais geológicos, solos, rochas e minerais, para somente assim poder melhor interpretar os resultados obtidos através da aquisição geofísica com a caracterização geológica do meio investigado.

O conhecimento dessas propriedades físicas, tanto pode ser adquirido através de ensaios controlados em laboratórios se utilizando dos diversos

materiais geológicos quanto em “situações conhecidas” em campo através dos diversos ensaios de amostragem (diretos e indiretos).

As propriedades eletromagnéticas dos materiais geológicos são expressas pela resistividade elétrica (ρ) que é inversamente proporcional à condutividade elétrica (σ), constante dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (β). Para o método da Eletrorresistividade terão mais relevância as discussões sobre a resistividade elétrica dos materiais (ORELLANA, 1972).

O método da Eletrorresistividade e o método IP são caracterizados pela detecção dos efeitos e distorções produzidos pelo fluxo de corrente elétrica através dos diferentes materiais geológicos que ocorrem em subsuperfície, sendo este fluxo de corrente elétrica gerado artificialmente. Este fluxo de corrente elétrica se propaga em subsuperfície por três formas de condução, Condução Eletrônica, Condução Eletrolítica e Condução Dielétrica. Abaixo é descrito o fenômeno que caracteriza cada uma.

- ◆ Condução Eletrônica: tem ocorrência principalmente nos materiais geológicos que possuem estrutura homogênea, alta concentração de elétrons livres e elevada mobilidade, ou seja, transporte de elétrons através da matriz da rocha devido ao modo de agregação dos minerais e seu grau de impurezas. Ex.: metais e semicondutores.
- ◆ Condução Eletrolítica ou Iônica: principal tipo de condução elétrica nos materiais geológicos, destacando-se no meio poroso, sedimentos inconsolidados e fissuras ou descontinuidades das rochas, pois é devido ao deslocamento dos íons existentes nas soluções contidas nas rochas e solos. Fatores que controlam o fluxo de corrente elétrica através desta solução presente são o fluxo de corrente nos poros, concentração de íons, a valência, a mobilidade e temperatura.
- ◆ Condução Dielétrica: tem sua ocorrência em meios isolantes ou que são fracos condutores de corrente elétrica. Um

fenômeno característico deste tipo de condução é a polarização dielétrica, onde esta se caracteriza pelo deslocamento brusco dos elétrons através da influência de um campo elétrico induzido.

Todos os materiais geológicos possuem um determinado grau de porosidade (rochas sedimentares, sedimentos inconsolidados ou solos) ou descontinuidades em sua estrutura como juntas, fraturas, falhas (rochas ígneas e metamórficas), onde estes podem estar preenchidos por soluções aquosas, se comportando como condutores iônicos, já que a disposição mineralógica conduz mal corrente elétrica, com exceção de algumas rochas com quantidades significativas de alguns minerais como magnetita, pirrotita, entre outros minerais.

As soluções aquosas que preenchem estes espaços ou vazios nos materiais geológicos na maioria dos casos são compostas por água, adicionada de sais minerais dissolvidos, onde estes contribuem consideravelmente para o decréscimo dos valores de resistividade elétrica.

De acordo com McNeill (1980) o fluxo de corrente elétrica nos materiais geológicos é do tipo iônico ou eletrolítico e acontece em relação ao percentual de saturação em água e a porosidade da matriz do material.

Os materiais geológicos (solos e rochas) possuem um vasto intervalo de variação de resistividade elétrica, ilustrado pela Figura 4.15, onde estes intervalos dependem dos seguintes fatores:

- ◆ Porosidade do material;
- ◆ Composição mineralógica dos materiais geológicos;
- ◆ Textura do material, quantidade de poros preenchidos por água, distribuição dos poros, interconectividade entre os poros ou entre as estruturas da rocha;
- ◆ Quantidade, natureza dos sais dissolvidos, concentração de Totais Dissolvidos de Sólidos (TDS) na solução aquosa;
- ◆ Temperatura e estado da solução aquosa contida nos poros ou nas estruturas das rochas.

Figura 4.15 – Intervalo de valores de resistividade elétrica de alguns materiais geológicos e em materiais naturais (Adaptado de ORELLANA, 1972; PALACKY, 1987).

4.3 Método da Polarização induzida (IP)

4.3.1 Introdução e histórico

De acordo com Sumner (1976) o método da Polarização Induzida é caracterizado por ser um fenômeno elétrico que se manifesta a partir do estímulo do meio físico através de uma corrente elétrica e sua resposta observada como o retardamento na perda de voltagem nos materiais quando é interrompido o fluxo de corrente.

Essa primeira observação do retardamento da perda de voltagem nos materiais data do ano de 1920, através do engenheiro francês Conrad Schlumberger, ao realizar investigações geofísicas se utilizando dos métodos geoeletricos na procura de sulfetos. Este observou durante a prospecção

geoelétrica que ao interromper a injeção de corrente elétrica, o campo elétrico gerado artificialmente não cessava instantaneamente mas sim de forma lenta. A denominação do nome Polarização Induzida (*Polarisation provoquée*) originou-se na tradução do trabalho de Conrad Schlumberger, *Étude sur la prospection électrique du sous-sol*, publicada em 1920.

A aplicação do método IP tem sua origem, historicamente, na prospecção geofísica através da procura de minerais metálicos, onde se destaca o trabalho de doutoramento de Harold O. Siegel em 1949, patrocinado pela empresa *Newmont Mining Co.* (SUMNER, *op. cit.*; ORELLANA, 1972).

Sumner (*op. cit.*) destaca também que entre os anos de 1955 e 1960, a aplicação do método IP desperta o interesse de diversas instituições de pesquisa, empresas e universidades por causa dos resultados satisfatórios para com a utilização do método na procura de bens minerais.

Slater & Lesmes (2002) cita o longo tempo na aquisição dos dados por causa da instrumentação rebuscada (uso de eletrodos não polarizáveis e equipamentos com maior precisão de medidas), a não disponibilidade de rotinas de inversão 2D e 3D para interpretação dos dados e finalmente o não total entendimento dos fenômenos físico-químicos que ocorrem em subsuperfície que influem no fenômeno IP. Tais fatores, em décadas passadas, contribuíram para não utilização do método IP em investigações geoambientais.

Além da clássica aplicação do método da Polarização Induzida na procura de bens minerais metálicos, nos dias de hoje é destacada a aplicação do método em investigações geoambientais, como contaminação da subsuperfície terrestre por derivados de hidrocarbonetos (ATEKWANA *et. al.*, 2000; SLATER; LESMES, 2002; BRAGA; CARDINALI, 2005; AAL *et. al.*, 2006;), contaminação por disposição inadequada de resíduos urbanos e industriais (MOURA, 2002; LAGO, 2004; SOGADE *et. al.*, 2006;) e intrusão da cunha salina em regiões costeiras.

De acordo com Sogade *et. al.* (2006) a medida do fenômeno da Polarização Induzida em investigações ambientais, foco principal deste trabalho, depende diretamente da distribuição, concentração e tipo dos contaminantes presentes na subsuperfície. O fenômeno IP possui comportamentos diferentes de acordo com as propriedades físicas e químicas

dos materiais naturais encontrados na subsuperfície, sendo de total importância o conhecimento do fenômeno IP e das propriedades físico-químicas do meio para melhor caracterizar as respostas observadas.

4.3.2 Fundamentos teóricos

O método da Polarização Induzida (IP) se baseia num efeito ou fenômeno elétrico onde ao se injetar um determinado valor de corrente elétrica I na superfície do terreno através de eletrodos metálicos, A e B , num determinado tempo, num local onde há um meio condutor, ao se cessar a injeção de corrente elétrica, a diferença de potencial elétrico ΔV , entre M e N , não desaparece imediatamente, mas sim atenuada de forma gradual com uma constante de tempo de várias dezenas de segundos (ORELLANA, 1974; SUMNER, 1976). O método IP possui uma resposta muito pequena a esse retardamento da voltagem no momento da interrupção de corrente elétrica.

A medida do parâmetro de IP pode ser realizada no domínio do tempo, chamado de IP - Domínio do Tempo, e no domínio da frequência, IP – Domínio da Frequência. Neste trabalho, será dada mais relevância no modo IP – Domínio do Tempo (*On+/Off/On-/Off cycle*).

A partir do formato da onda de corrente elétrica (Figura 4.16), em investigações se utilizando o método IP no domínio do tempo, os valores máximos de voltagem durante o envio de corrente elétrica (*On+ / On- cycle*) traz informações sobre a resistividade elétrica aparente dos materiais. Quando se interrompe a corrente elétrica (*Off cycle*) mede-se o efeito de polarização dos materiais naturais (WARD, 1990).

Figura 4.16 – Formato da onda de corrente elétrica transmitida e o sinal recebido (Modificado de WARD, 1990).

No modo IP – Domínio do tempo, as medidas de campo são realizadas a partir de um arranjo de quatro eletrodos convencionalmente chamados de **A e B**, **M e N**, fixos na superfície do terreno, onde dois eletrodos (**A e B**) injetarão no solo um determinado valor de corrente elétrica e os outros eletrodos (**M e N**) são submetidos a uma diferença de potencial elétrico primário ΔV_p , a partir disso ocorre à polarização do meio investigado.

O potencial elétrico primário ΔV_p não se anula e nem se manifesta instantaneamente no momento da interrupção da corrente elétrica no solo, mas

sim varia em função do tempo $\Delta V_{IP} = f(t)$, também chamada de Curva de Descarga IP, como ilustra a Figura 4.17.

Figura 4.17 – Formato da onda de corrente elétrica (*On+/Off/On-/Off cycle*) e a representação do efeito IP - Variação de potencial elétrico ΔV em função do tempo t , ilustrando o momento de interrupção da passagem de corrente elétrica (*Off cycle*) e o retardamento da perda de voltagem (Modificado de SUMNER, 1976; BRAGA, 1997).

A Curva de Descarga IP, $\Delta V_{IP} = f(t)$, possui uma amplitude que varia com o meio onde está sendo investigado, ou seja, está relacionada diretamente com a capacidade que os materiais naturais têm de se polarizar. A forma de se medir o efeito da Polarização Induzida no domínio do tempo, é comparando os valores de diferença de potencial elétrico residual existente num determinado espaço de tempo t após a interrupção de corrente elétrica ao potencial primário.

Os valores medidos da $\Delta V_{IP}(t)$ são muito menores que os valores da ΔV_p , e a relação entre ambos pode ser expresso pelo parâmetro denominado cargabilidade (M), que é forma mais utilizada para se expressar a resposta IP dos materiais naturais (TELFORD *et. al.*, 1990).

Parasnis (1986) definiu o termo cargabilidade como a área sob a curva de potencial transiente entre um intervalo de tempo definido, t_1 e t_2 . A cargabilidade é definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo determinado, e descrito pela Equação 4.16, abaixo:

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt \quad (\text{Equação 4.16})$$

A cargabilidade é uma resposta que pode ser dada em miliVolt por Volt (mV/V), valores percentuais (Porcentual IP) ou em Integral Tempo-transiente (TELFORD, *op. cit.*). Para se ter resultados consideráveis fora do nível de ruído ou evitar a perda da sensibilidade da detecção do equipamento, a $\Delta V_{IP}(t)$ deve ser medida num intervalo de tempo t entre 0.1 e 10 segundos.

4.3.3 Fontes dos efeitos de Polarização Induzida

Os materiais naturais possuem propriedades físicas (elétricas, magnéticas), químicas, mecânicas, que interferem ou auxiliam diretamente na passagem de corrente elétrica.

Para a manifestação do fenômeno IP há dois efeitos que possuem propriedades físico-químicas que podem explicar a origem da polarização dos materiais naturais, a polarização de membrana ou também chamada de eletrolítica e a polarização metálica ou eletrônica.

Polarização de membrana

A polarização de membrana ou eletrolítica constitui o chamado efeito “IP Normal”, onde ocorre em materiais com ausência de substâncias metálicas, ou seja, rochas ou sedimentos inconsolidados que não possuam minerais metálicos, portanto possui o mecanismo da condução eletrolítica, descrito nesse capítulo. Sua manifestação se dá devido a mobilidade entre cargas iônicas, ânions e cátions, por isso é mais pronunciado o efeito de polarização de membrana em argilas (Figura 4.18). O efeito de polarização em argilas não aumenta de forma uniforme com a sua maior concentração, mas atinge uma saturação máxima e o efeito IP tem um decréscimo.

Segundo VACQUIER (1957, *apud* MOURA, 2002), vários tipos de argilas fornecem respostas diferentes em relação ao efeito da polarização de membrana, exemplos são citados para a montmorilonita (valores altos) e caolinita (valores baixos).

Figura 4.18 – Efeito da polarização de membrana em escala dos poros dos materiais geológicos. a) Comportamento dos íons no poro da rocha antes de ser afetado por um determinado campo elétrico; b) Comportamento dos íons a um determinado campo elétrico. (Modificado de TELFORD *et. al.*, 1990).

De acordo com estudos de prospecção de águas subterrâneas realizados por Draskovits (1990 *apud* MOURA, 2002), se utilizando dos métodos da Eletrorresistividade e IP, mostra a relação entre resistividades elétrica aparente e as respostas IP aparente, onde o autor observou:

- ♦ A resposta IP é maior em camadas com misturas de areia e argila do que em camadas argilosas;
- ♦ Camadas arenosas possuem altos valores de resistividade elétrica e resposta IP intermediária;
- ♦ Camadas siltosas possuem altos valores de resposta IP e valores médios de resistividade elétrica;
- ♦ Argilas puras possuem valores baixos de resistividade elétrica e baixa resposta IP.

A Figura 4.19 ilustra as relações entre resistividade elétrica aparente e a resposta IP de alguns sedimentos inconsolidados, observados por Draskovits (*op. cit.*).

Figura 4.19 – Relação entre resistividade elétrica aparente e a resposta IP de alguns materiais geológicos (DRASKOVITS, 1990 *apud* MOURA, 2002).

Polarização eletrônica ou metálica

O efeito de polarização eletrônica ou metálica ocorre quando há existência de minerais metálicos, como os sulfetos (pirita, pirrotita, calcopirita, galena e grafita, que apresentam alta condutividade eletrônica, nos materiais geológicos, ou seja, na matriz da rocha. O comportamento do fluxo de corrente elétrica neste tipo de efeito é parte eletrônico, parte eletrolítico.

Esse comportamento pode ser explicado devido a reações químicas que ocorrem na interface desses minerais metálicos quando submetidos a uma determinada corrente elétrica, ou seja, trocas catiônicas na interface do mineral com a solução eletrolítica, onde a condução eletrônica passar a ser eletrolítica e o contrário também acontece, como ilustra a Figura 4.20. Esse efeito também pode ser chamado de “sobretensão”.

Figura 4.20 – Polarização de eletrodo. a) Comportamento dos íons no poro da rocha ao ser submetido a um determinado campo elétrico; b) Comportamento dos íons na interface do mineral ao ser submetido a um determinado campo elétrico. (Modificado de TELFORD *et. al.*, 1990).

4.4 Técnicas de aquisição dos dados

A prospecção geolétrica, neste trabalho caracterizado como a medida da resistividade elétrica aparente e da cargabilidade aparente dos materiais geológicos, pode ser realizada de diferentes técnicas, se utilizando de diferentes tipos de disposição dos eletrodos na superfície do terreno ao longo de poços. Os equipamentos utilizados para realizar as medidas de resistividade elétrica e de cargabilidade dos materiais geológicos são compostos geralmente por um módulo de controle (controle da emissão de corrente, conexões dos cabos que conectam os eletrodos de corrente elétrica e eletrodos de potencial elétrico) e um módulo de gerador de tensão.

