

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**MONITORAMENTO TEMPORAL DA PLUMA
DE CONTAMINAÇÃO DO ATERRO
CONTROLADO DE RIO CLARO (SP) POR MEIO
DO MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE**

José Ricardo Melges Bortolin

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, Área de Geociências e Meio Ambiente, para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)

2009

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Aluno – José Ricardo Melges Bortolin

Rio Claro, 02 de Outubro de 2009.

Resultado: Aprovado

Aos meus pais, José e Véra, meu irmão Luís
Rodrigo, meus avós Antonio (*in memoriam*) e
Catarina (*in memoriam*), Luiz (*in memoriam*) e
Ana (*in memoriam*), e à Amanda.

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida e por me prover forças durante toda a execução do projeto, principalmente no último e mais conturbado semestre do curso.

Aos meus pais, José e Véra, amigos e companheiros de todas as horas, por me concederem condições de cursar meu mestrado e por apoiarem e incentivarem minhas decisões.

Ao meu irmão Rodrigo, pela presença e por toda ajuda a mim dispensada durante minha caminhada (os trabalhos de campo não foram fáceis...).

À minha família, que esteve ao meu lado sempre que precisei, e à minha “nova” família, que me acolheu e também me ajudou por diversas vezes, em especial: Thiago, geólogo recém-formado, elucidando muitas dúvidas “geológicas”, e Seu Canindé, pelas traduções de *abstracts*.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, por confiar em mim e prontamente ter aceitado me orientar, mesmo sem me conhecer, pelas idéias e sugestões, sempre construtivas, e por compartilhar comigo sua experiência de vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pelo auxílio financeiro concedido na forma de bolsa de mestrado.

À Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente – SEPLADEMA, na pessoa do Eng. Luiz Antonio Seraphim, diretor do Depto. de Resíduos Sólidos durante o período de realização dos ensaios geofísicos, e ao Sr. Elilson de Sena Corocher, responsável pelos aterros sanitário e controlado do município de Rio Claro (SP).

Ao técnico do Depto. de Geologia Aplicada, Francisco Manoel Garcia Barrera, nosso querido Paco, pelo inestimável auxílio prestado durante a execução dos trabalhos de campo e cuja amizade jamais será esquecida.

Aos integrantes da banca do exame de qualificação, Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga e Dra. Andresa Oliva, pelas correções e muitas sugestões direcionadas ao meu projeto.

À amiga Claudia Moré de Lima, pela ajuda pré-mestrado, a qual foi indispensável para que eu pudesse chegar aonde cheguei.

Ao amigo César Augusto Moreira, pelo auxílio nas etapas de campo e pelas muitas sugestões e dúvidas sanadas no decorrer do projeto.

Ao amigo Mateus Vidotti Ferreira, pelas inúmeras vezes que me auxiliou com o ArcGIS.

À amiga Mariana Fernandes, por me ensinar a operar o GPS diferencial, fundamental para a conclusão do meu projeto.

Aos amigos e familiares que também me ajudaram nas várias etapas de campos: meu tio, Robson “Bill”; Demétrio Tadeu Ceccatto; Fabrício Aníbal Corradini; Sueli Roberta da Silva e Daniel Marinzek.

Às funcionárias do prédio da Pós-Graduação em Geociências: Rosângela, nosso anjo da guarda, que forneceu todo apoio em relação à documentação, formulários, malotes e afins, e Andréa e Ângela, que sempre garantiram um ambiente de trabalho agradável e organizado.

A todos os amigos que, durante muito tempo, estiveram presentes nas salas de computadores do prédio da Pós e ajudaram a tornar menos cansativas as intermináveis horas de trabalho. Não citarei nomes, pois são muitos (e são mesmo!) e seria injustiça de minha parte deixar de lembrar de alguém.

Por último, mas não menos importante, à pessoa que, no último ano, entrou em minha vida, tornou-se minha amiga, minha companheira de todos os momentos, soube compreender minhas ausências, e tornar-se-á minha esposa e mãe dos meus filhos: minha eterna namorada, Amanda.

“O futuro da humanidade está no lixo;
depende de nós escolhermos o caminho”.

José Ricardo Melges Bortolin

Sumário

Índice	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	ix
Resumo	x
Abstract	xi
Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	20
Capítulo 3 - Caracterização da área de estudo	51
Capítulo 4 - Metodologia	61
Capítulo 5 - Resultados e Discussões	69
Capítulo 6 – Conclusões	122
Capítulo 7 – Recomendações	127
Referências	129
Anexo 1	135

Índice

	Página
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Resíduos Sólidos Urbanos: Cenário Mundial Atual.....	1
1.2 Áreas de disposição de resíduos sólidos e o planejamento urbano	3
1.3 Políticas de Resíduos Sólidos.....	5
1.4 Áreas de disposição de resíduos sólidos, riscos ambientais e saúde pública.....	6
1.5 Métodos de Investigação.....	9
1.6 Monitoramento Temporal.....	10
1.7 Justificativa da Pesquisa.....	11
1.8 Objetivos.....	13
1.9 Revisão Bibliográfica.....	14
1.9.1 Eletrorresistividade aplicada em áreas de disposição de resíduos.....	14
1.9.2 Monitoramento Temporal	16
1.9.2.1 Área Industrial em Araras (SP)	16
1.9.2.2 Aterro controlado de Cordeirópolis (SP).....	17
1.9.3 Ensaios Geofísicos realizados no aterro controlado de Rio Claro (SP).....	18
 Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	 20
2.1 Métodos Geofísicos de Investigação	20
2.2 Breve histórico dos Métodos Geoeletricos	20
2.3 Classificação dos Métodos Geoeletricos.....	24
2.4 O Método da Eletrorresistividade.....	24
2.4.1 Conceitos fundamentais da resistividade elétrica	25
2.4.2 A resistividade elétrica das rochas	26
2.4.3 Influência do chorume na resistividade dos materiais geológicos.....	31
2.4.4 Medição da resistividade elétrica de um meio geológico	32
2.4.5 Resistividade Aparente	37
2.5 Técnicas de Campo	38
2.5.1 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical	38
2.5.2 Técnica do Imageamento Elétrico.....	39
2.6 Arranjos de Campo	40
2.6.1 Arranjo Schlumberger.....	40

2.6.2	Arranjo Dipolo-Dipolo	42
2.7	Processamento e interpretação dos dados	44
2.7.1	Interpretação Quantitativa Unidimensional	44
2.7.1.1	Método Comparativo	45
2.7.1.2	Método Direto	46
2.7.1.3	Método Inverso	46
2.7.2	Interpretação Quantitativa Bidimensional	47
2.7.2.1	Método Inverso	48
Capítulo 3 – Caracterização da área de estudo		51
3.1	Localização	51
3.2	Histórico	54
3.3	Contexto geológico	56
3.3.1	Formação Corumbataí	56
3.3.2	Formação Rio Claro	57
3.4	Hidrografia e Hidrogeologia	58
3.5	Aspectos Climáticos	59
Capítulo 4 – Metodologia		61
4.1	Aquisição dos dados de eletrorresistividade em campo	61
4.2	Processamento dos dados	64
4.2.1	Sondagens Elétricas Verticais	64
4.2.2	Mapa Potenciométrico	65
4.2.3	Imageamentos Elétricos	66
4.2.4	Mapas de resistividade aparente	66
4.3	Modelo Digital do Terreno em 3D (MDT)	68
Capítulo 5 – Resultados e Discussões		69
5.1	Interpretações das Sondagens Elétricas Verticais (SEV)	71
5.1.1	Grupo 1: ensaios realizados fora da área do aterro	72
5.1.1.1	Sub-grupo 1-A: ensaios realizados fora do aterro – Direção Leste	72
5.1.1.2	Sub-grupo 1-B: ensaios realizados fora do aterro – Direção Oeste	75
5.1.2	Grupo2: ensaios realizados dentro da área do aterro	78
5.2	Seções Geométricas	80
5.2.1	Seção AB	81

5.2.2	Seção CD	82
5.2.3	Seção EF	84
5.3	Mapa Potenciométrico.....	85
5.4	Interpretações dos Imageamentos Elétricos (IE) – Monitoramento Temporal	86
5.4.1	Linhas de referência: CEIP(7) e Linha 6	88
5.4.2	Monitoramento Temporal: CEIP(1) e Linha 1	90
5.4.3	Monitoramento Temporal: CEIP(2) e Linha 2	92
5.4.4	Monitoramento Temporal: CEIP(3) e Linha 3	94
5.4.5	Monitoramento Temporal: CEIP(4) Linha 4.....	96
5.4.6	Monitoramento Temporal: CEIP(6) e Linha 5.....	99
5.5	Variações sazonais de resistividade.....	101
5.5.1	Variações Sazonais: CEIP(1)-2 e Linha 1-2	101
5.5.2	Variações Sazonais: CEIP(4)-2 e Linha 4-2	107
5.6	Mapas de resistividade aparente.....	113
5.6.1	Mapa de resistividade aparente: Nível 1	113
5.6.2	Mapa de resistividade: Nível 2	114
5.6.3	Mapa de resistividade aparente: Nível 3	116
5.6.4	Mapa de resistividade aparente: Nível 4	117
5.6.5	Mapa de resistividade aparente: Nível 5	119
Capítulo 6 – Conclusões.....		122
6.1	Em relação à metodologia adotada	122
6.1.1	Sondagens Elétricas Verticais (SEV).....	122
6.1.2	Imageamentos Elétricos (IE)	124
6.2	Em relação ao monitoramento temporal.....	125
6.3	Em relação às variações sazonais.....	126
Capítulo 7 - Recomendações.....		127
7.1	Recomendações com relação ao Monitoramento Temporal	127
7.2	Recomendações com relação ao aterro controlado	128
Referências.....		129
ANEXO 1.....		135

Lista de Figuras

		Página
Figura 1.1:	Disposição final dos resíduos coletados no Brasil (Fonte: IBGE, 2000, p.50).....	7
Figura 1.2:	Resíduos sólidos depositados recentemente no aterro controlado de Rio Claro (SP).....	12
Figura 1.3:	À direita: transporte de chorume entre os dois aterros; à esquerda: lagoa do sistema de recirculação de chorume do aterro controlado de Rio Claro (SP).....	13
Figura 2.1:	Principais Métodos Geofísicos, destacando o Método da Eletrorresistividade (ER) em vermelho. (Fonte: BRAGA, 1997, p.4 e 2001, p.2; SHERIFF, 1989, p.3; SOUZA <i>et al</i> , 1998, p.165).....	21
Figura 2.2:	Classificação resumida dos Métodos Geométricos. Destaque para as Técnicas da Sondagem Elétrica e do Imageamento Elétrico (em vermelho). (adaptado de ORELLANA, 1972, p.34).....	24
Figura 2.3:	Condutor cilíndrico homogêneo usado para obter a expressão da resistividade elétrica.....	26
Figura 2.4:	Dispositivo para determinação da resistividade elétrica de um meio homogêneo.....	33
Figura 2.5:	Dispositivo tetraeletródico A M N B para aplicação de Métodos Geométricos.....	35
Figura 2.6:	Exemplo hipotético de sucessão de camadas geológicas com heterogeneidades e anisotropias distribuídas lateralmente e em profundidade.....	37
Figura 2.7:	Vista superior da distorção do campo elétrico causada por um corpo heterogêneo e anisotrópico (Fonte: SHERIFF, 1989, p.184).....	37
Figura 2.8:	A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	39
Figura 2.9:	A técnica do Imageamento Elétrico (IE).....	40
Figura 2.10:	Arranjo Schlumberger.....	41
Figura 2.11:	Arranjo Dipolo-Dipolo.....	43
Figura 2.12:	Exemplos hipotéticos da família de curvas auxiliares com 3 camadas.....	45

Figura 2.13:	Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv (Fonte: GEOTOMO SOFTWARE, 2007, p.2).....	49
Figura 3.1:	Mapa de localização do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de IBGE, 2005, 2008).....	52
Figura 3.2:	Fotografia aérea do aterro controlado de Rio Claro (SP) (modificado de BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S.A.,2006).....	53
Figura 3.3:	Imagem em 3D do aterro controlado de Rio Claro (SP).....	54
Figura 3.4:	Mapa geológico do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de CPRM, 200?; IBGE, 2008).....	57
Figura 3.5:	Mapa hidrológico do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de CEAPLA, 200?; IBGE, 2008).....	59
Figura 4.1:	Coleta de dados da Linha 4-2 com o resistímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.....	62
Figura 4.2:	Resistímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.....	62
Figura 4.3:	Módulo de emissão de corrente BISON 2390 – T 50 (à esquerda) e módulo de medição do potencial BISON 2390 – R (à direita).....	63
Figura 4.4:	Coleta de dados com o resistímetro BISON 2390. À esquerda: SEV 08. À direita: Linha 3.....	64
Figura 4.5:	GPS diferencial Trimble Navigation Pathfinder Pro XR 12 (mochila com receptor e antena, à esquerda; antena, ao centro e coletor Recon, à direita).....	67
Figura 4.6:	Coleta de dados com o GPS diferencial no aterro controlado de Rio Claro (SP).....	67
Figura 5.1:	Localização dos ensaios geofísicos realizados no aterro controlado de Rio Claro (SP) (modificado de BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S.A.,2006).....	70
Figura 5.2:	As nove curvas de campo agrupadas.....	71
Figura 5.3:	Curvas de campo das SEV do Grupo 1.....	72
Figura 5.4:	Curvas de campo das SEV do Sub-grupo 1-A.....	73

Figura 5.5:	Curvas de campo das SEV do Sub-grupo 1-B.....	76
Figura 5.6:	Curvas de campo das SEV do Grupo 2.....	78
Figura 5.7:	Mapa de localização das seções geoeletricas geradas com base nos dados das SEV.....	81
Figura 5.8:	Seção AB do subsolo construída com base nas informações das SEV do Sub-grupo 1-A.....	82
Figura 5.9:	Seção CD do subsolo construída com base nas informações das SEV do Sub-grupo 1-B.....	83
Figura 5.10:	Seção EF do subsolo construída com base nas informações das SEV do Grupo 2.....	84
Figura 5.11:	Mapa potenciométrico da área de estudos.....	86
Figura 5.12:	Mapa de localização dos Imageamentos Elétricos executados no aterro controlado de Rio Claro (SP), nos anos de 1999 (CEIP, em laranja) e 2008 (IE, em amarelo).....	87
Figura 5.13:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(7) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 6 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 6 de 2008, com correção topográfica.....	89
Figura 5.14:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 1 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 1 de 2008, com correção topográfica.....	91
Figura 5.15:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(2) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 2 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 2 de 2008, com correção topográfica.....	93
Figura 5.16:	Afloramento de chorume próximo ao limite sul do aterro.....	94
Figura 5.17:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(3) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 3 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 3 de 2008, com correção topográfica.....	95

Figura 5.18:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 4 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 4 de 2008, com correção topográfica.....	97
Figura 5.19:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(6) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 5 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 5 de 2008, com correção topográfica.....	100
Figura 5.20:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1), realizado no período de estiagem, em Agosto de 1999. Abaixo: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1)-2, realizado no período de chuvas, em Março de 2000.....	102
Figura 5.21:	Variação da resistividade aparente dos ensaios CEIP(1) e CEIP(1)-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).....	103
Figura 5.22:	Acima: Seção de resistividade aparente da Linha 1, realizada no período de estiagem, em Outubro de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 1-2, realizada no período de chuvas, em Maio de 2008.....	104
Figura 5.23:	Variação da resistividade aparente da Linha 1 e da Linha 1-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).....	106
Figura 5.24:	Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4), realizado no período de estiagem, em Agosto de 1999. Abaixo: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4)-2, realizado no período de chuvas, em Março de 2000.....	107
Figura 5.25:	Variação da resistividade aparente dos ensaios CEIP(4) e CEIP(4)-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).....	109
Figura 5.26:	Acima: Seção de resistividade aparente da Linha 4, realizada no período de estiagem, em Outubro de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 4-2, realizada no período de chuvas, em Abril de 2008.....	110

Figura 5.27:	Trator que faz o transporte de chorume do aterro sanitário para o aterro controlado.....	111
Figura 5.28:	Variação da resistividade aparente da Linha 4 e da Linha 4-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).....	112
Figura 5.29:	Mapa de resistividade do primeiro nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=1,70m).....	114
Figura 5.30:	Mapa de resistividade do segundo nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=5,10m).....	115
Figura 5.31:	Chorume aflorando através da parede externa da cava de resíduos e migrando em direção à estrada não pavimentada.....	116
Figura 5.32:	Mapa de resistividade do terceiro nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=8,70m).....	117
Figura 5.33:	Mapa de resistividade do quarto nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=12,7m).....	118
Figura 5.34:	Mapa de resistividade do quinto nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=17,0m).....	119
Figura 5.35:	Integração dos mapas de resistividade dos cinco níveis de investigação, em 3D.....	120

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 1.1: Números da geração de resíduos sólidos urbanos em diferentes abrangências geográficas. (Fonte: ¹ ONU <i>apud</i> CEPAM, 2008; ² WORLD BANK, 2008, p.2; ³ IBGE, 2000, p.52; ⁴ SÃO PAULO, 2003).....	2
Tabela 1.2: Produção estimada de resíduos sólidos urbanos na cidade de Rio Claro (SP) em 1985 e 2007. (Fonte: ^{1,2} BERRÍOS, 1986, p.91; ³ BERRÍOS, 1986, p.90; ⁴ IBGE, 2007, p. 93; ⁵ CETESB, 2007, p.30).....	3
Tabela 1.3: Doenças relacionadas com resíduos sólidos e transmitidas por vetores (Fonte: HELLER & MÖLLER, 1995).....	9
Tabela 2.1: Porosidade intergranular de diversas rochas (ORELLANA, 1972, p.63).....	28
Tabela 2.2: Valores de resistividade de alguns tipos litológicos principais (BRAGA, 2001, p.29; ORELLANA, 1972, p. 52 e 71; PARASNIS, 1972, p.98; TELFORD, GELDART E SHERIFF, 2004, p.285 a 290).....	30
Tabela 3.1: Classificação do clima do município de Rio Claro (SP).....	59
Tabela 4.1: Correspondências entre os ensaios de Moura (2002) e Bortolin (2009).....	63
Tabela 5.1: Informações dos ensaios geográficos executados no aterro controlado de Rio Claro (SP).....	69
Tabela 5.2: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Sub-grupo 1-A.....	73
Tabela 5.3: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Sub-grupo 1-A.....	74
Tabela 5.4: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Sub-grupo 1-B.....	76
Tabela 5.5: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Sub-grupo 1-B.....	76
Tabela 5.6: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Grupo 2..	79
Tabela 5.7: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Grupo 2.....	79
Tabela 5.8: Relação dos ensaios realizados para verificação de possíveis variações sazonais de resistividade.....	101
Tabela 6.1: Materiais geológicos identificados da Formação Rio Claro e suas respectivas variações de valores.....	122
Tabela 6.2: Materiais geológicos identificados da Formação Corumbataí e suas respectivas variações de valores.....	123
Tabela 6.3: Estrutura do aterro controlado de Rio Claro (SP).....	124

Resumo

Este trabalho contempla um monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP), por meio do Método da Eletrorresistividade, comparando-se resultados de Imageamentos Elétricos, com arranjo Dipolo-Dipolo, executados nos anos de 1999 e 2008. A base desse método reside em que diferentes materiais, geológicos ou não, apresentam diferentes valores de resistividade elétrica, sendo essa um parâmetro intrínseco dos materiais, o qual se relaciona à dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio. O chorume gerado em aterros acaba por diminuir a resistividade elétrica do meio natural circunvizinho, caracterizando a contaminação. Assim, zonas de baixa resistividade, com valores menores ou iguais a $50\Omega.m$, foram associadas à contaminação por chorume. A interpretação conjunta das seções de resistividade aparente permitiu identificar alterações das dimensões da pluma de contaminação no decorrer dos anos. Regida pelos fluxos principal e secundário, a pluma de contaminação avançou em direção aos limites oeste e sul do aterro. Complementarmente, Sondagens Elétricas Verticais permitiram verificar a profundidade do nível freático e o sentido do fluxo d'água, além da caracterização geolétrica das litofácies sobre as quais está assentado o aterro: sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro e sedimentos predominantemente siltosos da Formação Corumbataí.

Palavras-chaves: monitoramento temporal, aterro, eletrorresistividade, Imageamento Elétrico, Sondagem Elétrica Vertical.

Abstract

This work describes a temporal monitoring of the contamination plume from the controlled landfill of Rio Claro (SP), through the resistivity method, comparing the Electroresistivity Profiling's results, with Dipole-Dipole array, carried out in 1999 and 2008. The basis of this method lies in that different materials, geological or not, have different values of resistivity, and this is an intrinsic material parameter, which relates to the difficulty experienced by an electric current to propagate in a body. The leachates produced on the landfill diminish the electrical resistivity of the natural ambient, characterizing the contamination. Thus, zones of low resistivity, with values smaller or same a 50ohm.m, had been associates to the contamination for landfill wastewater. The joint interpretation of the sections of apparent resistivity allowed to identify alterations of the dimensions of the contamination plume in elapsing of the years. Governed by the main and secondary flows, the contamination plume advanced in direction to the limits west and soul of controlled landfill. Complementarily, Vertical Electrical Soundings had allowed to verify the depth and the direction of the underground water flow, and to characterize geo-electrically the lithology on which is seated the controlled landfill: sediments predominantly sandy of the Rio Claro Formation and sediments predominantly silty of the Corumbataí Formation.

Keywords: temporal monitoring, landfill, electrical resistivity, Electroresistivity Profiling, Vertical Electrical Soundings.

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Resíduos Sólidos Urbanos: Cenário Mundial Atual

Na atual sociedade, milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos são geradas por dia, em todo o mundo. Dois fatores que contribuem significativamente – mas não exclusivamente – para tanto são o Modelo de Produção e Consumo Capitalista (MPCC) e a constante busca do ser humano por melhores condições de vida.

O primeiro fator – MPCC –, desde seu início, no século XV, vem causando estragos e desequilíbrios em ecossistemas naturais e agrícolas e em sistemas urbanos. Esse modelo baseia-se, acima de tudo, no capital, além da ciência, tecnologia, moda, publicidade, meios de comunicação e comércio. No MPCC ainda prevalecem os interesses econômicos sobre os sociais, concentração demográfica e econômica, criação de infra-estrutura, intensificação do fluxo de pessoas e serviços e espalhamento de mercadorias mundo afora (VIEIRA, 2002, p.2).

No decorrer de sua existência, o MPCC proporcionou um aumento no poder aquisitivo e induziu hábitos de consumo em grande parte da população mundial. Também norteou novos processos de industrialização que, a cada dia, colocam no mercado mais e mais produtos potencialmente poluidores.

Em cinco séculos de existência, tal modelo passou por diversas fases, todas elas caracterizadas pela crescente e constante transformação da natureza e geração de problemas ambientais (VIEIRA, 2002, p.114). Exemplo disso é a poluição do meio natural, causada pela disposição final, muitas vezes incorreta, de resíduos domésticos, hospitalares e industriais, e a

contaminação de solos e águas por substâncias provenientes da decomposição desses resíduos.

O segundo fator faz com que se estabeleçam processos de migração de populações para áreas antes desocupadas e de modificações antrópicas do meio natural, para que este possa se adequar às necessidades de conforto e bem estar do ser humano. Devido às políticas de ordenamento territorial e gestão ambiental inexistentes e/ou ineficientes, são escolhidos locais técnica e geologicamente inapropriados para o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos gerados em tais processos.

A CETESB (2008) define resíduos sólidos urbanos:

Despejos sólidos, restos, remanescentes putrescíveis e não putrescíveis (com exceção dos excrementos) que incluem papel, papelão, latas, material de jardim, madeira, vidro, cacos, trapos, lixo de cozinha e resíduos de indústria, instrumentos defeituosos e até mesmo aparelhos eletrodomésticos imprestáveis.

Segundo estimativas da ONU, anualmente são produzidas cerca de 1 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos (ONU *apud* CEPAM, 2008). Os países da América Latina e Caribe são responsáveis por cerca de 12,5% desse total (WORLD BANK, 2008, p.2). Somente o Brasil produz cerca de 6% do total mundial (IBGE, 2000). No Estado de São Paulo são mais 7.393.000 toneladas anuais (SÃO PAULO, 2003).

Abrangência Geográfica	Produção de resíduos (toneladas/dia)
Mundo	¹ 2.739.726
América Latina e Caribe	² 342.465
Brasil	³ 161.827
Estado de São Paulo	⁴ 20.256

Tabela 1.1: Números da geração de resíduos sólidos urbanos em diferentes abrangências geográficas. (Fonte: ¹ONU *apud* CEPAM, 2008; ²WORLD BANK, 2008, p.2; ³IBGE, 2000, p.52; ⁴SÃO PAULO, 2003).

Na década de 1980, foi realizado um levantamento sobre produção de resíduos sólidos urbanos na cidade de Rio Claro (SP). Na época, a cidade contava com uma população em torno de 125.000 habitantes e a produção diária foi avaliada em 56,5 toneladas (BERRÍOS, 1986, p. 75). Segundo o autor, a quantidade média de resíduos sólidos urbanos produzidos diariamente por pessoa foi calculada em cerca de 502g. Outros tipos de resíduos, como industriais e hospitalares, não estão inclusos nessa estimativa.

Segundo o IBGE (2007, p.93), no ano de 2007, a população da cidade de Rio Claro (SP) evoluiu para mais de 185.000 habitantes e, proporcionalmente, a produção de resíduos

sólidos urbanos, para 95,3 toneladas diárias (CETESB, 2007, p.30). Efetuando-se um cálculo simples, pode-se chegar ao valor médio de 513g de resíduos sólidos urbanos produzidos por habitante, condizente com o índice para cidades entre 100.001 e 200.000 habitantes (CETESB, 2007, p.7).

Ano	População (habitantes)	Produção de resíduos sólidos urbanos (ton/dia)	Produção de resíduos sólidos urbanos (g/dia/capita)
1985	¹ 125.000	² 56,5	³ 502
2007	⁴ 185.421	⁵ 95,3	513

Tabela 1.2: Produção estimada de resíduos sólidos urbanos na cidade de Rio Claro (SP) em 1985 e 2007. (Fonte: ^{1,2}BERRÍOS, 1986, p.91; ³BERRÍOS, 1986, p.90; ⁴IBGE, 2007, p. 93; ⁵CETESB, 2007, p.30).

Inversamente proporcional à produção, está o índice de reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Na América Latina e Caribe, somente 3% de toda a produção de resíduos sólidos urbanos são reciclados (WORLD BANK, 2008, p.7).

Segundo o Compromisso Empresarial para a Reciclagem – CEMPRE, cerca de 12% dos resíduos sólidos urbanos são reciclados no Brasil. No ano de 2004, dos 5507 municípios brasileiros, somente 237 realizavam a coleta seletiva de lixo (CEMPRE, 2008), o que representa uma parcela de aproximadamente 4,25% do número total de municípios.

No município de Rio Claro (SP), o índice de reciclagem é de aproximadamente 2,1% do total de resíduos sólidos urbanos coletados, o que corresponde a cerca de 60 toneladas mensais (JORNAL CIDADE DE RIO CLARO, 2007).

De um modo geral, o restante dos resíduos coletados que não são reciclados recebe destinações como incineração, compostagem (para resíduos orgânicos) ou são dispostos em lixões e aterros controlados e/ou sanitários.

1.2 Áreas de disposição de resíduos sólidos e o planejamento urbano

A problemática existente por trás da disposição final de resíduos sólidos urbanos não é recente, remontando, pelo menos, três ou quatro décadas. Cottas (1983, p.89) já afirmava que as administrações municipais enfrentam inúmeras dificuldades com a determinação de locais apropriados para a disposição de rejeitos sólidos, tanto urbanos como industriais, questão essa que reveste-se de especial importância nos processos de planejamento urbano.

O mesmo autor também afirma que na escolha e na caracterização de áreas para realizar a disposição de resíduos sólidos urbanos deve-se executar indispensavelmente, ou

mesmo obrigatoriamente, estudos geológicos versando sobre a geotecnia e a hidrogeologia locais.

A escolha de tais áreas envolve investigações geológicas a fim de se determinar, basicamente, três quesitos: as condições de drenagem superficial dos terrenos, as características de drenabilidade dos solos e as propriedades para qualificação dos solos como material de cobertura (escavabilidade e compactação).

Ainda, segundo Cottas (*op. cit.*), os locais ideais para a instalação de aterros sanitários devem apresentar:

- baixa declividade, visando minimizar escoamentos para a área do aterro, ou construção de um sistema de drenagem para desviar o escoamento de águas pluviais
- distâncias superiores a 200m das cabeceiras de drenagens para evitar contaminação dos cursos d'água
- solos areno-argilosos, com grãos maiores que 0,1mm para evitar crescimento de bactérias nos interstícios
- conteúdo de argila superior a 25% para garantir condições adequadas de permeabilidade
- permeabilidade da base variando entre 10^{-4} a 10^{-7} cm/s, sendo adequados valores menores para locais onde o lençol freático for menos profundo
- solos de fácil escavabilidade e com boas características de material de aterro: baixos valores de LL (Limite de Liquidez) (20 a 30) e IP (Índice de Plasticidade) (5 a 10) e granulometria de areia fina, silte e argila em porcentagens próximas (solos homogêneos)

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define, através da norma NBR 13896/97, critérios ambientais, operacionais e sócio-econômicos que devem ser observados para a implantação de aterros sanitários, entre eles:

- distância mínima de 200m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água
- declividade mínima de 1% e máxima de 30%
- solos homogêneos com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e zona não saturada com espessura superior a 3m
- existência de uma camada natural de espessura mínima de 1,5m de solo insaturado entre a base do aterro e o topo do lençol freático
- impermeabilização da base do aterro quando as condições hidrogeológicas do local não atenderem às especificações supra citadas

- sistema de drenagem para coleta e remoção do líquido percolado
- sistema de exaustão dos gases gerados durante a decomposição dos resíduos
- local de implantação não deve ser sujeito a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos
- instalação de poços para monitoramento de águas subterrâneas durante sua operação e após seu fechamento (recomenda-se durante 20 anos)
- distância mínima de 500m dos distritos – núcleo populacional, da cidade-sede – área urbanizada ou das sedes das fazendas

Fica evidente que os critérios da NBR 13896/97 não se aplicam integralmente a aterros controlados, posto que, em diversos casos, são originados a partir de lixões e medidas preventivas de contaminação, como impermeabilização da base, não são cumpridas.

1.3 Políticas de Resíduos Sólidos

A falta de uma política nacional de gestão e orientação ambiental no que diz respeito aos resíduos sólidos urbanos é fato. Desde 1991, tramitam na Câmara dos Deputados, em Brasília, inúmeros projetos de lei que tem por objetivo instituir uma política nacional de resíduos sólidos. Dentre todos eles, destaca-se o Projeto de Lei nº. 203 de 1991, o qual foi responsável por introduzir as bases e diretrizes gerais que deveriam ser aplicáveis aos resíduos sólidos gerados no Brasil.

Entretanto, dezoito anos se passaram e a política regulamentadora de geração, tratamento e disposição dos resíduos sólidos no país continua no papel.

No ano de 2007 foi encaminhado à Câmara dos Deputados, o Projeto de Lei nº. 1991, o qual aprecia as matérias contempladas nos projetos de leis apensados ao Projeto de Lei nº. 203 de 1991, e tem como caráter tornar-se uma proposta substitutiva global.

Esse projeto de lei define os deveres e obrigações dos geradores de resíduos sólidos urbanos no país, de modo que todas as pessoas, físicas ou jurídicas, responsáveis direta ou indiretamente pela geração de resíduos sólidos estão sujeitas a essa lei. Também determina catorze diretrizes, visando a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, a não-geração, redução, reutilização, tratamento e a destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos, entre outros. São previstos ainda que os Estados, Municípios e o Distrito Federal deverão elaborar Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) contendo,

entre outras coisas, ações preventivas e corretivas nos procedimentos adotados, incluindo o respectivo **programa de monitoramento** das áreas de disposição de resíduos.

As Políticas de Resíduos Sólidos Estaduais, Municipais e do Distrito Federal que vierem a ser elaboradas deverão ser condizentes com as diretrizes estabelecidas no PL 1991/2007.

No Estado de São Paulo existe uma legislação específica, que trata da gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, em vigor há 3 anos, ao contrário do observado no âmbito nacional. Esta é a Política Estadual de Resíduos Sólidos, Lei Estadual nº. 12.300, de 16 de março de 2006, a qual substitui a Lei nº. 11.387, de 27 de maio de 2003, revogada de acordo com o Artigo 67.

Ao todo, são 59 artigos, que abordam a geração e os tipos de resíduos, caracterização dos geradores, tipos de resíduos e de tratamentos, destinação e disposição final, gestão integrada e compartilhada e penalidades, entre outros aspectos.

Esta lei é guiada por doze princípios, disposto no Artigo 2º, que englobam: gestão integrada e compartilhada dos resíduos sólidos, envolvendo o Poder Público, iniciativa privada e outros segmentos da sociedade civil; alterações dos padrões atuais e promoção de novos padrões sustentáveis de produção e consumo; promoção de práticas ambientalmente adequadas de reutilização, reciclagem, redução, recuperação e prevenção à poluição; definição das responsabilidades sobre a produção e o tráfego de matérias-primas ou de produtos intermediários ou acabados que venham a causar danos ambientais.

Assim como no PL 1991/2007, é prevista a implantação de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos pelos municípios, a fim de permitir uma visão global de todo o processo entre a geração e a disposição final de resíduos sólidos, e eliminar/minimizar os riscos à saúde e ao ambiente. Esse plano deve contemplar, entre outros, as diretrizes estabelecidas no Plano Estadual de Recursos Hídricos e no Plano Estadual de Saneamento, o cronograma de implantação e **programa de monitoramento** e avaliação das medidas e das ações implementadas.

1.4 Áreas de disposição de resíduos sólidos, riscos ambientais e saúde pública

Existem, basicamente, três diferentes tipos de locais para a disposição final de resíduos sólidos urbanos, sendo que a classificação estabelecida é feita de acordo com a estrutura do local e com a forma de disposição dos resíduos. São eles: lixão, aterro controlado e aterro sanitário.

O IBGE (2000, p.373) define:

Lixão (ou vazadouro a céu aberto): local utilizado para disposição do lixo, em bruto, sobre o terreno sem qualquer cuidado ou técnica especial. Caracteriza-se pela falta de medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Fadini e Fadini (2001, p.10) ressaltam que os resíduos urbano, industrial e, por vezes, hospitalares depositados em lixões possibilitam o pleno acesso de vetores de doenças ao lixo, por serem dispostos de forma rústica, a céu aberto e sem qualquer tratamento ou critério sanitário de proteção ao ambiente.

A CETESB (2008), define:

Aterro controlado: aterro para lixo residencial urbano, onde os resíduos são depositados recebendo depois uma camada de terra por cima. Na impossibilidade de se proceder a reciclagem do lixo, pela compostagem acelerada ou pela compostagem a céu aberto, as normas sanitárias e ambientais recomendam a adoção de aterro sanitário e não do controlado.

Aterro sanitário: aterro para lixo residencial urbano com pré-requisitos de ordem sanitária e ambiental. Deve ser construído de acordo com técnicas definidas, como: impermeabilização do solo para que o chorume não atinja os lençóis freáticos, contaminando as águas; sistema de drenagem para chorume, que deve ser retirado do aterro sanitário e depositado em lagoa próxima que tenha essa finalidade específica, vedada ao público; sistema de drenagem de tubos para os gases, principalmente o gás carbônico, o gás metano e o gás sulfídrico, pois, se isso não for feito, o terreno fica sujeito a explosões e deslizamentos.

No Brasil, a opção por lixões e aterros é a mais comum e representa cerca de 99% da destinação final do total de resíduos coletados. Segundo o IBGE (2000, p.50), 47,1% dos resíduos coletados são dispostos em aterros sanitários, 22,3% em aterros controlados e 30,5% em lixões (Figura 1.1).



Figura 1.1: Disposição final dos resíduos coletados no Brasil (Fonte: IBGE, 2000, p.50).

Apesar de se utilizarem locais ditos específicos para tal propósito, a disposição final desses resíduos nem sempre é feita de forma correta. Exemplo disso são os lixões, os quais representam uma prática obsoleta e inadequada de disposição de resíduos. Menos impactantes, mas, ainda assim, significativos, são os aterros controlados, que apesar de apresentarem medidas mitigatórias, oferecem risco iminente de contaminação ambiental.

O fato é que a disposição de resíduos em locais técnica e geologicamente impróprios, pode acarretar sérios problemas ambientais. Os gases gerados na decomposição da matéria orgânica constituinte dos resíduos – metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), gás sulfídrico (H_2S), entre outros – são contribuidores potenciais para o agravamento do efeito estufa.

No processo de decomposição de materiais de origem orgânica também é gerado o chorume. Inicialmente, chorume era o nome atribuído a uma substância gordurosa expelida pelo tecido adiposo de animais. Posteriormente, o significado da palavra foi ampliado e passou a significar o líquido contaminante, de cor escura, odor nauseante e de elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), originado de processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos.