Na prospecção geolétrica há três tipos de técnicas de aquisição dos dados: a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), o Caminhamento Elétrico (CE) e a Perfilagem Elétrica.

A técnica do Caminhamento Elétrico (Figura 4.21a) investiga a subsuperfície de modo lateral, ou seja, caracteriza a variação lateral da resistividade elétrica e cargabilidade dos materiais, realizando um “imageamento” em duas dimensões do meio investigado, caracterizando assim estruturas sub-verticais e/ou horizontais.

A Sondagem Elétrica Vertical ilustrada pela Figura 4.21b, é aplicada quando o objetivo é caracterizar a variação vertical da resistividade elétrica e cargabilidade da subsuperfície, ideal para caracterizar estruturas horizontais, como camadas plano-paralelas (Bacias Sedimentares).

A Perfilagem Geofísica é realizada ao longo de poços perfurados na superfície do terreno, onde o interesse é investigar a variação do parâmetro físico, nesse caso resistividade elétrica e cargabilidade, dos materiais geológicos *in situ*, assim facilitando a interpretação dos dados geofísicos com os dados geológicos em tempo real.

Figura 4.21 – Técnicas de aquisição de dados mostrando a relação da configuração dos eletrodos na superfície do terreno e os pontos investigados na subsuperfície: a) Técnica do Caminhamento Elétrico (CE) utilizado para investigar a variação lateral de resistividade elétrica e cargabilidade; b) Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) utilizado para investigar a variação vertical da resistividade elétrica e cargabilidade.

Para as três técnicas citadas, SEV, CE e Perfilagem Geofísica, as investigações podem ser unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) (Figura 4.22). Para a SEV, somente se pode realizar investigações 1D. A técnica do CE pode-se realizar investigações 2D e quase-3D, neste último caso vários perfis de CE paralelos podem ser interpolados resultando assim num resultado 3D do parâmetro medido. A Perfilagem Geofísica além de investigações 1D, atualmente há também utilização de investigações 2D e 3D ao longo de poços está sendo muito utilizado devido ao desenvolvimento de *softwares* de interpretação quantitativa (DAILY; OWEN, 1991; DECEUSTER *et. al.*, 2006; INGHAM *et. al.*, 2007).

Investigações 1D não são vantajosas por não detalhar a variação dos valores do parâmetro medido lateralmente, nesse caso se pode utilizar técnicas de imageamento 2D ou 3D. A prospecção geoeletrica 2D quando comparada com a 3D é mais vantajosa pelo tempo de aplicabilidade e o custo de operação da técnica.

Figura 4.22 – Modos de investigar a subsuperfície se utilizando da prospecção geoeletrica (Modificado de LOKE, 2000).

Para essas técnicas de aquisição há uma vasta forma de dispor os eletrodos na superfície do terreno ou ao longo de poços. A Figura 4.23 ilustra os arranjos de eletrodos mais utilizados em investigações 1D, 2D e pseudo-3D com os métodos da Eletrorresistividade e IP.

Figura 4.23 – Arranjos de eletrodos utilizados em investigações geoeletricas, ilustrando as possíveis configurações dos eletrodos de injeção de corrente elétrica (A e B) e eletrodos de medida de potencial elétrico (M e N) (Modificado de LOKE, 2000).

CAPÍTULO 04 – Métodos geofísicos

Para escolha ideal do arranjo eletródico e qual espaçamento entre eletrodos utilizar em investigações através dos métodos das Eletrorresistividade e IP, vários fatores tem que ser avaliados como profundidade e geometria do alvo, razão sinal/ruído, melhor resolução lateral e em profundidade e outros fatores não menos importantes.

Cogon (1973) avaliou as potencialidades dos arranjos eletródicos Gradiente, Dipolo-dipolo e Polo-dipolo através de simulações numéricas através do método de Elementos Finitos, na finalidade de obter melhores condições de aquisições em campo através do método IP. O autor através das simulações numéricas considerou o arranjo Dipolo-dipolo que apresentou melhor resolução para as anomalias (magnitude da resposta), melhor sensibilidade na profundidade de investigação. Já o arranjo Gradiente mostrou melhores respostas quanto à resolução de estruturas horizontais e estruturas inclinadas. O arranjo Polo-dipolo apresentou o menor desempenho comparado aos demais arranjos.

Ward (1990) apresenta os critérios para a escolha do melhor arranjo eletródico a ser utilizado em investigações geofísicas (Eletrorresistividade e IP), onde estes são:

- ◆ Razão sinal/ruído;
- ◆ Acoplamento Eletromagnético;
- ◆ Sensibilidade lateral;
- ◆ Resolução de estruturas inclinadas;
- ◆ Resolução de estruturas horizontais;
- ◆ Profundidade de investigação;
- ◆ Sensibilidade da profundidade do alvo;
- ◆ Sensibilidade a estruturas inclinadas;
- ◆ Sensibilidade a heterogeneidades superficiais (SEV);
- ◆ Sensibilidade a heterogeneidades superficiais (CE);
- ◆ Sensibilidade ao topo rochoso;
- ◆ Sensibilidade a efeitos laterais;
- ◆ Sensibilidade a variação topográfica.

Os critérios apresentados por Ward (*op. cit.*) foram avaliados para os arranjos eletródicos Gradiente, Dipolo-dipolo, Polo-dipolo, Schlumberger e Wenner. A Tabela 3.40 abaixo, ilustra esta avaliação.

Tabela 4.10 – Avaliação de alguns arranjos eletródicos utilizados em investigações com o método da Eletorresistividade e IP (WARD, 1990).

Critérios Analisados	Arranjos Eletródicos				
	G	DD	PD	S	W
Razão sinal/ruído	3	5	4	2	1
Acoplamento EM	3	1	2	4	5
Resolução de estruturas inclinadas	1	4	5	2*	3*
Resolução de camadas horizontais	5	2	2	1	1
Profundidade de exploração	†	†	†	†	†
Sensibilidade a profundidade do alvo	5	2	3	1	1
Sensibilidade a estruturas inclinadas	1	4	5	2	2
Sensibilidade a heterogeneidades superficiais (Caminhamento elétrico)	5	2	1	3	3
Sensibilidade a heterogeneidades superficiais (Sondagem Elétrica Vertical)	---	4	3	1	2
Sensibilidade ao topo rochoso	5	1	2	3*	3*
Sensibilidade a efeitos laterais	†	†	†	†	†
Sensibilidade a efeitos topográficos	†	†	†	†	†

Onde: G = Gradiente; DD = Dipolo-dipolo; PD = Polo-dipolo; S = Schlumberger; W = Wenner; 1 = Melhor; 2 = Segundo melhor; 3 = Terceiro melhor; 4 = Quarto melhor; 5 = Pior; (3*) = Incerteza em estimar; † = Total incerteza em estimar.

Na avaliação apresentadas por Cogon (*op. cit.*) e Ward (*op. cit.*), os arranjos eletródicos mostraram melhor desempenho de modo geral, menor razão sinal/ruído, sensibilidade em identificar heterogeneidades, sensibilidade do alvo, resolução de camadas horizontais, sensibilidade ao topo rochoso, maior magnitude na resposta do parâmetro, foram os arranjos Dipolo-dipolo e Polo-dipolo.

4.5 Profundidade de investigação

Os arranjos eletródicos possuem profundidades específicas de investigação, independente da técnica de campo utilizada para aquisição.

Segundo Ward (1990), a profundidade de investigação ou exploração é definida como a profundidade máxima com que um determinado alvo pode ser detectado com um determinado arranjo. Para isso efetivamente ocorrer, é preciso se ter um pré-conhecimento das propriedades físicas e geométricas do alvo a ser investigado.

Telford *et. al.* (1990) descreve que para uma determinada profundidade a ser investigada se faz necessário que o espaçamento entre eletrodos seja maior que a profundidade, pois assim se consegue obter informações do parâmetro medido e limitar o alvo por completo.

Alguns fatores podem influenciar o fluxo de corrente em subsuperfície e assim consequentemente, influenciando na profundidade de investigação. Esses fatores são: heterogeneidades dos materiais e estruturas geológicas, variações topográficas do terreno e ruídos naturais ou instrumentais. Devido a esses fatores que influenciam na profundidade de investigação, podemos dizer que a essa profundidade é dita teórica, pois na maioria das vezes não reflete a posição real do alvo investigado e a sua verdadeira resistividade elétrica ou cargabilidade.

Destacam-se na literatura os trabalhos de Roy & Apparao (1971), Edwards (1977), Barker (1989), Oldenburg & Li (1999) que através de simulações numéricas e experimentos controlados em laboratório identificaram e caracterizaram a relação da profundidade de investigação, a configuração dos arranjos eletródicos e os fatores que influenciam na medida do parâmetro em sua profundidade real.

Segundo Roy & Apparao a profundidade máxima de investigação é a profundidade de contribuição do sinal medido.

Atualmente a técnica mais atualizada para interpretação quantitativa quanto se referida a profundidade de investigação é a apresentada por Edwards (*op. cit.*) em seu trabalho, utilizando as definições determinadas por Roy & Apparao (*op. cit.*) através da DIC (*Depth of Investigation Characteristic*)

CAPÍTULO 04 – Métodos geofísicos

determinou para um modelo homogêneo de terra que a relação da profundidade média de investigação está relacionada com 50 % do sinal medido na superfície.

O autor ainda observou através dos testes que sobre um mesmo perfil de caminhamento elétrico se utilizando de diferentes espaçamentos entre eletrodos podem ser combinados numa única pseudo-seção, sendo denominada de Pseudo-seção Modificada.

A Pseudo-seção Modificada definida por Edwards (*op. cit.*) possui vantagens como maior razão sinal/ruído no conjunto de dados, podendo combinar investigações mais precisas, como exemplo investigações que requerem maior adensamento de dados mais próximo a superfície e maior profundidade de investigação. Gandolfo & Gallas (2006) mostraram através de aquisições de campo com diferentes espaçamentos de eletrodos para um mesmo perfil de Caminhamento Elétrico que é possível à metodologia proposta por Edwards (*op. cit.*).

Edwards (*op. cit.*) ainda observou que através dos testes empíricos e testes com dados reais que as profundidades efetivas de investigação para o arranjo Polo-polo é maior que a dos arranjos Polo-dipolo, Wenner e Dipolo-dipolo. A Tabela 3.50 ilustra profundidades efetivas de investigação propostas por Edwards (*op. cit.*) para algumas configurações eletródicas.

Tabela 4.11 – Profundidades de investigação da subsuperfície para diversas configurações de eletrodo (EDWARDS, 1977).

Arranjo Eletródico	Z_e/a	Z_e/L
Dipolo-Dipolo		
$n = 1$	0.416	0.139
$n = 2$	0.697	0.174
$n = 3$	0.962	0.192
$n = 4$	1.220	0.203
$n = 5$	1.476	0.211
$n = 6$	1.730	0.216
$n = 7$	1.983	0.220
$n = \infty$	-----	0.250
Polo-dipolo (AB = 20a)		
$n = 1$	0.517	0.023
$n = 2$	0.915	0.040
$n = 3$	1.293	0.054
$n = 4$	1.658	0.066
$n = 5$	2.013	0.077
$n = 6$	2.359	0.087
Dipolo Equatorial		
$n = 1$	0.451	0.319
$n = 2$	0.809	0.362
$n = 3$	1.180	0.373
$n = 4$	1.556	0.377
$n = 10$	3.84	0.383
$n = \infty$	-----	0.384
Wenner	0.519	0.173
Schlumberger		
Ideal, $a \rightarrow 0$	-----	0.192
$L = 40a$	7.66	0.192
$L = 20a$	3.82	0.191
$L = 10a$	1.90	0.190
Gradiente		
$L = 40a, x^* = 20a$	7.66	0.192
$L = 40a, x^* = 15a$	6.52	0.163
$L = 40a, x^* = 10a$	4.14	0.103
Polo-polo		
(A e N $\rightarrow \infty$)	0.867	-----
$L = 40a, y^{**} = 20a$	0.777	0.019
$L = 20a, y^{**} = 10a$	0.724	0.036
$L = 10a, y^{**} = 5a$	0.627	0.063
$L = 40a, y^{**} = 10a$	0.758	0.019

Onde: Z_e : profundidade efetiva de investigação; a : espaçamento entre os eletrodos; L : espaçamento entre os eletrodos mais externos (aquisição *in-line*); * x corresponde ao ponto médio entre os eletrodos de corrente elétrica, para o intervalo para $L/3 < x < L/2$; ** y corresponde à distância entre o centro do arranjo aos eletrodos externos.

4.6 Técnica do Caminhamento Elétrico

Neste tópico, a discussão será realizada com mais importância à técnica do Caminhamento Elétrico (CE), técnica aplicada para aquisição dos dados geofísicos na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP.

A aplicação da técnica de CE se realiza através de uma cobertura de medidas ao longo de um perfil, onde os eletrodos de injeção de corrente elétrica (A e B) e os eletrodos de medida de potencial elétrico (M e N) são fixados ao longo na superfície do terreno.

Os eletrodos de injeção de corrente elétrica são feitos de material metálico (aço inox ou cobre), ilustrado através da Figura 4.24, para facilitar a passagem de corrente elétrica.

Figura 4.24 – Ilustração do eletrodo de injeção de corrente elétrica, feito a partir de material metálico.

Os eletrodos de medida de potencial elétrico podem ser metálicos, material cerâmico ou material PVC (Figura 4.25). Os dois últimos são ditos eletrodos não-polarizáveis ou eletrodos porosos, pois são constituídos por material não-polarizável.

Conrad Schlumberger foi o primeiro a introduzir o conceito de eletrodo não-polarizável (SCHLUMBERGER, 1920 *apud* PETIAU; PERRIER, 1998).

Schlumberger utilizou em investigações geofísicas em anos posteriores eletrodo não-polarizável de Sulfato de cobre (CuSO_4).

O conceito de eletrodo não-polarizável consiste numa haste metálica imerso numa solução (eletrólito) de mesma composição da haste. O contato dos eletrodos com o solo não se dá pelo metal e sim por material poroso (cerâmica, madeira, etc.) na que fica em sua base, onde este controla a passagem do eletrólito para o solo. A polarização se dá entre o eletrólito do eletrodo e o eletrólito presente no solo, evitando assim a adição do potencial gerado caso o eletrodo fosse de material metálico (PETIAU; PERRIER, 1998).

Há vários tipos de eletrodos não-polarizáveis, citando eletrodos do tipo “metal-sal metal” (Cu/CuSO_4 , Cd/CdCl_2 ou $\text{Cd}/\text{Cd SO}_4$), ou seja, a haste metálica da mesma composição do eletrólito. O segundo tipo é quando o eletrólito possui um sal adicional, exemplos $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$, Ag/AgCl e $\text{Pb}/\text{Pb}_2\text{Cl}_2$.

A solução deve ser uma solução saturada que pode ser sulfato de cobre (CuSO_4), sulfato de prata (AgSO_4) ou cloreto de chumbo (Pb_2Cl_2), utilizados para evitar efeitos de polarização junto ao eletrodo metálico (eletrodos de injeção de corrente elétrica) no contato com o solo, o que resultaria em valores de potenciais elétricos de mesma magnitude daqueles que estão sendo medidos. A razão para a utilização deste tipo de eletrodo em termos de valores de potencial elétrico medido é de diminuir a razão sinal/ruído em determinadas investigações, como em medidas de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial espontâneo em estudos ambientais e hidrogeológicos.

Figura 4.25 – Ilustração do eletrodo não-polarizável de sulfato de cobre (CuSO_4) utilizado para medidas de potencial elétrico.

Para realizar a primeira medida do parâmetro interessado através da técnica do Caminhamento Elétrico, os eletrodos de corrente elétrica são espaçados a uma distância “a” dos eletrodos de medida do potencial elétrico. Após ser realizado a primeira medida, os eletrodos de medida de potencial elétrico são movidos a uma distância 2a, mantendo-se fixo os eletrodos de corrente elétrica. Para a terceira medida os eletrodos de potencial elétrico são movidos a uma distância 3a, realizando a terceira medida e assim sucessivamente. Este processo, ilustrado anteriormente pela Figura 4.21a, se repete conforme o objetivo da investigação, ou seja, qual a profundidade e distância em superfície do alvo a ser investigado, já que quanto mais distante os eletrodos de medida de potencial elétrico estiverem dos eletrodos de injeção de corrente, maior a será a profundidade investigada. Ao realizar essa rotina de aquisição por um longo perfil, terá se investigado lateralmente a variação de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente do meio.

Atualmente os nomes Tomografia Elétrica 2D ou Imageamento Elétrico 2D estão sendo utilizados por muitos pesquisadores para se referir a técnica de aquisição do Caminhamento Elétrico. Essa nova nomenclatura é devido ao uso de equipamentos mais sofisticados e automatizados (aquisição multi-eletródica) para a aquisição de dados de Eletorresistividade e Polarização Induzida.

Aquisições de campo se utilizando de resistivímetros multi-eletródicos estão sendo usadas nas mais diversas áreas de estudos, como áreas de complexa geologia, estudos ambientais, estudos de engenharia e etc. (GRIFFITHS; BARKER, 1993; DAHLIN, 1993; DAHLIN, 2001). As vantagens para aquisições multi-eletródicas são a rápida aplicação das técnicas de aquisição de campo (SEV, CE e Perfilagem Elétrica), a utilização de sub-rotinas de aquisição, possibilitando assim utilizar diferentes parâmetros de aquisição (arranjos eletródicos, espaçamento entre eletrodos e níveis de investigação), consequentemente diminuindo o tempo de aquisição, e por final, pela grande capacidade de armazenamento do volume de dados na memória destes equipamentos. O uso de aquisições multi-eletródicas permite também a aplicação integrada de investigações 1D, 2D e 3D.

Atualmente há equipamentos disponíveis comercialmente que trabalham com até 96 eletrodos conectados ao longo de um perfil (IRIS INSTRUMENTS, 2003). A Figura 4.26 ilustra uma rotina de aquisição multi-eletródica.

Figura 4.26 – Ilustração de uma Tomografia Elétrica ou Imageamento Elétrico 2D se utilizando da técnica do Caminhamento Elétrico através de um resistivímetro de aquisição multi-eletródica.

CAPÍTULO 05

Interpretação & Aquisição dos dados

5.1 Interpretação dos dados

5.1.1 Interpretação qualitativa – Pseudo-seção

A interpretação de dados geofísicos pode ser realizada de forma qualitativa e quantitativa, não sendo diferente para investigações 2D se utilizando dos métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida (IP). A interpretação qualitativa 2D para os métodos da Eletrorresistividade e o método IP, têm como objetivo identificar, diferenciar e delimitar zonas anômalas em dados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente.

Mais comumente os resultados obtidos através dos métodos citados acima são plotados graficamente denominada de “Pseudo-seção” de resistividade elétrica aparente e/ou cargabilidade aparente, técnica proposta por Hallof (1957, *apud* GRIFFITHS; BARKER, 1993), onde cada ponto investigado na subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica, isso de acordo com o espaçamento entre eletrodos e o arranjo eletródico utilizado na investigação.

A utilização da interpretação qualitativa através de pseudo-seções pode ocasionar interpretações ambíguas pois não reflete a distribuição de resistividade elétrica ou cargabilidade verdadeira e nem a profundidade real do meio investigado. Para este tipo de interpretação é imprescindível o uso da integração de informações diretas para se diminuir as ambigüidades geofísicas.

A Figura 5.10 ilustra a forma de plotagem de uma pseudo-seção de resistividade elétrica e cargabilidade com o arranjo Dipolo-dipolo ($a = 1$ metro; $n = 5$).

Figura 5.10 – Representação gráfica para interpretações qualitativas utilizadas em investigações 2D de Eletrorresistividade e IP se utilizando o arranjo Dipolo-dipolo ($a = 1$ metro; $n = 5$): a) Relação entre o espaçamento entre eletrodos e a profundidade teórica de investigação; b) Representação gráfica de investigações 2D de Eletrorresistividade e IP (Pseudo-seção).

5.1.2 Interpretação quantitativa - Método da inversão

Até década de 1990 somente existiam disponíveis comercialmente *softwares* que possibilitavam a interpretação qualitativa de dados de resistividade elétrica e cargabilidade. O significativo avanço tecnológico, tanto na eletrônica e na informática, ocorrido nas últimas décadas proporcionaram o surgimento de programas computacionais que realizam interpretação quantitativa, promovendo assim também o desenvolvimento de equipamentos de aquisição mais sofisticados, resultando num aumento da aplicação de investigações 1D, 2D e 3D dos métodos da Eletrorresistividade e IP.

O desenvolvimento de *software* que utilizam técnicas de modelagem numérica com o método da inversão para a interpretação quantitativa 2D de dados de resistividade elétrica e cargabilidade, tanto no domínio do tempo e no

domínio da frequência (INMAN, 1975; PELTON; *et. al.*, 1978; BARKER, 1992, OLDENBURG; LI, 1994; BEARD; TRIPP, 1995; LOKE; BARKER, 1995, 1996a; LOKE; *et. al.*, 2006; ATHANASIOU; *et. al.* 2007) permitem a obtenção de modelos da subsuperfície terrestre com uma melhor resolução espacial, melhor definição da geometria do alvo, e maior precisão quanto à profundidade investigada ao ser comparado com a interpretação qualitativa.

A interpretação quantitativa se utiliza de técnicas numéricas através do método da inversão, onde a partir dos dados de campo se busca o melhor modelo que se aproxime dos dados reais.

De acordo com Loke (2004) para se determinar a distribuição em subsuperfície de resistividade elétrica verdadeira se utiliza a técnica de inversão. A inversão de dados de resistividade elétrica e cargabilidade têm como objetivo, a partir de métodos matemáticos, obter um modelo de distribuição dos parâmetros medidos em subsuperfície similares aos valores medidos em campo, conseqüentemente um modelo da subsuperfície com melhor acurácia se comparado com a interpretação qualitativa.

Atualmente através da implementação da teoria da inversão através de algoritmos computacionais e também do avanço tecnológico dos microprocessadores, a agilidade e a capacidade de processamento matemático para um grande volume de dados é possível, produzindo assim uma interatividade do usuário com os resultados durante a aquisição dos dados. A Figura 5.11 ilustra a rotina básica de um algoritmo de inversão para dados de resistividade elétrica (NARAYAN *et. al.*, 1994).

Figura 5.11 – Rotina básica para um algoritmo de inversão de dados de resistividade elétrica (Adaptado de NARAYAN *et. al.* 1994)

De acordo com Olayinka & Yaramanci (2000) há dois tipos de inversão mais utilizados na interpretação de dados de Eletorresistividade e IP (investigações 2D), a inversão por suavização (*smooth inversion*) e a inversão por blocos ou polígonos (*block inversion*). Estes tipos de inversão 2D de dados de resistividade elétrica e IP estão implementados comercialmente nos *softwares* RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2003a) e RESIX IP2DI (INTERPEX, 1996), respectivamente. Abordaremos neste trabalho somente o método da inversão por suavização, método implementado no *software* RES2DINV (*op. cit.*), para a interpretação quantitativa dos dados adquiridos nesta pesquisa.

O *software* de inversão 2D de dados de resistividade elétrica e cargabilidade, RES2DINV (*op. cit.*), faz uso do método da inversão por suavização se utilizando do método matemático dos mínimos quadrados.

A inversão por mínimos quadrados utiliza o método de otimização por mínimos quadrados Gauss-Newton (LINES; TREITEL, 1984 *apud* LOKE; BARKER, 1996a) e *quasi*-Newton (BROYDEN, 1972 *apud* LOKE; BARKER, *op. cit.*).

De acordo com deGroot-Hedlin & Constable (1990; *apud* LOKE; BARKER, *op. cit.*) o método matemático da inversão por suavização se utilizando do método de mínimos quadrados (*smoothness-constrained least squares method*) utiliza a inversão baseada em células, ou seja, o *software* reconhece a subsuperfície terrestre como blocos retangulares (*grid*) possuindo valores constantes para o parâmetro investigado.

O arranjo dos blocos está vinculado ao número de pontos investigados em subsuperfície, baseado na pseudo-seção de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente (posição e profundidade teórica dos pontos investigados) (LOKE; BARKER, *op. cit.*). A profundidade teórica para cada ponto investigado é diferente para cada espaçamento entre eletrodos e também para cada arranjo eletródico. O *software* RES2DINV (*op. cit.*) se baseia nos critérios definidos por Edwards (1977) para estimar as profundidades de investigação, descrito no capítulo anterior. A Figura 5.12 ilustra a malha retangular e a posição dos blocos que simulam a subsuperfície terrestre. Para a realização do cálculo da matriz de dados o *software* se utiliza dos métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton (LOKE; BARKER, 1996a).

Figura 5.12 – Modelo bidimensional implementado no *software* RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2003a) onde o *software* reconhece a subsuperfície terrestre como um conjunto de células retangulares onde cada célula possui valores constantes de resistividade elétrica e cargabilidade. (Modificado de LOKE; BARKER, 1995; LOKE, 2002).

5.1.2.1 Método Gauss-Newton

O método Gauss-Newton determina a resistividade elétrica dos blocos retangulares e minimiza a diferença entre os valores de resistividade elétrica medida e a resistividade elétrica calculada através de sucessivas iterações (LINES; TREITEL, 1984 *apud* LOKE; BARKER, *op. cit.*).

O processo matemático utilizado pelo método Gauss-Newton é baseado no cálculo analítico da matriz Jacobiana $\mathbf{J}$ (*Jacobian Matrix*), chamada também de matriz sensibilidade, para um semi-espaco homogêneo. A matriz é novamente calculada usando o método dos elementos finitos a cada nova iteração. A equação que representa o método Gauss-Newton é caracterizada como:

$$(\mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i + \lambda_i \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{p}_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{g}_i - \lambda_i \mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{r}_{i-1} \quad (\text{Equação 5.10})$$

Onde:

$\mathbf{J}_i$ = Matriz Jacobiana de derivadas parciais dos dados de campo;

J_i^T = Transposta de J_i ;

g_i = Vetor discrepância que contém a diferença entre os logaritmos dos valores de resistividade aparente calculados e os observados;

p_i = Vetor perturbação nos parâmetros do modelo;

λ_i = Multiplicador de *Lagrange*, utilizado para diminuir a amplitude de p_i ;

C = Matriz de nivelamento utilizada para minimizar o rigor de p_i .

O segundo termo da Equação 5.10 aplica o contraste de suavização diretamente no vetor do modelo de resistividade (r_{i-1}), garantindo que o modelo seja suavizado para o fator utilizado, reduzindo assim a oscilação nos valores de resistividade elétrica do modelo. Segundo Loke & Barker (1996a) uma desvantagem desse método é tempo muito elevado para o cálculo da matriz para um grande volume de dados.

5.1.2.2 Método *quasi-Newton*

O método *quasi-Newton* é um método de otimização do processo de inversão através do recálculo da matriz Jacobiana para as demais iterações, chamada de *ith* . A matriz Jacobiana Estimada é denominada de B_i e pode ser estimada analiticamente para as demais iterações se utilizando do cálculo da primeira iteração da matriz Jacobiana J (método Gauss-Newton), se baseando num modelo de terra homogêneo para chegar até o modelo desejado. O cálculo da matriz Jacobiana para as demais iterações é denominado de B_{i+1} . A equação que define o método *quasi-Newton*, é descrita abaixo:

$$B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \quad (\text{Equação 5.11})$$

$$\text{Onde } u_i = (\Delta y_i - B_i p_i) / p_i^T p_i$$

B_i = Matriz Jacobiana estimada;

B_{i+1} = Matriz Jacobiana estimada para as demais iterações;

p_i = Vetor perturbação nos parâmetros do modelo;

y_i = Modelo de resposta para as demais iterações;

Δy_i = Mudança no modelo de resposta para as demais iterações;

u_i = Cálculo da matriz pelo Método Broyden.

A aplicação do termo u_i (Método Broyden) na equação reduz drasticamente a velocidade para o cálculo da matriz de dados, pois a razão de convergência para o método *quasi-Newton* é menor do que se comparado com o Gauss-Newton. Em modelos que possuem pequenos contrastes de resistividades, menores que 10:1, não há diferenças no modelo obtido, mas sim no tempo de obtenção do modelo, sendo muito menor se utilizando o método *quasi-Newton* (LOKE; BARKER, 1996a). O método Broyden é melhor descrito e discutido em Broyden (1972) *apud* Loke & Barker (1996a).

Para cada iteração, o usuário do *software* pode optar por calcular novamente utilizando o método Gauss-Newton ou o método *quasi-Newton* ou utilizar um misto dos dois métodos para obter um modelo ideal num tempo de processamento computacional menor. A diferença entre os dados medidos e os dados calculados é expresso pelo erro RMS (*Root Means Square Error*). As diferenças encontradas entre os valores dos dados medidos e os dados calculados são elevadas ao quadrado e somadas. A soma é então dividida pelo número de dados, para que se obtenha a média cuja raiz quadrada fornece um valor característico de erro na mesma unidade dos dados originais. Todo esse procedimento para obtenção do erro RMS é diretamente comparável ao conceito de desvio padrão.

Loke & Barker (1996a) e Loke & Dahlin (2002) em testes realizados através de simulações (modelagens) numéricas e também com dados reais de Eletorresistividade 2D na finalidade de comparação dos dois métodos, Gauss-Newton e *quasi-Newton*, ilustram que o erro RMS não muda significativamente após a terceira iteração e após a quinta iteração, a variação do erro RMS não varia mais que 5 %.

Loke & Dahlin (*op. cit.*) mostram através simulações que a diferença marcante entre os dois métodos é o tempo computacional para obtenção do modelo de resistividade elétrica, pois o método Gauss-Newton requer um tempo maior para cálculo da matriz Jacobiana para todas as iterações quando se comparado com o método *quasi*-Newton.

A rotina convencional para de inversão 2D de dados de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente através do software RES2DINV (*op. cit.*) pode ser descrita através da Figura 5.13, abaixo.

Figura 5.13 – Fluxograma representando a rotina de inversão utilizada pelo software RES2DINV (Adaptado de LOKE; BARKER, 1996a).