É comum encontrar em textos da literatura científica as expressões “chorume” e “percolado” apresentando o mesmo significado, o que não é totalmente correto. Enquanto a definição da palavra “chorume” apresenta-se supra citada, “percolado” significa o líquido composto pelo chorume e por águas de chuva e subterrâneas, que lixiviam compostos orgânicos presentes nos aterros para o ambiente.

A infiltração de chorume no solo das áreas de disposição de resíduos e de suas adjacências pode comprometer indeterminadamente a capacidade de produção e a qualidade de alimentos, por ventura, aí cultivados. Não são raros os casos em que se verifica tal cenário. A ingestão desses alimentos pode acarretar sérios problemas à saúde de animais e das pessoas.

O contato entre pessoas/animais e resíduos – e seus subprodutos – também pode ocorrer através de vetores mecânicos ou biológicos, podendo ocasionar inúmeros problemas de saúde. A Tabela 1.3 apresenta, de forma resumida, algumas doenças relacionadas com os resíduos sólidos e os vetores responsáveis por sua transmissão.

Vetores	Forma de transmissão	Principais doenças	
Ratos	<ul style="list-style-type: none"> • Através da mordida, urina ou fezes • Pulga que vive no corpo do rato 	<ul style="list-style-type: none"> • Leptospirose 	<ul style="list-style-type: none"> • Peste bubônica
Moscas	<ul style="list-style-type: none"> • Via mecânica (asas, patas e corpo) • Fezes e saliva 	<ul style="list-style-type: none"> • Febre tifóide • Salmonelose • Cólera 	<ul style="list-style-type: none"> • Amebíase • Disenteria
Mosquitos	<ul style="list-style-type: none"> • Picada da fêmea 	<ul style="list-style-type: none"> • Malária • Leishmaniose • Febre amarela 	<ul style="list-style-type: none"> • Dengue • Filariose
Baratas	<ul style="list-style-type: none"> • Via mecânica (asas, patas e corpo) • Fezes 	<ul style="list-style-type: none"> • Febre tifóide 	<ul style="list-style-type: none"> • Cólera
Aves	<ul style="list-style-type: none"> • Fezes 	<ul style="list-style-type: none"> • Histoplasmose 	

Tabela 1.3: Doenças relacionadas com resíduos sólidos e transmitidas por vetores (Fonte: HELLER & MÖLLER, 1995)

O chorume também pode atingir e contaminar as águas subterrâneas após atravessar toda a camada de solo que recobre o lençol freático. Existe ainda o risco de contaminação das águas superficiais quando ocorre o escoamento direto do chorume do local de geração até a drenagem, ou indiretamente, quando águas subterrâneas contaminadas afloram e atingem cursos d'água e/ou drenagens.

O problema das águas superficiais é relativamente mais rápido e mais simples de se combater, pois basta interromper a emissão de efluentes para que o próprio fluxo se encarregue de recuperar o curso d'água. Porém, o combate à contaminação das águas subterrâneas é mais complexo, exige mais tempo e, em muitos casos, torna-se impraticável (SILVA, 2001, p.2).

Tais problemas têm chamado a atenção de órgãos públicos e instituições de pesquisa no sentido de diagnosticar e avaliar os impactos ambientais gerados, entre eles a contaminação do solo e da água subterrânea (MOURA E MALAGUTTI FILHO, 2003, p.129).

1.5 Métodos de Investigação

A Geofísica constitui uma das melhores e mais importantes ferramentas para o estudo do meio natural. É uma ciência que possui estreita ligação com a Física e a Geologia, e tem como objetivo elucidar problemas de caráter geológico, dentre outros, por meio de métodos físicos (BRAGA, 1997, p.3).

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície, como, por exemplo, as sondagens e o monitoramento por poços, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente

menor (CETESB, 1999). Métodos geofísicos são eficientes na avaliação e caracterização de problemas ambientais; além disso, são de natureza não invasiva, o que significa que, a priori, não alteram o meio físico.

Orellana (1972, p.23) define:

A Prospecção Geofísica é, à primeira vista, um conjunto de técnicas físicas e matemáticas, aplicadas à exploração do subsolo para a busca e estudos de depósitos de substâncias úteis (petróleo, águas subterrâneas, minerais, carvão, etc.), por meio de observações efetuadas na superfície da Terra (tradução nossa).

Pode-se acrescentar a esse conceito os estudos no interior de furos de sondagens e de minas subterrâneas, e os levantamentos aéreos e espaciais.

A Geofísica envolve diversos métodos de investigação, sendo que os mais empregados estão baseados em ondas (mecânicas ou eletromagnéticas) e campos (eletromagnéticos). Dentre todos, destacam-se em estudos ambientais os métodos da Eletrorresistividade (ER), Eletromagnético (EM), do IP (*Induced Polarization* ou Polarização Induzida), do SP (*Self Potential* ou *Spontaneous Potential* ou Potencial Espontâneo), do GPR (*Ground Penetrating Radar* ou Radar de Penetração no Solo) e os métodos sísmicos (refração e reflexão).

Independentemente do método utilizado, a determinação da contaminação só é possível quando existem diferenças entre o valor natural, ou padrão – determinado em local adjacente à área, livre de contaminação – e o valor obtido na medição do parâmetro físico desejado (contraste anômalo de valores).

Determinar a existência de contaminantes em subsuperfície é importante, porém, não é suficiente. Também é desejável que se faça um acompanhamento da situação monitorando temporalmente o local, por meio da repetição dos ensaios, a fim de se comparar os resultados ao longo do tempo. Desse modo, é possível compreender plenamente o comportamento do contaminante, além de permitir um melhor planejamento para a remediação do problema.

1.6 Monitoramento Temporal

Define-se o conjunto de medidas e observações repetidas de uma substância, com um propósito definido de acordo com um planejamento prévio ao longo do tempo e do espaço, utilizando métodos comparáveis e padronizados, como “monitoramento” (NEVES, 2006, p.41).

O monitoramento temporal com métodos geofísicos, especificamente de áreas de disposição de resíduos sólidos é de suma importância, pois quando realizado desde as fases de implantação e de início de operação de aterros, por exemplo, permite determinar as condições iniciais da área, como valores padrões de resistividade elétrica (ER), cargabilidade (IP) e voltagem natural (SP) do meio natural, e características físico-químicas das águas subterrâneas, sem contaminação por chorume. Tais informações servem como referência para a detecção de possíveis contaminações que venham a ocorrer no subsolo e no lençol freático sob a área.

Dependendo do tempo decorrido desde a plena utilização da área para disposição de resíduos sólidos até a implantação do monitoramento, é possível verificar a existência e determinar o início da contaminação, conhecer eventuais variações da intensidade e a extensão da contaminação em determinado período, e identificar as substâncias causadoras. Também auxilia no correto planejamento de ações mitigatórias e no acompanhamento da evolução dos trabalhos de remediação.

Pode-se encontrar na literatura científica inúmeros trabalhos que relatam a utilização de métodos geofísicos no estudo de contaminação ambiental, dos mais diversos locais – lixões, aterros, curtumes, indústrias, cemitérios, entre outros – e por tão diversos contaminantes. Entretanto, verifica-se a escassez de obras abordando não somente a determinação e extensão da contaminação ambiental, mas também o monitoramento dessa contaminação no decorrer do tempo. São exemplos os trabalhos de Moreira e Dourado (2007); Moreira, Aquino e Dourado (2007); Moreira e Braga (2009a).

Mais escassos ainda são os trabalhos de pesquisa que utilizam o método da eletrorresistividade no monitoramento temporal de áreas de disposição de resíduos sólidos. No que tange a esse assunto, somente duas obras nacionais foram encontradas durante o desenvolvimento do presente estudo: Moreira (2009) e Moreira e Braga (2009b).

1.7 Justificativa da Pesquisa

Diante do contexto apresentado, desenvolveu-se um estudo no aterro controlado desativado da cidade de Rio Claro (SP), utilizando-se o método da Eletrorresistividade, com a finalidade de caracterizar geoelectricamente a área de disposição de resíduos sólidos urbanos e seu entorno, e comparar os resultados obtidos com outros anteriores, resultando em um trabalho de monitoramento ambiental da pluma de contaminação aí existente.

A opção por efetuar esse estudo na área interna e no entorno do aterro controlado desativado de Rio Claro (SP) deve-se à necessidade e à oportunidade da realização de novos estudos ambientais no local, já que a última série de investigações ocorreu nos anos de 1999/2000 (MOURA, 2002).

Essa necessidade é amparada por Braz e Silva (2001, p.4), que afirmam que cerca de 25% dos materiais orgânicos rapidamente degradáveis e 50% dos materiais orgânicos lentamente degradáveis estão contidos em embalagens plásticas, dificultando sua biodegradação. Por este motivo, o período de tempo esperado para a decomposição total do material orgânico rapidamente degradável é de 5 anos, enquanto que para o material orgânico lentamente degradável é de 15 anos. Dentro desse cenário, é esperado que ainda haja produção de chorume no aterro controlado desativado.

Apesar de desativado, o aterro ainda recebe (clandestinamente?) resíduos sólidos da construção civil (restos de tijolos, telhas, concreto, madeiras, vergalhões) e resíduos sólidos urbanos (roupas, calçados, fraldas, embalagens plásticas, papéis e restos de alimentos), como pôde ser verificado nas visitas de reconhecimento e, posteriormente, durante os trabalhos de campo (Figura 1.2).



Figura 1.2: Resíduos sólidos depositados recentemente no aterro controlado de Rio Claro (SP).

Também foi verificado que grandes volumes de percolato são retirados diariamente do aterro sanitário (em atividade) e re-introduzidos nas lagoas do sistema de recirculação de chorume do aterro controlado (desativado) (Figura 1.3).

Esse procedimento é realizado devido a um erro na administração do aterro sanitário: a falta de realização de obras, como a abertura de novas células para deposição de resíduos e a instalação de drenos horizontais, acarretou um acúmulo demasiado de detritos nas células já

existentes e conseqüente aumento da produção de chorume (JORNAL DIÁRIO DO RIO CLARO, 2009).

Assim sendo, tornou-se quase que constante a infiltração de percolato no subsolo do aterro desativado. Desse modo, os níveis de contaminação no local mantêm-se acima do esperado para uma área de disposição desativada a um período semelhante.



Figura 1.3: À direita: transporte de chorume entre os dois aterros; à esquerda: lagoa do sistema de recirculação de chorume do aterro controlado de Rio Claro (SP).

Portanto, é esperado que a pluma de contaminação tenha adquirido dimensões diferentes das determinadas por Moura (2002), regida por uma razão média de migração próxima à da condutividade hidráulica local – assim como foi verificado por Moreira e Dourado (2003, p.4) – indicando, desse modo, que se trata de uma entidade dinâmica, e justificando a necessidade da realização de novos estudos.

1.8 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é efetuar o monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado desativado do município de Rio Claro (SP), por meio da comparação dos resultados obtidos utilizando-se o Método da Eletrorresistividade (ER), nos anos de 1999 e 2008. Para tanto, foi necessário:

- Caracterizar geoelectricamente as cavas de resíduos e o entorno das cavas (Formações Rio Claro e Corumbataí)
- Determinar as espessuras e os limites laterais das cavas de resíduos, e a profundidade do substrato rochoso da área de estudo
- Determinar a profundidade do nível freático

- Gerar o mapa potenciométrico da área
- Reprocessar os dados de Moura (2002) com softwares recentes
- Definir as atuais localização, extensão e direção de migração provável da pluma de contaminação
- Verificar a ocorrência ou não de variações significativas dos valores de resistividade elétrica em períodos climáticos diferentes

1.9 Revisão Bibliográfica

1.9.1 Eletrorresistividade aplicada em áreas de disposição de resíduos

Vários trabalhos podem ser encontrados na literatura, relatando a utilização de métodos geofísicos em estudos de contaminação ambiental em áreas de disposição de resíduos, em especial o método da ER, com as técnicas do Imageamento Elétrico (IE) e da Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

Gallas (2000), Cavalcanti, Sato e Lima (2001), Shiraiwa *et al* (2002), Silva *et al* (2002), Moura e Malagutti Filho (2003, 2007) e Lago, Elis e Giacheti (2006) utilizaram, entre outras técnicas, IE para delimitar os limites laterais e inferiores das cavas de resíduos e SEV para determinar as profundidades da zona saturada e do topo rochoso, a espessura da camada de resíduos e a direção do fluxo subterrâneo.

Gallas (2000, p.147) integrou os Métodos de ER, IP e SP, e os aplicou utilizando a técnica do IE, no Lixão do Alvarenga, localizado na divisa entre os municípios de São Bernardo do Campo e Diadema, ambos no Estado de São Paulo. Os valores de resistividade abaixo de $50\Omega.m$, detectados nas linhas de IE, indicam locais atingidos pela pluma de contaminação. Os poluentes contidos na pluma de contaminação acarretaram em baixos valores de cargabilidade ($<14mV/V$) ao meio contaminado. Os resultados dos ensaios de SP permitiram identificar a direção do fluxo subterrâneo de águas, mesmo apresentando contaminação.

Cavalcanti, Sato e Lima (2001) empregaram a técnica da SEV em estudos preliminares no Aterro Metropolitano Centro, em Salvador-BA. Através dos dados de ER, IP e SP coletados, foi possível caracterizar e definir a localização do lençol freático e do topo rochoso e, assim, construir mapas da topografia do embasamento e do fluxo subterrâneo, servindo como subsídio para a instalação de poços de monitoramento. Verificou-se que a área

do aterro é geoelectricamente heterogênea, facilitando a identificação de possíveis contaminações posteriores. Análises químicas realizadas em amostras de águas de poços e superficiais indicaram a não contaminação das mesmas, corroborando os resultados dos ensaios geofísicos.

Também Shiraiwa *et al* (2002) realizaram estudos em um local semelhante, dessa vez no lixão desativado de Cuiabá-MT. Analisando conjuntamente os dados de ER, EM e GPR levantados em campo, foi possível detectar contaminação por chorume desde a superfície até a profundidade da zona saturada, indicando a contaminação do lençol freático, assinalada por baixos valores de resistividade ($>20\Omega.m$) associados a altos valores de condutividade ($<60mSm/m$).

Silva *et al* (2002) aplicaram os métodos da ER e EM, ambos com a técnica do Imageamento, no lixão desativado de Ribeirão Preto-SP e verificaram a existência de contaminação no subsolo da área, atingindo inclusive o lençol freático. As linhas de IE executadas em cima das cavas de resíduos apresentam baixos valores de resistividade ($>20\Omega.m$) e altos valores de condutividade ($<40mS/m$), quando comparados com os resultados da linha de referência, executada a jusante da área do aterro. Tais resultados indicam a contaminação por chorume. Até mesmo os ensaios da linha de referência detectaram anomalias condutivas a profundidades maiores, causadas pela dispersão do chorume pela água subterrânea.

Moura e Malagutti Filho (2003, 2007) utilizaram os métodos de ER e IP, aplicados com IE e SEV, para investigar a contaminação do lençol freático abaixo dos aterros controlados de Rio Claro e Piracicaba, Estado de São Paulo. Por ambas as técnicas, detectou-se zonas de baixa de resistividade elétrica, resultado da contaminação das áreas por chorume. Análises químicas de amostras de água coletadas em poços cacimba e de monitoramento indicaram elevadas concentrações de íons cloreto (Cl^-), sódio (Na^+), sulfatos (SO_4^{2-}) e nitrato (NO_3^{-2}).

Lago, Elis e Giacheti (2006) também utilizaram IE e SEV, combinando os métodos de ER, IP e SP, para investigar a existência de contaminação no subsolo do aterro de Bauru-SP. Os métodos da ER e do IP permitiram diferenciar as cavas com resíduos ($<20\Omega.m$) dos materiais naturais ($>100\Omega.m$) e definir o tipo de resíduo em subsuperfície: $>12mV/V$ para materiais polarizáveis e $<4mV/V$ para água subterrânea com sais dissolvidos e chorume. O método do SP permitiu, principalmente, mapear o fluxo subterrâneo. O resultado dessa integração de métodos auxiliou na locação de poços de monitoramento e detectou a posição de prováveis contaminações, direcionando a realização de ensaios diretos comprobatórios

(análises químicas de amostras de água), os quais indicaram contaminação por cádmio, cromo total e níquel, além de alteração nos valores de DBO e DQO.

Fachin *et al* (2006) desenvolveram um trabalho semelhante em uma área de disposição de resíduos industriais de um curtume, na cidade de Várzea Grande-MT. Ali eram dispostos pêlos, gorduras, restos de carne e lodo de tratamento biológico, contendo água, sais de cromo, zircônio, alumínio, ferro, curtentes vegetais, sintéticos, aldeídos e parafinas sulfocloradas. Nesse trabalho empregou-se os métodos de ER, EM e GPR. Os baixos valores de resistividade ($<30\Omega.m$) e altos valores de condutividade ($>40mS/m$), obtidos nas linhas executadas em cima de locais onde eram dispostos os resíduos, indicam a presença de contaminantes em subsuperfície. Já os valores obtidos na linha de referência, onde não existe contaminação, são significativamente diferenciados: resistividade acima de $50\Omega.m$ e condutividade menor que $20mS/m$. Os três métodos utilizados são complementares, cada qual corroborando o resultado dos outros.

1.9.2 Monitoramento Temporal

1.9.2.1 Área Industrial em Araras (SP)

Em uma área localizada no distrito industrial do município de Araras (SP), foi desenvolvido um trabalho de monitoramento temporal utilizando os Métodos: Eletromagnético (EM), Radar de Penetração no Solo (GPR), Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP).

Entre 1981 e 1992, esse local foi ocupado por duas empresas químicas: a Redistil Indústria Química Ltda, de 1981 a 1985, e a Indústria Química Sulfabrá S/A, de 1985 a 1992, as quais fabricavam, entre outros produtos, dieloxalato, acetato de etila, 4-amino-N-2-tiozolil-benzeno-sulfonamida, acetopiruvato de metila, 5-metil-3-carboxiamidoxazol (carboxamido), e utilização de 1,2 dicloroetano e tolueno como solventes.

Os solventes utilizados por ambas as indústrias, após passarem por colunas de destilação, eram reutilizados, e as águas residuais deste processo passavam por um tacho para concentrar os efluentes, os quais eram, depois, infiltrados em um poço presente no local. Este processo foi realizado entre 1981 e 1988.

Moreira, Aquino e Dourado (2007) desenvolveram um trabalho de monitoramento temporal empregando o método EM, com o objetivo de se determinar o comportamento evolucionar da pluma de contaminantes, presentes no solo e na água subterrânea. O

monitoramento ocorreu entre os anos de 1992 e 2003, por meio da realização de ensaios geofísicos semelhantes nos mesmos locais.

Os dados de condutividade aparente de ambos os anos foram processados, gerando mapas de iso-condutividades em diversas profundidades, os quais foram comparados qualitativamente e quantitativamente entre si, permitindo determinar a evolução da pluma de contaminantes.

Moreira e Dourado (2003, 2007) executaram seções de GPR em 1998 e em 2003. Por meio de comparação dos radargramas gerados com os dados dos diferentes anos foi possível determinar locais que apresentam anomalias de condutividade elétrica e, assim, estabelecer o comportamento da pluma de contaminação no intervalo de cinco anos, além de estimar a permeabilidade hidráulica do contaminante.

Moreira e Braga (2009) também efetuaram duas seções de Imageamento, utilizando os métodos de ER e IP, ambas executadas nos anos de 2004 e 2007 e nos mesmo locais, constituindo, assim, um trabalho de monitoramento temporal. O modo pelo qual se estabeleceu a evolução temporal da pluma de contaminação é semelhante ao comentado anteriormente: comparação quantitativa e qualitativa de iso-valores em mapas de condutividade aparente, e seções de resistividade aparente e de cargabilidade.

1.9.2.2 Aterro controlado de Cordeirópolis (SP)

No aterro controlado do município de Cordeirópolis (SP) foi desenvolvido o único trabalho de monitoramento temporal da contaminação de solos e águas subterrâneas, em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, mediante a utilização do Método da Eletrorresistividade, que se conseguiu levantar durante a fase de pesquisa bibliográfica.

O aterro localiza-se às margens da Rodovia Dr. Cássio de Freitas Levy (SP 017), na altura do km 4,5, e entrou em operação no ano de 2001. Possui 48.400m² de área disponível, é constituído por valas de 5m de profundidade, 4m de largura e 80m de largura, e tem vida útil prevista para 20 anos (MOREIRA E BRAGA, 2009, p.109).

Os dados foram obtidos sobre valas anualmente fechadas entre Dezembro de 2001 e Dezembro de 2007 (MOREIRA, 2009, p.viii).

Nesse trabalho, foram executadas 6 Sondagens Elétricas Verticais (SEV) profundas com o Método da ER, 24 SEV rasas com os Métodos da ER e do IP, 13 linhas rasas de Imageamento Elétrico (IE) com os Métodos da ER e do IP e 241 leituras rasas de SP (MOREIRA, 2009, p.52).

Os resultados indicam que os valores dos parâmetros investigados estão diretamente relacionados ao tempo de permanência dos resíduos nas valas. Os maiores valores de cargabilidade (Método IP) foram detectados em valas recém fechadas, diminuindo gradativamente em direção às valas mais antigas. A ação do chorume sobre os resíduos, principalmente sobre materiais metálicos, e sobre os minerais do solo do aterro pode resultar na solubilização, precipitação e acúmulo de minerais férricos na base das valas onde haja produção de chorume, aumentando, desse modo, o fenômeno da polarização induzida (MOREIRA, 2009, p.85).

No Método do SP, os maiores valores (positivos) estão associados às valas mais antigas, enquanto que na vala referente ao ano de 2007, os valores são próximos a zero (MOREIRA, 2009, p.86).

Menos pronunciada, mas evidente, é variação dos valores de resistividade elétrica de acordo com o tempo de fechamento das valas. Valas fechadas no início da operação do aterro (2001) apresentam valores de resistividade relativamente maiores àqueles verificados em valas fechadas mais recentemente (MOREIRA, 2009, p.75), atingindo o limiar de $500\Omega.m$ em 2001 e $100\Omega.m$ em 2007.

1.9.3 Ensaios Geofísicos realizados no aterro controlado de Rio Claro (SP)

Conforme pôde ser levantado durante a fase de pesquisa bibliográfica, diversos ensaios geofísicos foram realizados no aterro controlado desativado de Rio Claro (SP).

Em novembro de 1988 e março de 1989, o Prof. Dr. Clóvis José, do Departamento de Física do IGCE/UNESP – *Campus* de Rio Claro, executou duas séries de medidas empregando o Método EM, sendo que os resultados de tais ensaios somente foram publicados integralmente por Tandel (1998, p.118). Os resultados apontam a existência de uma pluma de contaminação em profundidade, com sentido do fluxo acompanhando a topografia – sudoeste dentro do aterro e sul a partir dos limites do mesmo.

No primeiro semestre de 1993, o Prof. Dr. Antônio Celso de Oliveira Braga, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP – *Campus* de Rio Claro, efetuou sete SEV na área do aterro com o intuito de determinar a espessura dos materiais litológicos em subsuperfície e a profundidade do aquífero freático, e uma linha de IE com arranjo Dipolo-Dipolo para determinar a direção do fluxo subterrâneo principal.

Em outubro de 1996, Tandel (1998, p. 64 e 119), contando com a participação do Prof. Dr. Clóvis José, realizaram um Caminhamento Eletromagnético no sentido do eixo maior do

aterro, e em novembro do mesmo ano, Tandel (1998, p. 64 e 123), juntamente com o Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, executaram duas linhas de IE, ambos no sentido do eixo maior do aterro, e coletaram dados de resistividade elétrica e de cargabilidade. Finalmente, em junho de 1997, Tandel (1998, p. 81 e 124), executou um ensaio de Sísmica de Refração (SR) em duas linhas perpendiculares ao eixo maior do aterro.

Com base nos resultados obtidos, Tandel (*op. cit.*) concluiu que ocorrem variações significativas dos valores de condutividade aparente em função da umidade no solo, determinada por períodos de chuva e de estiagem – variações sazonais. Também verificou que, na porção do aterro onde encontram-se os resíduos, os valores de condutividade aparente são demasiadamente maiores ($50\text{mS/m} \leq \sigma_a \leq 400\text{mS/m}$) do que em locais sem a presença de resíduos ($\sigma_a \approx 8\text{mS/m}$). Com os resultados dos ensaios de ER e IP, determinou que a pluma de contaminação estava limitada à área do aterro, até a profundidade aproximada de 25m, e acompanhava o fluxo d'água subterrâneo no sentido sudoeste. A SR permitiu definir a espessura do aterro e a geometria da base, indicando a forma de vale.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

2.1 Métodos Geofísicos de Investigação

Métodos Geofísicos de Investigação são um conjunto de procedimentos, que se baseiam em propriedades físicas e ferramentas matemáticas, aplicados à exploração do subsolo, para a busca e estudos de depósitos de substâncias úteis ou perigosas, corpos estranhos ou caracterização hidrogeomorfológica, por meio de observações efetuadas na superfície da Terra, furos de sondagens ou levantamentos aeroespaciais.

De acordo com a literatura, os principais Métodos Geofísicos podem ser classificados conforme apresentado na Figura 2.1.

2.2 Breve histórico dos Métodos Geométricos

Todas as informações contidas nessa seção foram obtidas nas obras de Collett (1990, p. 5 a 21), Koefoed (1979, p.1), Parasnis (1972, p.74) e, principalmente, Orellana (1972, p.27 a 33).

Os primeiros trabalhos envolvendo os Métodos Geométricos datam do século XVIII. No ano de 1720, Gray e Wheeler publicaram alguns trabalhos sobre a resistividade das rochas. Em 1746, Watson descobriu que o solo é um condutor elétrico.

Robert Fox descobriu em 1815 o fenômeno do Potencial Espontâneo (SP) e, anos depois, em 1830, publicou um trabalho sobre a utilização do Método do SP para mapear veios de minerais metálicos em minas, na cidade de Cornwall, Inglaterra.

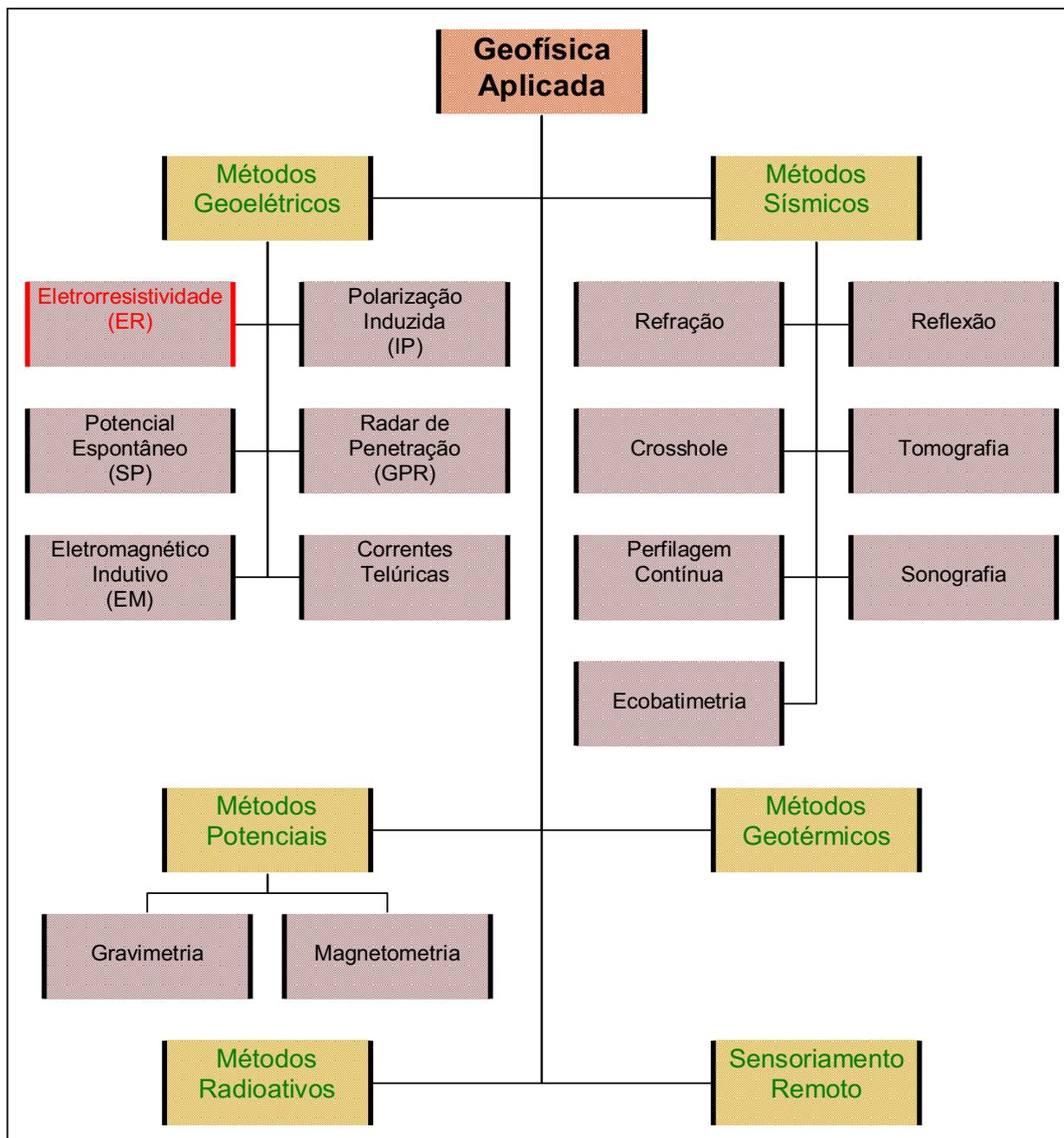


Figura 2.1: Principais Métodos Geofísicos, destacando o Método da Eletrorresistividade (ER) em vermelho. (Fonte: BRAGA, 1997, p.4 e 2001, p.2; SHERIFF, 1989, p.3; SOUZA *et al*, 1998, p.165).

Entre 1880 e 1913, Carl Barus aplicou o Método do SP para fins de estudo em Comstock Lode, e Barnes, Brown e Wells aplicaram o mesmo método em minas e construíram os primeiros eletrodos impolarizáveis, ambos no estado de Nevada, no Estados Unidos.

Porém, a primeira aplicação com êxito do Método do SP só veio acontecer no ano de 1913, feito conseguido pelo engenheiro de minas alsaciano Conrad Schlumberger, que descobriu depósitos de enxofre em Bor, na Sérvia, o primeiro descobrimento de minerais não-magnéticos utilizando a Geofísica.

Os métodos de campo artificial passaram a receber especial atenção no final do século XIX, quando investigadores como Brown, em 1883, patenteou um sistema de prospecção elétrica com dois eletrodos. Cerca de vinte anos depois, em 1902, Daft e Williams patentearam um dispositivo que utilizava correntes de baixa frequência. Em 1903, E. S. Ragozin, russo, publicou uma monografia tratando de métodos elétricos aplicados à busca de depósitos minerais e antecipou inúmeras idéias dos atuais Métodos Geoelétricos.

No ano de 1912, Conrad Schlumberger observa que quando uma corrente elétrica contínua é injetada no solo, ela não se estabelece e se interrompe instantaneamente, mas obedece uma curva de carga e descarga, semelhante a um capacitor. Percebeu também que o tempo de descarga e o potencial descarregado poderiam ser medidos e utilizados na caracterização de meios geológicos. Desse modo, revolucionou a Geofísica de Prospecção ao descobrir o fenômeno da Polarização Induzida (IP).

Em 1913, Schilowsky realizou ensaios utilizando um método eletromagnético e Schlumberger executou estudos tectônicos em Calvados, França.

Um marco importante na história dos Métodos Geoelétricos é o ano de 1915, quando Conrad Schlumberger e Frank Wenner idealizaram, independentemente, dispositivos tetraeletródicos de prospecção.

Apesar das inúmeras experiências realizadas, o uso sistemático dos Métodos da Eletrorresistividade e do Potencial Espontâneo deu-se, somente, a partir da década de 1920, pois, com o advento da I Guerra Mundial, grande parte das pesquisas e desenvolvimento de técnicas e equipamentos, em andamento, foram interrompidos. A princípio, tais métodos eram utilizados somente para fins de mineração, ou seja, para localização de jazidas minerais em subsolo.

De 1919 a 1932, os suecos Lundberg e Sundberg trabalharam no desenvolvimento de um método eletromagnético, utilizando um equipamento com duas antenas. Obtiveram sucesso com esse método descobrindo inúmeras jazidas de minerais na Suécia.

Entre 1920 e 1960, os avanços dos Métodos Geométricos foram inúmeros e grande parte deles é atribuída à dita Escola Franco-Soviética, graças às tentativas de aplicar os Métodos Geométricos à localização de estruturas petrolíferas na extinta União Soviética, incluindo as primeiras Sondagens Elétricas profundas (com mais de 1km de profundidade). Nos idos de 1932, Conrad Schlumberger, junto de seu irmão Marcel, do matemático romano Sabba S. Stefanescu e do físico francês Raymond Maillet, desenvolveram as bases teóricas da distribuição de potenciais em um semi-espaço estratificado, além das equações fundamentais da prospecção elétrica e sobre anisotropia.

Entre 1930 e 1940, realizaram-se os primeiros ensaios de campo utilizando Sondagens Dipolares, feito conseguido pelo russo Alpin. Em 1939, I. M. Blokh, obteve expressivos resultados aplicando o arranjo dipolar à técnica do Caminhamento Elétrico. Em 1945, Yarishev, compatriota de Alpin, executou a primeira Sondagem Dipolar profunda, sendo que, posteriormente, Kraev e Semenov atingiram mais de 10km de profundidade.

Nessa mesma década, desenvolveu-se o Método das Correntes Telúricas, que são correntes naturais produzidas por corpos geológicos e somente foram descobertas, pois interferiam nas medições das Sondagens Elétricas profundas efetuadas por Schlumberger e sua equipe.

Durante a II Guerra Mundial, o U.S. Naval Ordnance Laboratory desenvolveu uma técnica para detectar minas explosivas na água, baseada no Método da Polarização Induzida (COLLETT, 1990).

Na década de 1940, surgiram avanços tecnológicos em relação ao Método Eletromagnético. Até então, a prospecção por esse método dava-se somente por terra. A inovação foi embarcar os equipamentos em aviões e helicópteros e iniciou-se a Prospecção Eletromagnética Aérea.

Por volta de 1953, desenvolveu-se um novo método de prospecção, o qual registrava simultaneamente as correntes telúricas e as micro-pulsões do campo geomagnético terrestre. Era o Método Magneto-Telúrico, atribuído ao francês L. Cagniard e ao russo Tikhonov.

Sabe-se que, até o final da década de 1960, o método da eletrorresistividade foi utilizado para diversos fins, porém os relatos sobre seu uso no diagnóstico de contaminação ambiental são raros (MOURA, 2002, p.5). Somente a partir da década de 1970 é que o método ganhou importância nos estudos ambientais, por mostrar-se eficaz nesse tipo de trabalho.

2.3 Classificação dos Métodos Geométricos

Como visto no item 2.1 (Figura 2.1), os Métodos Geométricos são diversos e cada qual apresenta prós e contras; assim, suas aplicações variam de acordo com o objetivo da pesquisa. Segundo Orellana (1972, p.33), existem alguns fatores de classificação dos Métodos Geométricos, entre eles:

- segundo a natureza do campo eletromagnético que utilizam – natural ou artificial
- segundo a orientação da investigação – investigação puntual, lateral ou volumétrica
- segundo a continuidade do campo eletromagnético – contínuo ou variável

De um modo geral, os Métodos Geométricos podem ser assim classificados:

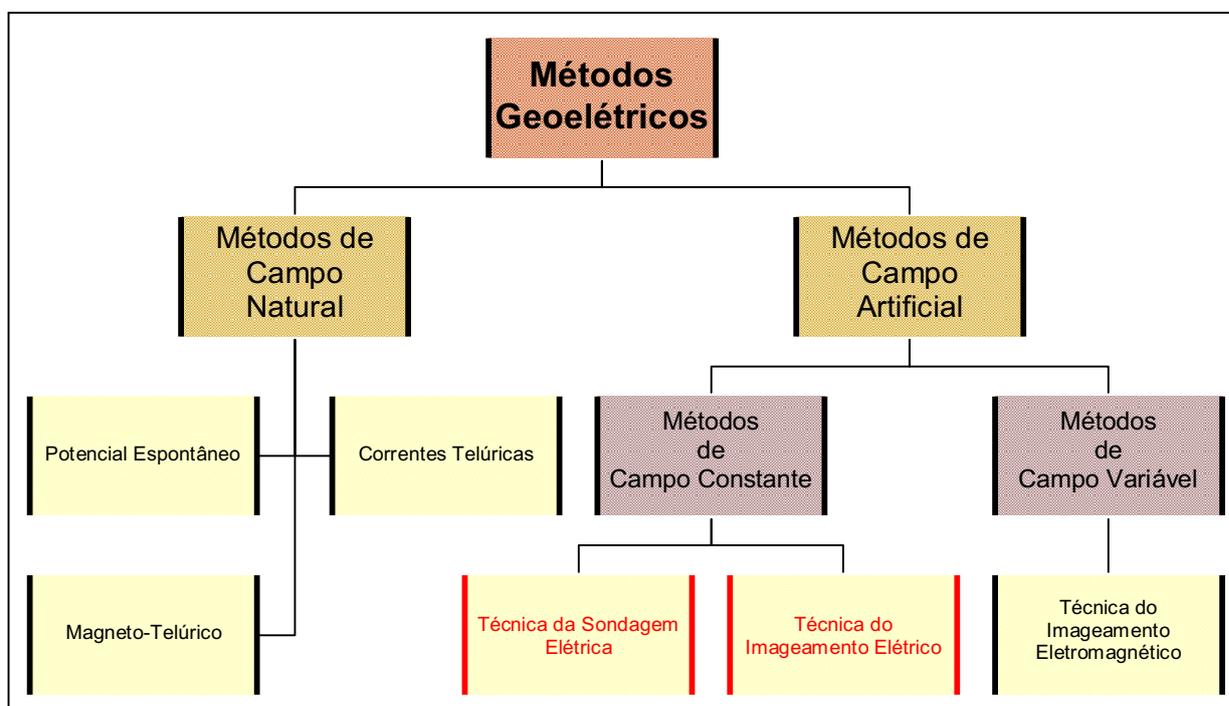


Figura 2.2: Classificação resumida dos Métodos Geométricos. Destaque para as Técnicas da Sondagem Elétrica e do Imageamento Elétrico (em vermelho). (adaptado de ORELLANA, 1972, p.34).

2.4 O Método da Eletroresistividade

O Método da Eletroresistividade fundamenta-se no fato de que diferentes materiais, geológicos ou não, apresentam diferentes valores de resistividade elétrica. A **resistividade elétrica** (ρ) é um parâmetro intrínseco dos materiais, o qual se relaciona à dificuldade

encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio. Esse coeficiente depende, entre outras coisas, da natureza e do estado físico do corpo considerado.

2.4.1 Conceitos fundamentais da resistividade elétrica

A Lei de Ohm define uma relação empírica entre a **intensidade (I) da corrente elétrica** que flui através de um condutor e a **tensão (U)** necessária para que essa corrente exista. Essa relação é dada por (Equação 2.1):

$$U = RI \quad (\text{Equação 2.1})$$

A constante de proporcionalidade R que aparece nessa relação é chamada de **resistência elétrica** do material. Sua unidade de medida é o *volt por ampère (V/A)* ou o *ohm (Ω)*.

Para corpos constituídos do mesmo material, mas com dimensões diferentes, o valor da resistência elétrica pode apresentar diferenças. Para caracterizar a capacidade de transmissão de corrente elétrica num determinado material, sem que seja necessária a utilização de fatores geométricos, é utilizada uma grandeza física chamada **resistividade elétrica (ρ)**, cuja unidade de medida é o *ohm.m ($\Omega.m$)* (TIPLER, 2000, p.122).

Por exemplo, para um corpo homogêneo, de comprimento l e área da seção transversal A , a resistividade ρ é dada por (Equação 2.2):

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde a unidade de medida de l é dada em m , de A em m^2 e de R em Ω .

Combinando-se as Equações 2.1 e 2.2, obtém-se a expressão da resistividade elétrica em termos da tensão aplicada nas extremidades do condutor homogêneo e da intensidade de corrente que, por ele, flui (Equações 2.3 e 2.4):

$$\rho = \frac{U}{I} \frac{A}{l} \quad (\text{Equação 2.3})$$

ou

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{l} = \frac{\Delta V}{I} K \quad (\text{Equação 2.4})$$

Na Equação 2.4, o fator K é chamado de **coeficiente geométrico** e sua dimensão é o metro (m).

A Figura 2.3 ilustra um esquema simplificado para se obter a resistividade elétrica de um corpo condutor homogêneo.

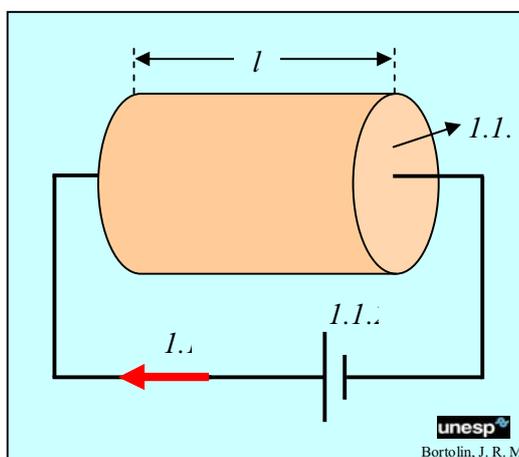


Figura 2.3: Condutor cilíndrico homogêneo usado para obter a expressão da resistividade elétrica.

2.4.2 A resistividade elétrica das rochas

É sabido, há muito tempo, que as rochas apresentam propriedades eletromagnéticas como, por exemplo, **potencial elétrico natural**, **resistividade elétrica** (ρ), **constante dielétrica** (κ) e **permeabilidade magnética** (μ) (TELFORD, GELDART E SHERIFF, 2004, p.283). Essas propriedades são devidas, entre outros fatores, à composição mineralógica, porosidade e textura que as rochas possuem.

A resistividade elétrica é uma das propriedades fundamentais dos diferentes materiais geológicos e serve para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, e interpretação de litotipos, sem necessidade de escavações físicas, que encarecem e prolongam o cronograma de execução da pesquisa (BRAGA, 1997, p.38). Segundo o mesmo autor, uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como sendo um

agregado com estrutura de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual sua resistividade é influenciada pelos seguintes fatores:

- resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha, e dos líquidos e gases que preenchem seus poros
- umidade, porosidade e textura da rocha
- processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral, tais como: processo de adsorção de íons na superfície do esqueleto mineral, diminuindo a resistividade total destas rochas

Devido a esses fatores, as rochas e/ou sedimentos de mesma composição podem apresentar diferentes valores de resistividade. Também influenciam o tamanho dos grãos, além do tipo de mecanismo de condução de corrente elétrica: a **condução eletrônica** (ocorre através de elétrons livres presentes em minerais metálicos ou na grafita) ou a **condução eletrolítica** (ou iônica, devido ao deslocamento de íons presentes na água e/ou eletrólitos contidos em fissuras e porosidades do solo e das rochas) (SOUZA *et al*, 1998, p.166). A condução iônica é o modo mais comum encontrado na natureza de condução de eletricidade, e é o modo mais significativo nos estudos geofísicos por eletrorresistividade (GALLAS *et al*, 2005, p. 52).

Telford, Geldart e Sheriff (2004, p. 284) e Lowrie (1997, p.205) ainda citam a **condução dielétrica**, que ocorre em maus condutores ou isolantes, onde os elétrons atômicos – isto é, ligados aos núcleos atômicos – são deslocados ligeiramente em relação aos núcleos sob a influência de um campo elétrico externo variável. Essa ligeira separação de cargas é conhecida como polarização dielétrica do material, a qual produz uma corrente conhecida como **corrente de deslocamento**.

As rochas, cuja resistividade elétrica está condicionada à presença de minerais condutores, representam uma parcela diminuta das camadas superiores da crosta terrestre. A condutividade da maior parte das rochas sedimentares se deve a poros preenchidos total ou parcialmente com eletrólitos. Essa é denominada **porosidade intergranular**. Nas rochas ígneas, predomina a **porosidade por fissuras**. Nas vulcânicas e calcáreas, a **porosidade vugular** é a predominante, causada por borbulhas de gás e dissoluções, respectivamente (KELLER E FRISCHKNECHT, 1966, p.20; ORELLANA, 1972, p.62).

Como a porosidade vugular não influi significativamente na porosidade total e a porosidade por fissuras não excede 2% do volume total, a porosidade intergranular fornece uma boa aproximação do valor real da porosidade de uma rocha. A Tabela 2.1 apresenta faixas de valores para alguns tipos litológicos mais comuns.

Rochas	Porosidade intergranular (%)
Argilas	20 – 50
Areias grossas	25 – 60
Areias finas	30 – 60
Areias de dunas	40
Areias de praias	80 – 85
Arenitos	20 – 35
Calcários	1,5 – 20
Dolomitas	3 – 20
Saibro	20 – 40
Lavas	20 – 80
Rochas Ígneas	0,3 – 5
Vulcânicas clásticas	5 – 60

Tabela 2.1: Porosidade intergranular de diversas rochas (ORELLANA, 1972, p.63).

É comum relacionar a resistividade elétrica com a porosidade, em rochas sedimentares, na forma da Lei de Archie (ARCHIE, 1942 *apud* ORELLANA, 1972, p.63), deduzida a partir de representações gráficas de outros autores (Equação 2.5):

$$\rho_r = P^{-m} \rho_a \quad (\text{Equação 2.5})$$

onde ρ_r é a resistividade elétrica da rocha, P é a porosidade expressa como uma fração por unidade de volume, ρ_a é a resistividade da água contida nos poros e m é o fator de cimentação.

A Equação 2.5 foi modificada pela introdução do coeficiente a (Equação 2.6), o qual depende da porosidade e/ou textura da rocha:

$$\rho_r = aP^{-m} \rho_a \quad (\text{Equação 2.6})$$

A Equação 2.6 é conhecida como Equação de Winsauer e, reescrevendo-a obtém-se as Equações 2.7 e 2.8:

$$\frac{\rho_r}{\rho_a} = aP^{-m} \quad (\text{Equação 2.7})$$

$$F = aP^{-m} \quad (\text{Equação 2.8})$$

onde F é definido como fator de formação. Esse é um coeficiente importante em estudos da resistividade de materiais em subsuperfície e pode fornecer uma estimativa próxima do real das porosidades de diferentes formações geológicas (BRAGA, 1997, p.45).

Segundo Orellana (1972, p.64), os valores numéricos para m podem variar entre 1,3 e 2,3, e para a variam entre 0,5 e 1,5, os quais representam de sedimentos fracamente consolidados a rochas com grãos bem cimentados. Do mesmo modo, Keller e Frischknecht (1966, p.21) indicam valores de a pouco menores que 1 para rochas com porosidade intergranular e pouco maiores que 1 para rochas com porosidade de fissuras; e valores de m maiores que 2 para rochas com grãos bem cimentados e menores que 2 para sedimentos fracamente consolidados.

A Equação 2.6 tem dois condicionantes: é válida somente para rochas com os poros totalmente preenchidos (saturados) por água e se o volume de água contida nos poros refletir inteiramente a porosidade da rocha. Porém, essas condições nem sempre são reais, pois os poros podem conter ar (nas rochas mais próximas da superfície), gás natural ou, até mesmo, petróleo (em regiões petrolíferas) (ORELLANA, 1972, p.66). Portanto, faz-se necessário relacionar a resistividade da rocha com o grau de saturação, como mostrado na seguinte relação empírica (Equação 2.9), proposta por Dakhnov:

$$\rho_r = abP^{-m}S^{-n}\rho_a \quad (\text{Equação 2.9})$$

onde b é um valor empírico, S indica o grau de saturação da rocha, definido como a fração do volume ocupada pela água em relação ao volume total dos poros, e n é um parâmetro determinado experimentalmente. Como exemplo, valores usuais para arenitos e calcários argilosos com porosidade inferior a 40% são $b=0,6$ e $n=2,25$; para rochas carbonáticas de porosidade inferior a 25%, $b=0,4$ e $n=2,1$ (KELLER E FRISCHKNECHT, 1966, p.28; ORELLANA, 1972, p.66).

A Tabela 2.2 exhibe os valores de resistividade de alguns tipos litológicos principais. Entretanto, devido a alguns fatores como grau de saturação e de alteração da rocha, tamanhos dos grãos, metamorfismo e efeitos tectônicos sofridos, esses valores podem variar. É de se esperar, portanto, que rochas e/ou sedimentos de mesma composição possam apresentar diferentes valores de resistividade.

Além disso, Telford, Geldart e Sheriff (2004, p.289) afirmam que de todas as propriedades físicas das rochas, a resistividade elétrica é a que apresenta maior variação: $1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ para a prata nativa a $1 \times 10^{16} \Omega \cdot m$ para o enxofre puro.

Tipo Litológico		Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Zona não saturada		100 a 30000
Zona saturada	Argiloso	≤ 20
	Argilo-arenoso	20 a 40
	Areno-argiloso	40 a 60
	Siltito Argiloso	10 a 60
	Siltito Arenoso	
	Arenoso	≥ 60
	Argilito	10 a 20
	Arenito	80 a 200
Águas	de lagos	1×10^3 a 3×10^3
	doces superficiais	10 a 1×10^3
	salobras superficiais	2 a 10
	Subterrâneas	1 a 20
	de lagos salgados	0,1 a 1
	Marinhas	0,2
Grafita		1×10^{-4} a 0,3
Basalto		10 a $1,3 \times 10^7$
Diabásio		20 a 5×10^7
Calcário		50 a 1×10^7
Gnaisse		3000 a 5000
Granito		5000 a 1×10^6
Sal gema		10000 a 1×10^6
Quartzo		$> 1 \times 10^{10}$

Tabela 2.2: Valores de resistividade de alguns tipos litológicos principais (BRAGA, 2001, p.29; ORELLANA, 1972, p. 52 e 71; PARASNIS, 1972, p.98; TELFORD, GELDART E SHERIFF, 2004, p.285 a 290).

Portanto, baseado na discussão apresentada a cerca da porosidade dos materiais geológicos, na Tabela 2.2 e assim como afirmado por Gallas (2000, p. 18), pode-se inferir que:

- materiais que apresentam porosidade demasiadamente baixa tendem a exibir altos valores de resistividade: folhelhos maciços e a maioria das rochas magmáticas e metamórficas
- materiais que não apresentam água em seus poros possuem alta resistividade: areias e cascalhos secos
- materiais cuja água intersticial seja livre de salinidade tendem a apresentar altas resistividades: areias e cascalhos limpos, mesmo que saturados em água
- a maioria dos materiais, especialmente se houver a presença de argilas, apresentam resistividades médias ou baixas: solos argilosos com água e rochas saturadas

Entretanto, estas afirmações são válidas se e somente se considerarmos materiais geológicos em meio natural, sem influência de substâncias “estranhas” ao meio, como, por exemplo: derivados de petróleo, pesticidas agrícolas, óleos minerais e/ou vegetais, e chorume. Tais substâncias, quando em contato com materiais geológicos, podem alterar suas características químicas e físicas, entre elas a resistividade elétrica.

2.4.3 Influência do chorume na resistividade dos materiais geológicos

Inicialmente, chorume era o nome atribuído a uma substância gordurosa expelida pelo tecido adiposo de animais. Posteriormente, o significado da palavra foi ampliado e passou a significar o líquido contaminante, de cor escura e odor nauseante, originado de processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos. Esses processos, somados com a ação da água das chuvas, são responsáveis por lixiviar compostos orgânicos presentes nos aterros para o meio ambiente.

Segundo Massai (2005), o chorume é extremamente agressivo e, assim sendo, pode atacar os metais contidos nos resíduos, liberando íons que se agregam aos materiais geológicos. Locais contaminados por chorume, como lixões e aterros, contém eletrólitos ricos em íons, favorecendo, assim, a condução de corrente elétrica na forma iônica. Desse modo, contaminações por chorume em subsuperfície podem ser detectadas pelo Método da ER pois nesses locais os valores de resistividade são mais baixos (GALLAS *et al*, 2005, p. 52).

As regiões do subsolo onde há ocorrência de valores anômalos de resistividade elétrica, em relação ao *background*, são ditas **zonas de anomalias**. Quando existe contaminação por chorume, as zonas de anomalia são condutivas, isto é, ocorre um

incremento da **condutividade elétrica** do substrato contaminado relativamente ao substrato não contaminado.

Fisicamente, a condutividade elétrica (σ) é o inverso da resistividade elétrica (ρ), e podem ser assim relacionadas (Equação 2.10):

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{Equação 2.10})$$

sendo a unidade de medida da condutividade elétrica o *Siemens/m* (*S/m*).

2.4.4 Medição da resistividade elétrica de um meio geológico

Como visto anteriormente, é necessário criar um campo eletromagnético em um meio geológico para se determinar o valor de resistividade elétrica que o caracteriza. Braga (1997, p. 29) cita que existem, basicamente, dois modos de criação deste esse campo: pelo procedimento galvânico e pelo procedimento indutivo.

No procedimento galvânico, eletrodos metálicos são cravados na superfície terrestre e conectados a uma fonte de corrente – contínua ou variável. Surge, então, uma diferença de potencial entre os eletrodos, a qual gera um campo eletromagnético em subsuperfície.

No procedimento indutivo, um circuito eletrônico emite uma corrente elétrica variável, que é enviada para uma bobina disposta na superfície do terreno, criando o campo eletromagnético primário. Por meio de indução, essa bobina origina correntes elétricas em subsuperfície – campo eletromagnético secundário –, detectados por meio de uma segunda bobina, também em superfície.

Especificamente, neste trabalho, empregou-se o procedimento galvânico. Portanto, a teoria de medição da resistividade elétrica de meios geológicos será desenvolvida com base nesse modo.

Consideremos, então, um dispositivo capaz de injetar uma corrente elétrica de intensidade I , através de um eletrodo metálico **A**, em um meio geológico homogêneo e isotrópico. Tomemos por suposição que o segundo eletrodo metálico **B**, que fecha o circuito de corrente, esteja infinitamente distante do eletrodo **A**, de modo a não interferir nas observações, conforme ilustrado na Figura 2.4.

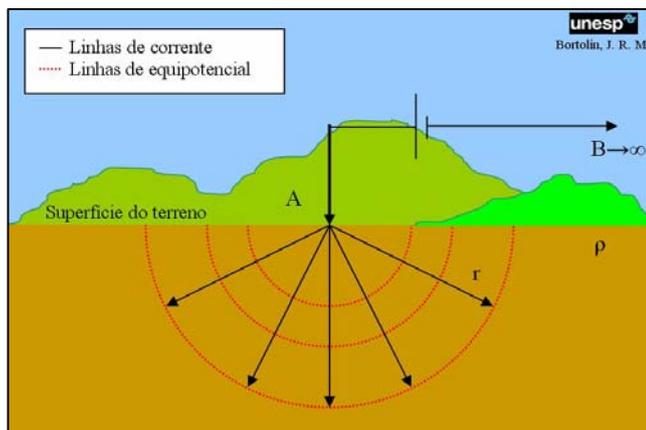


Figura 2.4: Dispositivo para determinação da resistividade elétrica de um meio homogêneo.

As linhas de fluxo de corrente são radiais em relação ao ponto de injeção de corrente e assim determinam uma superfície semi-esférica de área (Equação 2.11):

$$S = 2\pi r^2 \quad (\text{Equação 2.11})$$

Tal superfície semi-esférica localiza-se somente no meio geológico homogêneo e isotrópico, pois acima dele supomos a existência de ar, onde a condutividade elétrica (para fins de cálculo) é nula.

Dada a simetria do problema, a densidade de corrente J num ponto a uma distância r do ponto de injeção de corrente, em coordenadas esféricas, é (Equação 2.12):

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 2.12})$$

A densidade de corrente num meio condutor é linearmente proporcional ao campo elétrico (REITZ, MILFORD E CHRISTY, 1982, p.141). Essa afirmação é a tradução da Lei de Ohm na forma (Equação 2.13):

$$J_r = \sigma E_r = \frac{E_r}{\rho} \quad (\text{Equação 2.13})$$

Combinando-se as Equações 2.12 e 2.13, temos (Equações 2.14 e 2.15):

$$\frac{I}{2\pi r^2} = \frac{E_r}{\rho} \quad (\text{Equação 2.14})$$

$$E_r = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 2.15})$$

A Equação 2.15 nos diz que o valor do campo elétrico E de um eletrodo puntual, em coordenadas esféricas, é inversamente proporcional ao quadrado da distância r .

Segundo Reitz, Milford e Christy (1982, p.143), a diferença de potencial ΔV entre dois pontos r_1 e r_2 quaisquer é dada por (Equação 2.16):

$$\Delta V_{r_1}^{r_2} = -\int_{r_1}^{r_2} E_r dr \quad (\text{Equação 2.16})$$

Portanto, a diferença de potencial a uma distância r do eletrodo **A** é dada por (Equações 2.17 e 2.18):

$$\Delta V_r^\infty = -\int_r^\infty E_r dr = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Equação 2.17})$$

ou

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Equação 2.18})$$

Isolando o termo ρ , temos a Equação 2.19:

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 2.19})$$

Essa é a expressão fundamental do Método da Eletrorresistividade quando aplicado na superfície de um meio geológico homogêneo e isotrópico. Do mesmo modo que na Equação

2.3, o fator K é chamado de **coeficiente geométrico** e, nesse caso, depende do número de eletrodos e da disposição (configuração) utilizados.

Dentre os Métodos Geométricos, são bastante empregados aqueles que utilizam quatro eletrodos **A M N B**, nessa ordem, dispostos simetricamente em relação a um ponto médio **O**, sobre uma mesma reta imaginária. A Figura 2.5 ilustra o enunciado.

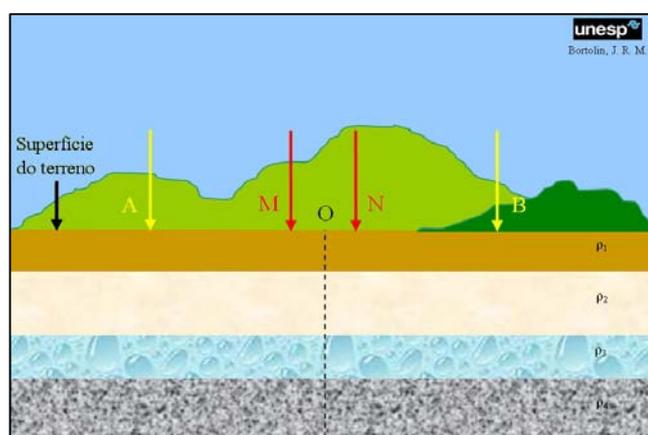


Figura 2.5: Dispositivo tetraeletródico **A M N B** para aplicação de Métodos Geométricos.

De acordo com Telford, Geldart e Sheriff (2004, p.524), quando os eletrodos de corrente **A** e **B** são dispostos de modo que a distância entre eles seja finita, a diferença de potencial entre dois pontos próximos da superfície será afetada por ambos os eletrodos de corrente. Portanto, o potencial medido sobre o eletrodo **M** será a soma das contribuições de cada eletrodo de corrente (Equação 2.20):

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_1} + \left(-\frac{I\rho}{2\pi r_2} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (\text{Equação 2.20})$$

onde r_1 é a distância entre os eletrodos **A** e **M** (ou **AM**), e r_2 é a distância entre os eletrodos **B** e **M** (ou **BM**).

Analogamente, o potencial medido sobre o eletrodo **N** será também a soma das contribuições dos eletrodos de corrente **A** e **B** (Equação 2.21):

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right] \quad (\text{Equação 2.21})$$

onde r_3 é a distância entre os eletrodos **A** e **N** (ou **AN**), e r_4 é a distância entre os eletrodos **B** e **N** (ou **BN**).

Enfim, a diferença de potencial entre **M** e **N**, dada por $\Delta V = V_M - V_N$, pode ser escrita como sendo (Equação 2.22):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (\text{Equação 2.22})$$

Isolando o termo ρ , podemos reescrever a Equação 2.22 na forma das Equações 2.23 e 2.24:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]} \quad (\text{Equação 2.23})$$

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (\text{Equação 2.24})$$

No entanto, os fatores r_1 , r_2 , r_3 e r_4 representam, respectivamente, as distâncias entre os eletrodos **A** e **M**, **B** e **M**, **A** e **N**, e **B** e **N**, ou, como já mencionado, **AM**, **BM**, **AN** e **BN**. Portanto, a Equação 2.24 pode ser reescrita como (Equação 2.25):

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Equação 2.25})$$

Esta é a equação fundamental do Método da Eletrorresistividade quando aplicado na superfície de um meio geológico homogêneo e isotrópico, e é válida para qualquer dispositivo linear com quatro eletrodos. Além disso, alterando-se as distâncias **AM**, **BM**, **AN** e **BN**, o valor da resistividade elétrica será sempre o mesmo, pois ΔV e I ajustam-se de modo a resultar sempre no mesmo valor de ρ .

2.4.5 Resistividade Aparente

Ao iniciar a discussão da teoria do Método da Eletrorresistividade no item anterior, fizemos a suposição de que o meio geológico, onde seria aplicado o método, era homogêneo e isotrópico, isto é, suas propriedades não sofrem variação conforme a localização do ponto considerado. Porém, na prática, essa situação dificilmente se verifica.

Os meios geológicos comuns são heterogêneos e anisotrópicos, pois são constituídos por uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade. As heterogeneidades e anisotropias dos materiais geológicos dessas camadas estão distribuídas tanto lateralmente como em profundidade (Figura 2.6), causando distorções no campo elétrico E , e quando detectadas são traduzidas como anomalias de resistividade (Figura 2.7) (MOURA, 2002, p.33).

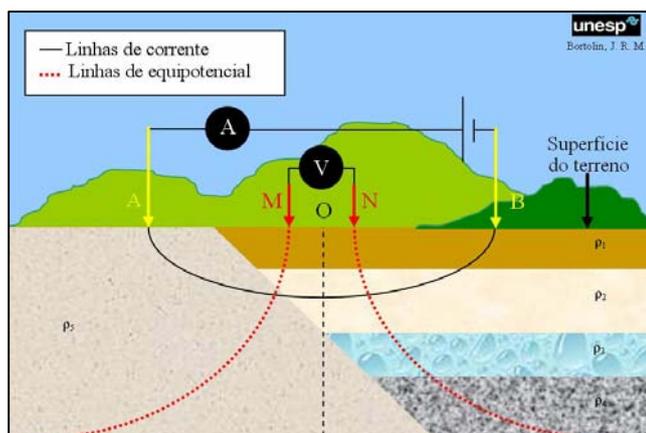


Figura 2.6: Exemplo hipotético de sucessão de camadas geológicas com heterogeneidades e anisotropias distribuídas lateralmente e em profundidade.

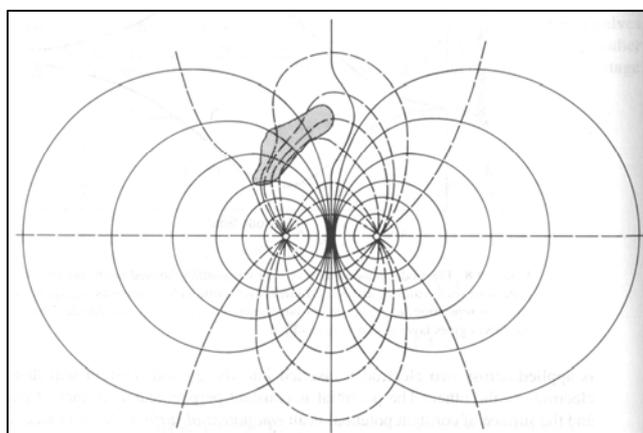


Figura 2.7: Vista superior da distorção do campo elétrico causada por um corpo heterogêneo e anisotrópico (Fonte: SHERIFF, 1989, p.184).

Desse modo, se efetuarmos as medidas pertinentes e levarmos os dados obtidos à Equação 2.25, resultará uma resistividade fictícia ρ_a , a qual dependerá da resistividade de cada camada geológica e das distâncias **AM**, **BM**, **AN** e **BN**.

Esta resistividade fictícia ρ_a , obtida pela aplicação dos dados obtidos sobre um meio heterogêneo à expressão correspondente a um meio homogêneo é chamada de **resistividade aparente**, a qual é uma variável experimental que expressa os resultados obtidos nas medições do Método da Eletroresistividade e que se toma como base para a interpretação (MOURA, 2002, p.33; ORELLANA, 1972, p.108). Sua unidade de medida também é o *ohm.m* ($\Omega.m$).

2.5 Técnicas de Campo

Dentro da Geofísica de Prospecção, existem diversas técnicas para a aplicação do Método da Eletroresistividade e elas diferem entre si em função do tipo de investigação pretendida: técnica do Imageamento Elétrico (IE) (ou Caminhamento Elétrico – CE) para investigação lateral, ao longo de uma seção, e técnicas da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e da Perfilagem Elétrica para investigação vertical de caráter puntual, sendo a sondagem aplicada em superfície e a perfilagem, em furos.

Para a execução desse trabalho de pesquisa optou-se pelas técnicas da Sondagem Elétrica Vertical e do Imageamento Elétrico, a fim de repetir as mesmas condições propostas por Moura (2002, p.44).

2.5.1 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) consiste na investigação da variação de um parâmetro físico – no caso, a resistividade elétrica – em profundidade, a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno. A Figura 2.8 ilustra essa técnica.

É considerada a melhor técnica para se detectar camadas geoeletricas de diferentes resistividades dispostas horizontalmente ou levemente inclinadas (TELFORD, GELDART E SHERIFF, 2004, p. 538).

As setas amarelas **A** e **B** representam os eletrodos de corrente, por onde a corrente elétrica é injetada no solo. As setas vermelhas **M** e **N** representam os eletrodos de potencial, por onde é medida a diferença de potencial. Tanto **M** e **N**, quanto **A** e **B**, são simétricos em relação ao ponto de investigação **O**, chamado de “centro da SEV”.

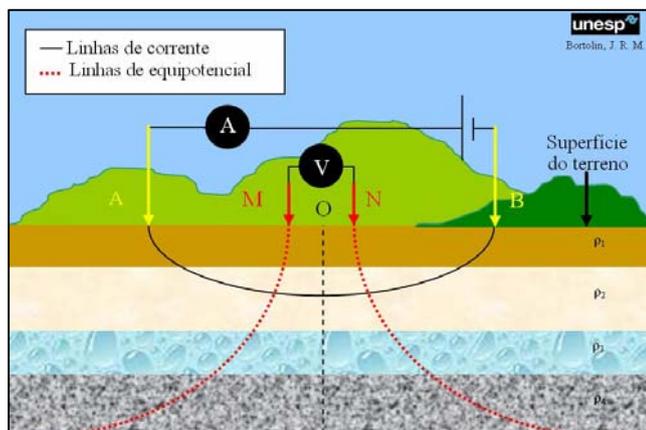


Figura 2.8: A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

A distância de separação dos eletrodos de corrente **A** e **B** varia durante o decorrer do ensaio. Quanto maior a abertura **AB**, maior é a superfície semi-esférica no subsolo e, conseqüentemente, maior é a profundidade teórica de investigação, pois diversos fatores podem influenciar na real profundidade de investigação, como, por exemplo, a diferença de valores entre duas camadas geológicas.

Os dados dos parâmetros físicos obtidos são plotados em gráficos bi-logarítmicos em função da distância de separação **AB/2** correspondente.

2.5.2 Técnica do Imageamento Elétrico

Trata-se da obtenção de valores de um parâmetro físico – novamente, a resistividade elétrica –, a partir da superfície terrestre e ao longo de uma seção, e na interpretação da sua variação horizontal a uma ou mais profundidades determinadas. A Figura 2.9 exibe um esquema representativo dessa técnica.

As setas vermelhas **A** e **B** representam os eletrodos de corrente, por onde a corrente elétrica é injetada no solo. As setas azuis **M₁** e **N₁**, **M₂** e **N₂**, **M₃** e **N₃**, **M₄** e **N₄**, **M₅** e **N₅**, representam os eletrodos de potencial, por onde é medida a diferença de potencial.

No desenvolvimento de um IE, os centros dos dipolos **AB** e **M_iN_i** deslocam-se ao longo da linha investigada. O espaçamento **AB** é igual ao **M_iN_i**, mas o espaçamento entre **AB** e **M_iN_i** varia no decorrer do ensaio. Cada dipolo **M_iN_i** refere-se a um nível de investigação.

Os pontos de investigação (na Figura 2.9, n_1 a n_5) são determinados por meio de segmentos de reta, partindo do centro geométrico de **AB** e **M_iN_i**, com inclinação de 45° em relação à superfície, de modo que se encontrem em certa profundidade. Quanto maior o espaçamento (R) entre os dipolos, maior será a profundidade (ou nível) de investigação.

É um método particularmente usado na exploração de minerais, onde a detecção de corpos com resistividade anômala – diferente do *background* – é necessária (TELFORD, GELDART E SHERIFF, 2004, p. 538).

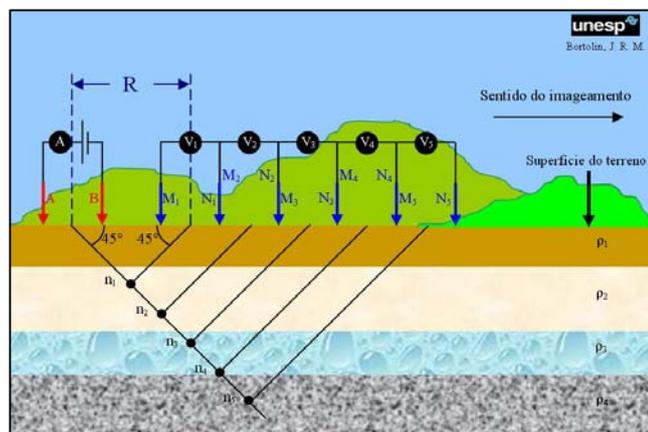


Figura 2.9: A técnica do Imageamento Elétrico (IE).

2.6 Arranjos de Campo

Arranjos são combinações numéricas e geométricas de eletrodos para a execução das técnicas dos Métodos Geométricos de Prospecção. Isso quer dizer que o número e a disposição dos eletrodos variam em cada arranjo. Apesar do grande número de possibilidades de arranjos, poucos deles são efetivamente utilizados em trabalhos de pesquisa.

A seguir, serão descritos dois arranjos tetraeletródicos – que utilizam quatro eletrodos – que podem ser empregados tanto na técnica da SEV, quanto na técnica do IE. São eles: o Schlumberger e o Dipolo-Dipolo. Porém, pela praticidade operacional e pela finalidade da investigação, optou-se por aplicar o arranjo Schlumberger para a técnica da SEV e o arranjo Dipolo-Dipolo para a técnica do IE.

2.6.1 Arranjo Schlumberger

Esse arranjo é bastante utilizado no Brasil e em alguns países da Europa e Ásia, como França e Rússia. Além de ser mais prático no campo, pois requer a mudança de apenas dois dos quatro eletrodos no decorrer dos ensaios, as leituras estão menos sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis, tais como, potenciais artificiais produzidos por cabos e estações de alta tensão (BRAGA, 1997, p.63).

Nesse arranjo, os eletrodos de potencial **M** e **N** são internos aos eletrodos de corrente **A** e **B**, e ambos os pares de eletrodos são simétricos em relação ao ponto de investigação **O**. A Figura 2.10 explicita o arranjo Schlumberger.

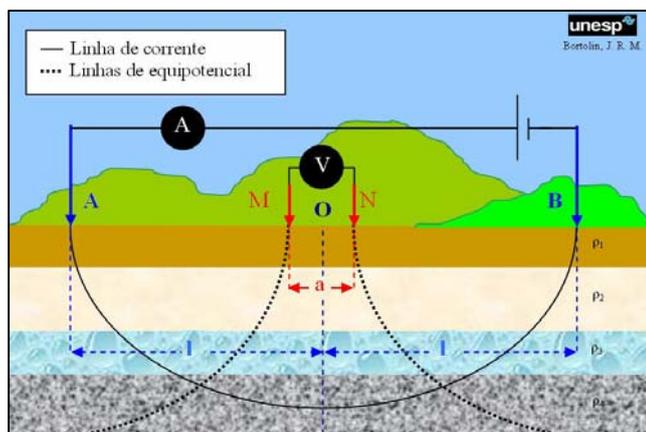


Figura 2.10: Arranjo Schlumberger.

No desenvolvimento de uma SEV com arranjo Schlumberger, os eletrodos de potencial **M** e **N** permanecem fixos no centro do arranjo, enquanto os eletrodos de corrente **A** e **B**, nas extremidades, apresentam uma separação crescente em relação ao ponto de origem. Desse modo, a distância de separação **MN** tende a zero em relação à distância de separação **AB**, minimizando os erros dos dados obtidos em campo.

A distância entre os eletrodos de corrente deve ser 5 (cinco) vezes maior, ou igual, à distância entre os eletrodos de potencial (SOUZA *et al*, 1998, p.169), ou seja, deve obedecer à relação geométrica (Equação 2.26):

$$MN \leq \frac{AB}{5} \quad (\text{Equação 2.26})$$

para que, desse modo, a distância de separação **MN** tenda a zero em relação à distância de separação **AB**, minimizando eventuais erros interpretativos em terrenos não homogêneos. Segundo Orellana (1972, p.113), esse erro é de apenas 4%.

O fator geométrico K_S para esse arranjo é dado por (Equação 2.27):

$$K_S = \pi \frac{(AM \cdot AN)}{MN} \quad (\text{Equação 2.27})$$

A profundidade teórica de investigação é diretamente proporcional à distância de separação **AB**: quanto maior a abertura, maior a profundidade investigada, e, normalmente, situa-se entre $0,25\mathbf{AB}$ e $0,1\mathbf{AB}$, dependendo da resistividade das litologias subjacentes (GALLAS, 2000, p.65).

Braga (2001, p.23) alerta que, no desenvolvimento de uma SEV, ao aumentar-se o espaçamento entre os eletrodos **AB**, o valor de ΔV diminui rapidamente, podendo atingir valores imprecisos. Uma das maneiras de se manter o ΔV com valor adequado para a aquisição dos dados pode ser realizada com o aumento da intensidade da corrente I ; entretanto, existe uma limitação operacional de cada tipo de equipamento. Alternativamente, em campo, é possível aplicar uma situação de contorno denominada de **embreagem**.