Além dos métodos apresentados e discutidos acima para inversão de dados, o *software* RES2DINV utiliza a combinação dos métodos de inversão Marquardt-Occam para reduzir distorções causadas por uma grande variação de resistividade elétrica nas camadas mais superficiais, como exemplo pequenas cavernas ou estruturas vazias de pequeno porte.

Outra questão que afeta a inversão de dados de resistividade elétrica e cargabilidade é a variação topográfica da superfície e da subsuperfície, pois distorce as linhas de fluxo de corrente e as linhas equipotenciais, não refletindo assim o modelo homogêneo de terra onde a teoria foi proposta. A variação

topográfica em levantamentos geofísicos implica do não posicionamento correto em profundidade do alvo e nem a definição correta da sua geometria.

Fox *et. al.* (1980) em seu trabalho observaram que a variação topográfica somente é representativa para investigações através do método da Eletorresistividade e IP em áreas com dez graus de inclinação ou mais em relação ao espaçamento entre eletrodos.

Na inversão de dados de resistividade elétrica e cargabilidade se utilizando do *software* RES2DINV a variação topográfica do terreno pode ser incorporada diretamente no modelo a partir de distorções (uniforme ou suavizada) se utilizando do método de Elementos Finitos ou através da Transformada de Schwarz-Cristoffel (S-C). Ambos os métodos são explicados detalhadamente em Loke (2000a).

5.1.3 Modelagem direta de dados de resistividade elétrica

De acordo com Duarte (2003) há atualmente dois tipos principais de modelagens, a modelagem direta e a modelagem inversa. A primeira representa a simulação do efeito a partir de um modelo físico, ao passo que a segunda tem como objetivo inferir o modelo físico correspondente aos efeitos observados.

A utilização de modelagens diretas no planejamento de investigações 2D se utilizando dos métodos da Eletorresistividade e IP é uma rotina que favorece a escolha dos melhores parâmetros para aquisição de campo (arranjo eletródico e espaçamento entre eletrodos), podendo assim auxiliar no aprimoramento das técnicas numéricas de interpretação quantitativa e no desenvolvimento de equipamentos de aquisição. A modelagem direta somente é possível quando há informações diretas ou indiretas sobre as características físicas do meio ou do alvo a ser investigado, como espessura de camadas geológicas, geometria e profundidade do alvo.

Os trabalhos realizados por Sasaki (1992), Dahlin (1993), Griffiths & Barker (1993), Dahlin & Loke (1998), Olayinka & Yaramanci (2000), Nguyen *et. al.* (2005) fizeram uso de modelagens diretas para dados de resistividade

elétrica e IP se utilizando das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico com objetivos de avaliar a potencialidade da integração das metodologias de modelagens e aquisição nas mais diversas situações de campo (geologia complexa, alvos enterrados, problemas ambientais, e etc.).

Neste trabalho, antes da realização das aquisições de campo, realizou-se a modelagem direta 2D de dados de resistividade elétrica. Para a realização das modelagens utilizou-se o *software* RES2DMOD (GEOTOMO SOFTWARE, 2002) que utiliza o método da modelagem por diferenças finitas (FD). O *software* simula a subsuperfície terrestre como malha regular (*grid*) contendo diversos blocos retangulares, ilustrado anteriormente pela Figura 5.12. O método de diferenças finitas determina o potencial elétrico para os nós desta malha regular de blocos retangulares, sendo *L* os nós na horizontal e *M* os nós na direção vertical. O *software* utiliza uma malha de 2 a 4 nós horizontais por unidade de espaçamento entre eletrodos.

Para o cálculo do potencial elétrico para cada nó o *software* necessita da entrada de valores de resistividade elétrica para cada bloco retangular do modelo, ou seja, um bloco de entrada onde formas geométricas (conjunto de blocos retangulares) onde o usuário define os valores de resistividade elétrica. Os blocos retangulares que formam o bloco de entrada de dados representam estruturas e/ou camadas geológicas e alvos culturais (tubulações, caixas de concreto, alvos arqueológicos e etc.). A partir do cálculo do potencial elétrico para cada nó, o *software* permite calcular a resistividade elétrica aparente para cada bloco retangular, de acordo com o espaçamento de eletrodos e arranjo eletródico definido pelo usuário. Cada bloco retangular representa um ponto de investigação em subsuperfície, onde a profundidade calculada arranjo eletródico para cada espaçamento entre eletrodos é baseado em Edwards (1977). O *software* de modelagem direta, RES2DMOD (*op. cit.*), permite a adição de valores, através de uma distribuição gaussiana, percentuais entre 0 % a 10 % que podem simular heterogeneidades geológicas ou ruídos instrumentais durante uma aquisição de dados.

5.2 Aquisição dos dados

Os dados somente foram adquiridos após realização de toda a etapa de modelagem direta e avaliação dos resultados, que serão apresentados no Capítulo 06, com objetivo de escolher o melhor arranjo eletródico e parâmetros de aquisição que melhor caracterizassem o modelo geológico-geofísico estabelecido. Os critérios para a avaliação de viabilidade para condições técnicas de aquisição foram:

- ♦ Investigação e técnica a ser aplicada;
- ♦ Equipamento disponível para aquisição;
- ♦ Relação tempo de aquisição/ arranjo eletródico e parâmetros de aquisição/resultados satisfatórios.

Apesar dos bons resultados obtidos com os arranjos DD, DD-E, PD e W-B não foi possível realizar a aquisição para todos os arranjos, devido ao tempo escasso de aquisição e também por limitações técnicas já que as configurações eletródicas DD-E e W-B somente são possíveis realizar a aquisição, de acordo com os critérios estabelecidos acima, com equipamentos totalmente automatizados (multi-eletródicos). A partir de toda esta avaliação, resultados das modelagens diretas e condições técnicas de aquisição, foram selecionados os arranjos DD e PD com os parâmetros de aquisição $a=10$ metros e $n=5$; $a=5$ metros e $n=10$.

A realização da aquisição dos dados de campo se deu em duas etapas, a primeira etapa de campo foi realizada no mês de junho de 2006 e a segunda etapa no mês de novembro do mesmo ano.

Para a avaliação da contaminação foram repetidos os ensaios geofísicos nas linhas C1, C2 e C3 de Elis (1999) com o método da Eletrorresistividade e Polarização Induzida, utilizando-se da técnica do Caminhamento Elétrico (CE), se utilizando do arranjo eletródico dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 10 metros.

A linha C1 está localizada ao longo da rodovia, fora da área onde os resíduos eram dispostos, enquanto que as linhas C2 e C3 se encontram dentro da área onde os resíduos eram dispostos, perfis que cortam

perpendicularmente as duas cavas de resíduos. A Figura 5.14 ilustra a localização das linhas C1, C2 e C3 na área do antigo lixão.

Figura 5.14 – Mapa esquemático da área do antigo lixão de Ribeirão Preto-SP, mostrando as duas cavas de disposição de resíduos, posição dos poços de monitoramento, sondagens a trado, CPTu, variação topográfica da área, Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) e a posição das linhas C1, C2 e C3 (Adaptado de PETROBRAS, 1997; ELIS, 1999).

Foram também realizadas medidas de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente sobre essas linhas com outras configurações de campo. As medidas de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente foram realizadas através da técnica de Caminhamento Elétrico (CE) se utilizando os arranjos eletródicos Dipolo-dipolo e Polo-dipolo. O Quadro 5.20 descreve detalhadamente toda a etapa de aquisição dos dados.

A avaliação metodológica para verificar a melhor rotina de aquisição de dados será realizada pela comparação de resultados obtidos a partir de modelagens diretas de dados e os resultados adquiridos.

Quadro 5.20 – Aquisições dos dados realizadas no antigo lixão de Ribeirão Preto - SP nos meses de junho e novembro de 2006.

Linhas	Técnica de Campo	Arranjo Eletródico	Espaçamento entre eletrodos (a)	Níveis (n)	Parâmetro Medido	Parâmetros Método IP	Stacks (medidas)	Equipamento
LC1 300 m	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	10 metros	5	Resistividade Cargabilidade	Janela IP 2000 ms	5 (mínimo)	Syscal PRO
	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	5 metros	10	Resistividade Cargabilidade	Delay time 160 ms	10 (máximo)	
LC2 265 m	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	10 metros	5	Resistividade Cargabilidade	Janela IP 2000 ms	5 (mínimo)	Elrec PRO Syscal R2
	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	5 metros	10	Resistividade Cargabilidade	Delay time 160 ms	10 (máximo)	
	Caminhamento Elétrico	Polo-dipolo	5 metros	10	Resistividade Cargabilidade			
LC3 300 m	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	10 metros	5	Resistividade Cargabilidade	Janela IP 2000 ms	5 (mínimo)	Syscal PRO
	Caminhamento Elétrico	Dipolo-dipolo	5 metros	10	Resistividade Cargabilidade	Delay time 160 ms	10 (máximo)	
	Caminhamento Elétrico	Polo-dipolo	5 metros	10	Resistividade Cargabilidade			

5.2.1 Equipamentos utilizados

Para a realização da aquisição dos dados foram utilizados os resistivímetros *Syscal R2*, *Elrec PRO* e *Syscal PRO* (Figura 5.15), todos estes desenvolvidos pela empresa francesa *IRIS Instruments*. Os equipamentos citados são de patrimônio da Universidade de São Paulo (USP) e foram cedidos para desenvolvimento desta pesquisa pelo Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) e pelo Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-SP (EESC/USP), respectivamente.

Figura 5.15 – Equipamentos utilizados para aquisição dos dados de campo. a) Resistivímetros *Elrec PRO* e *Syscal R2* pertencentes ao Laboratório de Geofísica Aplicada do IAG-USP; b) Resistivímetro *Syscal PRO* pertencente ao Departamento de Geotecnia da EESC/USP.

Além dos equipamentos já citados, foram utilizados equipamentos auxiliares e indispensáveis para a aquisição dos dados nas duas etapas de campo, como bateria de 12 V, eletrodos metálicos para injeção de corrente elétrica, eletrodos não polarizáveis (porosos) para realização da medida de potencial elétrico, cabos de conexões aos eletrodos, marretas para fixação dos eletrodos, cabos de injeção de corrente elétrica, cabos de medida de potencial elétrico, solução saturada de sulfato de cobre (CuSO_4 + água) para os eletrodos porosos, solução de cloreto de sódio (NaCl + água) para os eletrodos

metálicos, e por final trenas para marcar as posições dos eletrodos (porosos e metálicos) na superfície do terreno.

Os cabos de injeção de corrente elétrica, cabos de medida de potencial elétrico e eletrodos porosos utilizados na aquisição dos dados foram construídos e adaptados nas dependências do Laboratório de Instrumentação de Geofísica Aplicada do IAG/USP. Os eletrodos não polarizáveis são constituídos de um tubo de PVC (Cloro de poli vinil), uma haste interna de cobre em forma de espiral, placa de cerâmica na sua base e solução de CuSO_4 preenchendo o recipiente, ilustrado anteriormente no Capítulo 04 pela Figura 4.25. Os eletrodos não polarizáveis possuem dimensões de 13 cm de altura e diâmetro de 5 cm (2 pol).

Na primeira etapa de campo, realizada no mês de junho de 2006, se utilizou os equipamentos *Syscal R2* (módulo de transmissão/recepção e conversor 250 W DC/DC) e *Elrec PRO* (módulo de recepção) para a realização da aquisição de campo. O equipamento *Syscal R2* realizou a função de módulo de transmissão de corrente elétrica (*Tx - only time domain*) e o *Elrec PRO* o módulo de medida de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente (*Rx - only time domain*). O equipamento *Elrec PRO* possui dez (10) canais de leitura e foi desenvolvido para ser propriamente um módulo de medida de dados de resistividade e cargabilidade em projetos de exploração mineral. Os parâmetros físicos medidos em campo, resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente, foram adquiridos no domínio do tempo.

Para ambos os equipamentos, *Syscal R2* e *Elrec PRO*, para trabalharem em pleno sincronismo, o módulo Tx (*Syscal R2*) injeta um valor de corrente elétrica através de eletrodos metálicos fixos na superfície do terreno a partir de uma tensão estabelecida, onde este valor de corrente elétrica injetado é informado pelo operador ao módulo Rx (*Elrec PRO*), sincronizando ambos os equipamentos através do formato da onda de corrente (*current waveform*), e por final os eletrodos porosos fixados ao longo da superfície do terreno e conectados ao módulo Rx (*Elrec PRO*) detectam o valor de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente para cada ponto em profundidade dos níveis investigados.

O equipamento *Syscal PRO* foi utilizado na segunda etapa de campo, e também possui características semelhantes se comparado com o sistema de

medidas utilizado anteriormente, pois possui dez (10) canais de entrada e num só sistema faz a função Tx e Rx (*time domain*), facilitando a aquisição de campo. Os sistemas de aquisição são ilustrados pela Figura 5.16.

Figura 5.16 – Sistemas utilizados para aquisição dos dados de campo ilustrando os resistivímetros *Elrec PRO* (modo Tx conectados aos eletrodos de corrente elétrica)/*Syscal R2* (modo Rx conectados aos eletrodos de medida de potencial elétrico) e o resistivímetro *Syscal PRO* (modo Tx --- Rx num único sistema de aquisição).

5.2.2 Parâmetros de aquisição de campo

Os dois sistemas (*Syscal R2/Elrec PRO* e *Syscal PRO*) utilizados para a aquisição dos dados nas duas etapas de campo podem ser caracterizados como semi-automatizado, pois se realizou medidas de resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente em até 10 níveis em profundidade para cada

posição dos eletrodos de corrente, sem ter que mudar manualmente cada par de eletrodos para se ter a medida do parâmetro investigado.

Os parâmetros para as aquisições do método da Polarização Induzida foram os mesmos utilizados por Elis (1999), ou seja, foi utilizado o modo Logarítmico, Janela total IP (tempo de injeção de corrente elétrica e relaxação) de 2000 ms e *Delay time* de 0,16 s. Os intervalos para aquisição de dados do parâmetro de cargabilidade aparente através dos equipamentos desenvolvidos pela *IRIS Instruments* são descritos no Tabela 5.10 e ilustrado pela Figura 5.17 através da curva de decaimento IP.

Tabela 5.10 – Parâmetros utilizados para aquisição dos dados de Polarização Induzida através dos equipamentos Syscal PRO e Elrec PRO (Adaptado de IRIS INSTRUMENTS, 2003, 2004).

Parâmetros	Simbologia <i>Syscal PRO/Elrec PRO</i>	Tempo (ms)
Tempo de injeção de corrente elétrica e relaxação	TIME	2000
Tempo de medida da primeira amostra de voltagem	VDLY	1260
Tempo de atraso para a primeira janela (<i>Delay time</i>)	MDLY	160
Primeira janela IP (M1)	TM ₁	120
Segunda janela IP (M2)	TM ₂	220
Terceira janela IP (M3)	TM ₃	420
Quarta janela IP (M4)	TM ₄	820

Figura 5.17 – Curva de decaimento IP mostrando todos os intervalos para a integração dos valores de polarização induzida (Adaptado de IRIS INSTRUMENTS, 2003).

Antes da realização de cada medida era checada a resistência de contato dos eletrodos (par de eletrodos) em relação ao solo. As medidas só eram realizadas se para todo o conjunto de eletrodos, a resistência de contato encontrava-se abaixo do valor de 5 kOhm. De acordo com manual do equipamento *Syscal R2* (IRIS, 1993) em locais onde a resistência de contato entre o eletrodos e o solo possuem valores superior a 20 kOhm, sugere-se que as medidas não sejam realizadas, pois há grande interferência no fluxo de corrente elétrica injetada no solo, aumentando assim o nível de ruído instrumental nos dados medidos. Nas ocasiões onde foram observados elevados valores para a resistência de contato (> 5 kOhm), verificava-se o contato dos eletrodos com o solo e assim tentava-se melhorar o contato se adicionando solução de NaCl (Cloreto de sódio). Caso não obtivesse sucesso na melhora da resistência de contato entre o eletrodo e o solo, a medida era realizada e aceita caso estivesse dentro dos parâmetros já citado pelo manual do equipamento (< 20 kOhm).

Para obtenção da medida final do parâmetro, em ambos os sistemas, eram realizados num total de cinco medidas (mínimo) e dez no máximo caso o desvio padrão para as primeiras cinco medidas estivesse fora da correlação dos dados. Este conjunto de medidas para um mesmo ponto em subsuperfície eram realizadas automaticamente por ambos os sistemas de aquisição (módulo

Rx). Todo o conjunto de dados era armazenado na memória do equipamento e ao final das aquisições transferidas e editadas para um computador portátil. O tempo médio para a aquisição dos dados de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C3 se utilizando do arranjo Dipolo-dipolo ($a = 10$ metros; $n = 5$) foi de aproximadamente cinquenta minutos. Já para $a = 5$ metros e $n = 5$ (LC3) para o mesmo arranjo eletródico o tempo registrado foi duas vezes mais.

A Figura 5.18 ilustra toda a rotina realizada para a aquisição dos dados de campo.

Figura 5.18 – Rotina de aquisição em campo. a) Posicionamento do perfil e montagem dos equipamentos; b) Perfuração dos buracos para fixação dos eletrodos não-polarizáveis; c) Fixação dos eletrodos e conexão dos mesmos aos cabos; d) Checagem dos valores de resistência de contato e em seguida realização das medidas dos parâmetros da resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente.

CAPÍTULO 06

Apresentação & Discussão dos resultados

6.1 Apresentação dos resultados

Neste capítulo apresentaremos todos os resultados, modelagens diretas e dados adquiridos, obtidos neste trabalho, tanto das modelagens diretas e modelagens inversas, onde estas foram obtidas através de processamento computacional se utilizando um computador portátil com processador de 1.7 GHz e memória RAM de 1 GHz (compartilhada).

6.1.1 Modelagens diretas

Antes da realização das etapas de campo foram realizadas modelagens diretas 2D para testar alguns arranjos eletródicos e espaçamentos entre eletrodos, para avaliar e escolher os melhores parâmetros de aquisição através da técnica do Caminhamento Elétrico. O *software* utilizado para realizar as simulações diretas foi o RES2DMOD (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

O modelo geológico-geofísico utilizado para a entrada de dados no *software* RES2DMOD (*op. cit.*) foi obtido por Elis (1999) a partir de resultados de resistividade elétrica 2D obtidos sobre a linha C3, na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP. Elis (*op. cit.*) obteve os dados de resistividade elétrica aparente sobre a linha C3 através da aplicação da técnica do Caminhamento Elétrico, se utilizando do arranjo eletródico Dipolo-dipolo e espaçamento entre eletrodos de 10 metros, investigando 5 níveis em profundidade. Os resultados foram interpretados quantitativamente se utilizando do *software* RESIX IP2DI (INTERPEX, *op. cit.*). O modelo geológico-geofísico da linha C3 caracteriza

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

várias estruturas com valores definidos de resistividade elétrica, como ilustra a Figura 6.10. A escolha desta linha para realizações de modelagens diretas se deu devido à caracterização das duas cavas de resíduos e suas zonas de influência em profundidade apresentados por Elis (1999) em seu trabalho.

Figura 6.10 – Modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) a partir de resultados de resistividade elétrica 2D na linha C3 através do software RESIX IP2DI (INTERPEX, 1996.).

Através deste modelo geológico-geofísico, Elis (*op.cit.*) pôde caracterizar este perfil. Os valores de resistividade elétrica sugeridos para o modelo variam de 2.330 Ohm.m à 11 Ohm.m. O modelo possui estruturas diversas, que caracterizam e as diferenciam como, camadas de solo mais superficiais (324 Ohm.m), cavas de resíduos (6,7 Ohm.m e 8 Ohm.m), zona de percolação de resíduos (80 Ohm.m), zona contaminada (11 Ohm.m), zona não-saturada (2.330 Ohm.m) e zona saturada (152 Ohm.m). A partir deste modelo geológico-geofísico foi construído um modelo de blocos de resistividade elétrica para entrada no *software* RES2DMOD (GEOTOMO SOFTWARE, 2003), como ilustra a Figura 6.11. O modelo elaborado para uso nas simulações pode ser considerado complexo e com uma grande variação de valores de resistividade elétrica quando se comparados com os modelos vistos em outros trabalhos

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

Sasaki (1992), Dahlin (1993), Dahlin & Loke (1998), Griffiths & Barker (1993), Olayinka & Yaramanci (2000), Dahlin & Zou (2004) e Nguyen *et. al.* (2005).

Após a elaboração do modelo de blocos de resistividade, foram simuladas respostas de aquisições elétricas bidimensionais para os arranjos eletródicos Dipolo-dipolo (DD), Dipolo-dipolo Equatorial (DD-E), Polo-dipolo (PD), Polo-polo (PP), Wenner-Alpha (W-A), Wenner-Beta (W-B), Wenner-Gama (W-G) e Wenner-Schlumberger (W-S). Os parâmetros de aquisição foram de dez metros de espaçamento entre eletrodos e cinco níveis de investigação ($a=10$ metros; $n=5$) e cinco metros de espaçamento entre os eletrodos e dez níveis de investigação em profundidade ($a=5$ metros; $n=10$). Foram obtidos para todos os arranjos e parâmetros citados acima, pseudo-seções de resistividade elétrica.

Figura 6.11 – Modelo de blocos de resistividade elétrica elaborado a partir no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999).

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

Antes de escolher qual nível de ruído adicionar nas pseudo-seções que simulam ruídos instrumentais e/ou geológicos (distribuição gaussiana), foram comparados resultados com níveis de ruído de 0 %, 5 % e 10 % em termos do erro RMS se utilizando o método Gauss-Newton e *quasi*-Newton para o cálculo da matriz Jacobiana. Escolheu-se o conjunto de dados de resistividade elétrica aparente obtido com o arranjo Dipolo-dipolo ($a=10$ metros; $n=5$). Para cada método foram calculadas dez iterações. A Figura 6.12 ilustra os resultados destas comparações.

Os diferentes níveis de ruídos adicionados nos dados de resistividade elétrica aparente mostraram que houve diferenças entre si para o cálculo da matriz de dados para ambos os métodos relacionado às diferenças de valores de resistividades elétrica nas camadas mais superficiais do modelo e a sensibilidade quanto à profundidade de investigação para o arranjo Dipolo-dipolo, mas não sendo significativos ao ponto de criar artefatos ao longo da seção.

Todos os níveis de ruído apresentaram para a primeira iteração erros RMS muito elevados, aproximadamente 56 %. O método Gauss-Newton apresentou menor tempo de convergência para todos os níveis de ruído, onde após a quinta iteração houve a estabilização do erro entre os dados observados e os calculados, diferentemente ao método *quasi*-Newton que teve maior tempo de convergência. O erro RMS elevado para o método *quasi*-Newton é devido que a matriz Jacobiana é estimada a partir de um modelo de terra homogêneo, diferentemente quando se comparado com o método Gauss-Newton. Após a quinta iteração o erro RMS estabilizou para todos os níveis de ruído sendo que o erro final para todos os resultados variou de 12 à 8 %.

Figura 6.12 – Comparação entre diferentes níveis de ruídos se utilizando dos métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton através do processo de inversão dos dados.

Para ambos os métodos, após a quinta iteração os valores dos erros estabilizam, não variando significativamente até a décima iteração.

Os resultados obtidos através do método Gauss-Newton para todos os níveis de ruído obtiveram o erro RMS muito próximos, observando o mesmo comportamento para o método *quasi*-Newton.

Todos os níveis de ruídos que foram submetidos ao método *quasi*-Newton tiveram maior erro RMS. Os dados contaminados com 10 % de ruído (método *quasi*-Newton) apresentaram maior erro final, 11, 4 %. Sasaki (1992) já tinha observado em seu trabalho que a inversão de dados de resistividade elétrica não é sensível a simulações de ruído através de uma distribuição gaussiana. O fator sensibilidade está relacionado diretamente pelo nível de suavização no cálculo da matriz de dados (λ – *damping factor*).

Apesar de não haver grandes diferenças entre os diferentes níveis de ruído para o modelo gerado, optou-se a adicionar junto aos dados de todas as pseudo-seções de resistividade elétrica, o nível de ruído gaussiano de 5 %,

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

com finalidade de simular ambientes geológicos ou que possuem algum tipo de ruído instrumental, pois todos os ambientes possuem algum nível de ruído devido as diferentes propriedades físicas e químicas do meio, e ruídos culturais.

As Figuras 6.13 e 6.14 respectivamente apresentam as pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas a partir das simulações. Elas são apresentadas em relação aos níveis de investigação em profundidade.

Os resultados das pseudo-seções para ambos os parâmetros utilizados (espaçamento entre eletrodos e níveis de investigação) ilustram que foi possível identificar os limites das cavas de resíduos com todos os arranjos eletródicos, marcadas entre as posições de 80 à 240 metros aproximadamente. Não se pode caracterizar nem identificar corretamente a geometria das cavas e nem suas zonas de influência pois as pseudo-seções de resistividade elétrica não fornecem informação verdadeira da posição e nem do parâmetro medido.

Os resultados das pseudo-seções obtidas com os arranjos DD e W-G para ambos os parâmetros simulados foram às configurações que melhor caracterizaram as cavas de resíduos, mas não refletiram o modelo direto.

Observa-se que o nível de ruído adicionado nas pseudo-seções (5 %) e a larga variação de resistividade para as estruturas do modelo simulado foi hábil em gerar “artefatos”, como se nota nos resultados obtidos com o arranjo W-G. Observou-se no conjunto de dados de resistividade elétrica aparente para o arranjo W-G valores negativos e uma larga variação de valores (5 – 1500 Ohm.m) entre cada estrutura simulada. Nota-se a sensibilidade do arranjo em caracterizar essa larga variação para o modelo simulado. Os resultados obtidos com os parâmetros $a=5$ metros e $n=10$, mostraram melhor resolução espacial devido a maior amostragem de pontos tanto lateralmente quanto em profundidade, caracterizando assim com mais clareza os limites das cavas.

Observa-se que para um mesmo modelo direto simulado com conjunto de estruturas possuindo variados valores de resistividade elétrica, para as diversas configurações eletródicas, se obteve respostas diferentes, refletindo a ambigüidade geofísica.

Os dados de resistividade elétrica aparente obtidos com as modelagens não permitiram caracterizar a geometria das cavas (limite lateral, topo e base), nem suas zonas de influência.

Figura 6.13 – Pseudo-seções de resistividade elétrica contaminadas com 5 % de ruído gaussiano, obtidas através do *software* de modelagem direta RES2DMOD a partir do bloco de entrada baseado no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) para os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 10 metros; n= 5).

Figura 6.14 – Pseudo-seções de resistividade elétrica contaminadas com 5 % de ruído gaussiano, obtidas através do software de modelagem direta RES2DMOD a partir do bloco de entrada baseado no modelo geológico-geofísico obtido por Elis (1999) para os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S ($a=5$ metros; $n=10$).

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

Antes da interpretação quantitativa final para os resultados da modelagem direta, realizou-se um teste para comparar os métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton, na finalidade de estabelecer uma rotina própria para a inversão dos dados que satisfaçam o menor tempo computacional, o menor erro RMS final e o melhor resultado se comparando com modelo geológico-geofísico. Para os testes foram utilizadas as pseudo-seções com parâmetros $a = 10$ metros e $n = 5$. Todas as pseudo-seções foram submetidas ao processo de inversão se utilizando o método Gauss-Newton e *quasi*-Newton, com dez iterações. O Quadro 6.20 e a Figura 6.15 ilustram os resultados desta comparação.

Quadro 6.20 – Resultados obtidos com a comparação dos métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton em relação ao Erro RMS e o tempo computacional para obtenção das seções de resistividade elétrica ($a=10$ metros e $n=5$) a partir das modelagens diretas.

Arranjo Elétrico	Gauss-Newton (10 iterações)		<i>quasi</i> -Newton (10 iterações)	
	Tempo (segundos)	Erro RMS (%)	Tempo (segundos)	Erro RMS (%)
Dipolo-dipolo (130 pontos)	5,876	8,48	1,955	10,22
Dipolo-dipolo Equatorial (140 pontos)	5,156	7,72	2,172	9,58
Polo-Dipolo (135 pontos)	5,11	6,92	2,032	8,72
Polo-Polo (140 pontos)	4,875	5,94	1,985	6,59
Wenner-Schlumberger (120 pontos)	5,281	6,36	1,908	7,57
Wenner-Alpha (110 pontos)	5,126	6,42	1,859	8,33
Wenner-Beta (110 pontos)	5,686	7,19	2,077	8,20
Wenner-Gama (110 pontos)	6,002	17,08	2,421	21,18

Os resultados apresentaram o erro RMS final para todos os arranjos valores elevados da primeira até a terceira iteração. Após a terceira iteração os valores não variaram significativamente, permanecendo constantes. Observou-se também que não houve diferenças significativas entre os métodos para o erro RMS final, somente no tempo computacional exigido para obtenção da

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

seção de resistividade elétrica se utilizando o método Gauss-Newton, chegando até seis segundos para as dez iterações, confirmando os testes que Loke & Dahlin (2002) já haviam observados em simulações diretas com modelos que simulavam estruturas mais simples. O arranjo eletródico W-G dentre todas as configurações eletródicas foi a que apresentou maior erro RMS final para ambos os métodos devido a larga variação de valores de resistividade elétrica criadas a partir do modelo direto, apesar da família Wenner possui a menor razão sinal/ruído.

A partir dos resultados apresentados acima se optou por uma combinação de ambos os métodos, Gauss-Newton e *quasi*-Newton, e também uma redução no número de iterações devido a estabilidade do erro RMS após a quinta iteração. Para todos os demais resultados a serem apresentados, seções de resistividade elétrica e cargabilidade, o processo de inversão será realizado com a aplicação do método Gauss-Newton para as duas primeiras iterações e as demais iterações com o método *quasi*-Newton, interrompendo o processo na quinta iteração. Foi utilizado o fator de 0,5 para suavização no cálculo da matriz de dados (λ - damping factor) de acordo com Sasaki (1992).

Figura 6.15 – Comparação entre os métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton utilizado pelo *software* RES2DINV para inversão dos dados de resistividade elétrica e cargabilidade em função do erro RMS para cada iteração.

6.1.2 Resultados - Modelagens Diretas

As pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas a partir da modelagem direta foram submetidas ao processo de inversão seguindo rotina descrita acima. Os resultados são apresentados pelas figuras 6.16 e 6.17.