A finalidade da embreagem é minimizar eventuais imprecisões de leitura e maximizar a qualidade da obtenção dos dados. Essa operação consiste em, a partir do momento em que o valor medido de ΔV tornar-se demasiadamente baixo:

- manter fixos os eletrodos de corrente **A** e **B**, e realizar duas medidas do potencial: uma com a separação inicial de **MN** e outra com a distância aumentada de **MN**
- aumentar o espaçamento **AB**, de acordo com o planejado, e realizar duas novas leituras como no item anterior
- repetir esse procedimento durante as leituras dos próximos três espaçamentos de **AB**

O resultado deste procedimento na construção da curva de campo apresenta-se como curvas de resistividade que mantêm trajetórias paralelas.

2.6.2 Arranjo Dipolo-Dipolo

Gandolfo (2007, p.29) afirma que “o arranjo Dipolo-Dipolo é certamente o de uso mais difundido para a execução de IE dentre os diversos arranjos existentes, sendo largamente utilizado para diversos fins (mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia)”. Segundo esse autor, alguns pontos positivos desse arranjo são:

- simetria dos eletrodos, facilitando o correto posicionamento de uma anomalia na interpretação qualitativa de uma pseudo-seção, comparativamente a outros arranjos
- facilidade operacional em campo
- boa resolução lateral (horizontal)
- bom desempenho no mapeamento de estruturas verticais

Do mesmo modo, o autor destaca como pontos negativos:

- as anomalias são fortemente influenciadas por irregularidades da cobertura superficial
- baixa razão sinal/ruído, principalmente quando se torna grande a separação entre os pares de dipolos
- inadequado para a identificação de estruturas horizontais

A Figura 2.11 esquematiza esse arranjo com 5 níveis de investigação, onde as setas vermelhas **A** e **B** representam os eletrodos de corrente, por onde a corrente elétrica é injetada no solo, e as setas azuis **M₁** e **N₁** a **M₅** e **N₅**, representam os eletrodos de potencial, por onde é medida a diferença de potencial. Os pares de eletrodos **AB** e **M_iN_i** são igualmente espaçados por uma distância x .

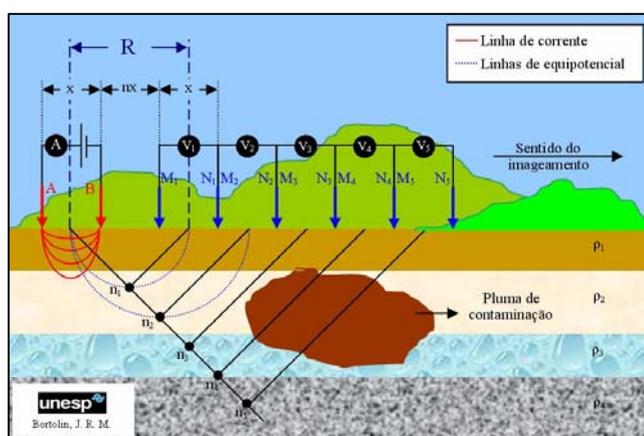


Figura 2.11: Arranjo Dipolo-Dipolo.

Nesse arranjo, os eletrodos de potencial **M** e **N** são externos aos eletrodos de corrente **A** e **B**, e ambos os pares de eletrodos são simétricos em relação ao ponto de investigação – na Figura 2.11, n_1 a n_5 .

O espaçamento entre os dipolos R varia de acordo com a relação (Equação 2.28):

$$R = x(n + 1), \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad (\text{Equação 2.28})$$

onde cada n corresponde a um dipolo $M_i N_i$, o qual refere-se a um nível de investigação.

De acordo com Gandolfo (2007, p.30), a profundidade teórica de investigação Z é dada pela relação (Equação 2.29):

$$Z = \frac{R}{2} = \frac{x(n + 1)}{2}, \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad (\text{Equação 2.29})$$

O fator geométrico K_{DD} para esse arranjo é dado por (Equação 2.30):

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (\text{Equação 2.30})$$

Quando se utiliza grandes valores de x (abertura de dipolos) – maiores que 20m – a investigação limita-se em 5 ou 6 níveis em profundidade, devido à baixa relação sinal/ruído. Pode-se alcançar mais níveis de investigação utilizando-se equipamentos de grande potência e/ou sensibilidade, ou ainda empregando-se dipolos com abertura reduzida – menores que 10m –, situação típica em estudos hidrogeológicos rasos e ambientais (GANDOLFO, 2007, p. 31).

2.7 Processamento e interpretação dos dados

Segundo Moura (2002, p.49), existem três tipos de interpretação de dados geoeletricos: qualitativa, semiquantitativa e quantitativa.

As interpretações qualitativa e semiquantitativa têm como finalidade apresentar uma visão inicial da estrutura estudada em subsuperfície, não importando a determinação dos valores absolutos de espessuras e resistividades das camadas, e sim relações de semelhanças/diferenças entre certas características, como, por exemplo, delimitações de áreas de diferentes naturezas geológicas e zonas de profundidades máxima ou mínima de alguma camada.

A interpretação quantitativa visa a definição de parâmetros que traduzam valores, quantidades do modelo geoeletrico, e, em muitos casos, é realizada paralelamente aos trabalhos de campo, permitindo modificar o planejamento inicial dos levantamentos em função dos resultados obtidos, em determinadas situações.

Na presente dissertação foram aplicados dois tipos de interpretação quantitativa: a unidimensional e a bidimensional, descritas a seguir.

2.7.1 Interpretação Quantitativa Unidimensional

Consiste em interpretar dados de SEV admitindo um modelo geoeletrico homogêneo e isotrópico, onde a resistividade varia somente com a profundidade. São três os métodos aqui aplicados: comparativo, direto e inverso.

2.7.1.1 Método Comparativo

Esse método baseia-se em reduzir artificialmente – sempre que possível – o número de camadas da curva de campo, substituindo as duas primeiras por uma só camada, equivalente a elas. Assim, o problema se reduz, gradualmente, a um caso de duas camadas (ou, na pior das hipóteses, a um caso com número reduzido de camadas), simplificando a interpretação.

Desse modo, as curvas de campo podem ser agrupadas de acordo com o número de camadas geológicas e em função da relação entre os valores de resistividade aparente de cada camada geológica. Tal procedimento é feito com o auxílio de cartas de famílias de curvas auxiliares.

Por exemplo, para curvas com duas camadas geológicas (ρ_1 e ρ_2), existem somente duas situações distintas: $\rho_1 > \rho_2$, denominada **curva descendente**, e $\rho_1 < \rho_2$, denominada **curva ascendente**. Para curvas com três camadas geológicas, a Figura 2.12 ilustra alguns exemplos hipotéticos.

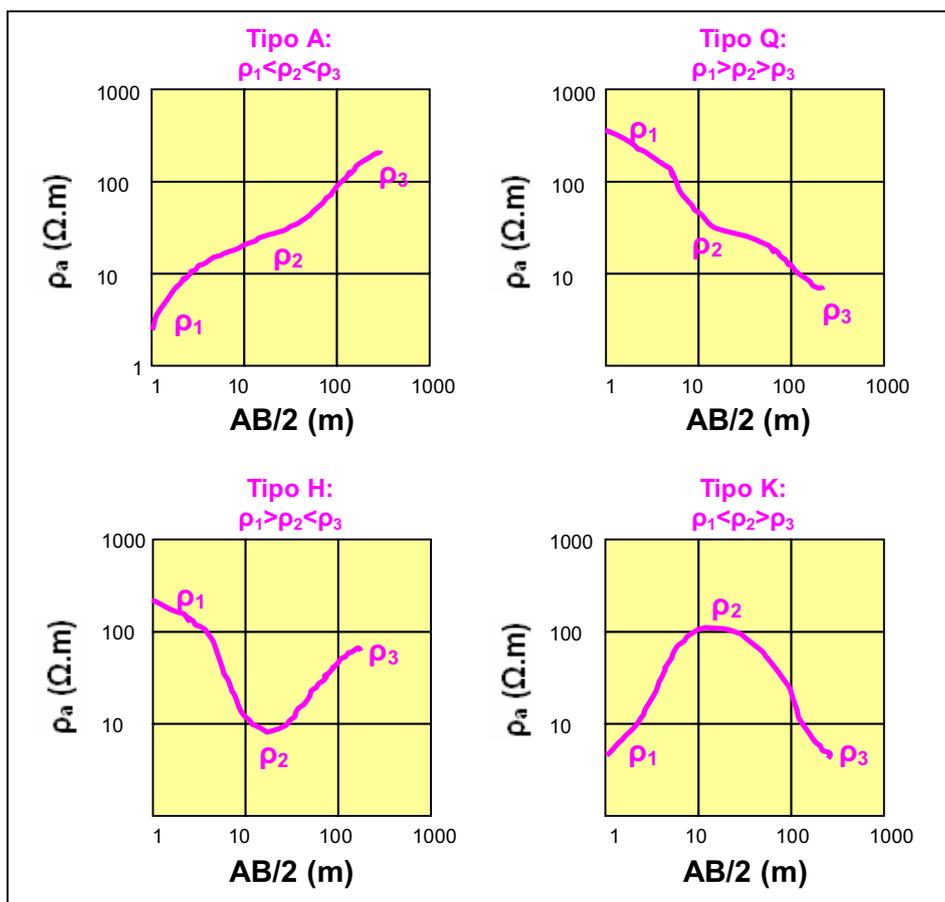


Figura 2.12: Exemplos hipotéticos da família de curvas auxiliares com 3 camadas.

Curvas com quatro ou mais camadas são combinações resultantes das curvas de três camadas. Por exemplo, para a situação onde $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$, a curva será classificada como Tipo AA; já para a situação onde $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, a curva será do tipo QH, e assim sucessivamente.

Esse método foi o primeiro usado na interpretação das curvas de campo apresentadas nessa obra, servindo como base para a interpretação com métodos computacionais.

2.7.1.2 Método Direto

No Método Direto de interpretação admite-se um modelo inicial e uma curva teórica iniciais, baseados em informações geológicas prévias da subsuperfície, os quais são ajustados gradativamente aos dados de campo pelo usuário, modificando os parâmetros resistividade e espessura das camadas, até que o modelo ajustado seja julgado satisfatório.

Esse método baseia-se na função transformada da resistividade (GANDOLFO, 2007, p.65), que pode ser descrita como uma transformação T, do tipo $F=T(\mathbf{x})$, onde “ \mathbf{x} ” corresponde ao vetor que contém o conjunto de parâmetros do modelo da subsuperfície (resistividade e espessura) e “ F ” é a resposta deste modelo. A transformação “T”, que descreverá matematicamente o processo físico observado poderá ser linear ou não-linear. O modelo inicial necessário para as iterações subseqüentes não precisa, necessariamente, ser fornecido pelo usuário.

O *software* Interpex IX1D, escolhido para processar os dados de SEV da presente pesquisa, realiza a modelagem direta utilizando filtros lineares (INTERPEX LIMITED, 2008a).

2.7.1.3 Método Inverso

Este método assume um modelo de subsuperfície unidimensional – 1D –, onde os valores dos parâmetros variam somente com a profundidade. São parâmetros do modelo a resistividade verdadeira e a espessura da camada. Por convenção, é pressuposto um meio planoestratificado – isto é, constituído por n camadas horizontais lateralmente infinitas, homogêneas e isotrópicas –, onde a resistividade elétrica varia apenas com a profundidade (GANDOLFO, 2007, p.66; LOWRIE, 1997, p.216).

O objetivo da inversão geofísica é a determinação dos parâmetros do modelo a partir de uma tentativa de ajuste da resposta do modelo aos dados observados, dentro de um limite de erro pré-estabelecido. Entretanto, os dados geofísicos reais são sempre numericamente

finitos e entre eles sempre estarão presentes componentes que não podem ser explicadas em termos geológicos.

Assim sendo, a resposta do processo de inversão – o modelo gerado – nunca será única, isto é, existirá mais de uma solução que satisfará os dados observados (GANDOLFO, 2007, p.64). Os modelos cujas resistividades calculadas se aproximem, em algum grau, aos valores medidos, para um mesmo conjunto de dados são chamados “modelos equivalentes”.

O *software* Interpex IX1D (INTERPEX LIMITED, 2008b) efetua a inversão dos dados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), o qual realiza um ajuste não-linear de parâmetros, partindo do princípio de que o modelo direto é localmente linear. Assim, o problema é substituído por uma matriz operação (Equação 2.31):

$$o = c + Adp \quad (\text{Equação 2.31})$$

onde o é o vetor conjunto de dados observados, c é o resultado do cálculo direto utilizando o modelo atual, A é a matriz Jacobiana das derivadas parciais das resistividades aparentes em relação aos parâmetros do modelo desconhecido e dp é um conjunto de parâmetros do modelo calculado (otimizações) que podem ajustar os dados observados a um caso ideal.

A matriz A é calculada alterando-se cada um dos parâmetros das camadas, por vez, e realizando um cálculo direto. Cada cálculo gera uma linha da matriz. Os parâmetros fixados não são afetados e as colunas referentes são zeradas (INTERPEX LIMITED, 2008a).

O processo de inversão é iterativo, isto é, o processo é iniciado pelo cálculo da resposta teórica do modelo inicial fornecido pelo usuário, que é comparada com os dados de campo, e o procedimento é repetido n vezes, até que o modelo gerado seja satisfatoriamente convergente com o conjunto de medidas (GANDOLFO, 2007, p.66).

A inversão é realizada usando o Método *Ridge Regression* (INMAN, 1975). Para cada iteração, uma correção do modelo é calculada usando o melhor fator de amortecimento disponível para essa iteração.

2.7.2 Interpretação Quantitativa Bidimensional

Consiste em processar os dados de IE com o objetivo de realizar uma modelagem 2D, isto é, criar seções de resistividade aparente que traduzam a realidade em subsolo. Nesse caso, o modelo geoeletrico admitido é heterogêneo e anisotrópico, o que significa dizer que a

resistividade varia lateral e verticalmente. Para esse trabalho de pesquisa empregou-se, especificamente, o método inverso.

2.7.2.1 Método Inverso

Geralmente, medidas de resistividade obtidas com o método do IE são apresentadas e interpoladas sob a forma de pseudo-seções, as quais representam visualmente o comportamento das resistividades em subsuperfície. Pseudo-seções são seções que representam a distribuição das resistividades aparentes no subsolo, onde a profundidade de cada ponto de investigação é meramente teórica, determinada por algoritmos com informações a respeito do espaçamento dos eletrodos.

Porém, as formas dos contornos dependem não somente dos valores de resistividade medidos, mas também da geometria do arranjo utilizado. Assim, torna-se necessária a utilização de processos de inversão dos dados para que se obtenha uma seção de resistividade mais precisa e condizente com a realidade (GALLAS, 2005, p.53).

Essencialmente, todos os métodos de inversão buscam gerar um modelo cujas repostas representem, do modo mais fiel possível, os dados medidos em campo, tentando minimizar diferenças entre os valores calculados pelo programa e os valores medidos em campo. Também buscam modificar parâmetros que produzem características, desejadas ou não, no modelo resultante.

Portanto, é de se esperar que os processos de inversão de dados de resistividade procurem estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície, minimizando inclusive eventuais distorções nas pseudo-seções ocasionadas pelos arranjos de eletrodos (GALLAS, 2005, p.53).

No método baseado em células, usado pelo *software* Res2Dinv (GEOTOMO SOFTWARE, 2002), escolhido para realizar o processamento dos dados de IE, os parâmetros são os valores de resistividade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores de resistividade aparente medidos (Figura 2.13).

Esse *software* baseia-se em um método iterativo que, partindo de um modelo inicial tenta encontrar um modelo aprimorado, cujos valores de resistividade aparente sejam mais próximos aos valores medidos (FERREIRA, 2002, p.68). Segundo Gallas (2005, p.53), “teoricamente, produz um modelo de subsuperfície 2-D isento das distorções na pseudo-seção de resistividade aparente originadas pela geometria do arranjo eletródico usado”.

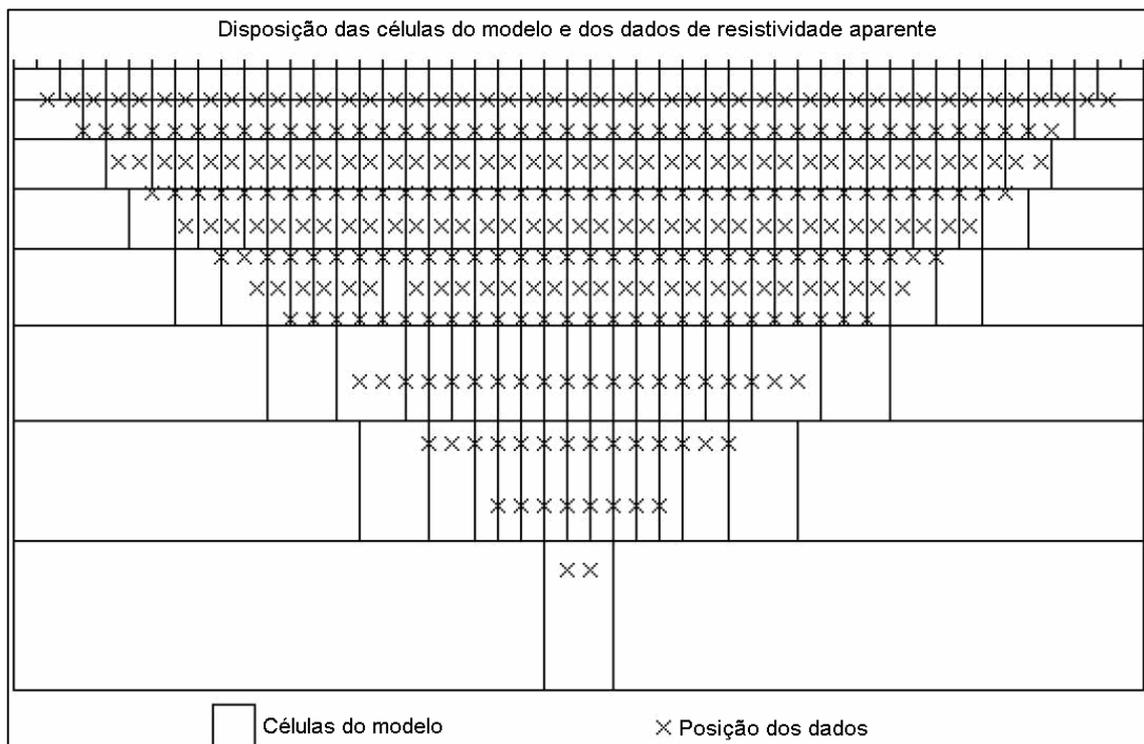


Figura 2.13: Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv (Fonte: GEOTOMO SOFTWARE, 2007, p.2).

O método iterativo de inversão utilizado pelo Res2Dinv é o *smoothness-constrained least-squares method*, ou método de mínimos quadrados com vínculo de suavidade, expresso pela relação matemática (Equação 2.32):

$$(J^T J + \mu F)d = J^T g + \mu Fr \quad (\text{Equação 2.32})$$

onde F é a matriz de suavização, J é a matriz Jacobiana das derivadas parciais, r é o vetor contendo o logaritmo dos valores de resistividade modelados, μ é o fator de suavização, d é o vetor de perturbação do modelo e g é o vetor de discrepância.

O vetor de discrepância g expressa a diferença entre os valores calculados e os valores medidos em campo de resistividade aparente. Frequentemente, a magnitude do vetor discrepância é dada como um valor do erro médio quadrático – RMS (*root-mean-squared*). O método de inversão em questão tenta reduzir essa quantidade, buscando encontrar um modelo melhor após cada iteração.

O vetor de perturbação do modelo d indica a variação dos valores calculados de resistividade do modelo usando a Equação 2.32. Essa equação tenta minimizar a combinação dos parâmetros: diferença entre os valores de resistividade aparente medidos e calculados, e

irregularidade – ou rugosidade, isto é, a recíproca da suavização do modelo – dos valores de resistividade.

O fator de suavização μ (*damping factor*) determina o peso atribuído à suavização do modelo durante o processo de inversão. Quanto maior o fator de suavização mais suavizado é o modelo. Porém, o erro médio quadrático (RMS) pode ser diretamente proporcional.

O método *smoothness-constrained least-squares* pode ser modificado de forma que forneça, em alguns casos, resultados melhores. Os elementos da matriz de suavização F podem ser modificados para que as variações verticais (ou horizontais) nos valores de resistividade modelados sejam ressaltadas no modelo resultante.

Capítulo 3 – Caracterização da área de estudo

A presente pesquisa foi realizada no aterro controlado desativado do município de Rio Claro (SP). A seguir, é descrita a localização do município em questão, com ênfase na área da área de disposição de resíduos supra citada e feita uma síntese dos aspectos hidro-morfo-geológicos e dos principais trabalhos geofísicos aí desenvolvidos.

3.1 Localização

O município de Rio Claro localiza-se a noroeste da capital do Estado de São Paulo, distante cerca de 173km. Conta com uma área de aproximadamente 500km², que engloba as zonas urbana e rural, além dos distritos de Assistência e Ajapi. O acesso pode ser feito pelo sistema Anhanguera/Bandeirantes e Rodovia Washington Luiz (SP 310). Devido à sua localização, o acesso às principais cidades da região é facilitado (Figura 3.1).

O município de Rio Claro (SP) faz limite com nove municípios: ao norte, com Corumbataí; a noroeste, com Itirapina; a oeste, com Ipeúna; ao sul, com Piracicaba e Iracemápolis; a sudeste, com Santa Gertrudes; a leste, com Araras e a nordeste, com Leme.

O aterro controlado desativado de Rio Claro (SP) localiza-se ao sul do município, na altura do km 3, às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP 127) (Figuras 3.1 e 3.2), que liga o município a Piracicaba, na faixa de sentido Rio Claro-Piracicaba, e possui uma área de 44.242,16 m² (TANDEL, 1998, p.44).

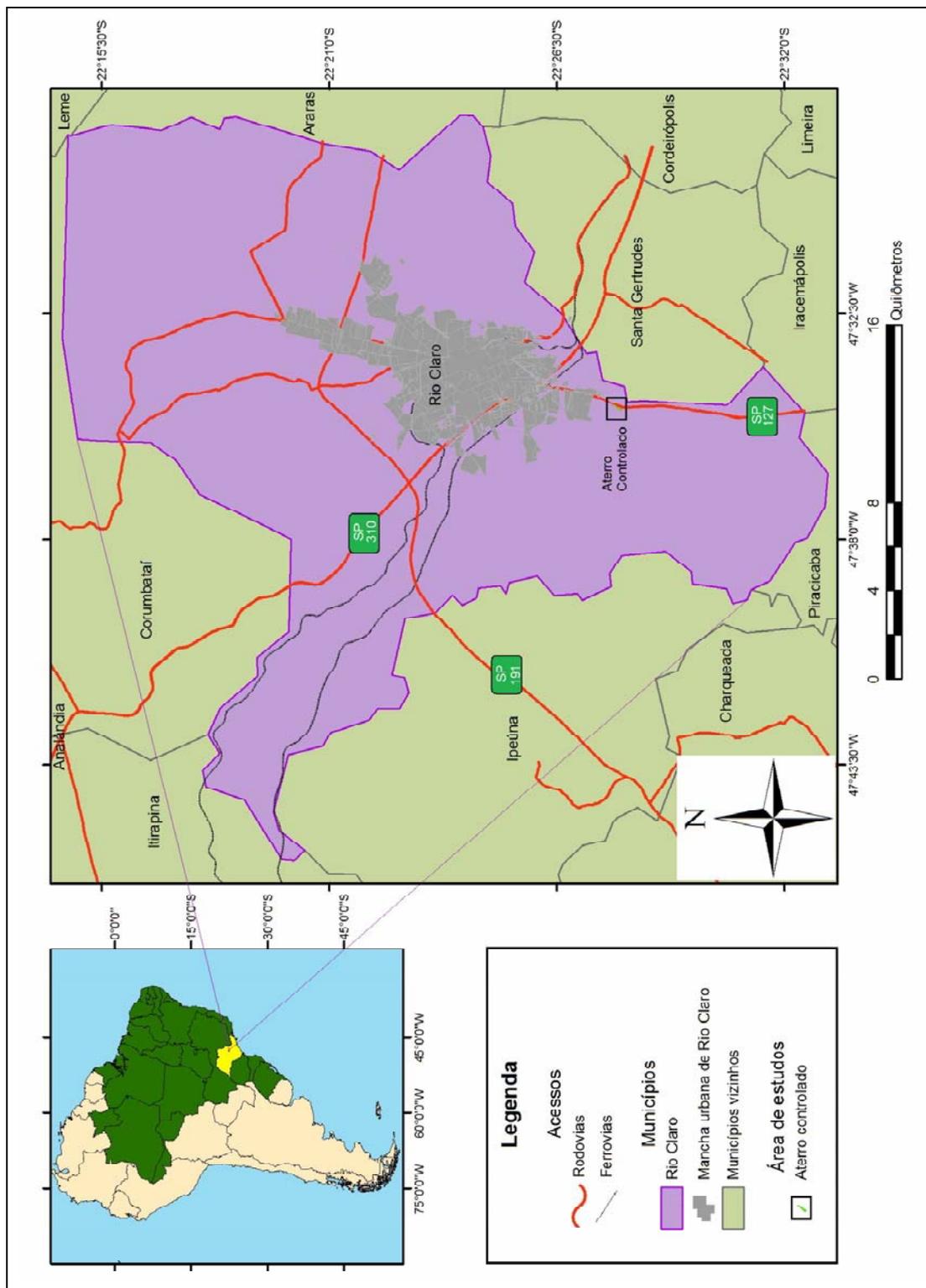


Figura 3.1: Mapa de localização do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de IBGE, 2005, 2008)

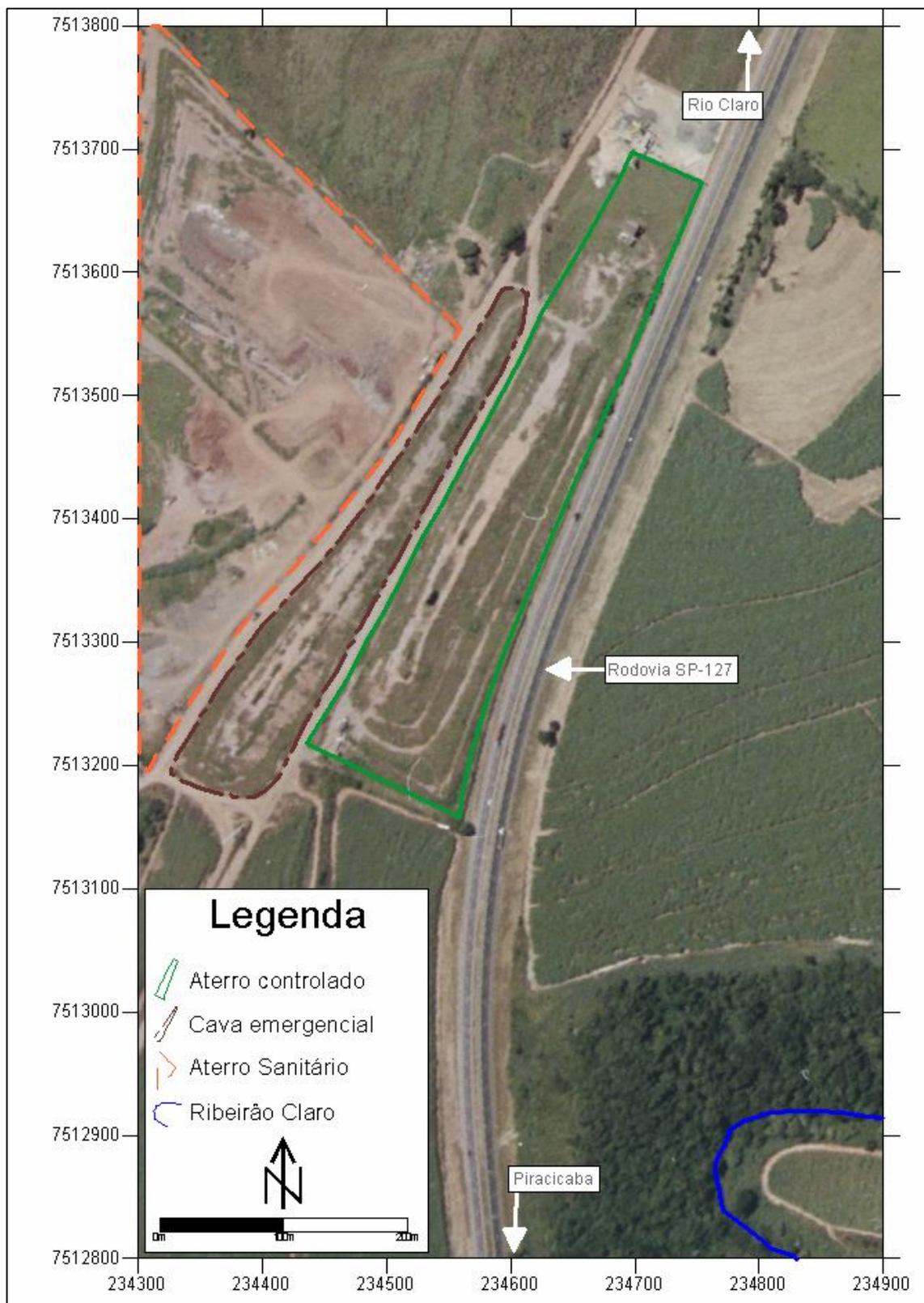


Figura 3.2: Fotografia aérea do aterro controlado de Rio Claro (SP) (modificado de BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S.A.,2006).

Na Figura 3.3, pode-se observar a área de estudos modelada em três dimensões (3D), também chamado Modelo Digital do Terreno (MDT). O modelo foi posicionado de modo a ressaltar o significativo desnível de 23m, entre o limite norte, que se encontra na cota 586m, e o limite sul, localizado na cota 563m.

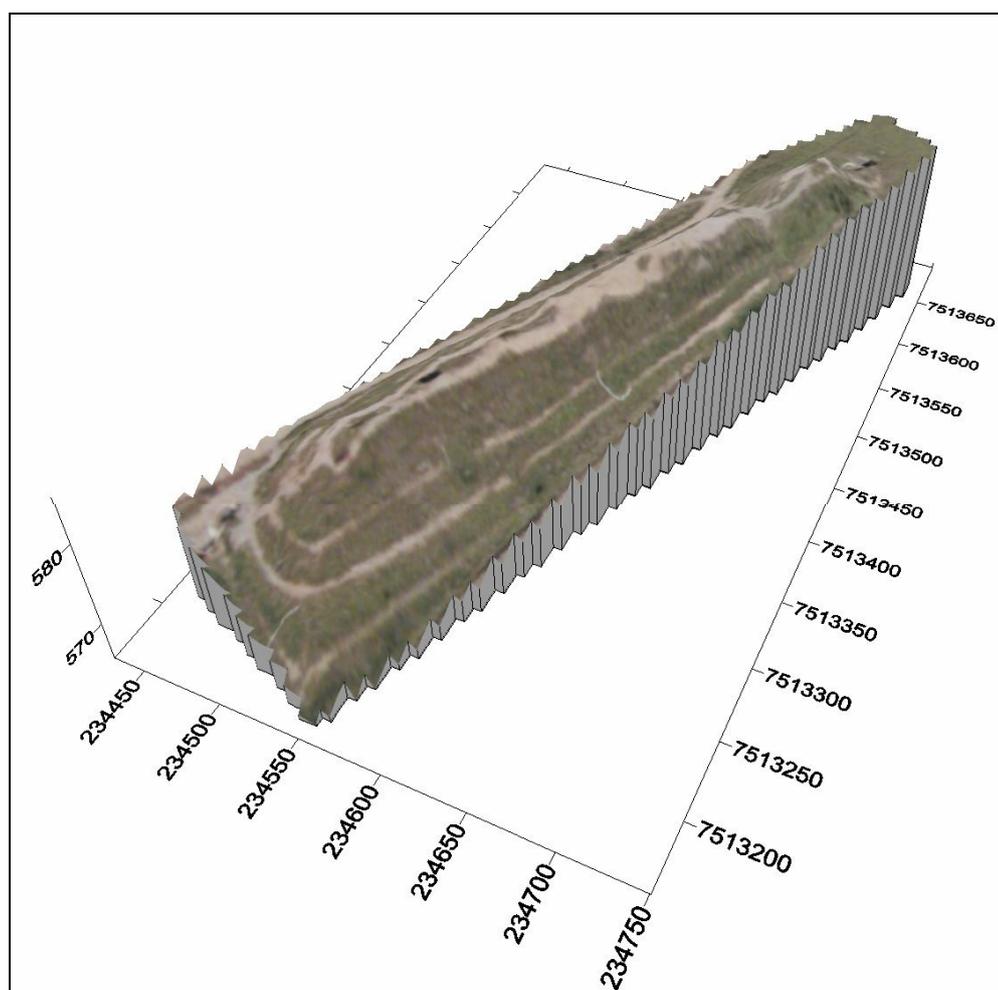


Figura 3.3: Imagem em 3D do aterro controlado de Rio Claro (SP).

3.2 Histórico

Tandel (1998, p. 42) apresenta um histórico detalhado sobre o aterro controlado do município de Rio Claro (SP), o qual teve origem no ano de 1982, como um lixão instalado numa antiga voçoroca, e foi concebido para receber resíduos de origem dos serviços de limpeza pública do município.

Entre 1982 e 1988, a coleta dos resíduos e o gerenciamento do lixão eram efetuados pela prefeitura municipal. A partir de 1988, a coleta dos resíduos passou a ser feita pela empresa Coletora Pioneira Ltda. e o gerenciamento pela empresa SPA – Sistemas de Proteção Ambiental Ltda.

Desde que assumiu o gerenciamento, a SPA colocou em prática um projeto de cobertura diária dos resíduos depositados e de instalação de drenos para a coleta de gases e percolado. A partir do mês de outubro de 1990, analisou mensalmente a composição físico-química dos gases e do percolado gerados no local, até outubro de 1992, quando encerrou o gerenciamento do, então, aterro controlado.

No ano de 1991, foi construída uma cerca com telas de aço e mourões de concreto, delimitando a área total do aterro. Também foi implementada fiscalização constante para impedir o depósito de lixo industrial, pesagem dos caminhões antes de descarregar os resíduos e instalou-se um incinerador de lixo hospitalar, o qual nunca entrou em plena operação devido a graves erros de projeto. O lixo hospitalar era disposto na extremidade sudoeste do aterro e no pátio do incinerador, em valas comuns e com adição de cal.

A coleta dos resíduos foi de responsabilidade da empresa Coletora Pioneira Ltda. entre 1988 e junho de 1993, quando passou a ser realizada pela empresa Proposta Engenharia e Edificações Ltda., até junho de 1994. Posteriormente, a empresa Transpolix Transportes Especiais Ltda. assumiu a coleta até maio de 1999.

O gerenciamento do aterro ficou a cargo da prefeitura municipal entre outubro de 1992 e novembro de 1994, quando a Transpolix assumiu também essa responsabilidade, implementando um projeto de minimização de impactos ambientais e recuperação da infraestrutura do aterro.

As atividades no aterro foram encerradas em setembro de 1997 e, em caráter emergencial, utilizou-se uma área contígua, a leste do aterro. Após o término das operações de disposição de resíduos, todo o aterro foi coberto com uma camada de solo de, aproximadamente, 0,5m.

Os drenos de coleta de gás e de percolado presentes no aterro controlado de Rio Claro (SP) são construídos com brita de basalto n.º 4. O percolado era conduzido por canaletas de concreto até um poço concretado do sistema de recirculação, sendo que a quantidade gerada era de, no máximo, 42 litros por hora na época das chuvas, chegando a zero na seca. Os gases eram eliminados nos queimadores, mantidos constantemente acesos.

Os resíduos coletados eram dispostos diretamente no aterro, sem separação ou tratamento intermediário, em células de 4m de altura, em média. Eram recobertos com uma camada de

material de cobertura com cerca de 0,5m e compactado por trator de esteira. A densidade final de compactação girava em torno de 600 kg/m^3 (BRAZ E SILVA, 2001, p. 3).

A base do aterro não recebeu nenhum tipo de impermeabilização (por exemplo, camadas de argila ou mantas plásticas). Ensaio de laboratório apontam valores do coeficiente de permeabilidade da base do aterro nunca superiores a 10^{-6} cm/s .

Também foram construídos – provavelmente no início de 1994 – três poços de monitoramento de águas subterrâneas, em PVC e com 4” de diâmetro, sendo um a montante e dois a jusante.

No entorno do aterro controlado desativado verifica-se o domínio de lavouras de cana-de-açúcar, destinadas a atender a agroindústria do açúcar e do álcool.

3.3 Contexto geológico

Em termos geológicos, a cidade de Rio Claro (SP) encontra-se no setor paulista do flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, representada por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica. Devido à sua localização marginal na bacia, diversas unidades litoestratigráficas afloram na região, como exibido na Figura 3.4 e resumidas na Tabela 3.1. Somente as Formações Corumbataí e Rio Claro receberão maior enfoque, pois afloram na área do aterro controlado.