Observa-se que para todas as seções de resistividade elétrica obtidas com o processo de inversão, ambos os parâmetros de aquisição simulados, foi possível identificar as cavas de resíduos, onde os valores de resistividade elétrica variaram de 1 à 30 Ohm.m no interior das cavas de resíduos. Todas as seções de resistividade elétrica apresentaram o erro RMS final abaixo de 10 %, mostrando uma boa correlação dos dados observados (pseudo-seções) com os dados calculados. Apesar disso, alguns arranjos simulados apresentaram artefatos gerados após o processo de inversão, mostrando uma maior sensibilidade em identificar largas variações de resistividade elétrica em subsuperfície, caso do arranjo W-G.

Os resultados obtidos através dos arranjos DD, DD-E, PD, W-A e W-B foram as configurações eletródicas que melhor definiram a geometria das cavas de resíduos, tanto lateralmente quanto em profundidade e também maior sensibilidade em caracterizar a zona de influência das cavas de resíduos. Os parâmetros $a=5$ metros e $n=10$ para os arranjos acima citados apresentaram os melhores resultados, identificando espacialmente com maior precisão as estruturas simuladas.

Os arranjos W-A, W-G e W-S se utilizando dos parâmetros $a=10$ metros e $n=5$ conseguiram identificar os limites das cavas de resíduos, apesar de apresentarem maior profundidade de investigação, mostram distorções em profundidade não refletindo o modelo direto simulado. A seção de resistividade elétrica obtida com arranjo W-S para os parâmetros de aquisição $a=5$ metros e $n=10$ mostrou uma maior sensibilidade em caracterizar variações nas camadas superficiais dentro das cavas de resíduos e em profundidade, o que pode ser explicado pela combinação dos arranjos Wenner (maior profundidade de investigação) e Schlumberger (maior resolução nas camadas mais superficiais).

O arranjo W-G para ambos os parâmetros de aquisição simulados produziu artefatos consideravelmente. Para o parâmetro de aquisição $a=5$

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

metros e $n=10$, o processo de inversão utilizado não foi robusto suficiente para completar o processo, não obtendo assim a seção de resistividade elétrica para o arranjo e parâmetros simulados, podendo ser explicado pela larga variação de valores de resistividade elétrica aparente gerados durante o processo de simulação direta.

O arranjo PP foi hábil em identificar os limites laterais das cavas de resíduos e sua base. Caracterizou também em profundidade uma contribuição considerável das zonas de influência das cavas de resíduos (zonas de percolação de chorume e zona contaminada), não refletindo a profundidade simulada. Os resultados obtidos com o arranjo PP para ambos os parâmetros de aquisição, foram que maior proporcionaram informações em profundidade, chegando até 42 metros aproximadamente.

Os parâmetros de aquisição simulados para todos os arranjos ($a=5$ metros e $n=10$) apresentaram maior resolução espacial de imageamento do modelo simulado se comparado com os parâmetros $a=10$ metros e $n=5$, pois a profundidade de investigação é equiparável devido ao maior número de níveis de investigação. Com esse parâmetro simulado é maior a precisão em se identificar a geometria das cavas e suas zonas de influência.

Figura 6.16 – Seções – Seções de resistividade elétrica 2D obtidas através do processo de inversão das pseudo-seções simuladas com os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S (a= 10 metros e n= 5).

Figura 6.17 – Seções de resistividade elétrica 2D obtidas através do processo de inversão das pseudo-seções simuladas com os arranjos DD, DD-E, PD, PP, W-A, W-B, W-G e W-S ($a=5$ e metros e $n=10$).

6.2 Resultados – Dados adquiridos

6.2.1 Resultados – Interpretação qualitativa

Antes de apresentar os resultados e iniciar a discussão dos mesmos, é importante destacar que se tentou reconstruir, durante as aquisições de campo, a mesma posição para todos os perfis C1, C2 e C3 (sentido W – E), mas não foi possível investigar exatamente os mesmos pontos em subsuperfície por Elis (1999).

Isso ocorreu devido à área antigo lixão não ser uma área totalmente controlada (acesso privativo, cercas delimitando a área, posicionamento dos perfis com marcos georeferenciados, etc.). Ao longo dos anos a área do lixão sofreu e ainda sofre várias mudanças físicas como cobertura das cavas com aterro, queimadas, mudanças de referências como cercas, postes e etc. O controle do posicionamento das linhas foram tomadas com auxílio do GPS (*Global Position System*), tendo como referências coordenadas geográfica do início e fim de cada linha e algumas referências físicas (postes, cercas, e etc.) ainda existentes.

Os resultados obtidos nas aquisições de campo, primeiramente serão apresentados e comparados com os resultados obtidos por Elis (1999) para as linhas C1, C2 e C3, tanto para resistividade elétrica aparente. A comparação será realizada através da técnica proposta por Hallof (1957 *apud* GRIFFITHS; BARKER, 1993), através de pseudo-seções de resistividade elétrica e cargabilidade.

Os resultados obtidos por Elis (*op. cit.*) e os resultados das aquisições de campo realizadas durante as etapas de campo desta pesquisa foram interpolados através do *software* Surfer 8 (GOLDEN SOFTWARE, 2002) se utilizando o método da Krigagem Linear, que consiste num processo de estimativa por médias móveis de valores de variáveis distribuídas adjacientemente no espaço a partir de valores amostrados, ou seja, estima valores médios nos locais.

A Figura 6.18 ilustra os resultados de resistividade elétrica aparente para a linha C1, tanto para os dados adquiridos em 1997 e os dados adquiridos em

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

2006. A linha C1 é localizada fora das cavas de resíduos, na frente da área do antigo lixão e orientada perpendicularmente ao fluxo subterrâneo. Os resultados ilustram uma variação resistividade elétrica aparente na faixa de 40 à 300 Ohm.m podendo ser relacionada a variação textural dos solos (argilas e areias). Nota-se uma zona anômala entre as posições 90 metros até o final do perfil, com valores abaixo de 40 Ohm.m, podendo ser correlacionados a contaminação proporcionada pela direção do fluxo da água subterrânea. Os valores mais elevados de resistividade elétrica aparente (> 300 Ohm.m) podem ser relacionados com materiais predominantemente arenosos, referentes a cobertura coluvionar originada das rochas basálticas da Formação Serra Geral e do próprio arenito Botucatu que ocorre localmente. Em ambas as pseudo-seções se pode notar a influência causada pelo poço de monitoramento (tubulação metálica), localizado próximo à posição de 120 metros. Observa-se que há a uma distribuição em profundidade de baixos valores de resistividade elétrica aparente, podendo ser relacionada a contaminação predominante na área e acompanhando o fluxo subterrâneo.

Figura 6.18 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C1.

Os resultados de resistividade elétrica aparente adquiridos nesta pesquisa para a linha C2 são apresentados pela Figura 6.19. Para esta linha os resultados anteriores e os atuais não podem ser comparados com objetivo de monitoramento ambiental, pois o perfil adquirido não correspondeu

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

ao mesmo adquirido por Elis (1999). Os resultados adquiridos (2006) limitam lateralmente duas zonas de baixos valores de resistividade elétrica aparente ($< 70 \text{ Ohm.m}$) podendo ser relacionadas as duas cavas de resíduos. A primeira cava de resíduos é delimitada entre as posições 35 à 150 metros e a segunda cava tem seu início na posição 170 metros, não podendo delimitar seu final devido ao limite da área do lixão. Observa-se também nestes resultados a incipiente correlação dos baixos valores de resistividade elétrica aparente às duas cavas de resíduos.

Figura 6.19 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C2.

A Figura 6.20 ilustra os resultados de resistividade elétrica aparente para a linha C3, tanto para os dados adquiridos em 1997 e os dados adquiridos em 2006. A linha C3 está orientada perpendicularmente as cavas de resíduos e ao fluxo subterrâneo (NE) que ocorre na área. Os resultados para ambas as épocas limitam lateralmente duas zonas anômalas com baixos valores de resistividade elétrica aparente ($< 40 \text{ Ohm.m}$). Observa-se também nestes resultados a incipiente correlação dos baixos valores de resistividade elétrica aparente às duas cavas de disposição de resíduos, confirmando assim as características físicas do percolado, caráter muito condutor. Se comparados aos ensaios de 1997, os resultados atuais ilustram um pequeno aumento nos

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

valores de resistividade elétrica aparente no interior das cavas, mas ainda predominam valores que confirmam a contaminação.

Figura 6.20 – Comparação das pseudo-seções de resistividade elétrica obtidas em anos diferentes para a linha C3.

6.2.2 Resultados – Interpretação quantitativa

Os dados adquiridos foram submetidos ao processo de inversão através da rotina estabelecida anteriormente, método Gauss-Newton para as duas primeiras iterações e *quasi*-Newton para as demais iterações, encerrando o processo na quinta iteração. Todas as seções de resistividade elétrica e cargabilidade tiveram a variação topográfica inserida nos modelos invertidos. A inversão dos dados de topografia foi obtida através da Transformada de Schwarz-Cristoffel, implementada na rotina de inversão utilizada pelo *software*. O fator de suavização (λ) utilizado foi de 0,5.

As figuras 6.21 e 6.22 ilustram as seções de resistividade elétrica e cargabilidade adquiridas com o arranjo DD ($a=10$ metros; $n=5$ e $a=5$ metros; $n=10$) obtidos ao longo da linha C1.

Os resultados de resistividade elétrica e cargabilidade identificam a posição do poço de monitoramento, marcado na posição de 135 metros por uma anomalia pontual e alongada. Esta anomalia que identifica o poço de monitoramento é caracterizada por baixos valores de resistividade elétrica e

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

altos valores de cargabilidade. A anomalia referente ao poço de monitoramento é devido ao material metálico que compõe o seu revestimento.

Uma zona anômala é bem caracterizada por baixos valores resistividade elétrica, 20 à 100 Ohm.m, entre as posições 160 à 280 metros, ocorrendo abaixo dos 10 metros de profundidade. Essa zona anômala é coincidente com o topo da zona freática suspensa caracterizada pela seção geológico-geofísica A – A' (Figura 3.17) e pode estar relacionada com o fluxo preferencial da pluma de contaminação (NE) definido por Elis (1999). Esta mesma zona anômala também pôde ser observada anteriormente nos resultados (anteriores e atuais) apresentados pelas pseudo-seções de resistividade elétrica.

Os resultados de cargabilidade para a linha C1 para ambos os parâmetros adquiridos marcaram várias estruturas verticais na parte inicial das seções podendo ser relacionadas com estruturas residuais de decomposição dos basaltos ou mesmo estruturas geradas (artefatos) a partir do processo de inversão.

É observado nas duas seções de cargabilidade após a posição de 160 metros até o final do perfil, as seções de cargabilidade mostram valores variando entre 5 à 30 mV/V, correlacionados aos sedimentos coluvionares das Formações Botucatu e Serra Geral, caracterizada na seção geológico-geofísica A – A'.

Os resultados obtidos para a linha C1 com os parâmetros $a=5$ metros e $n=10$, ilustrado pela Figura 6.22, apresentaram melhor resolução espacial, apesar de uma menor profundidade de investigação (aproximadamente 14 metros), melhor caracterizando a variação e a distribuição dos valores de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C1. Os resultados obtidos com os parâmetros de aquisição $a=10$ metros e $n=5$ (Figura 6.21) que obteve uma profundidade máxima de investigação de aproximadamente 17 metros, permitiu caracterizar a variação em profundidade dos parâmetros de resistividade elétrica e cargabilidade. As seções de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C1 apresentaram baixos valores para o erro RMS final (menores que 5,5 %), demonstrando assim uma menor diferença entre os dados observados (resistividade elétrica aparente e cargabilidade aparente) e os dados calculados, permitindo assim uma maior confiabilidade no modelo final para os parâmetros investigados.

Figura 6.21 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para linha C1 obtidas com o arranjo DD, $a = 10$ metros e $n = 5$.

Figura 6.22 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para linha C1 obtidas com o arranjo DD (a= 5 metros e n= 10).

As seções de resistividade elétrica e cargabilidade que foram adquiridas ao longo da linha C2 são apresentadas pelas figuras 6.23, 6.24 e 6.25 com os arranjos DD ($a= 10$ metros e $n= 5$; $a= 5$ metros e $n= 10$) e PD ($a= 5$ metros e $n= 10$) respectivamente.

Os resultados apresentados em todas as seções identificam os limites laterais das duas cavas de resíduos. A cava oeste é identificada entre as posições 60 à 135 metros aproximadamente e a cava leste entre as posições de 165 à 240 metros. Os limites das cavas são identificados e caracterizados devido aos baixos valores de resistividade elétrica, menores que 30 Ohm.m, e também por altos valores de cargabilidade, variando entre 30 a 50 mV/V.

Observa-se também uma pequena variação nos valores de resistividade elétrica e cargabilidade nas seções adquiridas com os arranjos DD e PD ($a= 5$ metros e $n= 10$) devido a uma maior resolução, na parte mais superior das cavas de resíduos, podendo ser explicado pela variedade de materiais (escórias metálicas, escórias cerâmicas, pilhas, restos de papel, vidros e etc) depositados ali durante a atividade do lixão como área receptora de resíduos. Alguns destes materiais por apresentarem tendência a se polarizarem interferem diretamente nas medidas do efeito de polarização induzida, refletindo assim em elevados valores de cargabilidade.

Fora das cavas de resíduos os resultados mostram altos valores de resistividade elétrica (70 à 700 Ohm.m) e baixos valores de cargabilidade variando de 1 à 8 mV/V, relacionados aos sedimentos coluvionares provenientes dos arenitos da Formação Botucatu e dos basaltos da formação Serra Geral.

As seções adquiridas com os arranjos DD ($a= 10$ metros e $n= 5$; $a= 5$ metros e $n= 10$) e PD ($a= 10$ metros e $n= 5$) ao longo da linha C2 identificam a base das cavas das duas cavas de resíduos, pois estes parâmetros utilizados na aquisição investigaram respectivamente profundidades máximas de 17 metros, 13,5 metros e 19 metros aproximadamente. De acordo com dados de SEV's na realizadas na área que cobre as cavas, identificou-se a base das cavas na profundidade de 12 metros. Abaixo dessa profundidade os valores de resistividade elétrica, variando entre 15 à 30 Ohm.m podem ser relacionados a influência da percolação de chorume em profundidade. Os resultados de cargabilidade (arranjo PD) ilustram duas cavas em forma de cunha, também

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

mostrando abaixo dos 12 metros valores medianos de cargabilidade, podendo estar relacionado à a percolação do chorume na zona não saturada.

Os arranjos DD e PD ($a = 5$ metros e $n = 10$) melhor definem a geometria das cavas e a larga variação de resistividade elétrica e cargabilidade em seu interior. O arranjo PD apresentou uma maior profundidade de investigação (17,5 metros) tanto para os resultados de resistividade elétrica e cargabilidade, melhor resolução e melhor definição da geometria da cavas de resíduos e sua influência em profundidade se comparado com os resultados obtidos com o arranjo DD para ambos os parâmetros de aquisição utilizados. Nota-se uma estrutura vertical no final da cava oeste, podendo ser relacionada com alguma distorção criada durante o processo de inversão dos dados.

O erro RMS final se apresentou valores menores que 12 % para todas as seções de resistividade elétrica e cargabilidade obtidas ao longo da linha C2, permitindo assim uma maior confiabilidade no modelo final para os parâmetros investigados.

Figura 6.23 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo ($a = 10$ metros e $n = 5$).