Todas as informações aqui contidas foram extraídas de Cottas (1983, p.105 a 110) e Zaine (1994, p.14 a 47).

3.3.1 Formação Corumbataí

Corresponde à unidade superior do Grupo Passa Dois no Estado de São Paulo. Aflora continuamente desde o divisor de águas dos rios Tietê e Piracicaba para o norte, até os limites com o Estado de Minas Gerais. Até a zona norte da Depressão Periférica assenta-se concordantemente com a Formação Irati, quando essa desaparece, passando a repousar em discordância erosiva sobre os sedimentos do Grupo Tubarão. Possui espessura inferior a 150m, sendo que na faixa aflorante do Estado de São Paulo e na região de Rio Claro (SP) não ultrapassa os 130m, adelgaçando para o norte e não ultrapassando 60m na região de Leme/ Pirassununga.

É constituída por argilitos, siltitos e folhelhos cinzentos, arroxeados, marrom-avermelhados e, às vezes, esverdeados. Possui intercalações de arenitos de granulometria fina, leitões carbonáticos e coquinas até o topo da Formação.

3.3.2 Formação Rio Claro

A Formação Rio Claro tem sua seção-tipo no Município de Rio Claro, sendo que a maior parte do sítio urbano encontra-se assentada sobre ela, inclusive o aterro controlado. Essa formação capeia grandes interflúvios planos 50 a 60m acima do Rio Corumbataí, entre as cotas de 580 a 670m. Na espessura dessa Formação predominam valores entre 25 e 30m, com máximo da ordem de 40m.

Assenta-se discordantemente sobre rochas da Formação Corumbataí. Em cotas mais elevadas – 650 a 670m – assenta-se sobre a Formação Pirambóia e na área do domo de Pitanga, apresenta contato basal com a Formação Irati.

Suas principais características são: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso (8 a 12m) e arenitos, com colorações passando de branca, para amarela e vermelha, variando de areia fina a grossa, intercaladas com camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos.

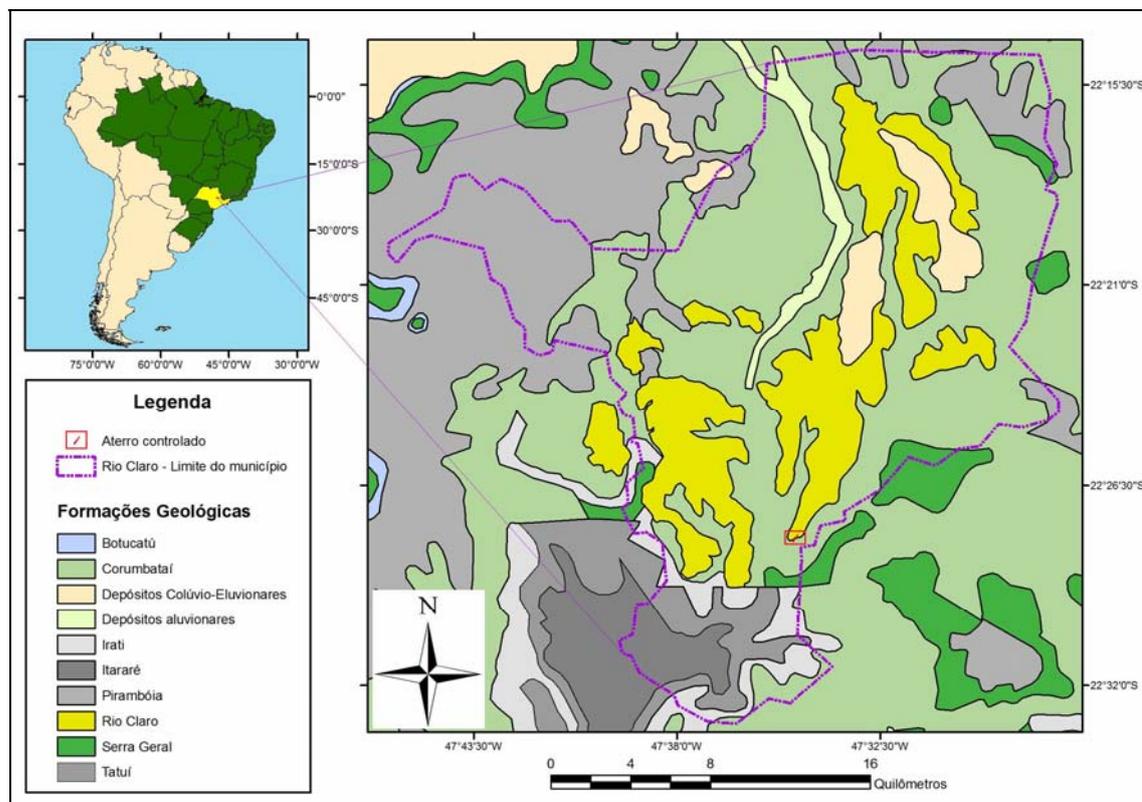


Figura 3.4: Mapa geológico do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de CPRM, 200?; IBGE, 2008).

3.4 Hidrografia e Hidrogeologia

O município de Rio Claro (SP) encontra-se no flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, a qual ocupa uma área de aproximadamente 891.309km^2 – cerca de 10,4% do território brasileiro. Juntamente com as bacias dos rios Paraguai e Uruguai, formam a Bacia Platina, totalizando mais de $1.400.000\text{km}^2$ (GARCIA E GARAVELLO, 1996, p.87).

Segundo Cottas (1983, p.100 e p.142) e Zaine (1994, p.4), a área é drenada pela Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí, a qual apresenta área de, aproximadamente, 489km^2 e vazão de $2,239 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$. O Rio Corumbataí (Figura 3.5) possui três principais afluentes: os rios Passa Cinco e Cabeça, na margem direita, e o Ribeirão Claro, na margem esquerda, sendo esse o rio que abastece o município de Rio Claro (SP) (cerca de 1000 litros por segundo) (OLIVA, 2002, p.24). Parte do leito do Ribeirão Claro encontra-se a sudeste do aterro controlado, a cerca de 315m de distância.

Esse conjunto de rios representa o principal sistema de drenagens da região; nascem nas escarpas das serras e morrotes que compõem a linha de cuevas e deslocam-se para o sul, alimentando o Rio Piracicaba que, por sua vez, deságua no Rio Tietê.

Cottas (1983, p.142) e Oliva (2002, p.1 e p.38) relatam que no município de Rio Claro (SP), as águas subterrâneas encontram-se em dois sistemas armazenadores preferenciais.

O primeiro consiste de um aquífero livre e pouco profundo, constituído por materiais inconsolidados de cobertura – Formação Rio Claro – e limitados na base pelos sedimentos impermeáveis da Formação Corumbataí. Possui vazão entre $17\text{m}^3/\text{h}$ e $25\text{m}^3/\text{h}$. Este aquífero ocorre na região sul do município, onde se encontra o aterro controlado.

Majoritariamente, a área central da Formação Rio Claro atua como área de recarga do aquífero livre, onde ocorre a infiltração no solo das águas pluviais, as quais se deslocam seguindo, aproximadamente, a topografia, em direção de cotas menores e aflorando próximo aos contatos da formação (OLIVA, 2002, p. 57).

O segundo sistema trata-se de um aquífero confinado, com profundidades que variam entre 200m e 500m, sendo arenitos do Grupo Tubarão, mais especificamente da Formação Tatuí e das camadas do topo do Subgrupo Itararé. A vazão desse sistema varia entre $20\text{m}^3/\text{h}$ e $37\text{m}^3/\text{h}$.

Oliva (2002, p.38) ainda cita que ocorrem corpos profundos de diabásio com água em suas fraturas e vazões entre $5\text{m}^3/\text{h}$ e $30\text{m}^3/\text{h}$.

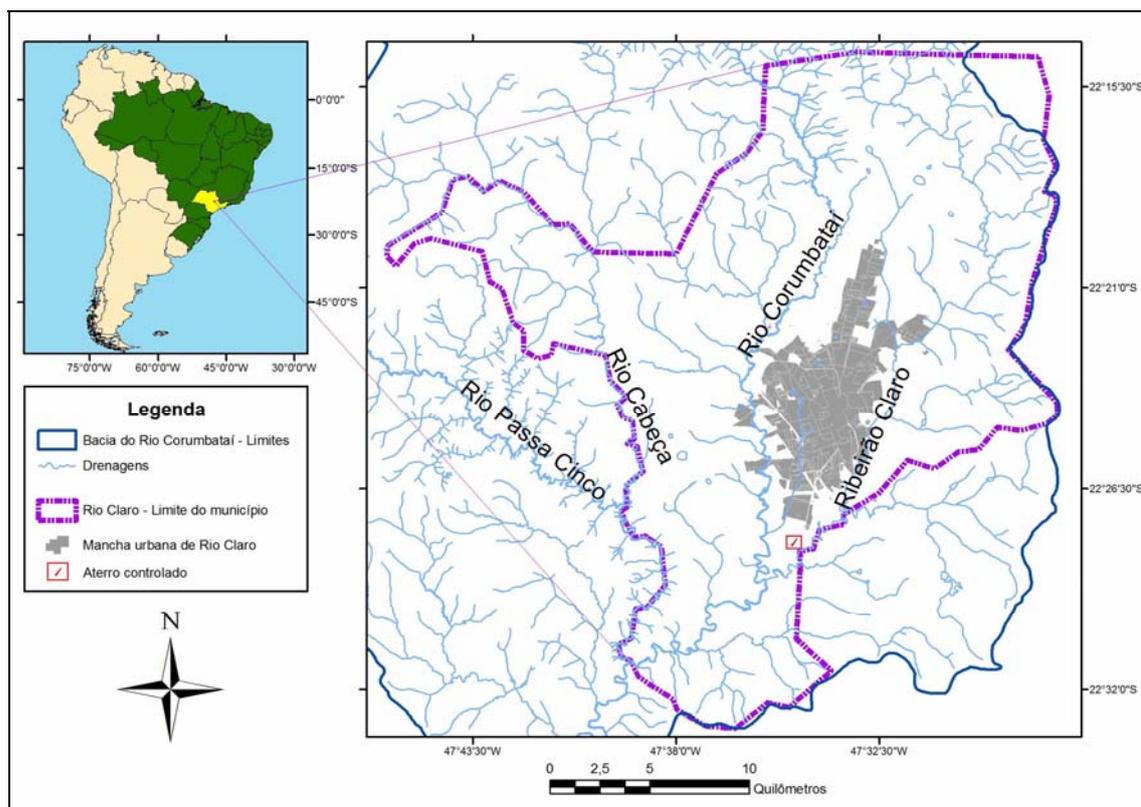


Figura 3.5: Mapa hidrológico do município de Rio Claro (SP), destacando a posição do aterro controlado (modificado de CEAPLA, 2007; IBGE, 2008).

3.5 Aspectos Climáticos

O município de Rio Claro (SP) situa-se entre as latitudes 22°14'S e 22°35'S. Portanto, o clima pode ser considerado tropical, alternadamente seco e úmido – duas estações bem definidas. As temperaturas médias anuais situam-se entre 18,1°C e 20,9°C (ZAINÉ, 1994, p.4). Segundo a classificação proposta por Köppen (1918 *apud* AYOADE, 2004, p.232), o clima no município pode ser designado como Cwa (Tabela 3.1), onde:

C	Clima temperado chuvoso e quente: o mês mais frio tem temperatura média até 18°C e o mês mais moderadamente quente tem temperatura média maior que 10°C.
w	Seca no inverno, chuva de verão.
a	Verão quente, com o mês mais quente apresentando temperatura média maior que 22°C.

Tabela 3.1: Classificação do clima do município de Rio Claro (SP).

Devido à sua localização, o município é submetido à forte radiação solar, criando melhores condições à evaporação e contribuindo, em parte, para a manutenção do nível de umidade característico local. Durante o verão, quando há um decréscimo geral da pressão

motivado pelo forte aquecimento do interior do continente, ventos de W a NW, trazidos por linhas de instabilidade tropical, podem ocasionar chuvas e trovoadas, por vezes granizo e ventos moderados a fortes com rajadas que atingem 60 a 90km/h. No inverno, a circulação atmosférica e a topografia, aliadas à radiação solar, produzem fenômenos climáticos como geadas e nevoeiros (COTTAS, 1983, p.99; NIMER, 1989, p.273).

Quase todo o interior do território paulista apresenta índices de 1.000 a 1.250mm, porém, no município de Rio Claro (SP) esse índice pode superar os 1.500mm.

O período chuvoso compreende de outubro a março, com 55 a 60 dias de chuva, onde se verificam mais de 80% das precipitações anuais e média de 1.200mm. O máximo pluviométrico acontece nos meses de dezembro ou janeiro.

O período de seca ocorre de abril a setembro, com apenas 15 a 20 dias de chuva, sendo que a precipitação média varia de 180 a 200mm (ZAINÉ, 1994, p.4). O mínimo pluviométrico ocorre nos meses de junho ou julho.

Capítulo 4 – Metodologia

4.1 Aquisição dos dados de eletrorresistividade em campo

Os dados de resistividade elétrica foram obtidos em duas etapas de campo: a primeira ocorreu nos meses de abril e maio de 2008, referente ao período pós-chuvas (Figura 4.1), e a segunda etapa, nos meses de setembro e outubro do mesmo ano, época que corresponde ao período de estiagem. A realização dessas etapas foi programada de modo a se obter condições climáticas semelhantes às existentes quando Moura (2002) realizou seus ensaios de campo nos anos de 1999 e 2000, principal referência dessa dissertação.

Assim como as condições climáticas semelhantes, procurou-se desenvolver os ensaios geofísicos aproximadamente nos mesmos locais em que foram realizados anos antes pelo autor supra citado, haja visto que a idéia central do presente trabalho de pesquisa é determinar possíveis alterações nos valores de resistividade do subsolo do aterro controlado mediante comparação de resultados de ensaios geofísicos semelhantes.

Desse modo, na primeira etapa, foram executadas duas seções de Imageamento Elétrico, denominados Linha 1-2 e Linha 4-2, os quais correspondem aos ensaios CEIP(1)-2 e CEIP(4)-2 apresentados na obra de Moura (2002).

Para o primeiro levantamento utilizou-se o resistivímetro de fabricação sueca ABEM TERRAMETER SAS4000. Esse aparelho abriga em uma mesma unidade os circuitos do emissor de corrente e do receptor de potencial, e pode realizar medidas de resistividade elétrica, polarização induzida e potencial espontâneo, em 4 canais simultaneamente (Figura 4.2). O máximo valor de corrente que pode injetar no solo é de 1A e pode ler diferenças de potenciais de até 400V. A potência máxima de saída é de 100W.



Figura 4.1: Coleta de dados da Linha 4-2 com o resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.



Figura 4.2: Resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.

Este equipamento também conta com um microprocessador interno que realiza cálculos, fornecendo, entre outros parâmetros, o valor da resistência elétrica mediante os valores de corrente injetada e potencial medido. Além disso, pode armazenar na memória dados dos ensaios geofísicos realizados, descarregando-os para um computador do tipo PC através de um cabo de dados.

Diferentemente do que foi realizado por Moura (2002), não se coletou dados de Polarização Induzida (IP) em momento algum. Ensaio preliminares na área do aterro revelaram diversas dificuldades na obtenção desse parâmetro e, por isso, optou-se por coletar somente dados de eletroresistividade.

Na segunda etapa, foram executadas 9 Sondagens Elétricas Verticais – sendo 7 no entorno e 2 dentro do aterro controlado –, denominadas SEV 01 a SEV 09, e 6 Imageamentos Elétricos, denominados Linha 1 a Linha 6. Tais ensaios correspondem aos realizados por Moura (2002) conforme a Tabela 4.1.

Moura (2002)	Bortolin (2009)	Moura (2002)	Bortolin (2009)
CEIP(1)	Linha 1	SEV(1)	SEV 01
CEIP(1a)	Não realizado	SEV(3)	SEV 02
CEIP(2)	Linha 2	Sem correspondência	SEV 03
CEIP(3)	Linha 3	SEV(4)	SEV 04
CEIP(4)	Linha 4	Sem correspondência	SEV 05
CEIP(5)	Não realizado	SEV(6)	SEV 06
CEIP(6)	Linha 5	Sem correspondência	SEV 07
CEIP(7)	Linha 6	Sem correspondência	SEV 08
		Sem correspondência	SEV 09

Tabela 4.1: Correspondências entre os ensaios de Moura (2002) e Bortolin (2009).

Os ensaios CEIP(1a) e CEIP(5) não foram realizados pois julgou-se não ser necessária a execução do primeiro e pela impossibilidade de execução do segundo, devido à nova geometria do aterro controlado. As SEV foram distribuídas de modo a estabelecer uma malha otimizada, de espaçamento aproximadamente regular, sem a preocupação demasiada de coincidi-las com os ensaios anteriores, pois serviram para a elaboração do mapa potenciométrico da área.

O equipamento utilizado nessa etapa foi o resistivímetro de fabricação norte-americana BISON 2390 (Figura 4.3), composto de um módulo de emissão de corrente (BISON 2390 – T 50) e de um módulo de medição do potencial (BISON 2390 – R).

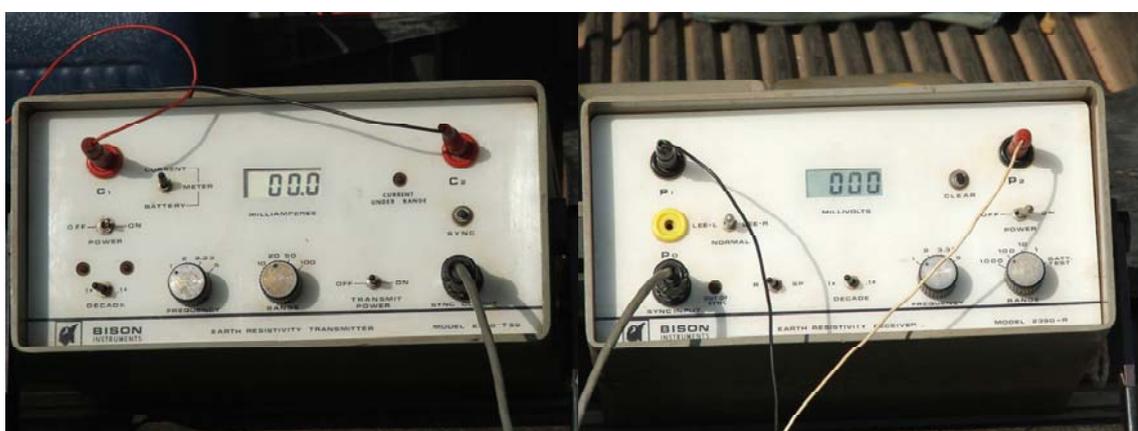


Figura 4.3: Módulo de emissão de corrente BISON 2390 – T 50 (à esquerda) e módulo de medição do potencial BISON 2390 – R (à direita).

O módulo de emissão (ou transmissor) possui 50W de potência e pode injetar no solo correntes de até 100mA e 500V. Já o módulo de medição (ou receptor) pode ler potenciais de até 1999mV. Esse aparelho possui somente um canal de leitura e pode realizar medidas de resistividade elétrica e potencial espontâneo.

Os dados das SEV obtidos em campo (Figura 4.4, à esquerda) foram anotados em tabelas e plotados num gráfico *bilog*, gerando o que se chama de “curva de campo”. Posteriormente, foram inseridos em um *software* específico para efetuar o processamento. Também os dados dos IE foram, em campo (Figura 4.4, à direita), anotados em tabelas e inseridos em um *software* específico para o processamento de dados obtidos por meio dessa técnica.



Figura 4.4: Coleta de dados com o resistímetro BISON 2390. À esquerda: SEV 08. À direita: Linha 3.

4.2 Processamento dos dados

4.2.1 Sondagens Elétricas Verticais

Os dados das SEV foram processados no *software* Interpex IX1D, versão 2.17, da Interpex Limited (2008), com o qual é possível aplicar os métodos direto e inverso de processamento.

Inicialmente, as curvas passaram por um processo de suavização das seções paralelas, geradas com o procedimento da “embreagem”, onde os valores de resistividade aparente da curva final são equivalentes aos de um ensaio realizado completamente com $MN/2=0,3m$.

No método direto, inseriu-se os dados de campo e gerou-se uma curva teórica e um modelo geoeletrico inicial, esse último baseado nos resultados de Moura (2002). Esse modelo

foi ajustado modificando-se os parâmetros resistividade aparente e espessura de cada camada geoeétrica, de acordo com informações geológicas levantadas na literatura consultada e em observações de campo. Os ajustes foram feitos até resultarem numa curva satisfatória.

Posteriormente, foi empregado o método inverso para refinar o modelo geoeétrico, buscando a convergência da curva teórica, gerada pelo *software*, com os dados de campo. O controle da convergência foi feito executando uma iteração por vez, ao invés de deixar o programa fazer o ajuste automático, pois, desse modo, garante-se maior fidelidade da curva teórica (ajustada) em relação à curva de campo. O erro de ajuste desse processo foi mantido abaixo de 10%.

Em função do caráter indireto da investigação do subsolo a partir da superfície do terreno, o erro na determinação dos parâmetros geoeétricos pode variar entre 10% e 15%, em condições normais de campo (BRAGA, 1997, p. 113).

4.2.2 Mapa Potenciométrico

Após a interpretação das curvas de campo de cada SEV, gerou-se o mapa potenciométrico referente à área e ao entorno do aterro controlado de Rio Claro (SP). Mapas potenciométricos são importantes ferramentas para estudos hidrogeológicos, pois fornecem informações essenciais sobre cotas potenciométricas e direções de fluxos d'água (OLIVA, 2002, p.56).

A elaboração desse mapa foi feita utilizando o *software* Surfer, versão 8.01 (GOLDEN SOFTWARE, 2002). Foram testados os vários métodos de interpolação de dados disponíveis no *software* e, após a análise dos resultados obtidos com cada um deles, optou-se por empregar o método *Natural Neighbor*, pois, para locais onde não existem dados coletados, não são gerados dados interpolados.

Natural Neighbor é um método de interpolação espacial, desenvolvido por Robin Sibson (1981). O método é baseado no diagrama Voronoi de um conjunto discreto de pontos geográficos. A equação que o descreve, em 2D, é:

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, y_i) \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde $G(x,y)$ é o valor interpolado para o ponto (x,y) , n é o número de pontos vizinhos usados na interpolação, w_i é o peso atribuído, determinado por triangulação Delaunay, e $f(x_i,y_i)$ é o valor observado no ponto (x_i,y_i) .

4.2.3 Imageamentos Elétricos

Para processar os dados dos IE, tanto os de Moura (2002) quanto os recentes, foi empregado o *software* Res2Dinv, versão 3.4, da Geotomo Software (2002). Os dados anteriores foram reprocessados para que pudessem ser devidamente comparados aos dados atuais.

Os arquivos de cada linha de IE foram, primeiramente, gerados no Microsoft Excel 2003 (MICROSOFT CORPORATION, 2003), com a extensão **.xls**, pois é um *software* que apresenta uma interface mais simples e intuitiva. A seguir, utilizou-se o *software* Surfer, versão 8.01 (GOLDEN SOFTWARE, 2002), para converter cada arquivo **.xls** em um arquivo **.dat**. Desse modo, os dados puderam ser lidos e trabalhados no Res2Dinv.

Para gerar as seções de resistividade aparente foi utilizada o processo de inversão com o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) – ou *Least-squares Method* – com 5 iterações. Foram realizados vários testes, alterando-se os parâmetros do método de inversão, com o objetivo de se obter pseudo-seções mais condizentes possíveis com o meio físico investigado. Entretanto, os resultados obtidos não se mostraram satisfatórios e, então, optou-se pelos parâmetros *default*.

As cores e os valores da escala de resistividade aparente foram escolhidos de modo a ressaltar as zonas de contaminação em subsolo, sendo que os extremos da escala (máximo e mínimo) foram determinados pela análise conjunta de todas as seções geradas com os dados de 1999, 2000 e 2008.

A Linha 6 foi tomada como referência, onde adotou-se o mínimo valor de resistividade aparente dessa seção como limite da contaminação: todo e qualquer valor menor que $140\Omega.m$, que viesse a ser encontrado nas seções, indicaria provável contaminação.

4.2.4 Mapas de resistividade aparente

Esses mapas são produtos derivados dos dados de IE e permitem determinar a variação da resistividade aparente conforme a localização (eixos X e Y) e o nível de investigação (eixo Z).

Após processados no *software* Res2dinv, versão 3.4 (*op. cit.*), os dados de resistividade aparente de cada sessão foram exportados para o *software* Surfer, versão 8.01 (*op. cit.*). Esses dados foram, então, classificados por nível de investigação e associados com a posição do eletrodo correspondente. A posição de cada eletrodo foi coletada com o auxílio de um GPS diferencial da marca Trimble, com antena e receptor modelo Navigation Pathfinder Pro XR 12 e coletor modelo Recon (Figuras 4.5 e 4.6).

Por fim, utilizou-se o método de interpolação *Nearest Neighbor*, descrito no item 4.2.2, para gerar os mapas de resistividade aparente correspondentes a cada um dos cinco níveis de investigação.



Figura 4.5: GPS diferencial Trimble Navigation Pathfinder Pro XR 12 (mochila com receptor e antena, à esquerda; antena, ao centro e coletor Recon, à direita).



Figura 4.6: Coleta de dados com o GPS diferencial no aterro controlado de Rio Claro (SP).

4.3 Modelo Digital do Terreno em 3D (MDT)

Chama-se de Modelo Digital de Terreno (MDT) uma representação matemática contínua da distribuição espacial das variações de altitude em uma determinada área. Um MDT pode ser construído a partir das curvas de nível e/ou pontos altimétricos.

Em um MDT, as gradações topográficas do relevo são perceptíveis através de tons de cinza, onde o preto corresponde a altimetria zero (nível do mar) e as tonalidades mais claras indicam, progressivamente, as áreas mais elevadas. Entretanto, pode-se atribuir cores ao modelo, de modo a ressaltar certos detalhes da área.

Quando confeccionados em duas dimensões, o produto final é um mapa onde as gradações topográficas do relevo são determinadas por linhas fechadas. Porém, quando confeccionados em três dimensões, obtém-se uma figura tridimensional, um dos objetivos da presente obra.

Para tanto, coletou-se uma série de dados de posição e altitude com o GPS diferencial da marca Trimble, com antena e receptor modelo Navigation Pathfinder Pro XR 12 e coletor modelo Recon (Figuras 4.5 e 4.6). Os dados foram corrigidos usando o *software* GPS Pathfinder Office, versão 4.00, da Trimble Navigation Limited, através da antena da Santiago & Cintra do *campus* da UNESP de Rio Claro (SP) e, após a correção, a precisão no eixo Z ficou entre 0,25m e 0,60m.

Posteriormente, essa série de dados foi inserida no *software* Surfer, versão 8.01, e por meio da interpolação de dados, com o método *Natural Neighbor*, obteve-se o modelo digital da área de estudos em 3D.

Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Entre os meses de Abril e Outubro de 2008 realizou-se 17 ensaios geofísicos na área do aterro controlado de Rio Claro (SP), aplicando-se o Método da Eletroresistividade, técnicas da SEV e do IE, conforme descrito na Tabela 5.1 e ilustrado pela Figura 5.1.

Ensaio	Arranjo	AB/2 máximo (m)	Localização (UTM)				
			E-W	N-S			
SEV 01	Schlumberger	150	234652	7513288			
SEV 02			234697	7513402			
SEV 03			234770	7513572			
SEV 04			234573	7513474			
SEV 05			234622	7513645			
SEV 06			234506	7513353			
SEV 07		234434	7513223				
SEV 08		100	234607	7513465			
SEV 09			234563	7513384			
Ensaio	Arranjo	Extensão (m)	Espaçamento (m)	Localização (UTM)			
				Início		Término	
				E-W	N-S	E-W	N-S
Linha 1	Dipolo-Dipolo	320	10	234724	7513598	234602	7513306
Linha 1-2*							
Linha 2		125	5	234437	7513224	234521	7513182
Linha 3		380	10	234682	7513618	234523	7513284
Linha 4		90	5	234610	7513575	234688	7513533
Linha 4-2*							
Linha 5		420	10	234630	7513578	234430	7513214
Linha 6		100		234821	7513720	234861	7513811

*Linhas repetidas em períodos climáticos diferentes

Tabela 5.1: Informações dos ensaios geofísicos executados no aterro controlado de Rio Claro (SP).

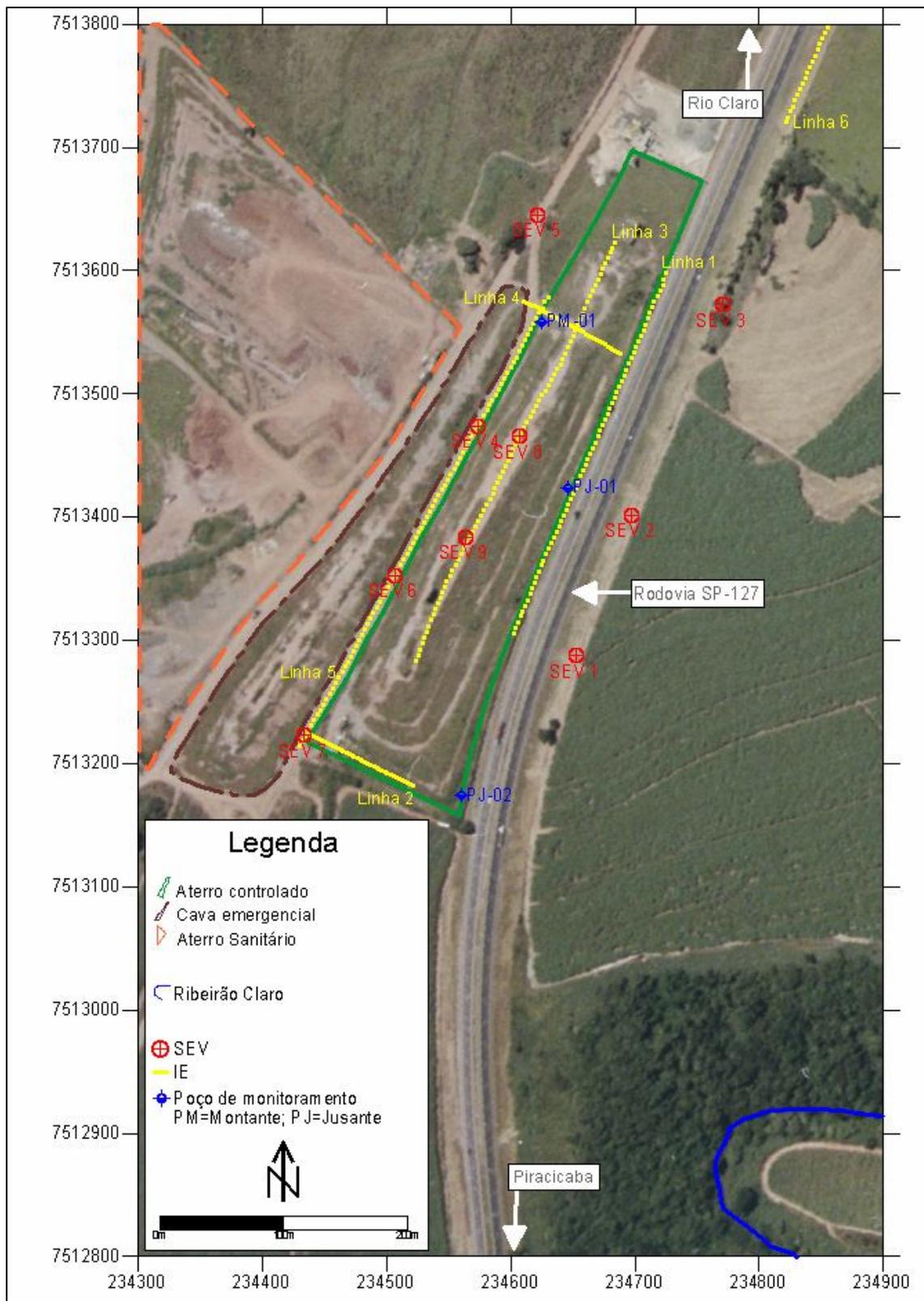


Figura 5.1: Localização dos ensaios geofísicos realizados no aterro controlado de Rio Claro (SP) (modificado de BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S.A.,2006).

5.1 Interpretações das Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

Os dados obtidos em campo, na execução de cada SEV, permitiram gerar curvas, uma para cada ensaio. A Figura 5.2 exibe as nove curvas geradas, onde os caracteres (\square) simbolizam os dados de campo e as linhas contínuas representam (-) as curvas de melhor ajuste, após o processamento.

Essas curvas, quando comparadas entre si, apresentam características em comum, tais como: local de realização do ensaio, comportamento da curva e faixa de variação da resistividade aparente.

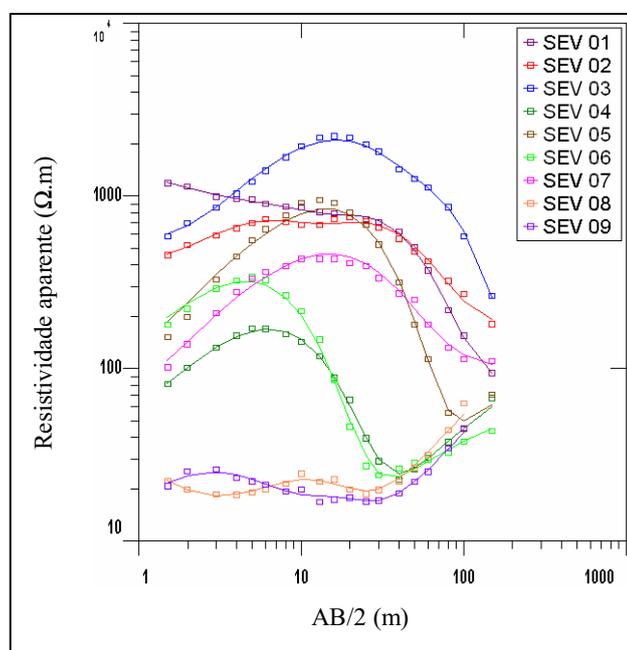


Figura 5.2: As nove curvas de campo agrupadas.

A interpretação qualitativa dos dados de SEV constou da análise e posterior agrupamento das curvas de resistividade aparente segundo o local de realização de cada ensaio. Desse modo, dividiu-se as SEV em dois grupos principais:

- **Grupo 1:** ensaios realizados fora da área do aterro (SEV 01 a SEV 07) (Figura 5.3)
- **Grupo 2:** ensaios realizados dentro da área do aterro (SEV 08 e SEV 09) (Figura 5.6)

5.1.1 Grupo 1: ensaios realizados fora da área do aterro

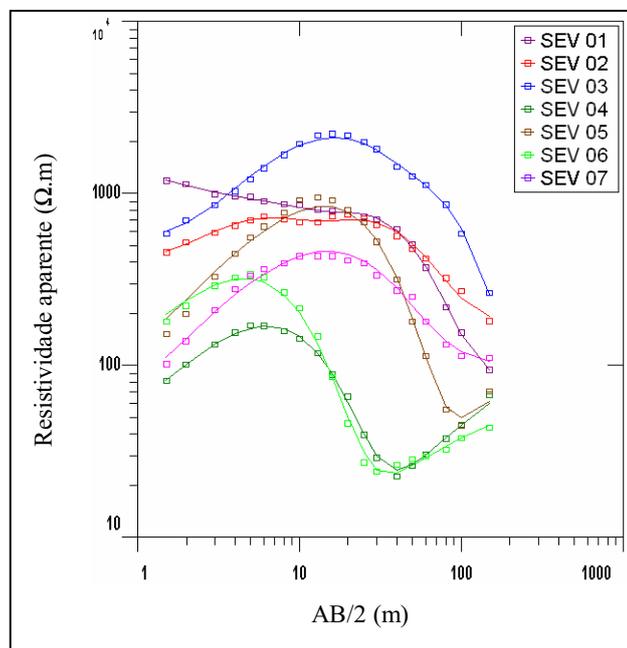


Figura 5.3: Curvas de campo das SEV do Grupo 1.

As SEV constantes desse grupo possibilitaram, principalmente, a caracterização de várias camadas do subsolo da área externa do aterro, a determinação da profundidade do nível d'água e, posteriormente, a elaboração do mapa potenciométrico. As curvas desse grupo foram sub-divididas em outros dois grupos, de acordo com o padrão da curva e com a faixa de variação da resistividade aparente, a saber:

- **Sub-grupo 1-A:** ensaios realizados fora do aterro – Direção Leste
- **Sub-grupo 1-B:** ensaios realizados fora do aterro – Direção Oeste

5.1.1.1 Sub-grupo 1-A: ensaios realizados fora do aterro – Direção Leste

As três SEV desse sub-grupo foram executadas em local exterior à área do aterro, a cerca de 30m de distância do limite leste e rente ao canal (Figura 5.1).

Analisando a Figura 5.4, verifica-se que as curvas desse sub-grupo apresentam como características comuns o ramo final descendente, 6 camadas geolétricas e valores mínimos de resistividade aparente dos níveis geolétricos associados à Fm. Rio Claro acima de 140Ω.m (com exceção da SEV 03, mas que, por tratar-se de um nível argiloso, é aceitável), indicando

provável não-contaminação do subsolo, já que foram realizadas em local distante da cava de resíduos. Os resultados aqui obtidos corroboram os resultados de Moura (2002, p.87).