Figura 6.24 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo ($a = 5$ metros e $n = 10$).

Figura 6.25 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade para a linha C2 adquirida com o arranjo Polo-dipolo (a= 5 metros e n= 10).

Os resultados de resistividade elétrica e cargabilidade adquiridas ao longo da linha C3 são apresentados pelas figuras 6.26, 6.27 e 6.28 respectivamente.

Os resultados adquiridos com os arranjos DD e PD e ambos os parâmetros de aquisição ilustram duas zonas com baixos valores de resistividade elétrica, variando entre 1 à 30 Ohm.m, e altos valores de cargabilidade, 15 à 50 mV/V, correspondendo as duas cavas de resíduos. As cavas são limitadas através destas variações dos parâmetros, entre as posições 70 à 120 metros (cava oeste) e 150 à 210 metros (cava leste).

Os resultados apresentados pela Figura 6.26 ilustram as seções de resistividade elétrica e cargabilidade adquiridas com o arranjo DD ($a = 10$ metros e $n = 5$). As seções mostram uma profundidade de investigação de até 17 metros, identificando assim a base das cavas que de acordo com a seção geológico-geofísica B – B' e o modelo geológico-geofísico proposto por Elis (1999) para a linha C3, se encontra na posição de 12 metros. Entre as profundidades 12 à 17 metros, observa-se baixos valores de resistividade elétrica e médios a altos valores de cargabilidade, assim confirmando que ainda está tendo uma considerável migração do chorume em profundidade. Fora das cavas de resíduos é observada a relação altos valores de resistividade elétrica (acima de 200 Ohm.m) e baixos cargabilidade (15 à 50 mV/V), correlacionados aos solos e sedimentos arenosos e areno-argilosos provenientes das formações Botucatu e Serra Geral.

A Figura 6.27 ilustra os resultados obtidos com o arranjo DD ($a = 5$ metros e $n = 10$), marcando também as duas cavas de resíduos por baixos/alto valores de resistividade elétrica e cargabilidade respectivamente.

A profundidade máxima de investigação com os parâmetros de aquisição utilizados foi de aproximadamente 13,5 metros, identificando assim a base das cavas, mas não podendo se afirmar que há uma percolação preferencial do chorume em profundidade.

Observa-se uma variação nos valores de cargabilidade no interior da cava leste, podendo estar relacionados com os diversos tipos de materiais ali depositados. Os resultados obtidos com estes parâmetros de aquisição e arranjo eletródico, melhor caracterizaram e definiram a distribuição e variação

CAPÍTULO 06 – Apresentação & Discussão dos resultados

de resistividade elétrica e cargabilidade em subsuperfície, devido a maior quantidade de pontos e níveis investigados.

As seções de resistividade elétrica e cargabilidade obtidas ao longo da linha C3 com o arranjo Polo-dipolo ($a = 5$ metros e $n = 10$) são apresentadas pela Figura 6.28. Observa-se, como em todos os outros resultados já apresentados para a linha C3, a caracterização das duas cavas de resíduos (geometria) e sua distribuição e variação por baixos valores de resistividade elétrica ($< 30 \text{ Ohm.m}$) e altos valores de cargabilidade (15 à 50 mV/V), relacionados a presença de resíduos.

A profundidade máxima de investigação com a utilização destes parâmetros de investigação foi de aproximadamente 19 metros, marcado assim a base das cavas e também confirmando a influência da percolação de chorume em profundidade, tanto para os dados de resistividade elétrica e cargabilidade.

Altos valores de resistividade elétrica (acima de 200 Ohm.m) e baixos valores de cargabilidade (15 à 50 mV/V) observados, são correlacionados aos solos e sedimentos arenosos e areno-argilosos dos arenitos provenientes da Formação Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral, respectivamente.

O erro RMS final para todas as seções obtidas para a linha C3 foram menores que 10,5 %, mostrando uma boa correlação entre os dados medidos e os calculados.

Figura 6.26 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo ($a = 10$ metros e $n = 5$).

Figura 6.27 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Dipolo-dipolo ($a=5$ metros e $n=10$).

Figura 6.28 – Seção de resistividade elétrica e cargabilidade ao longo da linha C3 adquirida com o arranjo Polo-dipolo ($a= 5$ metros e $n= 10$).

CAPÍTULO 07

Conclusão & Considerações finais

7.1 Conclusão geral

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram avaliar a potencialidade da integração de resultados de modelagens diretas e aquisições de campo no monitoramento ambiental da área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP se utilizando de investigações 2D através dos métodos da Eletorresistividade e Polarização Induzida, bem como avaliar a resposta de diferentes formas de aquisição de dados.

7.1.1 Conclusões - Modelagens diretas

As seções de resistividade elétrica obtidas nas modelagens diretas permitiram selecionar os melhores parâmetros de aquisição de campo (arranjo eletródico, espaçamento entre eletrodos e quantidade de níveis de investigação) e também selecionar uma rotina básica do processo de inversão que satisfizesse o menor tempo computacional, o menor erro RMS final e o melhor resultado se comparando com modelo geológico-geofísico.

Os testes realizados com diferentes níveis de ruído não mostraram diferenças significativas perante o processo de inversão submetido. Os métodos Gauss-Newton e *quasi*-Newton apresentaram erro RMS final muito parecido, havendo diferenças significantes no tempo de processamento computacional. O método *quasi*-Newton demonstrou ser mais ágil no cálculo da matriz de dados, só que mais lento no tempo de convergência para as três primeiras iterações.

Perante a rotina de inversão submetida, os arranjos DD, DD-E, PD, W-A e W-B ($a = 5$ metros e $n = 10$) foram os que melhor refletiram o modelo direto

CAPÍTULO 07 – Conclusão & Considerações finais

simulado, definindo a geometria das cavas de resíduos, e demonstraram maior sensibilidade em caracterizar as zonas de influência, em profundidade, da contaminação das cavas de resíduos.

Os arranjos W-A, W-G e W-S ($a= 10$ metros e $n= 5$) foram hábeis em identificar os limites das cavas de resíduos. Apresentaram distorções ao longo da profundidade, não refletindo o modelo simulado. O arranjo W-S ($a= 5$ metros e $n= 10$) teve maior sensibilidade e resolução em caracterizar variações de resistividade elétrica nas camadas superficiais e no interior das cavas.

O processo de inversão utilizado não foi robusto suficiente para completar o processo submetido para o conjunto de dados se utilizando do arranjo W-G ($a= 5$ metros e $n= 10$) devido pela larga variação de valores de resistividade elétrica aparente gerados durante o processo de simulação direta.

O arranjo PP foi hábil em identificar os limites laterais das cavas de resíduos e sua base. Apresentou a maior profundidade de investigação para ambos os parâmetros simulados, aproximadamente 42 metros.

Os parâmetros de aquisição $a= 5$ metros e $n=10$ apresentaram maior resolução espacial de imageamento do modelo simulado devido ao maior numero de pontos investigados e níveis de investigação.

7.1.2 Conclusão – Aquisições de campo

Os resultados das modelagens diretas juntamente com as condições técnicas de aquisição permitiram a escolha dos arranjos DD ($a= 10$ metros e $n= 5$; $a= 5$ metros e $n= 10$) e PD ($a= 5$ metros e $n= 10$) para monitoramento ambiental. Os resultados apresentados para os arranjos eletródicos e parâmetros de aquisição permitiram a seguinte avaliação para as linhas C1, C2 e C3:

Linha C1

As pseudo-seções de resistividade elétrica (dados anteriores e atuais) mostraram uma incipiente contaminação (valores $<$ que 40 Ohm.m) já observada anteriormente por Elis (1999). Valores acima de 300 Ohm.m podem ser relacionados a variação textural de materiais naturais que ocorrem

CAPÍTULO 07 – Conclusão & Considerações finais

localmente. Observa-se nas proximidades da posição de 120 metros a influência causada pelo revestimento metálico do poço de monitoramento.

As seções de resistividade elétrica e cargabilidade para os arranjos DD ($a=5$ metros e $n=10$; $a=10$ metros e $n=5$) identificaram a posição do poço de monitoramento, por uma anomalia pontual e alongada, sendo mais destacada na seção de cargabilidade. A zona anômala observada nos resultados das pseudo-seções é bem caracterizada nas pseudo-seções, possivelmente relacionada com o fluxo preferencial da pluma de contaminação (NE).

Os resultados de cargabilidade (8 a 25 mV/V) para ambos os parâmetros de aquisição apresentaram informações a respeito dos materiais geológicos que ocorrem localmente (colúvio e solos das formações Botucatu e Serra Geral).

Os resultados obtidos com os parâmetros $a=5$ metros e $n=10$ apresentaram melhor resolução espacial, apesar de uma menor profundidade de investigação. Os resultados obtidos com os parâmetros de aquisição $a=10$ metros e $n=5$ apresentaram uma profundidade máxima de investigação de aproximadamente 17 metros, permitindo caracterizar a variação de resistividade elétrica e cargabilidade em relação a profundidade.

Linha C2

As pseudo-seções (dados anteriores e atuais) não puderam ser comparados devido a aquisição não ter sido realizada ao longo da mesma posição realizada por Elis (1999). Os resultados atuais de resistividade elétrica aparente limitaram lateralmente duas zonas anômalas de baixa resistividade, que caracterizam as duas cavas com resíduos.

Os resultados de resistividade elétrica e cargabilidade que foram adquiridas com os arranjos DD e PD identificaram os limites laterais das duas cavas de resíduos, onde estas estão relacionadas a baixos valores (< 30 Ohm.m) de resistividade elétrica e altos de cargabilidade (entre 30 a 50 mV/V).

Os arranjos DD e PD ($a=5$ metros e $n=10$) melhor caracterizaram a variação de resistividade elétrica e cargabilidade na parte mais superior das cavas. Altos valores de resistividade elétrica (70 à 700 Ohm.m) e baixos valores de cargabilidade (1 à 8 mV/V) caracterizaram os sedimentos coluvionares que ocorrem na área provenientes dos arenitos da Formação Botucatu e dos basaltos da Formação Serra Geral. O arranjo PD apresentou

uma maior profundidade de investigação (17,5 metros), melhor resolução e melhor definição da geometria das cavas de resíduos e sua influência em profundidade.

Linha C3

Os resultados das pseudo-seções de resistividade elétrica (anterior e atual) permitiram limitar lateralmente duas zonas anômalas com baixos valores de resistividade elétrica aparente ($< 40 \text{ Ohm.m}$) relacionadas às duas cavas de resíduos. Valores acima de 300 Ohm.m são relacionados a solos residuais das formações Botucatu e Serra Geral. Em comparação aos ensaios adquiridos em 1997, os ensaios atuais mostraram um discreto aumento nos valores de resistividade elétrica aparente no interior das cavas, mas ainda confirmam a contaminação. Isso sugere que possivelmente existe uma atenuação natural da carga contaminante, mas que ocorre de uma forma bastante lenta.

Os resultados das seções de resistividade elétrica e cargabilidade para todos os arranjos mostraram baixos valores ($1 \text{ à } 30 \text{ Ohm.m}$) e elevados ($15 \text{ à } 50 \text{ mV/V}$) respectivamente, correlacionados às posições das cavas de resíduos.

Dentre os resultados das seções de resistividade elétrica e cargabilidade adquiridos com os arranjos DD e PD para ambos os parâmetros de aquisição, o arranjo PD ($a = 5 \text{ metros}$ e $n = 10$) foi o que melhor definiu a geometria das cavas, apresentou melhor resolução espacial e maior profundidade de investigação.

7.2 Considerações finais

O uso de modelagens diretas para definir estratégias e parâmetros de aquisição de campo se mostrou uma ferramenta poderosa, pois permitiu um planejamento e uma idéia do comportamento do parâmetro físico a ser observado em campo. É importante destacar que para o uso de metodologias como simulações diretas é preciso do subsídio de informações diretas para a elaboração do modelo físico a ser investigado.

CAPÍTULO 07 – Conclusão & Considerações finais

Os métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida se mostraram eficientes em investigações ambientais no caso de disposição inadequada de resíduos e em seu contínuo monitoramento, devido a sua versatilidade, facilidade e rapidez de aplicação dos ensaios de campo e baixo custo de aplicação se comparado com outros métodos de investigação da subsuperfície. A técnica de campo do Caminhamento Elétrico se mostrou hábil em caracterizar lateralmente e em profundidade as variações de resistividade elétrica e cargabilidade.

Os resultados apresentados pelos ensaios do método IP mostraram que os dados de cargabilidade apresentaram uma sensível variação ao tipo de resíduos presentes no interior das cavas.

Os resultados obtidos com a interpretação qualitativa através das pseudo-seções foram importantes pois proporcionaram um pré-conhecimento das anomalias observadas em campo e também uma avaliação do comportamento da contaminação existente.

O uso do método da inversão para dados de resistividade elétrica e cargabilidade 2D se mostrou robusto pois foi capaz de identificar e caracterizar com precisão estas anomalias antes identificadas pelas pseudo-seções. Também é importante ressaltar que para diminuir as ambigüidades acerca das interpretações qualitativas e quantitativas, a integração de informações diretas que complementem a caracterização dos parâmetros observados se faz necessária e obrigatória ao intérprete.

Os parâmetros de aquisição se mostraram capazes de caracterizar a variação de resistividade elétrica e cargabilidade em subsuperfície. Para investigações que necessitam de boa resolução em grandes profundidades sugerem-se menores espaçamentos entre eletrodos e mais níveis de investigação.

Referências bibliográficas

(Referências citadas e consultadas)

AAL, G. Z. A.; SLATER, L. D. & ATEKWANA, E. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics* 71 (2). p. H13 – H24. 2006.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos: Classificação – NBR 10004. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.

ATHANASIOU, E. N.; TSOURLOS, P. I.; PAPAACHOS, C. B. & TSOKAS, G. N. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different arrays types. *Journal of Applied Geophysics*, 62. p. 124 – 140. 2007.

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

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

BARKER, R. D. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break*, 10. p. 53 – 62. 1992.

BEARD, L. P. & TRIPP, A. C. Investigating the resolution of IP arrays using inverse theory. *Geophysics*, 60 (5). p. 1326 – 1341. 1995.

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

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

Referências bibliográficas

BERNSTONE, C.; DAHLIN, T.; OHLSSON, T. & HOGLAND, W. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology*, 39 (3-4). p. 360 – 371. 2000.

CANDANSAYAR, M. E. & BASÖKUR, A. T. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49. p. 13 – 25. 2001.

CARPENTER, P. J.; KAUFMANN, R. S. & PRICE, B. The use of resistivity soundings to determine landfill structure. *GroundWater*, 28 (4). p. 569 – 575. 1990.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de qualidade de águas subterrâneas do Estado de São Paulo – 1997. São Paulo: CETESB, 1998b. 106 p. 1998.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Projeto de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha/CETESB-GTZ. 2. ed. São Paulo, 398 p. 2001.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares: Relatório de 2006. 98 p. 2007.

CHAMBERS, J. E.; KURAS, O.; MELDRUM, P. I.; OGILVY, R. D. & HOLLANDS, J. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 1. p. B231 – B239. 2006.

COGGON, I. H. A comparison of IP electrodes arrays. *Geophysics*, 38. p. 737 – 76. 1973.