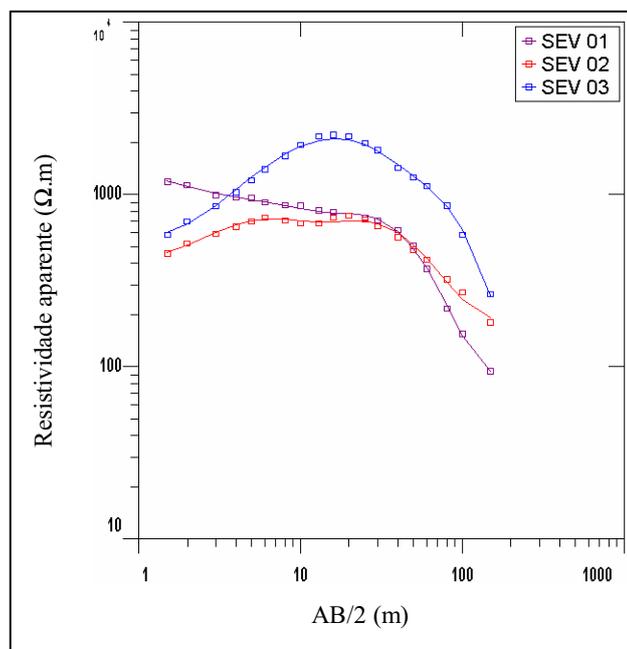


Figura 5.4: Curvas de campo das SEV do Sub-grupo 1-A.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam um resumo da interpretação quantitativa, que estabeleceu os valores de resistividade, as espessuras dos níveis geoeletricos e as faixas de variações dos valores desse sub-grupo de SEV.

Ensaio	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Nível 4		Nível 5		Nível 6	
	ρ_1 ($\Omega.m$)	E_1 (m)	ρ_2 ($\Omega.m$)	E_2 (m)	ρ_3 ($\Omega.m$)	E_3 (m)	ρ_4 ($\Omega.m$)	E_4 (m)	ρ_5 ($\Omega.m$)	E_5 (m)	ρ_6 ($\Omega.m$)	E_6 (m)
SEV 01	1410	0,70	925	5,60	197	1,70	3521	4,50	227	4,00	81	-
SEV 02	403	1,30	1594	1,80	175	1,70	1424	10,00	270	5,30	172	-
SEV 03	536	1,80	10400	3,00	108	1,90	5446	8,00	211	9,20	36	-

Tabela 5.2: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Sub-grupo 1-A.

Nível geoeletrico	Interpretação	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)
1	Solo residual arenoso e seco	$403 \leq \rho_1 \leq 1410$	$0,70 \leq E_1 \leq 1,80$
2	Sedimentos predominantemente arenosos secos	$925 \leq \rho_2 \leq 1594$ 10400^*	$1,80 \leq E_2 \leq 5,60$
3	Sedimentos predominantemente arenosos com provável intercalação de argilito	$108 \leq \rho_3 \leq 197$	$1,70 \leq E_3 \leq 1,90$
4	Sedimentos predominantemente arenosos secos	$1424 \leq \rho_4 \leq 5446$	$4,50 \leq E_4 \leq 10,00$
5	Sedimentos predominantemente arenosos saturados (N.A.)	$211 \leq \rho_5 \leq 270$	$4,00 \leq E_5 \leq 9,20$
6	Sedimentos predominantemente silto-argilosos	36 $81^{**} \leq \rho_6 \leq 172^{**}$	-

*com prováveis estruturas conglomeráticas
** possivelmente fraturados

Tabela 5.3: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Sub-grupo 1-A.

Os cinco primeiros níveis geoeletricos, descritos na Tabela 5.3, podem ser associados à Formação Rio Claro, pois apresentam valores de resistividade característicos de sedimentos predominantemente arenosos e com ocorrência de níveis de sedimentos argilosos intercalados ao contexto geológico, conforme descrito na literatura (ZAINE, 1994, p.41). A espessura total desses cinco níveis geoeletricos também está de acordo com a literatura, que relata média de 25m a 30m, e máximo de 40m, para a Formação Rio Claro.

O primeiro nível geoeletrico condiz com o solo arenoso, seco e pouco espesso do canal, refletindo não somente a formação geológica que o originou, mas, também, as condições climáticas do período de estiagem em que foram realizados os ensaios.

O segundo nível geoeletrico das SEV 01 e 02 pode estar associado a sedimentos arenosos medianamente consolidados e secos da Formação Rio Claro e, por isso, apresentam valores de resistividade máxima próximos a $1600\Omega.m$. O segundo nível da SEV 03 apresenta valor de resistividade cerca de 6,5 vezes maior que o máximo valor determinado através das outras SEV desse sub-grupo, indicando tratar-se da existência de possíveis estruturas conglomeráticas (cascalho), que tendem a elevar bruscamente a resistividade local (COTTAS, 1983, p.114; TANDEL, 1998, p.34; ZAINE, 1994, p.41;).

No terceiro nível percebe-se significativa queda dos valores de resistividade, o que pode indicar a existência de uma camada de sedimentos argilosos intercalada aos sedimentos arenosos do contexto geológico, assim como descrito por Cottas (1983, p.114), Tandel (1998, p.34) e Zaine (1994, p.41), e defendido por Moura (2002, p.92).

O quarto nível geoeétrico exibe valores de resistividade que variam, aproximadamente, entre $1400\Omega.m$ a $5500\Omega.m$, indicando, possivelmente, a existêcia de sedimentos predominantemente arenosos e secos da zona de retenção da Formação Rio Claro. Esses sedimentos podem ser relacionados ao segundo nível geoeétrico, como sendo uma “continuação” desse nível após a camada de argilitos.

No quinto nível geoeétrico têm-se, novamente, a existêcia de baixos valores de resistividade relativamente aos valores das camadas adjacentes. Devido ao contexto local, esses valores podem ser associados a sedimentos predominantemente arenosos umedecidos por ação do nível d'água subterrâneo. Inicia-se, entre 12m e 15m de profundidade, aproximadamente, a zona saturada.

O sexto e último nível geoeétrico desse sub-grupo apresenta baixos valores de resistividade (menores ou iguais a $172\Omega.m$), indicando tratar-se possivelmente de sedimentos predominantemente silto-argilosos da Formação Corumbataí, variando de não-fraturados na SEV 03, onde a cota topográfica é maior, para fraturados nas SEV 01 e 02, localizados em cotas topográficas inferiores. Esta interpretação é baseada em Braga (1997, p.139).

Essa variação poderia indicar que o nível de fraturas da Formação Corumbataí aumenta conforme a cota topográfica diminui, pelo fato de que a espessura da Formação Rio Claro (sobreposta à Fm. Corumbataí) decresce acompanhando, aproximadamente, a topografia e facilitando, assim, o contato de agentes erosivos (como a água) com os sedimentos silto-argilosos. Entretanto, seria necessária uma investigação mais detalhada para averiguar tal afirmação.

5.1.1.2 Sub-grupo 1-B: ensaios realizados fora do aterro – Direção Oeste

Os ensaios do Sub-grupo 1-B foram realizados em uma estrada não pavimentada, localizada entre o aterro controlado e a cava emergencial, conforme pode ser observado na Figura 5.1.

A Figura 5.5 apresenta as curvas do Sub-grupo 1-B. São características comuns: o ramo final ascendente (com exceção da SEV 07), 5 ou 6 camadas geoeétricas e valores mínimos de resistividade aparente dos níveis geoeétricos associados à Fm. Rio Claro abaixo $5\Omega.m$, indicando provável contaminação do subsolo, já que foram realizadas em local adjacente à cava de resíduos. Também os resultados aqui apresentados corroboram os resultados de Moura (2002, p.87).

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam um resumo da interpretação quantitativa, que estabeleceu os valores de resistividade, as espessuras dos níveis geoeétricos e as faixas de variações dos valores desse sub-grupo de SEV.

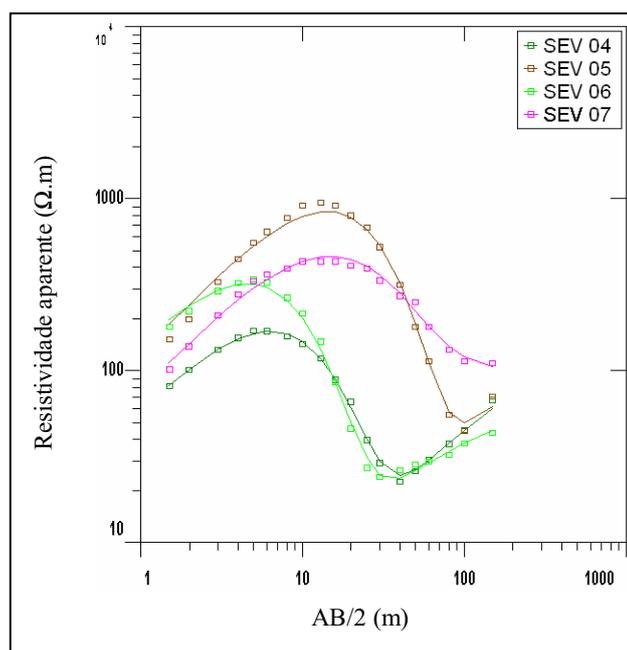


Figura 5.5: Curvas de campo das SEV do Sub-grupo 1-B.

Ensaio	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Nível 4		Nível 5		Nível 6	
	ρ_1 ($\Omega.m$)	E_1 (m)	ρ_2 ($\Omega.m$)	E_2 (m)	ρ_3 ($\Omega.m$)	E_3 (m)	ρ_4 ($\Omega.m$)	E_4 (m)	ρ_5 ($\Omega.m$)	E_5 (m)	ρ_6 ($\Omega.m$)	E_6 (m)
SEV 04	27	0,40	-	-	400	2,90	24	7,00	9	12,50	165	-
SEV 05	47	0,40	11555	1,20	-	-	24	9,30	2	2,10	192	-
SEV 06	65	0,40	783	1,80	140	1,70	28	5,80	12	12,70	62	-
SEV 07	22	0,30	3719	1,00	437	7,90	-	-	178	12,00	99	-

Tabela 5.4: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Sub-grupo 1-B.

Nível geoeletrico	Interpretação	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)
1	Solo residual arenoso com influência dos resíduos	$22 \leq \rho_1 \leq 65$	$0,30 \leq E_1 \leq 0,40$
2	Sedimentos predominantemente arenosos	$783 \leq \rho_2 \leq 3719$ 11555*	$1,00 \leq E_2 \leq 1,80$
3	Sedimentos predominantemente arenosos com possível influência dos resíduos	$140 \leq \rho_3 \leq 437$	$1,70 \leq E_3 \leq 7,90$
4	Sedimentos predominantemente arenosos com chorume	$24 \leq \rho_4 \leq 28$	$5,80 \leq E_4 \leq 9,30$
5	Sedimentos predominantemente arenosos saturados com chorume (N.A.)	$2 \leq \rho_5 \leq 12$ 178**	$2,10 \leq E_5 \leq 12,70$
6	Sedimentos predominantemente silto-argilosos a silto-arenosos ⁺	$62^{\#} \leq \rho_6 \leq 192^{\#+}$	-

* com prováveis estruturas conglomeráticas

** não contaminados ou com baixo nível de contaminação

[#] possivelmente fraturados

Tabela 5.5: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Sub-grupo 1-B.

Assim como no Sub-Grupo 1-A, os valores de resistividade dos cinco primeiros níveis geoeletricos do Sub-Grupo 1-B, característicos de sedimentos predominantemente arenosos, podem ser associados à Formação Rio Claro; porém, somente o segundo nível não apresenta indícios de contaminação por choro-me.

Novamente, a espessura total desses cinco níveis geoeletricos, os quais representam a Formação Rio Claro, encontra-se concordante com a literatura, que relata média de 25m a 30m, e máximo de 40m.

O primeiro nível geoeletrico apresenta valores relativamente baixos para sedimentos arenosos, o que pode ser considerado um indicativo de provável contaminação por choro-me proveniente das cavas de resíduos.

O segundo nível, com resistividade acima de $780\Omega.m$, pode estar associado a sedimentos arenosos da Formação Rio Claro, compactados por ação do tráfego de veículos pesados no local de realização dos ensaios ou, no caso da SEV 05, pode indicar a possível ocorrência de um nível conglomerático (COTTAS, 1983, p.114; TANDEL, 1998, p.34; ZAINÉ, 1994, p.41), que elevaria bruscamente a resistividade da camada, assim como descrito para a SEV 03 do Sub-grupo 1-A.

O terceiro nível geoeletrico apresenta-se com resistividade intermediária, relativamente aos extremos desse sub-grupo. Valores entre $140\Omega.m$ e $437\Omega.m$ podem ser encontrados na Formação Rio Claro em situações de não-contaminação. Entretanto, devido ao contexto, não se pode afirmar com certeza a inexistência de contaminação somente pelos resultados das SEV, devendo ser necessária a realização de análises químicas para a confirmação, ou não, de tal hipótese.

No quarto nível geoeletrico, valores próximos a $25\Omega.m$ são discordantes se associados a sedimentos predominantemente arenosos naturais, isto é, sem contaminação por choro-me. Portanto, esses baixos valores podem indicar a contaminação do subsolo por choro-me e o início da influência da zona saturada (zona de capilaridade).

Os valores mais baixos de resistividade, relativamente ao contexto do sub-grupo, são encontrados no quinto nível geoeletrico. Tais valores podem indicar a existência de sedimentos arenosos umedecidos por ação do nível d'água subterrâneo, porém, contaminados pelo choro-me proveniente das cavas de resíduos adjacentes. Somente na região da SEV 07 o nível freático aparenta não ter sido contaminado por choro-me, já que seu valor de resistividade ($178\Omega.m$) é típico de sedimentos arenosos da Formação Rio Claro localizados na zona saturada. De um modo geral, a zona saturada determinada pelos ensaios do Sub-grupo 1-B parece iniciar-se entre 9m e 11m de profundidade.

Por fim, o sexto e último nível geoeétrico desse sub-grupo está associado à Formação Corumbataí e apresenta valores mínimo e máximo de $62\Omega.m$ e $192\Omega.m$, respectivamente. Entretanto, pode-se subdividir essa faixa em dois intervalos distintos: $62\Omega.m$ a $165\Omega.m$, valores típicos de sedimentos silto-argilosos, e $192\Omega.m$, característico de sedimentos silto-arenosos, ambos possivelmente fraturados (BRAGA, 1997, p.139).

5.1.2 Grupo2: ensaios realizados dentro da área do aterro

Esse grupo apresenta somente 2 ensaios: SEV 08 e SEV 09, ambos realizados no topo da cava de resíduos. São características comuns desse grupo: o ramo final ascendente – acima de $1700\Omega.m$, indicando tratar-se da base do aterro, constituída por sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro –, 6 ou 7 camadas geoeétricas e valores de resistividade de cada nível geoeétrico entre $3\Omega.m$ e $120\Omega.m$, indicando a presença de resíduos e contaminação de material geológico por chorume. A Figura 5.6 apresenta as curvas de campo das duas SEV aqui comentadas.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam um resumo da interpretação quantitativa, que estabeleceu os valores de resistividade, as espessuras dos níveis geoeétricos e as faixas de variações dos valores desse grupo de SEV.

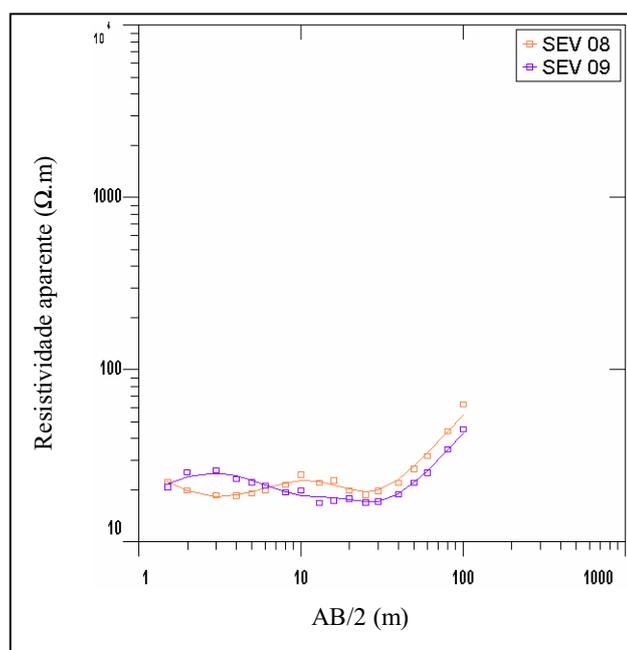


Figura 5.6: Curvas de campo das SEV do Grupo 2.

Ensaio	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Nível 4		Nível 5		Nível 6		Nível 7	
	ρ_1 ($\Omega.m$)	E_1 (m)	ρ_2 ($\Omega.m$)	E_2 (m)	ρ_3 ($\Omega.m$)	E_3 (m)	ρ_4 ($\Omega.m$)	E_4 (m)	ρ_5 ($\Omega.m$)	E_5 (m)	ρ_6 ($\Omega.m$)	E_6 (m)	ρ_7 ($\Omega.m$)	E_7 (m)
SEV 08	38	0,50	16	3,30	120	1,50	3	3,10	38	1,00	7	2,90	3253	-
SEV 09	12	0,60	-	-	78	0,60	12	3,90	106	1,40	5	10,00	1760	-

Tabela 5.6: Resistividade (ρ) e espessura (E) dos níveis geoeletricos das SEV do Grupo 2.

Nível geoeletrico	Interpretação	Resistividade ($\Omega.m$)	Espessura (m)
1	Material de cobertura do aterro (úmido?) com influência dos resíduos	$12 \leq \rho_1 \leq 38$	$0,50 \leq E_1 \leq 0,60$
2	Resíduos	$\rho_2 = 16$	$E_2 = 3,30$
3	Material de cobertura do aterro com chorume	$78 \leq \rho_3 \leq 120$	$1,50 \leq E_3 \leq 0,60$
4	Resíduos	$3 \leq \rho_4 \leq 12$	$3,10 \leq E_4 \leq 3,90$
5	Material de cobertura do aterro com chorume	$38 \leq \rho_5 \leq 106$	$1,00 \leq E_5 \leq 1,40$
6	Resíduos	$5 \leq \rho_6 \leq 7$	$2,90 \leq E_6 \leq 10,00$
7	Sedimentos predominantemente arenosos (secos?), calcário ou diabásio	$1760 \leq \rho_7 \leq 3253$	-

Tabela 5.7: Modelo geoeletrico proposto para o subsolo do Grupo 2.

O primeiro nível geoeletrico apresenta baixo valor de resistividade por tratar-se, aparentemente, de material de cobertura do aterro com influência dos resíduos e umedecido, talvez, por chorume proveniente da lagoa do sistema de recirculação de chorume, localizada próxima ao local do ensaio.

O segundo, terceiro, quarto, quinto e sexto níveis geoeletricos representam a forma de disposição de resíduos do aterro, alternando camadas de resíduos e material de cobertura contaminados por chorume.

O sétimo e último nível foi interpretado como a base do aterro, pois apresenta valores de resistividade bastante elevados, se comparados às demais camadas. Entretanto, não se pode afirmar certamente a qual litologia pertence essa camada.

Valores elevados de resistividade, como os do sétimo nível geoeletrico e no referido local, podem ser associados com a Formação Irati, constituída por calcários dolomíticos, folhelhos pirobotuminosos e siltitos com níveis conglomeráticos de quartzo e sílex. Também podem ser associados à soleira de diabásio que ocorre próxima à área do aterro. Cerca de 5km

ao sul do aterro localiza-se o distrito de Assistência, onde as empresas Partecal e Pedreira Stavias exploram, respectivamente, as rochas calcárias da Formação Irati e diabásio para brita.

Outra hipótese provável, e que parece ser a mais correta, é a interpretação de Moura (2002, p.86), que se baseia em descrições de sondagens à percussão e que associa tais valores aos sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro.

Entretanto, para que seja possível a ocorrência de valores de resistividade altos, relativamente aos outros níveis, seria necessária a existência de uma camada impermeável (manta de PAD ou argila) entre a camada de resíduos mais profunda e a base do aterro, evitando, assim, a contaminação dos sedimentos predominantemente arenosos pelo percolado e elevando o valor de resistividade do sétimo nível geoeletrico.

Apesar de relatada na literatura consultada como não existindo qualquer tipo de impermeabilização da base do aterro, ainda assim será levada em conta essa hipótese, por mostrar-se provável e tangível.

Se tal camada impermeável realmente existir, pode não ter sido detectada nos ensaios por ser pouco espessa (supressão de camadas). Num aterro controlado é pouco provável a utilização de mantas de PAD na impermeabilização da base, quando tal medida é adotada. Portanto, existe a possibilidade de ter se utilizado uma fina camada de argila como impermeabilizante, que, quando saturada, apresenta valores de resistividade semelhantes aos de resíduos. Novos ensaios no local, utilizando-se o Método do IP, poderiam confirmar essa hipótese.

5.2 Seções Geoeletricas

Com base na interpretação das SEV foi possível gerar três seções representativas dos locais de realização dos ensaios, uma para cada grupo e/ou sub-grupo descrito anteriormente. A Figura 5.7 exibe a localização das respectivas seções.

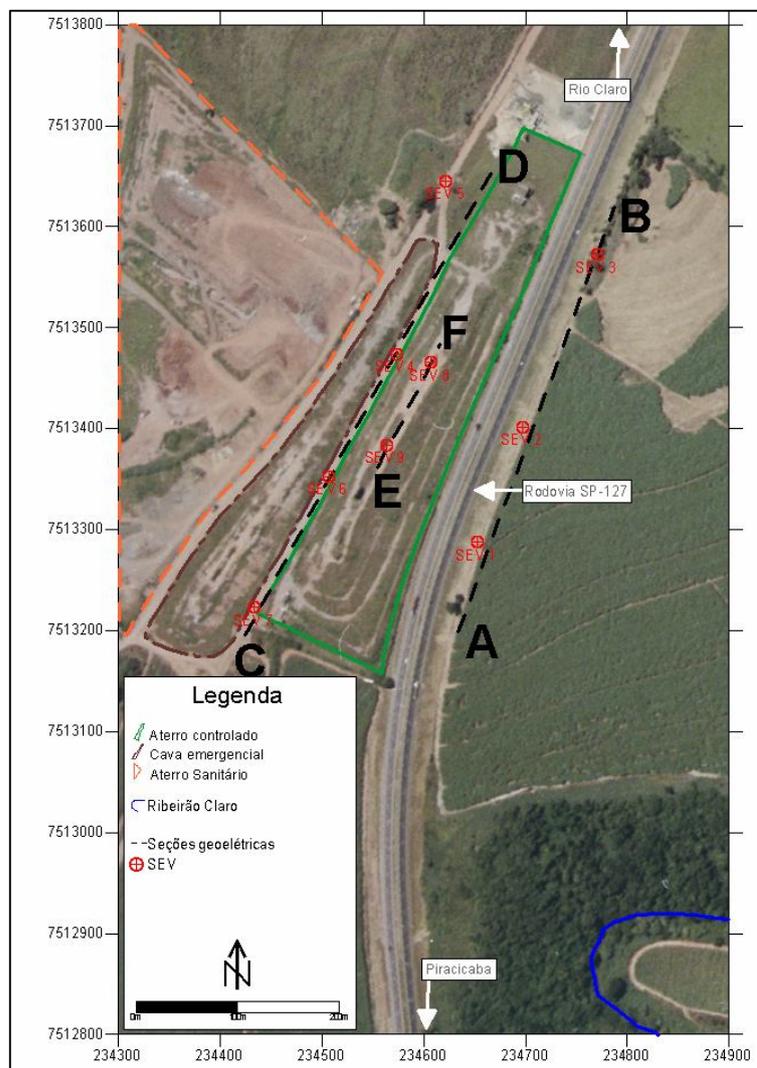


Figura 5.7: Mapa de localização das seções geotécnicas geradas com base nos dados das SEV.

5.2.1 Seção AB

Na Seção AB (Figura 5.8), gerado a partir da interpretação das SEV do Sub-grupo 1-A, é notável o relevo com queda acentuada da topografia de **B** para **A**, onde existe uma diferença de cota de cerca de 10,8m em uma distância de, aproximadamente, 285m entre a SEV 03 e a SEV 01. Tal diferença pode ser associada aos sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro que, por sua constituição, sofrem mais facilmente os efeitos de agentes erosivos. Agrega-se a isso, também, o fato de que o local de realização dos ensaios ser um canal, onde é freqüente o uso de máquinas que alteram, constantemente, a espessura e a compactação do solo residual e das camadas mais próximas à superfície.

A disposição das camadas intermediárias é relativamente planar, recebendo influência da topografia da superfície.

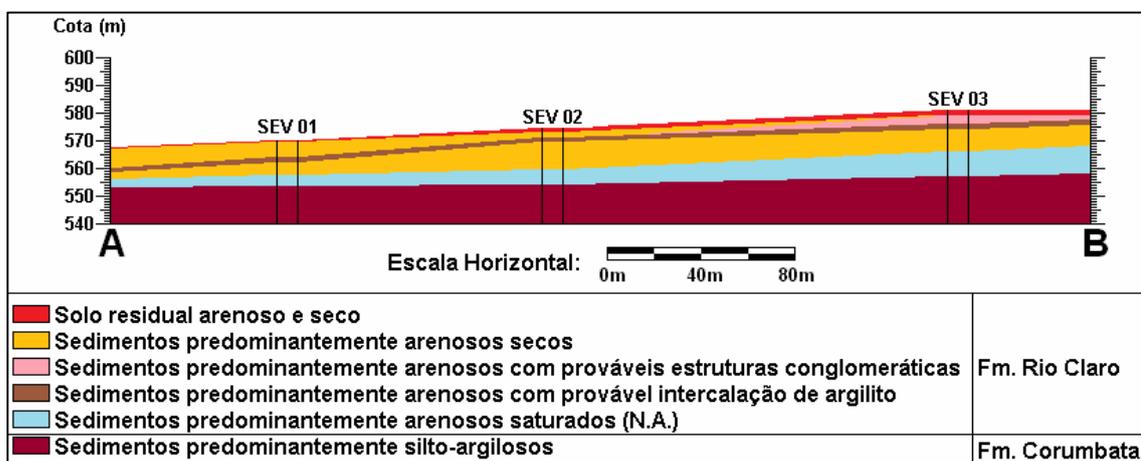


Figura 5.8: Seção AB do subsolo construída com base nas informações das SEV do Sub-grupo 1-A.

No extremo **B** da seção observa-se uma intercalação de estruturas conglomeráticas, detectada apenas na SEV 03, mas que torna a aparecer na SEV 05 do Sub-grupo 1-B. Por isso, é provável que essa camada de conglomerados estenda-se no sentido E-W.

O comportamento do nível freático acompanha, aproximadamente, o declive topográfico da superfície, adelgaçando-se em direção ao extremo **A** e ao Rio Corumbataí, cerca de 270m ao S da SEV 01.

Nesse sub-grupo, os sedimentos da Formação Corumbataí exibem pequena variação de cota entre as SEV – a maior diferença é de 3,50m, aproximadamente – indicando tratar-se de uma camada bastante plana. Detectou-se variações entre sedimentos não fraturados (SEV 03) e fraturados (SEV 01 e 02), amparados por Braga (1997, p.139), indicando uma possível correlação entre a espessura total das camadas superiores à formação e a ocorrência de fraturamento. Tal correlação indicaria que o nível de fraturas da Formação Corumbataí aumenta conforme diminui a espessura das camadas que o sobrepõe, pois, assim, é facilitado o contato de agentes erosivos (entenda-se “água”) com os sedimentos silto-argilosos da formação.

5.2.2 Seção CD

A Figura 5.9 exhibe a Seção CD, gerada a partir da interpretação das SEV do Sub-grupo 1-B. Nota-se a planicidade da superfície, onde a variação de cotas topográficas entre as SEV 05 e 07 é de, somente, 3,13m em, cerca de, 460m de distância.

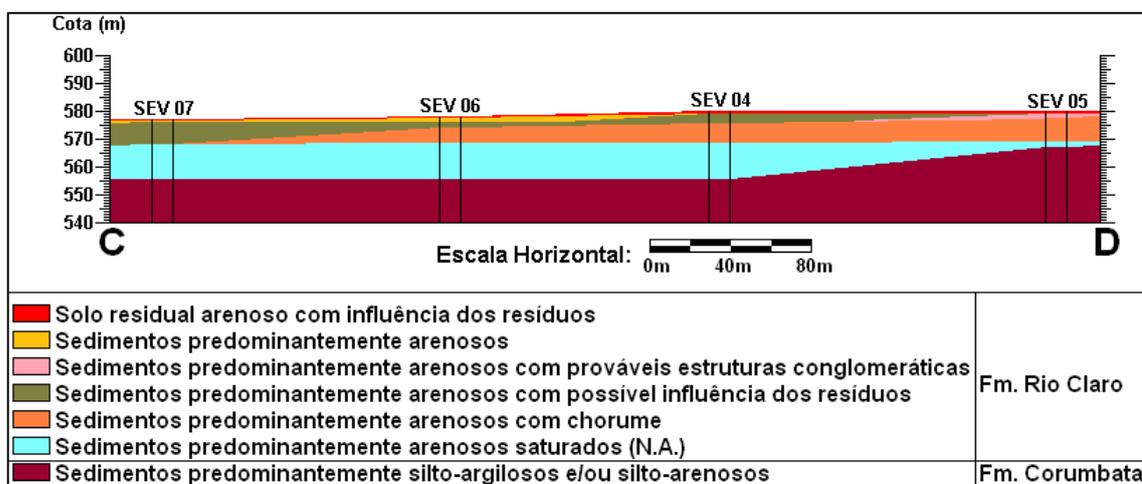


Figura 5.9: Seção CD do subsolo construída com base nas informações das SEV do Sub-grupo 1-B.

As camadas que se seguem após o primeiro nível geométrico (solo residual arenoso com influência dos resíduos) até o nível freático apresentam comportamento relativamente plano, correspondendo, de forma aproximada, à variação de cotas da superfície.

Assim como na Seção AB, aqui também pode ser observada uma intercalação de estruturas conglomeráticas, detectada somente na SEV 05, no extremo **D** da seção, reforçando a idéia de que esta camada de conglomerados deve estender-se no sentido E-W.

Novamente, nota-se que o comportamento do nível freático acompanha, de forma aproximada, o suave declive topográfico da superfície. Entretanto, a espessura da camada de sedimentos predominantemente arenosos por onde ele flui apresenta-se variável, passando de 2m na região da SEV 05 para próximo de 12m no restante da seção.

Essa variação abrupta de espessura também é percebida no último nível geométrico, associado à Formação Corumbataí. Nessa camada, os sedimentos predominantemente siltosos estão mais próximos à superfície na região da SEV 05 do que no restante da seção. A partir da SEV 04, em direção ao à SEV 07, essa camada torna-se bastante plana novamente, assim como na Seção AB.

Nesse sub-grupo também foram detectadas variações na ocorrência de fraturamento nos sedimentos. Porém, a variação mais notável refere-se à relação silte-argila/silte-areia, novamente amparada por Braga (1997, p.139). No extremo **D** da seção, na região da SEV 05, a Formação Corumbataí apresenta-se como uma ocorrência de sedimentos predominantemente silto-arenosos, enquanto que no restante do perfil, em direção ao extremo **C**, a mesma formação geológica apresenta-se como sedimentos predominantemente silto-argilosos.

5.2.3 Seção EF

A terceira e última seção geoeétrica, denominada Seção EF, é apresentada na Figura 5.10. Esta foi construída com base na interpretação das SEV do Grupo 2, executadas no topo da cava de resíduos.

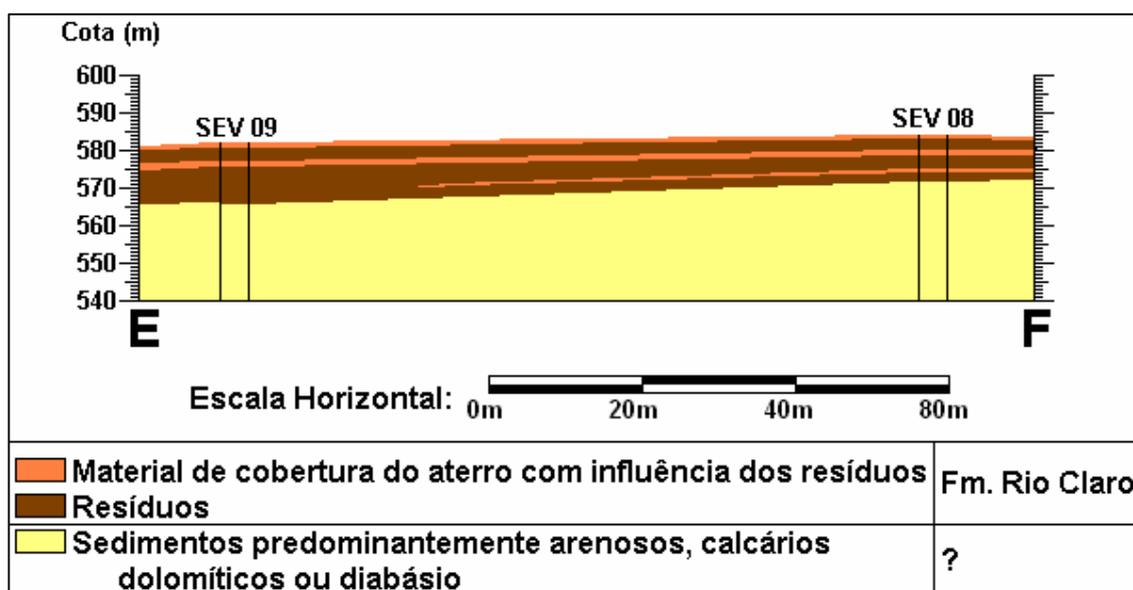


Figura 5.10: Seção EF do subsolo construída com base nas informações das SEV do Grupo 2.

A distância entre as SEV 08 e 09 é de, aproximadamente, 92m, enquanto que a variação de cota topográfica entre os dois ensaios é de, cerca de, 1,45m. Por isso, a superfície nesse trecho do topo do aterro pode ser dita como plana. Mas, a partir da SEV 08 em direção ao N, e a partir da SEV 09 em direção ao sul, a variação topográfica do topo do aterro sofre significativa variação, principalmente próximo aos extremos da cava de resíduos.

O que se pôde detectar através das SEV do Grupo 2 foi uma estrutura de sucessivas camadas de resistividades diferentes e que foram interpretadas como alternância entre resíduos e material de cobertura, este último contaminado por chorume.

A segunda e a terceira camada de resíduos, determinadas na SEV 08, parecem tornar-se uma só camada na SEV 09, com espessura equivalente à de duas camadas de resíduos mais o material de cobertura da terceira camada de resíduos, assim como explicitado na Figura 5.10.

O último nível geoeétrico apresenta elevados valores de resistividade, diferindo-o do restante do perfil. Estes valores podem ser associados a três litologias diferentes: calcários

dolomíticos da Formação Irati, soleira de diabásio e sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro, sendo que esta última aparenta ser a hipótese mais provável. Moura (2002, p.73) afirma que a base do referido aterro controlado encontra-se sobre sedimentos da Formação Rio Claro, informação levantada por meio de sondagens à percussão.

Entretanto, elevados valores de resistividade somente são encontrados nesses sedimentos quando não existe contaminação por choroume, especificamente no presente caso.

Como mencionado anteriormente, verificou-se na literatura consultada que não existe qualquer tipo de impermeabilização da base do aterro. Porém, essa afirmação não parece ser fidedigna diante dos resultados das SEV 08 e 09, pois o único modo de se evitar a contaminação dos sedimentos da base do aterro (resultando em elevados valores de resistividade) seria a existência de uma camada impermeável abaixo de todos os resíduos, que barraria o fluxo vertical do percolado.

Estudos complementares utilizando-se o Método do IP e do GPR, e sondagens mecânicas poderiam comprovar a hipótese levantada.

5.3 Mapa Potenciométrico

Com base na interpretação das curvas de campo das SEV gerou-se o mapa potenciométrico da área de estudos, apresentado na Figura 5.11. As linhas de fluxo indicam **sudeste** como a direção principal, contrariando Tandel (1998, p.124) e Moura (2002, p.99), que determinaram que o fluxo subterrâneo tem como direção principal sudoeste dentro da área e sul após os limites do aterro. Porém, é fácil perceber, observando a Figura 5.11, que o fluxo aqui determinado tende a seguir em direção ao Ribeirão Claro, que aparece no canto inferior direito do mapa. Desse modo, é mais plausível afirmar e justificar a direção principal do fluxo d'água subterrâneo para sudeste.

Oliva (2002, p.57) determinou que a superfície do lençol freático na cidade de Rio Claro (SP) (entenda-se cidade como perímetro urbano) encontra-se entre as cotas 566m e 669m, com o fluxo subterrâneo orientado das cotas maiores, ao norte do município, para as cotas menores, que ocorrem nas regiões sul e sudoeste, onde localiza-se o aterro controlado. Os valores encontrados para o nível freático na região do aterro encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela autora supracitada. Entretanto, a cota do nível d'água (N.A.) freático diminui em direção ao Rio Corumbataí, ficando abaixo do valor mínimo de 566m. Esse resultado é esperado, pois o nível freático tende a migrar para cotas menores, ao encontro de drenagens e/ou originando nascentes.

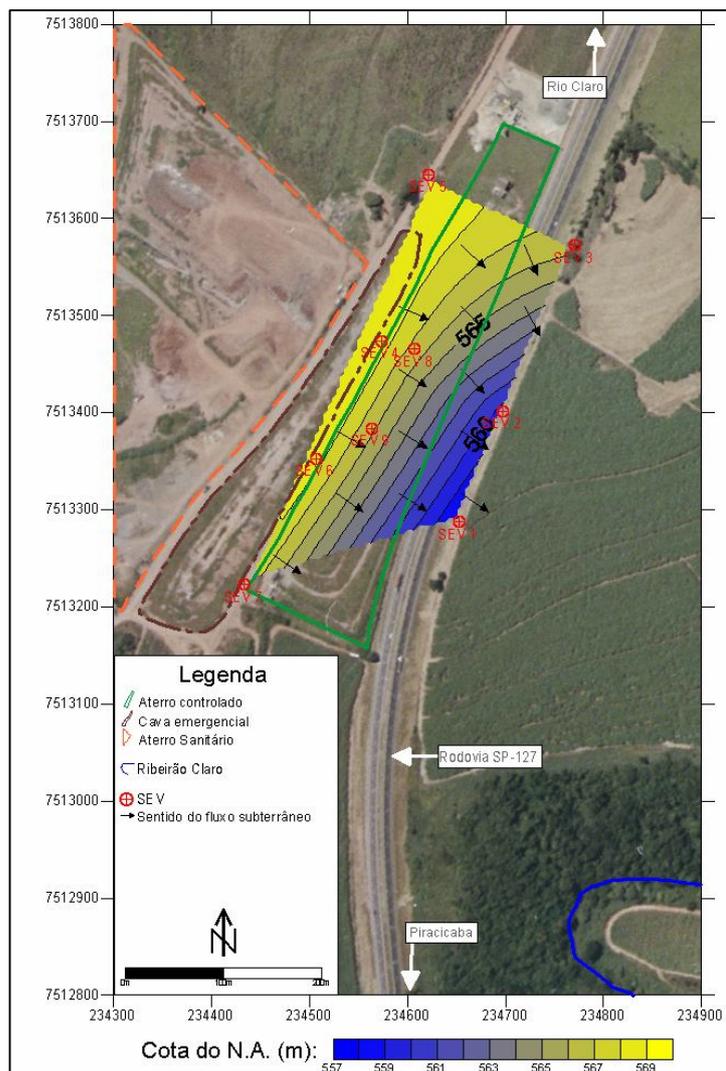


Figura 5.11: Mapa potenciométrico da área de estudos.

5.4 Interpretações dos Imageamentos Elétricos (IE) – Monitoramento Temporal

A análise e interpretação dos dados de IE foram feitas de forma qualitativa e quantitativa simultaneamente, baseadas, essencialmente, em informações da geologia e hidrogeologia local, e na referência bibliográfica principal da presente pesquisa, a obra de Moura (2002).

Das 8 seções de IE executadas, 4 foram realizadas dentro e 4 fora da área do aterro controlado de Rio Claro (SP). Desse modo, foi possível delimitar a cava de resíduos e determinar as faixas de variações dos valores de resistividade aparente do local de realização de cada ensaio.

Somente os ensaios executados no ano de 2008 sofreram correção na topografia do local onde foram realizados durante o processamento no Res2dinv, v. 3.4, pois os dados de

localização e cota de cada eletrodo são válidos unicamente para esse grupo de ensaios. Já aqueles executados em 1999 apresentam dados topográficos muito pouco confiáveis e, por esse motivo, não foi realizada a correção topográfica.

O monitoramento temporal da pluma de contaminação na área do aterro controlado, por meio da comparação entre os resultados dos ensaios geofísicos de 1999 e de 2008, foi executado somente através das seções de resistividade. Não foi possível gerar mapas de resistividade com os dados de 1999 (semelhantes aos apresentados no item 5.6) devido aos dados pouco confiáveis de localização e de cota dos eletrodos.

A Figura 5.12 apresenta a localização dos ensaios executados em 1999 e dos ensaios executados em 2008.

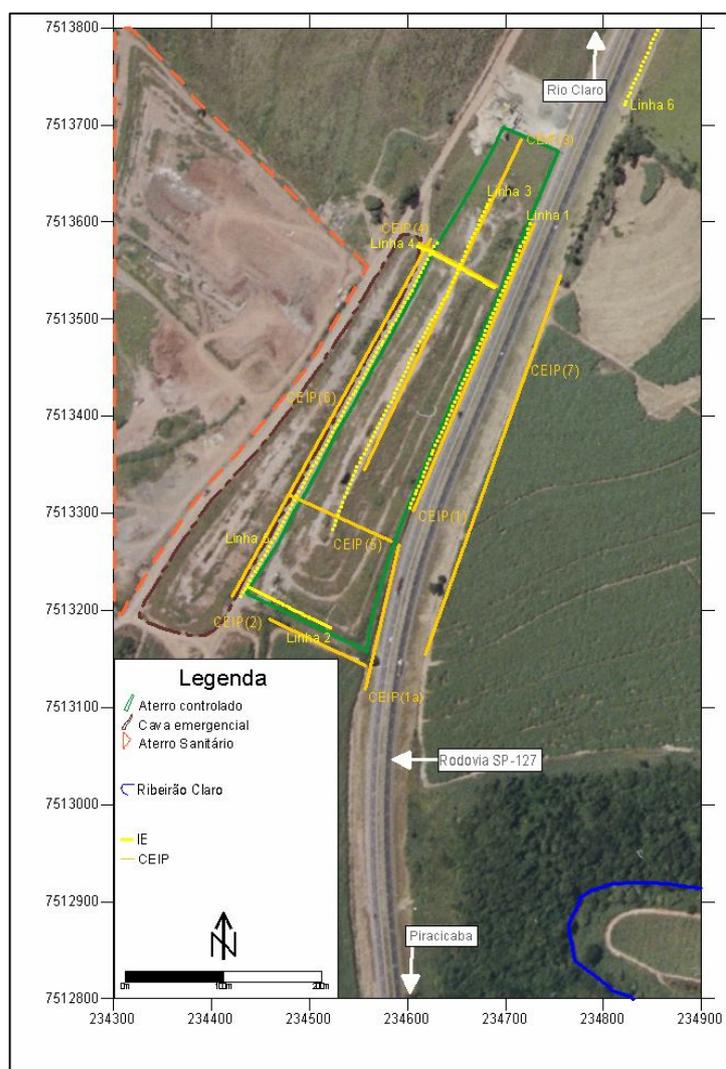


Figura 5.12: Mapa de localização dos Imageamentos Elétricos executados no aterro controlado de Rio Claro (SP), nos anos de 1999 (CEIP, em laranja) e 2008 (IE, em amarelo).

5.4.1 Linhas de referência: CEIP(7) e Linha 6

O ensaio CEIP(7) foi tomado como linha de referência por Moura (2002) na interpretação de seus resultados e foi realizado às margens da Rodovia SP 127, no sentido Piracicaba – Rio Claro, distando cerca de 40m do aterro (Figura 5.12).

Pode-se verificar na Figura 5.13 (acima) que o mínimo valor de resistividade aparente que essa seção apresenta é de cerca de $140\Omega.m$, típico de sedimentos predominantemente arenosos próximos à superfície. O valor máximo de resistividade aparente verificado nessa seção é da ordem de $5000\Omega.m$, valor esse que condiz com sedimentos predominantemente arenosos secos (zona de retenção). Ambos os valores corroboram Braga (1997, p.119).

A Linha 6 foi realizada a cerca de 150m de distância a montante do aterro (Figura 5.12). Optou-se por executar este ensaio em local distante do aterro (ao contrário do ensaio CEIP(7)) para garantir que não houvesse influência dos resíduos sobre os resultados obtidos.

Nessas condições, a Linha 6 foi tomada como linha de referência para os ensaios de 2008 e seus valores de resistividade refletem um cenário aparentemente sem contaminação do subsolo.

Observando-se a Figura 5.13, nota-se que a Linha 6 (ao centro), executada no ano de 2008, apresenta o valor mínimo de resistividade aparente semelhante ao da CEIP(7) (Figura 5.13, acima), realizada em 1999. Desse modo, é possível afirmar que não houve alteração (ao menos, não significativa) dos valores de referência de resistividade aparente no intervalo decorrido entre a realização dos dois ensaios geofísicos, independentemente do local de realização de cada um.

O valor máximo de resistividade aparente encontrado na seção do ensaio CEIP(7), de 1999, é da ordem de $5000\Omega.m$, superior ao valor máximo da seção da Linha 6, de 2008, que é de, aproximadamente, $1000\Omega.m$. Tal flutuação de valores pode ser atribuída a diferentes teores de água em subsolo nos anos em que se realizaram os ensaios.

Quando feita a correção da seção da Linha 6 com os dados de topografia do local de realização do ensaio (Figura 5.13, abaixo), percebe-se que os valores máximo e mínimo não são alterados e que a distribuição das zonas de resistividade aparente não sofre significativas mudanças, devido à planicidade da superfície do terreno.

Moura (2002, p.101, 103 e 125) definiu que valores de resistividade aparente maiores ou iguais a $300\Omega.m$ representam o limite do *background* da área. Valores entre $30\Omega.m$ e $300\Omega.m$ indicam a zona de transição entre o meio natural e os resíduos, e valores menores ou iguais a $30\Omega.m$ caracterizam a presença de resíduos.

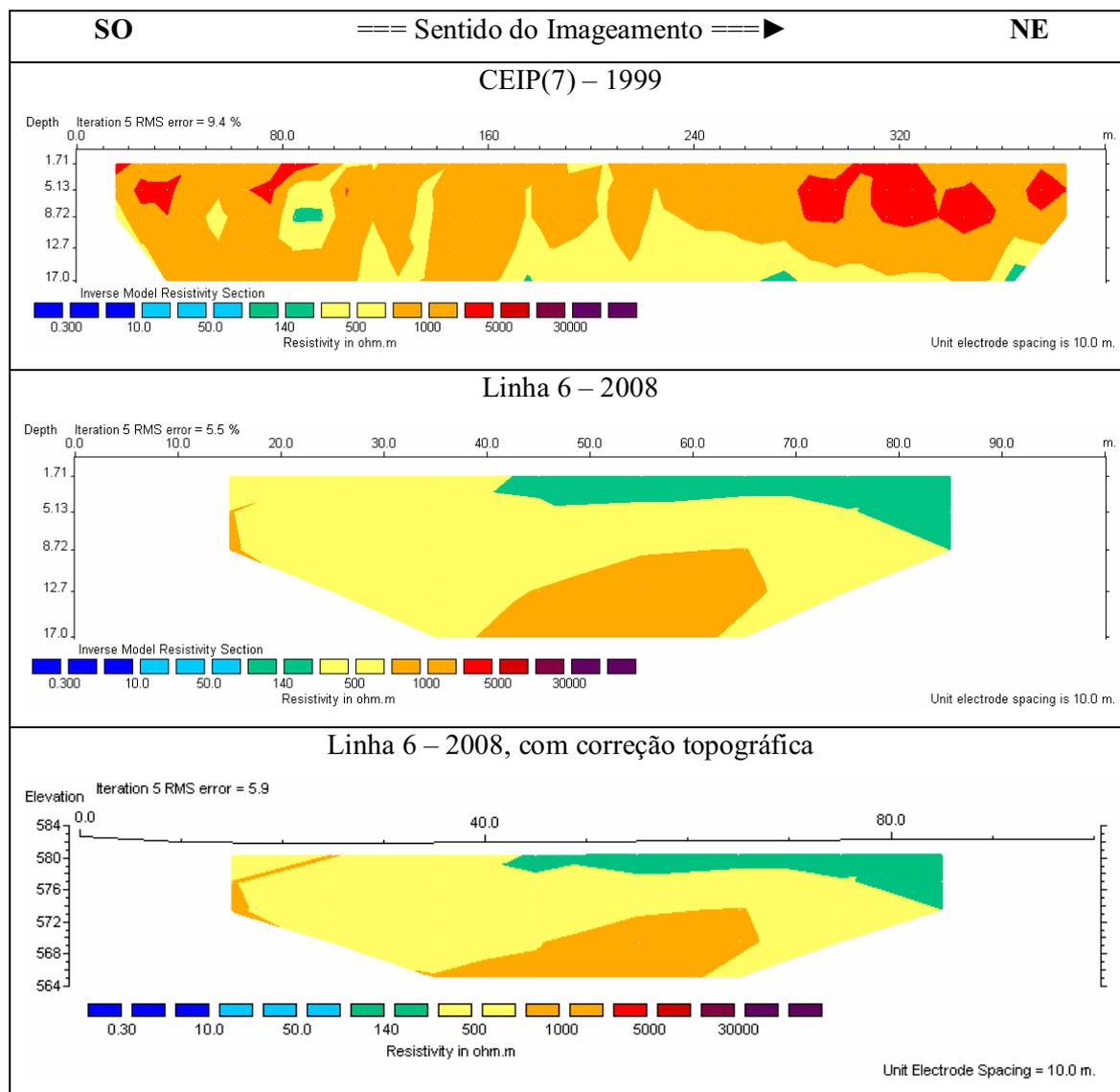


Figura 5.13: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(7) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 6 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 6 de 2008, com correção topográfica.

Na presente obra, as faixas de variações de resistividade aparente das seções foram assim classificadas: valores maiores ou iguais a $140\Omega.m$ representam o meio natural (*background*), valores entre $50\Omega.m$ e $140\Omega.m$ indicam a zona de transição meio natura/resíduos, e valores menores ou iguais a $50\Omega.m$ caracterizam a presença de resíduos e indicam provável contaminação.

Portanto, nas seções com dados obtidos nos anos de 1999 e 2000, considerar-se-á valores de resistividade aparente menores ou iguais a $50\Omega.m$ como indícios de provável contaminação do subsolo, assim como para as seções de 2008.

5.4.2 Monitoramento Temporal: CEIP(1) e Linha 1

A seção referente ao ensaio CEIP(1) (Figura 5.12), executado às margens da Rodovia SP 127 (Fausto Santomauro), pista de sentido Rio Claro-Piracicaba, é exibida na Figura 5.14 (acima). No extremo esquerdo da seção notam-se elevados valores de resistividade aparente, alcançando a marca dos $5000\Omega.m$ (valor máximo da seção). Essa região foi interpretada por Moura (2002, p.114) como sendo o limite entre o meio natural e os sedimentos contaminados.

Pode-se observar também nessa seção zonas de baixa resistividade aparente ($\leq 50\Omega.m$) encontradas, principalmente, em profundidades superiores a 12m, as quais foram interpretadas por Moura (2002) como sedimentos arenosos da Formação Rio Claro contaminados pelo percolado proveniente do aterro controlado.

Nota-se, ainda, que as zonas de baixa resistividade aparente concentram-se na porção direita da seção, que corresponde às cotas mais baixas. Esse fato pode indicar o sentido do fluxo subterrâneo que acompanha, aproximadamente, o declive da topografia e que, na orientação da seção, seria da esquerda para a direita (Figura 5.14, acima). Na Figura 5.14 (abaixo) é possível observar a diferença de cotas entre o ponto inicial e o ponto final do ensaio.

A seção referente à Linha 1 (Figura 5.12), também executada no mesmo local, entre a Rodovia SP 127 e a cerca que delimita a área do aterro, é mostrada na Figura 5.14 (ao centro). Apesar do local de execução de ambas as linhas ser o mesmo, não se pode garantir que os pontos inicial e final de cada linha coincidiram com os da outra, pois os registros das coordenadas iniciais e finais dos ensaios de 1999 apresentam pouca precisão.

Essa seção apresenta valores de resistividade acima dos $140\Omega.m$, assim como na seção do ensaio CEIP(1), indicando que, apesar da sua localização, é provável que não tenha ocorrido contaminação das camadas próximas à superfície. Entretanto, quando comparada com a seção do ensaio CEIP(1) de 1999, percebe-se um acréscimo nos valores de resistividade aparente, que passam de $140\Omega.m$ para $500\Omega.m$, o que poderia indicar recuperação natural da área antes contaminada.

No extremo esquerdo da seção da Linha 1 de 2008 verifica-se um incremento nos valores de resistividade aparente, atingindo o valor máximo de, aproximadamente, $1000\Omega.m$, típico de sedimentos arenosos da Formação Rio Claro (Braga, 1997, p.119). Essa anomalia resistiva pode indicar uma tendência de recuperação natural da área antes contaminada ou, então, pode representar simplesmente o limite entre o meio natural e os sedimentos contaminados.

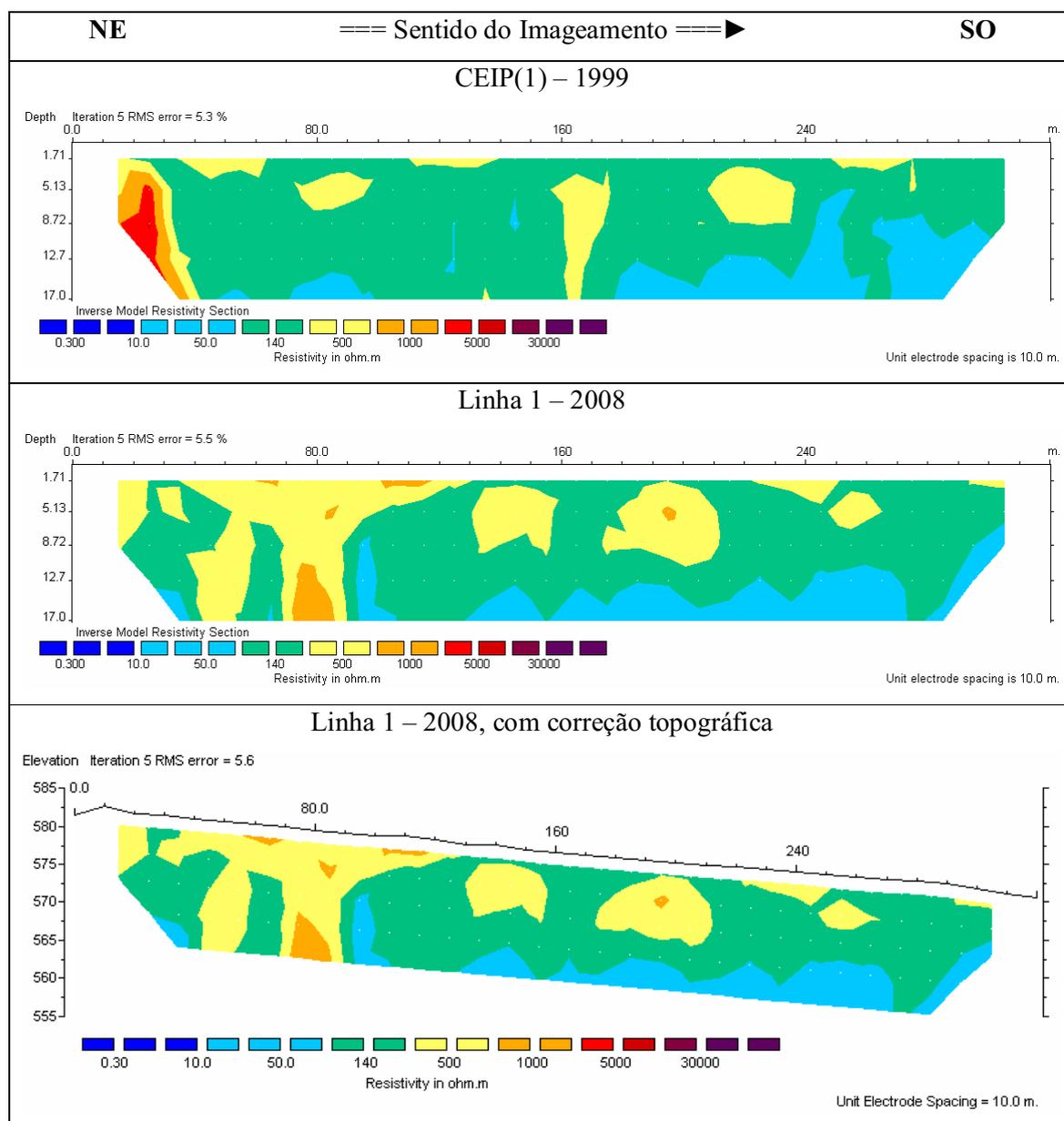


Figura 5.14: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 1 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 1 de 2008, com correção topográfica.

A partir dos 8m de profundidade, aproximadamente, notam-se regiões – até com certa continuidade – com resistividades variando de $10\Omega.m$ (valor mínimo da seção) a $50\Omega.m$, e que, devido ao contexto da localização do ensaio, pode ser associado com possível contaminação e/ou com o nível freático, amparado pelos resultados das SEV.

As zonas com resistividade aparente menor ou igual a $50\Omega.m$ da seção do ensaio CEIP(1), estão mais próxima à superfície do terreno quando comparadas à seção da Linha 1; entretanto, aparentam ter menor extensão quando comparadas ao ensaio de 2008. Essa

variação de profundidade e de extensão pode ser reflexo do teor de água contido em subsuperfície nos diferentes anos.

5.4.3 Monitoramento Temporal: CEIP(2) e Linha 2

O ensaio CEIP(2) foi executado paralelamente ao limite sul do aterro, no sentido de seu eixo menor (Figura 5.12). No ano em que foi executado (1999), o aterro encontrava-se em operação e a disposição dos resíduos no local era feita no sentido aproximado Norte-Sul. Portanto, a região onde foi realizado o presente ensaio foi a última a receber os resíduos.

Tal informação pode justificar os elevados valores de resistividade aparente encontrados na seção correspondente a esse ensaio (Figura 5.15, acima). Essa seção apresenta-se quase totalmente resistiva, com valores maiores ou iguais a $140\Omega.m$.

Moura (2002, p.118) afirma que valores menores que $300\Omega.m$ evidenciam a contaminação da lateral da cava pelo percolado. Entretanto, discorda-se de tal afirmação, pois a região do ensaio foi a última a receber os resíduos, o que isentaria quase por completo a possibilidade de haver contaminação do subsolo nesse local.

Além disso, como pode ser verificado na seção do ensaio CEIP(7) (Figura 5.13, acima), adotado por Moura (2002) como referência, os valores de resistividade aparente do ensaio CEIP(2) são característicos de ambiente sem contaminação, pois refletem o *background* da área.

Pequenas zonas de baixa resistividade ($\geq 50\Omega.m$) surgem em profundidades maiores que 6m e, nesse contexto, podem indicar o nível freático.

A Linha 2, executada no ano de 2008, foi realizada no mesmo local do ensaio CEIP(2) (Figura 5.12). Porém, não se pode garantir que as duas seções foram levantadas exatamente no mesmo local, mas sim dentro de um limite de tolerância, pelo fato de que os dados de localização dos pontos inicial e final do IE de 1999 apresentam baixa precisão.

Verifica-se que os valores máximos e mínimos das duas seções são idênticos, porém a distribuição desses valores em cada seção é totalmente diferente. Apesar de executadas no mesmo local, as seções resultantes são distintas entre si, tornando esse caso bastante interessante.

Com a Linha 2 (2008) foi possível delimitar a cava de resíduos, conforme pode ser visto na Figura 5.15 (ao centro). Esse limite é bastante marcante, ocorrendo entre as estacas de 35m e 40m da seção. À esquerda desse ponto ocorrem resistividades acima de $140\Omega.m$, indicando o limite lateral da cava, e que crescem gradualmente até mais de $5000\Omega.m$, valores

que refletem os sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro, sobre a qual está assentado o aterro controlado.

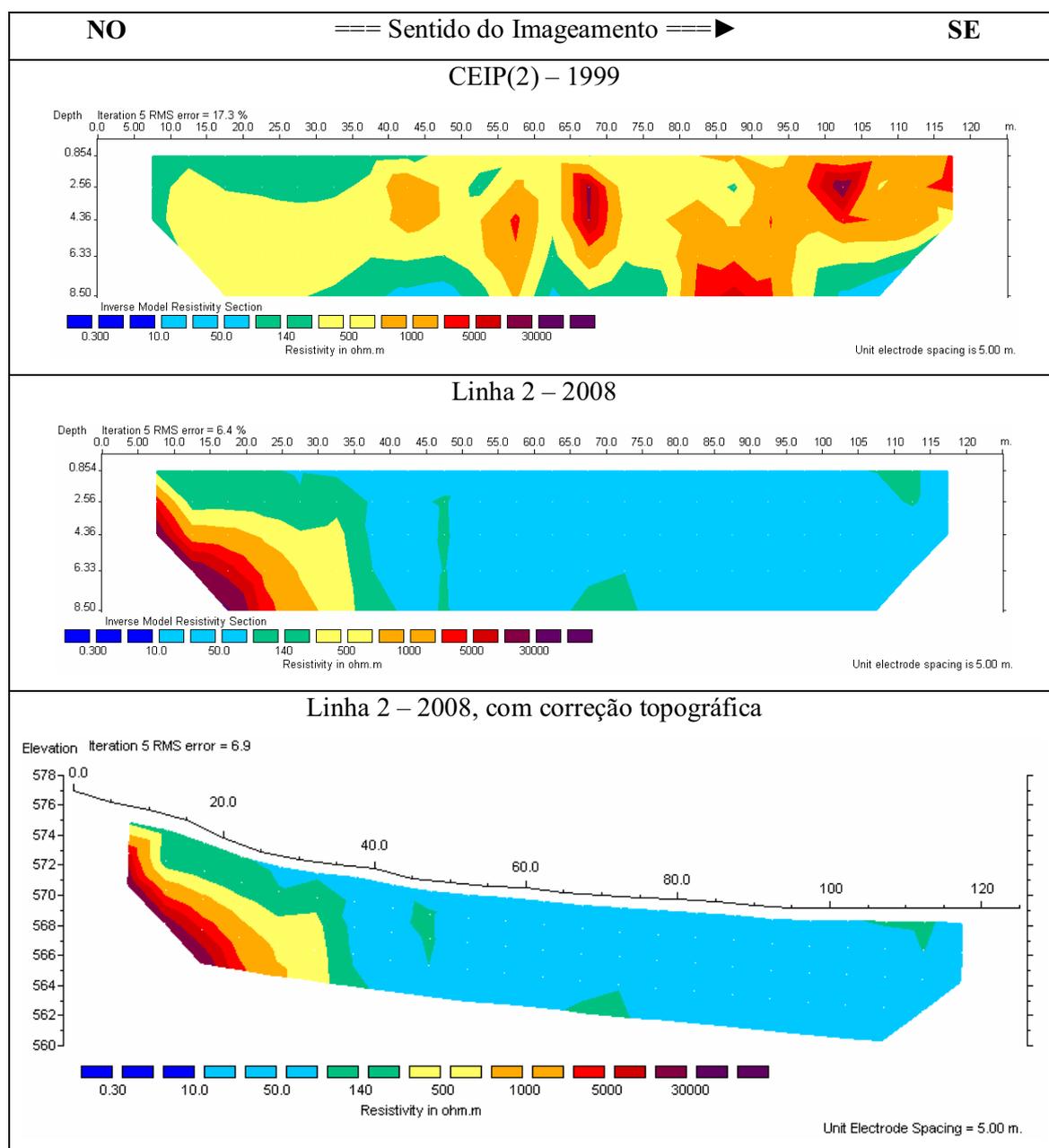


Figura 5.15: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(2) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 2 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 2 de 2008, com correção topográfica.

Ainda assim, mas de modo menos confiável, os altos valores de resistividade do extremo esquerdo da seção podem indicar a não contaminação do local, por conta do sentido do fluxo subterrâneo dirigir-se da esquerda para a direita (na orientação da Figura 5.15, ao

centro e abaixo), acompanhando, aproximadamente, a topografia do local do ensaio, observada na Figura 5.15 (abaixo).

À esquerda da estaca de 40m têm-se uma grande zona de baixa resistividade ($\rho_a \leq 50\Omega.m$), relativamente ao restante da seção. Esta região pode ser associada com a presença de resíduos e com o provável sentido de migração da pluma de contaminação, já que foi possível constatar, em campo, o afloramento de chorume em direção ao limite sul do aterro (Figura 5.16).



Figura 5.16: Afloramento de chorume próximo ao limite sul do aterro.

5.4.4 Monitoramento Temporal: CEIP(3) e Linha 3

O ensaio CEIP(3) foi realizado no topo da cava de resíduos e no sentido do eixo maior do aterro (Figura 5.12). Na época em que foi executado este ensaio, o aterro ainda estava em operação; portanto, é possível que o topo da cava de resíduos estivesse em uma cota menor do que a atual.

Na seção referente ao ensaio em questão, exibida na Figura 5.17 (acima), percebe-se dois cenários distintos: do ponto inicial até a estaca de 80m, aproximadamente, é possível verificar uma região com valores de resistividade aparente maiores ou iguais a $140\Omega.m$, que, de acordo com a linha de referência – CEIP(7) ou Linha 6 – pode ser interpretada como a lateral da cava de resíduos.

A partir da estaca dos 80m até o ponto final da seção, têm-se o segundo cenário, onde todas as resistividades aparentes são menores ou iguais $50\Omega.m$. De acordo com o contexto do local, essa grande região da seção pode ser associada à presença de resíduos em subsuperfície e material de cobertura das células contaminados por chorume. Moura (2002, p.101)

interpretou igualmente o significado dessa região; entretanto, atribuiu para os resíduos valores menores ou iguais a $30\Omega.m$.

A Linha 3, de 2008 (Figura 5.17, ao centro), foi executada aproximadamente no mesmo local do ensaio CEIP(3) (Figura 5.12). Novamente não se pôde garantir a coincidência dos pontos inicial e final de ambos os ensaios, devido à baixa precisão dos registros de localização do ensaio de 1999.

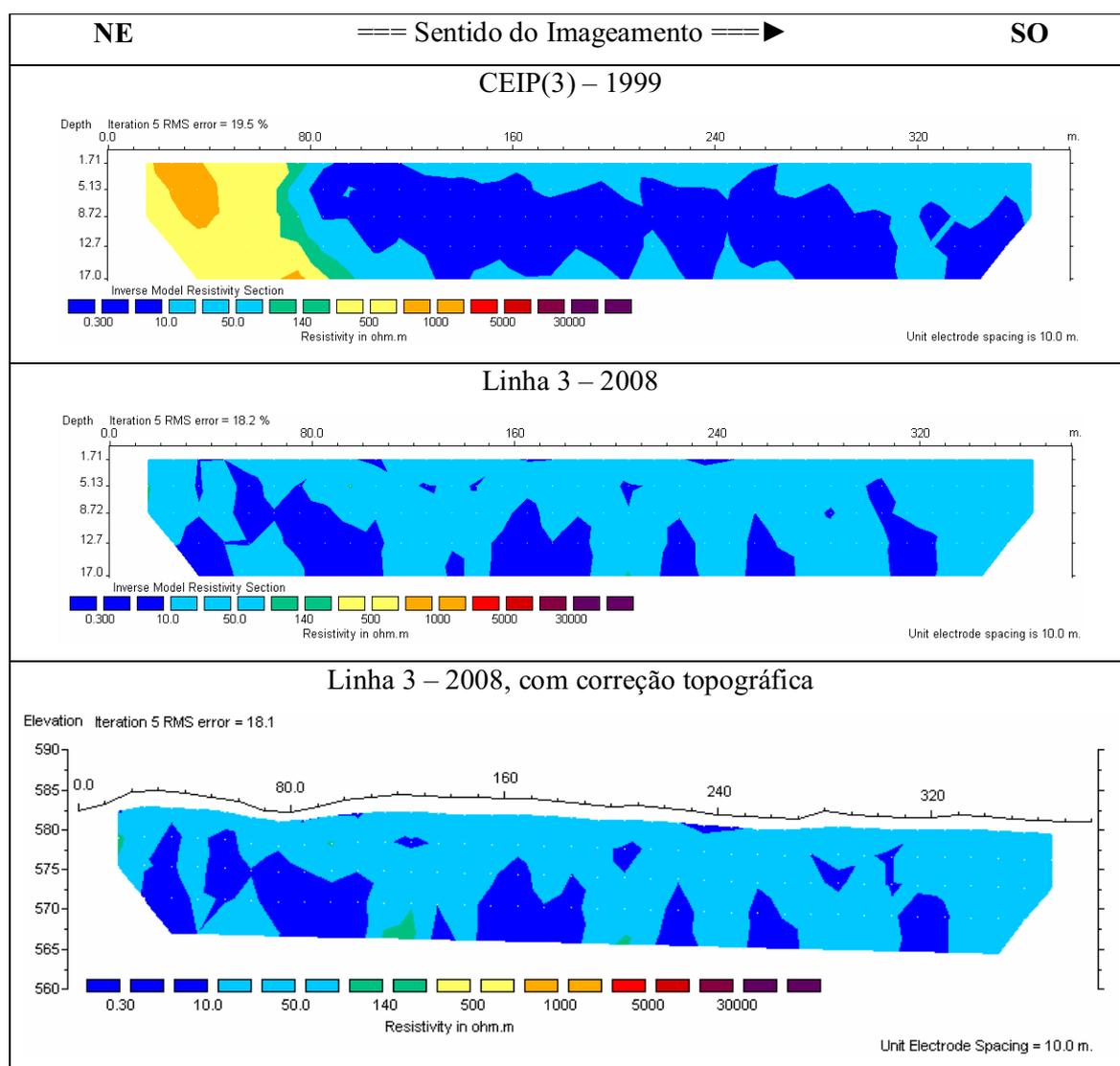


Figura 5.17: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(3) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 3 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 3 de 2008, com correção topográfica.

A lateral da cava de resíduos, identificada na seção CEIP(3), não pode ser detectada na Linha 3, pois o ponto inicial do ensaio de 1999 deu-se onde, em 2008, funcionava a

administração do serviço de coleta de resíduos municipais, operada na ocasião pela Secretaria de Obras da Prefeitura de Rio Claro (SP). Como consequência, o início da Linha 3 deu-se, aproximadamente, na estaca de 90m do ensaio CEIP(3), e o ponto final do ensaio CEIP(3) encontra-se, aproximadamente, na estaca de 290m da Linha 3.

Com exceção do limite lateral da cava, detectado em 1999, o cenário é bastante semelhante na seção de 2008: somente verificam-se valores de resistividade aparente menores ou iguais a $50\Omega.m$, os quais podem ser interpretados como resíduos, por vezes misturados com o material de cobertura, contaminados por chorume.

Pode-se perceber uma sutil diferença entre as duas seções, em relação à distribuição das resistividades aparentes: a Linha 3, de 2008, aparenta ter zonas de muito baixa resistividade ($\leq 10\Omega.m$) menores, em área, que a seção CEIP(3), de 1999. Essa diferença pode refletir uma tendência de recuperação do ambiente, tentando retomar os valores padrões sem contaminação (*background*).

Na Figura 5.17 (abaixo) é apresentada a seção da Linha 3 com correção topográfica, onde é possível notar a relativa ondulação do topo da cava de resíduos. Pequenas zonas com resistividade de $140\Omega.m$ aparecem distribuídas na seção, influenciadas, talvez, pela modificação do fator geométrico atribuído ao ponto de investigação após correção da topografia.

5.4.5 Monitoramento Temporal: CEIP(4) Linha 4

Os dados de eletrorresistividade referentes ao ensaio CEIP(4) de 1999 foram coletados transversalmente ao eixo maior do aterro (Figura 5.12). Na Figura 5.18 (acima), que exibe a seção de resistividade aparente desse ensaio, pode-se distinguir duas regiões distintas.

A primeira região, que se estende do ponto inicial até a estaca dos 25m, aproximadamente, apresenta valores de resistividade que variam entre $140\Omega.m$ e $1000\Omega.m$. Tais valores são característicos de material geológico isento de contaminação. Essa região pode ser interpretada como sendo o limite lateral da cava, assim como proposto por Moura (2002, p.106) e amparado pelas seções do ensaio CEIP(7) e da Linha 6.

A partir da estaca dos 25m, têm-se a segunda região, onde os valores de resistividade aparente passam a situar-se entre $0,3\Omega.m$ e $50\Omega.m$, indicando a presença de resíduos e de material de cobertura das células contaminados pelo percolado.

Moura (2002, p.106) identificou aí três diferentes zonas de concentrações de percolado, com diferentes valores de resistividade, sendo que os maiores valores ocorrem

próximos à superfície e os menores valores próximos à base do aterro. Essa disposição das zonas de resistividade indicam que o percolado tem sentido de fluxo para baixo. Devido ao reprocessamento da seção efetuado no presente trabalho, tal informação não se mostra aparente.

A Linha 4 (Figura 5.18, ao centro) foi executada no ano de 2008, no mesmo local do ensaio CEIP(4) e dentro de um limite de tolerância (Figura 5.12), como mencionado nas linhas de IE anteriores. Por meio de comparação do limite material natural/resíduos das duas seções, pode-se inferir que a Linha 4 teve seu início cerca de 15m antes do ponto inicial do ensaio CEIP(4).