COSTA, A. F. U. & FERLIN, C. A. Aplicação prática de métodos elétricos na detecção e monitoramento da contaminação de águas subterrâneas. In.: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE

Referências bibliográficas

GEOFÍSICA, 2. Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: SBGf. p. 1210 – 1212. 1993.

DAHLIN, T. On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Doctorate thesis. Lund Institute of Technology. Lund University. Lund, Sweden. 186 p. 1993.

DAHLIN, T. The development of DC resistivity imaging techniques. Computer & Geosciences, 27. p. 1019 – 1029. 2001.

DAHLIN, T. & LOKE, M. H. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. Journal of Applied Geophysics, 38. p. 237 – 249. 1998.

DAHLIN, T. & ZOU, B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrodes arrays. Geophysical Prospecting, 52. p. 379 – 398. 2004.

DAILY, W. & OWEN, E. Cross-borehole resistivity tomography. Geophysics, 56 (8). p. 1228 – 1235. 1991.

DECEUSTER, J.; DELGRANCHE, J. & KAUFMANN, O. 2D cross-borehole resistivity tomographies below foundations as a tool to design proper remedial actions in covered karst. Journal of Applied Geophysics, 60. p. 68 – 86. 2006.

DOURADO, J. C.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. O. & LOURENÇO JÚNIOR, J. C. R. Utilização integrada de métodos elétricos e do GPR na análise ambiental do Aterro Sanitário de Jundiaí-SP. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., Salvador. Anais... Salvador: SBGF. p. 285 – 288. 2001.

DUARTE, O. O. Dicionário enciclopédico inglês-português de Geofísica e Geologia. 2ª Ed. Rio de Janeiro: SBGf. p. 352. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

EDWARDS L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. Geophysics, 42, p. 1020 – 1036. 1977.

ELIS, V. R. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese

Referências bibliográficas

(Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP/Rio Claro – SP. 264 p. 1999.

ELIS, V. R. & ZUQUETTE, L. V. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo – Uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8., 1996, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: ABGE. P. 39 – 49. 1996.

ELIS, V. R. & ZUQUETTE, L. V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. Revista Brasileira de Geociências. São Paulo – SP. Volume 32. 119 – 134 p. 2002.

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

FACHIN, S. J. S.; ELIS, V. R.; BORGES, W. R.; LAGO, A. L. & SOUZA, G. C. Modelagem elétrica 2D a partir de dados de eletrorresistividade do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP. In.: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2., 2006, Natal. Anais...SBGf: Rio de Janeiro. 2006.

FEITOSA, F. A. C & MANOEL FILHO, J. [Coord.]. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. CPRM/REFO/LABHID-UFPE, Fortaleza, CE. 391 p. 2000.

FILLI, M.; ROSA FILHO, E. F.; AUGE, M.; MONTAÑO XAVIER, J.; TUJCHINEIDER, O. El Acuífero Guaraní: um recurso compartilhado por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). Boletín Geológico y Minero, v. 109, n.4, p.389 – 3984. 1998.

FOX, R. C.; HOHMANN, G. W.; KILLPACK, T. J. & RIJO, L. Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. Geophysics, 61 (1). p. 75 – 93. 1980.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO, W.; PRADO, R. L. & DOURADO, J. C. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área

Referências bibliográficas

afetada por ruptura em teto de túnel urbano. Revista Brasileira de Geofísica, 19 (1). p. 33 – 46. 2001.

GALLAS, J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 24(1-2). p. 43 – 51, 2003.

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

GANDOLFO, O. C. B. & GALLAS, J. D. F. Resistividade 2D – Profundidade de investigação e resolução do objeto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2., 2006, Natal. Anais...SBGf: Rio de Janeiro. 2006.

GEOTOMO SOFTWARE. RES2DMOD, version 3.01, Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite- element methods. Geoelectrical Imaging 2-D & 3D. Geotomo Software, Penang, Malaysia. 15 p. 2002.

GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method – Geoelectrical Imaging 2-D & 3D, Geotomo Software, Penang, Malaysia. 129 p. 2003.

GRIFFITHS D. H. & BARKER R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, p. 211 – 226. 1993.

GRIFFITHS D. H. & BARKER R. D. Electrical imaging in Archaeology. Journal of Archaeological Science, 21. p. 153 – 158. 1994.

HAGREY, S.A. al & MEISSNER, R. Botanical problems studied by applied geophysics: Mitteilungen, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, DGG (German Geophysical Society). p. 2 – 8. 2004.

HAGREY, S. A. al. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. Journal of Experimental Botany (JXB Advance Access). p. 1 – 16. 2007.

Referências bibliográficas

HATAE, M. Aplicação de geofísica como subsídio para estudos de arqueologia do lixo. Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo São Paulo – USP/São Paulo – SP. 75 p. 2005.

HESSE, A.; JOLIVET, A.; & TABBAGH, A. New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics*, 51 (3), p. 585 – 594. 1986.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: Indicadores Sociais. São Paulo, SP. Disponível em www.ibge.gov.br. 2000.

INGHAM, M.; PRINGLE, D. & EICKEN, H. Cross-borehole resistivity tomography of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, (*In Press*). 2007.

INMAN, J. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40. p. 798 – 817. 1975.

INTERPEX LIMITED. RESIX IP2DI - Resistivity and Induced Polarization data interpretation software. Interpex, Golden, Colorado. 1996.

IPT. Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995. 278p.

IPT. Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, SP. 126p. 1981.

IRIS INSTRUMENTS. Syscal R2: *Manual of 250 W DC/DC converter*. Orléans, France. 72 p. 1992.

IRIS INSTRUMENTS. Syscal R2: *Operating manual*. Orléans, France. 72 p. 1993.

Referências bibliográficas

IRIS INSTRUMENTS. Syscal *PRO: 10 channels resistivity-meter for resistivity and IP measurements* (User's manual). Orléans, France. 66 p. 2003.

IRIS INSTRUMENTS. Elrec *PRO: 10 channels resistivity and IP receiver* (User's manual). Orléans, France. 61 p. 1993.

LAGO, A. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Dissertação (Mestrado). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo – USP/São Paulo – SP. 110 p. 2004.

LOKE, M. H. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60. p. 1682 – 1690. 1995.

LOKE, M. H. & BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44. p. 131 – 152. 1996a.

LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia. 67 p. 2000.

LOKE, M. H. Topographic modelling in electrical imaging inversion: 62nd Annual Conference Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, Session DODO2. Glasgow, Scotland. 03 p. 2000a.

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

LOKE, M. H.; CHAMBERS, J. E.; OGILVY, R. D. Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data. *Geophysical Prospecting*, 54. p. 287 – 301. 2006.

KAMURA, K. Relationships between eletrochemical properties of leacheate and resistivity of strata in the landfill site consisting mainly of combustion residuals. *Environmental Geology*, 41 (5). p. 537 – 543. 2002.

Referências bibliográficas

KELLY, W. E. Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. *Ground Water*, 14 (1), p. 6 – 10. 1976.

McNEIL, J. D. Electrical conductivity of soils and rock. Geonics Ltd., Ontario, Canada, Technical note Tn – 5. 1980.

MALAGUTTI FILHO, W.; JOSÉ, C.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; TANDEL, R. Y. & PORSANI, J. L. 1997. Aplicação Integrada de Técnicas Geofísicas no Aterro Sanitário de Rio Claro-SP. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Vol. 1, pp. 422-424.

MONDELLI, G. Investigação geoambiental em áreas de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP/São Paulo – SP. 264 p. 2004.

MONTEIRO, R. C. Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do sistema Aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Rio Claro – SP. 212 p. 2003.

MORAES, P. B. Tratamento de chorume de aterro sanitário usando eletrólise foto-assistida. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/Campinas – SP. 118 p. 2004.

MOURA, H. P. Emprego da Eletroresistividade e da Polarização Induzida na Caracterização Geoelétrica de Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP/Rio Claro – SP. 231 p. 2002.

NARAYAN, S.; DUSSEAUULT, M. B. & NOBES, D. C. Inversion techniques applied to resistivity inverse problems. *Inverse Problems*, 10. p. 669 – 686. 1994.

NICOLOTTI, G; SOCCO, L. V.; MARTINIS, R.; GODIO, A. & SAMBUELLI, L. Applications and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29 (2). p. 66 – 78. 2003.

Referências bibliográficas

NGUYEN, F; GARAMBOIS, S.; JONGMANS, D.; PIRARD, E. & LOKE, M. H. Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *Journal of Applied Geophysics*, 57, p. 260 – 277. 2005.

OLDENBURG, D. W. & LI, Y. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64. p. 403 – 416. 1999.

OLAYINKA, A. I. & YARAMANCI, U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45. p. 63 – 81. 2000.

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

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

PALACKY, G. J. Clay mapping using electromagnetic methods. *First Break*, 5. p. 295 – 306. 1987.

PANISSOD, C.; MICHOT, D.; BENDERITTER Y. & A. TABBAGH. On the effectiveness of 2D electrical inversion results: an agricultural case study. *Geophysical Prospecting*, 49. p. 570 – 576. 2001.

PAPADOPOULOS, N. G.; SARRIS, A.; FASSOULAS, C. H.; ILLIOPOULOS G. & HAMDAN, H. Contribution of geophysical investigations in the paleontological research for the recovery of *Deinotherium giganteum* from Siteia, Crete. 6th European Geoparks Meeting. University of Aegean, Mytiline. 2005.

PARASNIS, D. S. *Principles of applied geophysics*. 4th ed., Chapman and Hall, London. 420 p. 1986.

PARI, W.; CARLOTTO, V.; CÁRDENAS, J.; OVIEDO, M.; DOUMA, M.; BEST, M. & BOBROWSKY, P. Aplicación de la geofísica (resistividad 2D y Georadar-GPR) en la ciudadela inca de Machu Picchu: Cusco, Perú. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú (SGP). p. 50 – 53. 2006.

Referências bibliográficas

PASCHOALATO, C. F. P. R.; MARTINEZ, M. S.; FERREIRA, J. F. & BOCALON, E. C. Otimização de parâmetros analíticos a serem empregados no monitoramento de águas subterrâneas em aterros sanitários. In: 21 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. Anais...ABES: Rio de Janeiro : Associação brasileira de engenharia sanitária e ambiental, 2001.

PEJON, O. J. & ZUQUETTE, L. V. Importância de estudos geológico-geotécnicos para a disposição de rejeitos urbanos. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 2., 1991, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 367 – 377. 1991.

PELTON, W. H., RIJO, L., SWIFT, C. M., JR. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data: Geophysics, 43. p. 788 – 803. 1978.

PETIAU, G. & PERRIER, F. Physics and chemistry of electrodes for geophysical applications. In: The Garchy 1995-1996 electrode experiment technical report. Chapter 2. p. 17 – 28. 1998

PETROBRÁS. Petróleo Brasil S.A. *Lixão de Serrana: Caracterização do problema ambiental e proposição de soluções*. [s.l.]: PETROBRÁS, Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), 91 p. (Relatório Final). 1997.

PORSANI, J. L.; FILHO, W. M.; ELIS, V. R.; SHIMELES, F.; DOURADO, J. C. & MOURA, H. P. 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, 55 (3). p. 199 – 209. 2004.

REYNOLDS, J. M. An Introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons Inc., 796 p. 1997.

ROCHA, G. A. Mega-reservatório de água subterrânea do Cone Sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão. In: Seminário Internacional “Aqüífero Gigante do Mercosul”. Curitiba, PR. 27 p. 1996.

ROY, A. & APPARAO, A. Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, 36. p. 943-959. 1971.

Referências bibliográficas

SCHALCH, V. Produção e características do chorume em processos de decomposição de lixo urbano. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. Universidade de São Paulo – USP/São Carlos – SP. 103 p. 1984.

SANTOS, L. C. A questão dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem sócio-ambiental com ênfase no município de Ribeirão Preto-SP. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP/Rio Claro – SP. 120 p. 2004.

SASAKI, Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40. p. 453 – 463. 1992.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. Caracterização do chorume do aterro de Bauru. *In. XVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, Porto Alegre: ABES. 2000.

SETTI, A. A. A necessidade do uso sustentável dos recursos hídrico. Brasília: MMA/IBAMA, 344p. 1996.

SHIKLOMANOV, I. "World fresh water resources", GLEICK, P. H. (Editor), *Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, Stockholm Environmental Institute. p. 13-24. 1998.

SILVA, J. E.; LOUREIRO, E. M.; ELIS, V. R.; HODO, F. Y. & PORSANI, J. L. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20 (3). p. 193 – 198. 2002.

SLATER, L. D. & LESMES, D. IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67 (1). P. 77 – 88. 2002.

SOGADE, J. A.; SCIRA-SCAPPUZZO, F.; VICHABIAN, Y.; SHI, W.; RODI, W.; LESMES, D. P.; MORGAN, F. D. Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. *Geophysics*, 71 (3). p. B75 – B84. 2006.

Referências bibliográficas

SUMNER, J. S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 277 p. 1976.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. & VIGIL, S. Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, McGrall-Hill, Inc., New York, 949 p. 1993.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. Applied geophysics. Cambridge University Press, Second Edition. 770 p. 1990.

VALLIANATOS, F.; SOUPIO, P.; MAKRI, J. P.; SALTAS, V. & PAPADOPOULOS, I. Construed geotechnical characteristics of foundation beds by geophysical measurements. Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG). p. 135 – 142. Hania, Greece. 2006.

VIEIRA, A. E. A questão ambiental do resíduo/lixo em Ribeirão Preto-SP. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP/Rio Claro – SP. 153 p. 2002.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. Geotechnical and Environmental Geophysics. Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK. p. 147 – 189. 1990

ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; SINELLI, O.; GANDOLFI, N. Carta de zoneamento geotécnico específico para disposição de resíduos da região de Ribeirão Preto – SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 3., 1995, Ouro Preto. Anais...Ouro Preto: [s.n.], v. 2, p. 535 – 548. 1995.

ANEXOS

Anexo A – Tabela ilustrando análises físico-químicas realizadas ao longo dos anos para alguns poços localizados na área do antigo lixão de Ribeirão Preto – SP.

Parâmetros	Unidade	P-1	P-1	P-2	P-2	P-3	P-3	P-5	P-5	P-19	P-19
		2004	1997	2004	1997	2004	1997	2004	1997	2004	1997
Condutividade	µS / cm	78,7	xx	740	xx	91,2	0,97	67,8	195	803	0,83
Sólidos totais	mg / L	756	xx	1828	xx	400,5	142	170	142	633	2,505
Nitrato	mg/L NO ₃	< 0,001	xx	3,504	xx	2,388	0,028	0,054	0.11	3,071	N/D
Amônia	mg/L NH ₃	0,038	xx	4,0	xx	0,104	0,003	0,001	0.016	3,20	0,13
Sulfito	mg/L SO ₃	1,97	xx	8,85	xx	1,97	0,40	0,05	0.35	0,34	1,0
Cromo total	mg/L Cr	0,085	xx	0,141	xx	0,048	0,4	< 0,001	0.04	1,145	0,4
Níquel	mg/L Ni	0,160	xx	0,131	xx	0,121	0,016	0,118	0.014	0,179	0,30
Zinco	mg/L Zn	0,278	xx	12,324	xx	0,297	0.058	0,731	0.033	0,729	0,63
Oxigênio consumido	mg/L O ₂	N/D	xx	51,1	xx	10,8	0.5	1,22	2.20	12,77	9

♦ Análises físico-químicas realizadas – coleta em 21/05/2004

♦ xx – Não foram feitas coletas.