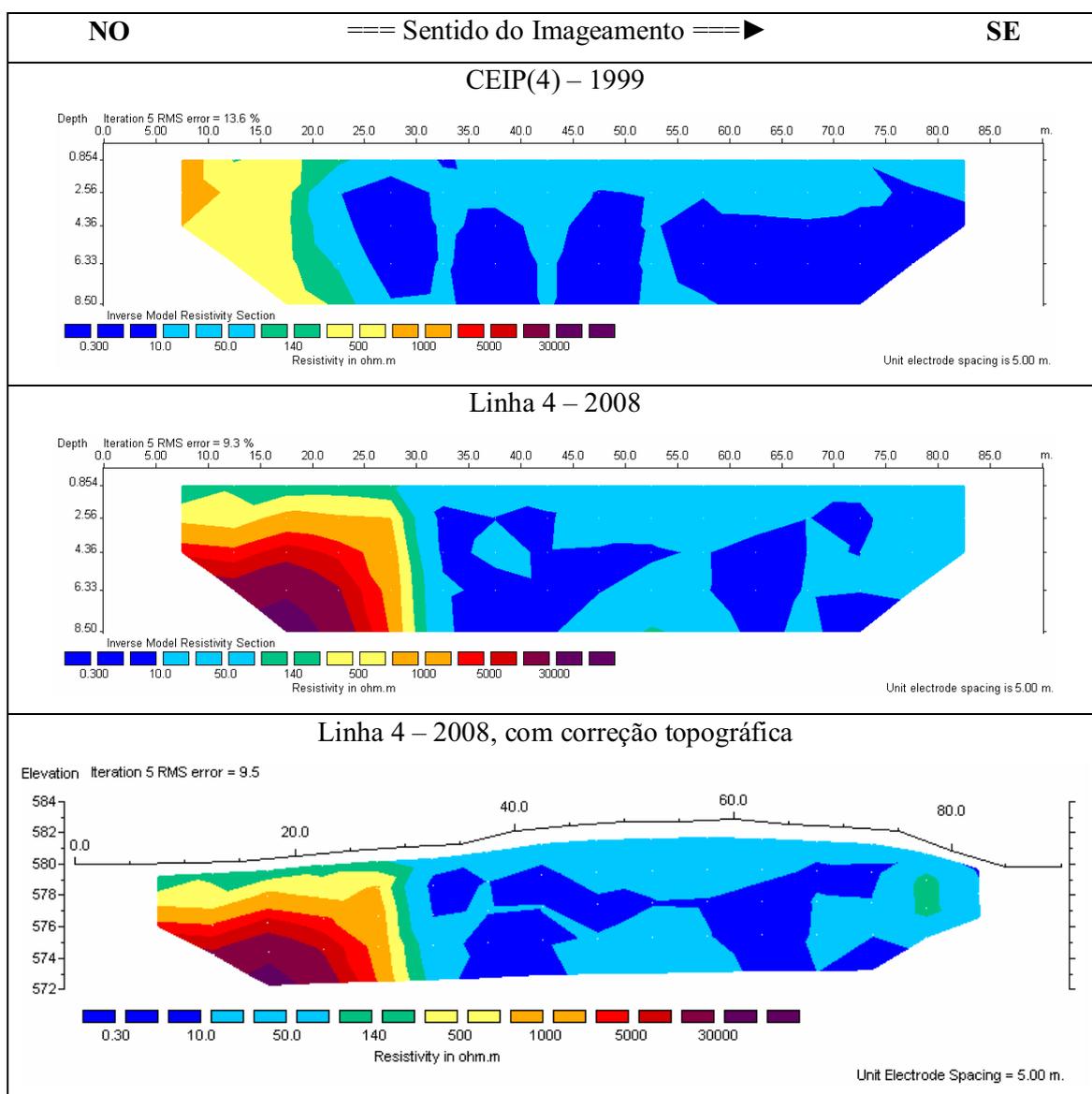


Figura 5.18: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 4 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 4 de 2008, com correção topográfica.

Novamente, é possível definir duas regiões distintas. A primeira região, que se estende da estaca de 0m até a estaca de 30m, é caracterizada por resistividades iguais ou maiores que 140 Ω .m. Amparado pela interpretação dos resultados de Moura (2002, p.106) e pela linha de referência – Linha 6 – pode-se afirmar que se trata de um dos limites laterais da cava de resíduos.

Observando-se a Figura 5.18 (ao centro), nota-se que os valores de resistividade da lateral da cava apresentam diferença entre os anos de 1999 e 2008: no primeiro ensaio o valor máximo é de 1000 Ω .m, enquanto que no segundo ensaio é de 30000 Ω .m.

Essa diferença pode ser reflexo da fase de operação do aterro: em 1999, quando ainda encontrava-se em funcionamento, a produção de chorume era mais acentuada, causando diminuição da resistividade aparente da lateral da cava, por meio de infiltração. No ano de 2008, com o aterro desativado há, pelo menos, 7 anos, verificam-se valores significativamente maiores, os quais podem ser associados com uma queda da geração e conseqüente diminuição da infiltração do percolado na lateral da cava de resíduos.

A elevação dos valores de resistividade aparente na lateral da cava do aterro também pode ser resultado da compactação do material geológico ocasionada pelo tráfego de caminhões pesados no local. Uma terceira hipótese é a tendência do meio natural de se recuperar, fazendo com que as resistividades retomem o valor padrão de ambiente sem contaminação.

A partir da estaca dos 30m, têm-se a segunda região da seção, onde os valores de resistividade aparente decrescem e situam-se entre 0,3 Ω .m e 50 Ω .m, indicando tratar-se de materiais altamente condutivos, como resíduos sólidos aterrados e material geológico de cobertura, ambos com chorume.

Na região compreendida pelos resíduos ($\rho_a \leq 50\Omega$.m), existe um ligeiro aumento nos valores de resistividade da seção de 2008 em relação à seção de 1999. Esse incremento também pode estar associado à diminuição da produção de chorume pelos resíduos aí presentes.

Quando inseridas as informações sobre a topografia do local de realização do ensaio (Figura 5.18, abaixo), mantém-se duas zonas distintas: a lateral da cava e a cava, propriamente dita, com resíduos. Desse modo, a região da lateral da cava não sofre significativas alterações. Porém, na região dos resíduos notam-se diferenças na distribuição das zonas de resistividade aparente menores ou iguais a 10 Ω .m e o aparecimento de uma zona resistiva ($\rho_a = 140\Omega$.m) em meio aos resíduos.

Assim como na Linha 3, tais diferenças podem ter sido influenciadas pela modificação do fator geométrico atribuído ao ponto de investigação após correção da topografia.

5.4.6 Monitoramento Temporal: CEIP(6) e Linha 5

O ensaio CEIP(6) de 1999 (Figura 5.12 e Figura 5.19, acima) foi realizado em uma estrada não pavimentada, externa ao aterro controlado e vizinha a ele. Essa estrada encontra-se sobre um divisor de águas, com quedas nas direções SE e NO, aproximadamente.

Moura (2002, p.129) interpretou a zona de resistividade menor ou igual a $50\Omega.m$ como sendo material geológico contaminado por chorume, proveniente do aterro controlado e da cava emergencial, conforme pode ser observado nas Figuras 5.12 e 5.19 (acima).

Entretanto, essa zona aparenta ser resultado apenas do fluxo proveniente da cava emergencial, pois a disposição dos resíduos no aterro controlado foi feita no mesmo sentido do ensaio (na orientação da Figura 5.19, acima: da esquerda para a direita), enquanto que na cava emergencial, tal disposição foi feita no sentido contrário ao do ensaio.

Por conseqüência da topografia local, o fluxo de contaminante, tanto do aterro controlado quanto da cava emergencial, parece migrar em direção à Rodovia SP 127. Desse modo, somente o fluxo proveniente da cava emergencial poderia interceptar o local do ensaio.

A zona de baixa resistividade ($\rho_a \leq 50\Omega.m$) encontra-se em profundidades maiores no extremo direito da seção pois, como já mencionado, os resíduos foram depositados na cava emergencial da direita para a esquerda, na orientação da Figura 5.19 (acima). Por isso, a produção e o fluxo de chorume são mais antigos nessa região, fazendo com que a pluma de contaminação atingisse profundidades maiores nesse local, em comparação ao restante da seção.

A região situada entre as estacas de 0m e 140m, da Figura 5.19 (acima), apresenta valores de resistividade aparente maiores ou iguais a $140\Omega.m$, típicos de ambiente isento de contaminação, justificados pela inexistência de resíduos na cava emergencial nesse intervalo do ensaio.

A Linha 5, cuja seção de resistividade aparente é apresentada na Figura 5.19 (ao centro), foi executada no mesmo local do ensaio CEIP(6) (Figura 5.12) e, também, dentro de um limite de tolerância em relação à localização, como mencionado nas linhas de IE anteriores.

É facilmente notável que essa seção exhibe uma camada superficial, com aproximadamente 5m de espessura e valores de resistividade maiores ou iguais a $140\Omega.m$, a

qual pode ser interpretada como sedimentos predominantemente arenosos e material de empréstimo para cobertura dos resíduos. Tais valores também são encontrados nos flancos esquerdo e, principalmente, direito da seção, sendo que esse último pode ser associado com o limite sul da cava emergencial.

A grande região com resistividades entre $0,3\Omega.m$ e $50\Omega.m$, que se encontra a profundidades maiores que 5m e se estende por quase toda a seção, pode ser associada com materiais geológicos em sub-superfície contaminados por chorume, agora sim, proveniente do aterro controlado e da cava emergencial, já que existem resíduos depositados por toda a extensão de ambas as áreas.

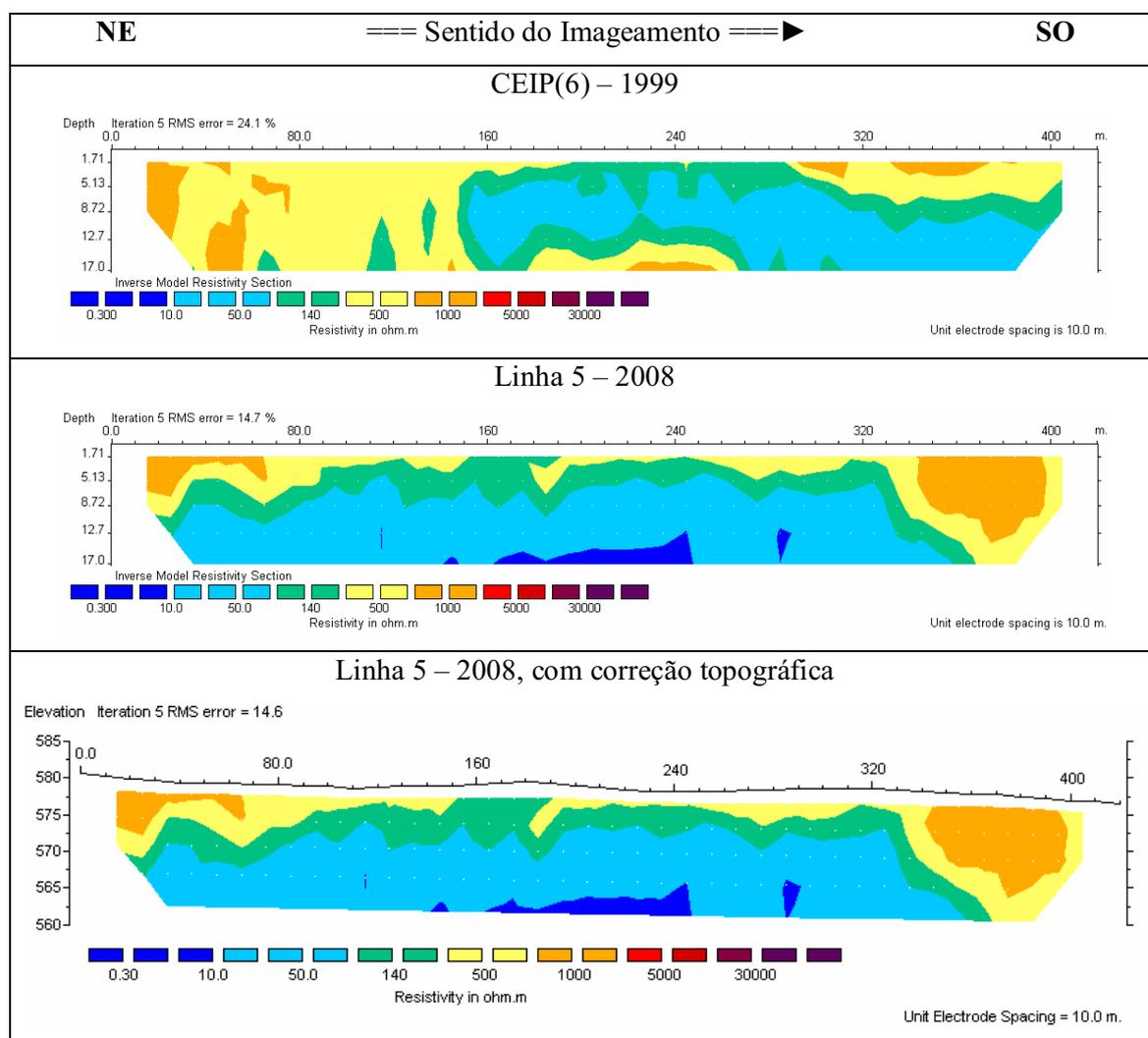


Figura 5.19: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(6) de 1999. Ao centro: Seção de resistividade aparente da Linha 5 de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 5 de 2008, com correção topográfica.

Como pôde ser verificado em campo, no topo do aterro controlado existem duas “lagoas” do sistema de recirculação de chorume (Figura 1.3) que ainda recebem volumes consideráveis de chorume, originário do novo aterro (sanitário). É provável que parte do contaminante tenha migrado das “lagoas” em direção ao subsolo do local do ensaio. Essa hipótese explicaria a zona de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10 \Omega.m$), encontrada na região central da seção, e que coincide com a localização das duas “lagoas” de chorume no aterro controlado.

5.5 Variações sazonais de resistividade

Com o intuito de se verificar a existência de variações dos valores de resistividade do subsolo do aterro controlado, Moura (2002, p.134) realizou duas linhas de IE em dois períodos climáticos distintos: o primeiro na época da estiagem e o segundo logo após as chuvas.

Desse modo, os ensaios CEIP(1) e CEIP(4) foram executados após a estiagem – Agosto de 1999 – e após o período de chuvas – Março de 2000. Seguindo o mesmo raciocínio, ensaiou-se, na presente pesquisa, a Linha 1 após o período de chuvas (Maio de 2008) e após o período de estiagem (Outubro de 2008); da mesma forma, a Linha 4 foi executada nos meses de Abril de 2008 – após as chuvas – e Outubro de 2008 – após a estiagem.

A Tabela 5.8 apresenta os nomes e a correspondência entre cada IE.

Moura (2002)		Bortolin (2009)	
Ensaio	Mês/Ano	Ensaio	Mês/Ano
CEIP(1)	Agosto/1999	Linha 1	Outubro/2008
CEIP(1)-2	Março/2000	Linha1-2	Maio/2008

Tabela 5.8: Relação dos ensaios realizados para verificação de possíveis variações sazonais de resistividade.

5.5.1 Variações Sazonais: CEIP(1)-2 e Linha 1-2

Nas seções referentes ao ano de 1999, é notável a queda dos valores de resistividade no período de chuvas (Figura 5.20, acima) em relação ao período de estiagem (Figura 5.20, abaixo). Essas diferenças são mais perceptíveis no extremo esquerdo das seções, onde os valores atingiam o máximo de $5000 \Omega.m$ no período de estiagem e, no período das chuvas, não

ultrapassam os $500\Omega.m$, representando uma queda de 90% do valor máximo. O valor mínimo permaneceu o mesmo em ambos os ensaios, sendo ele de $10\Omega.m$.

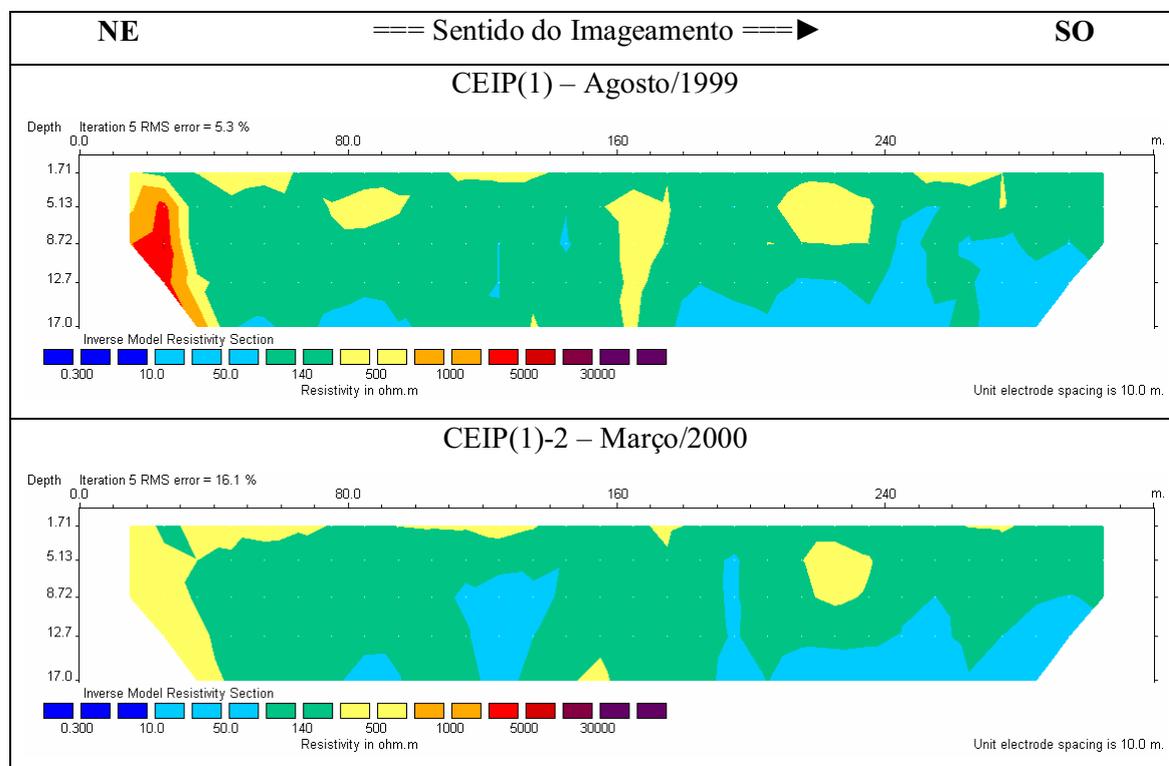


Figura 5.20: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1), realizado no período de estiagem, em Agosto de 1999. Abaixo: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(1)-2, realizado no período de chuvas, em Março de 2000.

A Figura 5.21 exibe a variação das resistividades aparentes dos vários níveis investigados nos ensaios CEIP(1) e CEIP(1)-2. Moura (2002, p.134) observou que, com exceção dos 4º e 5º níveis, em todos os outros níveis os valores de resistividade aparente do ensaio CEIP(1)-2 são relativamente menores do que os valores do ensaio CEIP(1), e concluiu que tal diferença de valores está condicionada às épocas de realização dos ensaios.

A relativa diminuição da resistividade aparente ocorre, provavelmente, devido ao maior número de íons dispersos provenientes dos resíduos, já que no período de chuvas há alteração significativa do volume líquido, favorecendo a geração de mais percolado dentro da cava de resíduos (MOURA, 2002, p.134).

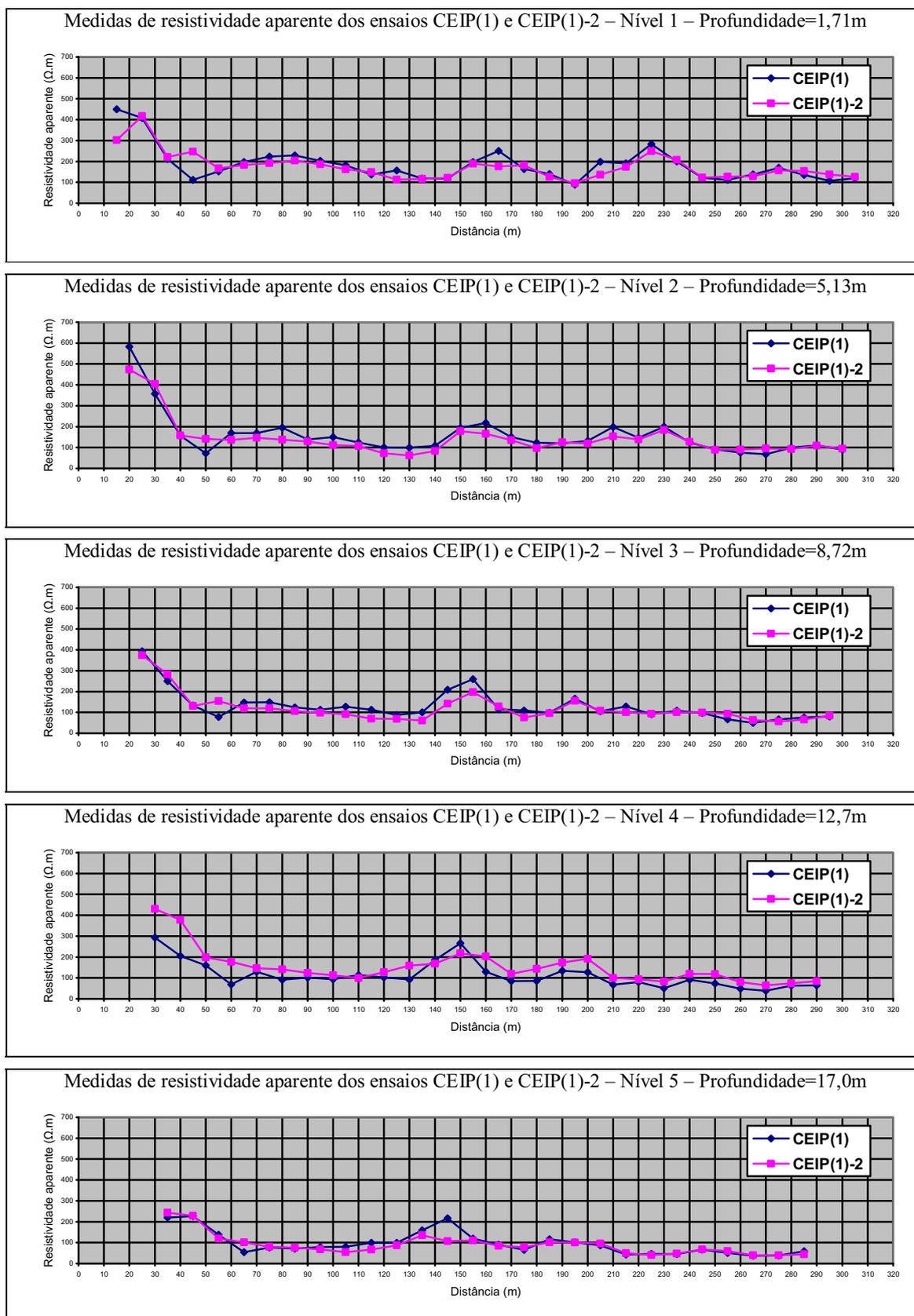


Figura 5.21: Variação da resistividade aparente dos ensaios CEIP(1) e CEIP(1)-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).

Também nas seções do ano de 2008 percebem-se diferenças nos valores de resistividade aparente obtidos em períodos climáticos distintos. Ao contrário do que se verificou nas seções de 1999, nas seções de 2008 não houve variação do valor máximo, permanecendo em $1000\Omega.m$. Os valores mínimos de resistividade aparente sofreram alterações, passando de $50\Omega.m$, no período de chuvas, para $0,3\Omega.m$, no período de estiagem, representando uma queda de 99,4%.

No extremo direito da seção do período de chuvas (Figura 5.22, abaixo) verifica-se significativa alteração na zona de baixa resistividade ($\rho_a \leq 50\Omega.m$), indicando a possível presença de contaminante (chorume) em superfície. Em profundidades maiores, os valores de resistividade atingem a ordem de $0,3\Omega.m$.

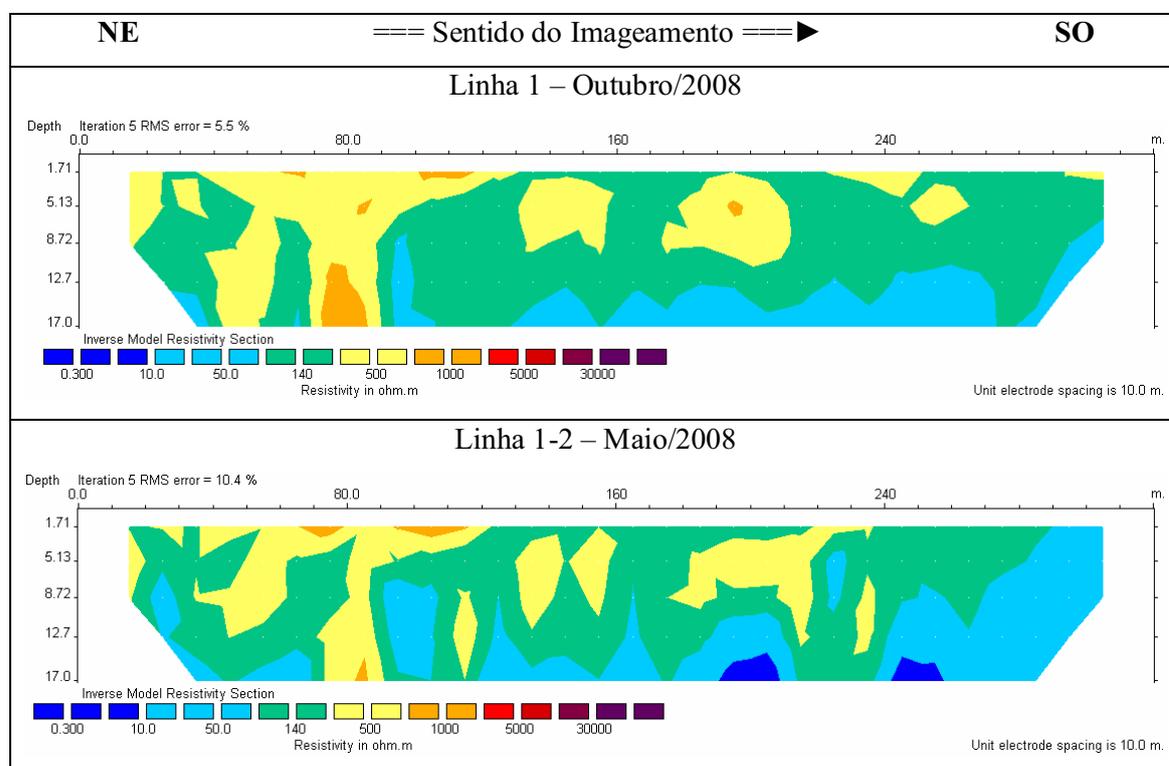


Figura 5.22: Acima: Seção de resistividade aparente da Linha 1, realizada no período de estiagem, em Outubro de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 1-2, realizada no período de chuvas, em Maio de 2008.

Essas observações sugerem a existência de uma relação entre as condições climáticas e a quantidade de água pluvial infiltrada no subsolo do aterro. Tal relação é um fator indesejado, pois oferece maior risco de contaminação das águas subterrâneas, já que o aumento do volume de água em subsuperfície proporciona um acréscimo no número de íons dispersos provenientes dos resíduos. Esse fato favorece a geração de chorume dentro da cava de resíduos.

A Figura 5.23 exibe a variação das resistividades aparentes dos vários níveis investigados na Linha 1 e na Linha 1-2. Pode-se observar que, em todos os níveis de investigação, os valores de resistividade aparente da Linha 1 são relativamente maiores que os valores da Linha 1-2.

Assim como Moura (2002, p.134) afirmou em sua obra, tal diferença de valores está condicionada às épocas de realização dos ensaios. No período de chuvas, com uma maior quantidade de água pluvial infiltrada no solo, ocorre a diminuição relativa da resistividade aparente devido ao maior número de íons dispersos provenientes dos resíduos.

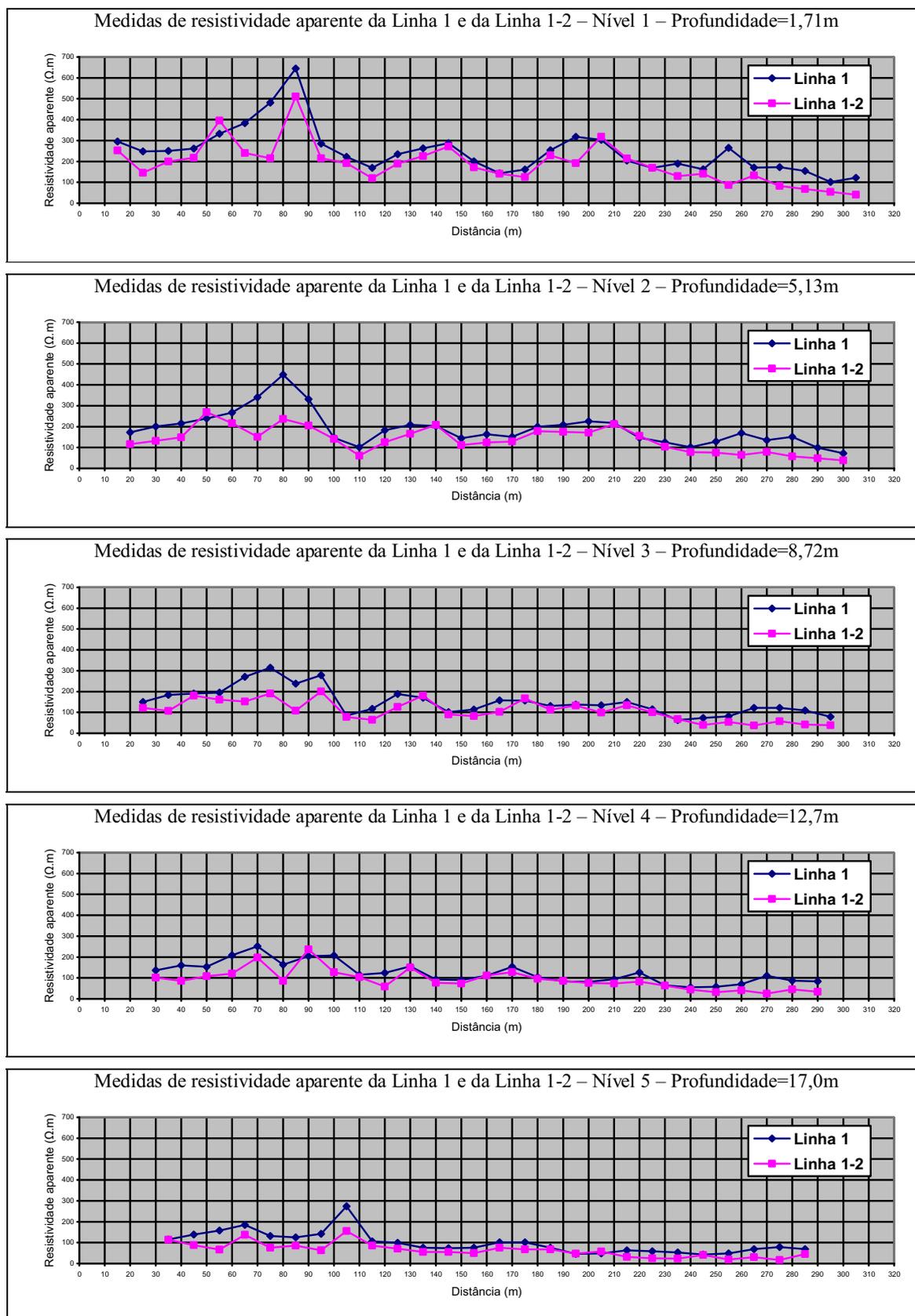


Figura 5.23: Variação da resistividade aparente da Linha 1 e da Linha 1-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).

5.5.2 Variações Sazonais: CEIP(4)-2 e Linha 4-2

De um modo geral, nas seções dos ensaios CEIP(4) e CEIP(4)-2, não houve variação significativa dos valores de resistividade aparente, mantendo-se o máximo em $1000\Omega.m$ e mínimo em $0,3\Omega.m$. As condições climáticas distintas nos períodos em que os dados foram coletados refletem-se como alterações na distribuição das resistividades aparentes nas seções.

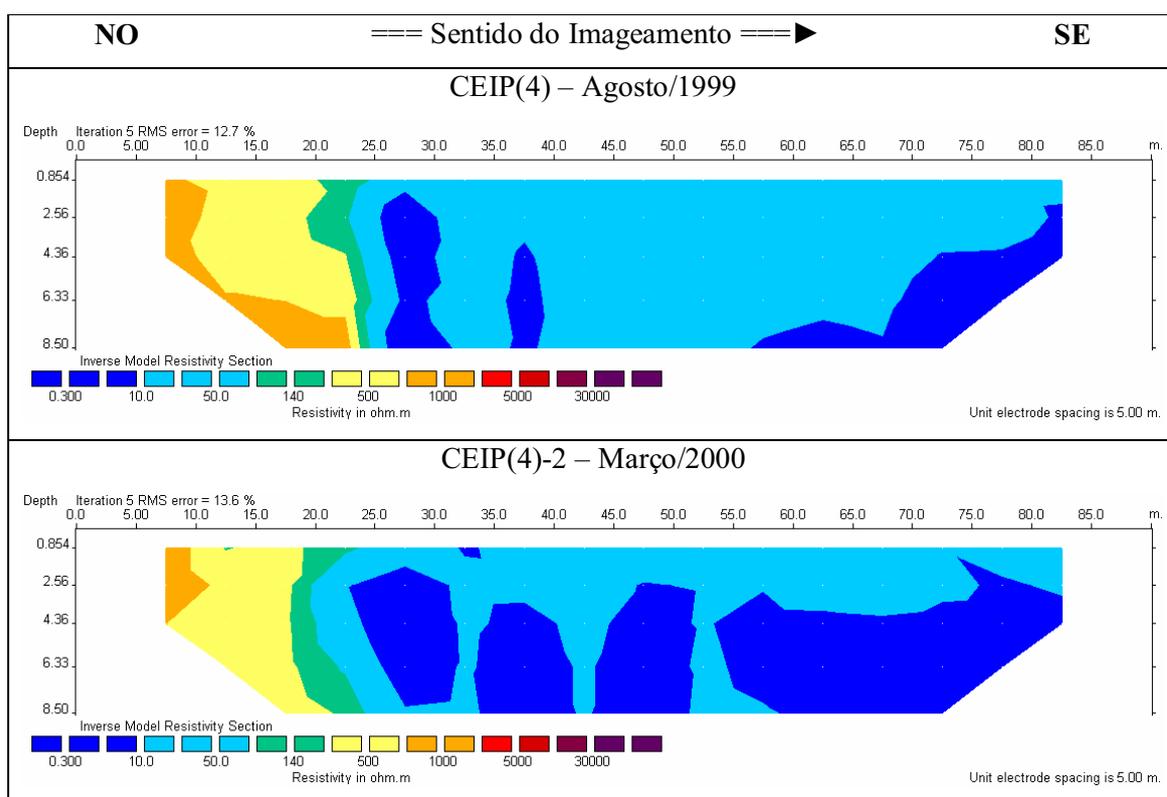


Figura 5.24: Acima: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4), realizado no período de estiagem, em Agosto de 1999. Abaixo: Seção de resistividade aparente do ensaio CEIP(4)-2, realizado no período de chuvas, em Março de 2000.

Na região que corresponde à lateral da cava de resíduos, nota-se ligeira variação na distribuição das resistividades aparentes, com a zona de $1000\Omega.m$ apresentando-se com maior área no período de estiagem (Figura 5.24, acima). O limite lateral da cava parece ter avançado cerca de 5m no período de estiagem, em relação ao período de chuvas, passando da marca dos 20m para a marca dos 25m.

Na porção da seção correspondente aos resíduos, a variação na distribuição das resistividades aparentes é mais marcante. Zonas de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10\Omega.m$)

apresentam-se com menor área no período de estiagem (Figura 5.24, acima), em relação ao período de chuvas (Figura 5.24, abaixo).

As alterações verificadas entre os diferentes períodos climáticos, dadas as condições existentes, somente mostram-se possíveis se relacionadas à quantidade de água pluvial infiltrada no subsolo do aterro.

Pode-se verificar na Figura 5.25 como ocorreu a variação das resistividades aparentes dos vários níveis investigados nos ensaios CEIP(4) e CEIP(4)-2. Os valores de resistividade aparente do ensaio CEIP(4) são ligeiramente maiores que os valores do ensaio CEIP(4)-2. As diferenças de valores não se mostram tão pronunciadas quanto nos ensaios CEIP(1) e CEIP(1)-2, sendo mais perceptíveis nos níveis 4 e 5.

É provável que a pequena amplitude da variação da resistividade aparente esteja relacionada aos resíduos presentes em subsuperfície, já que, mesmo na época de estiagem, quando o volume de água pluvial infiltrada é consideravelmente menor, o número de íons dispersos é significativamente elevado.

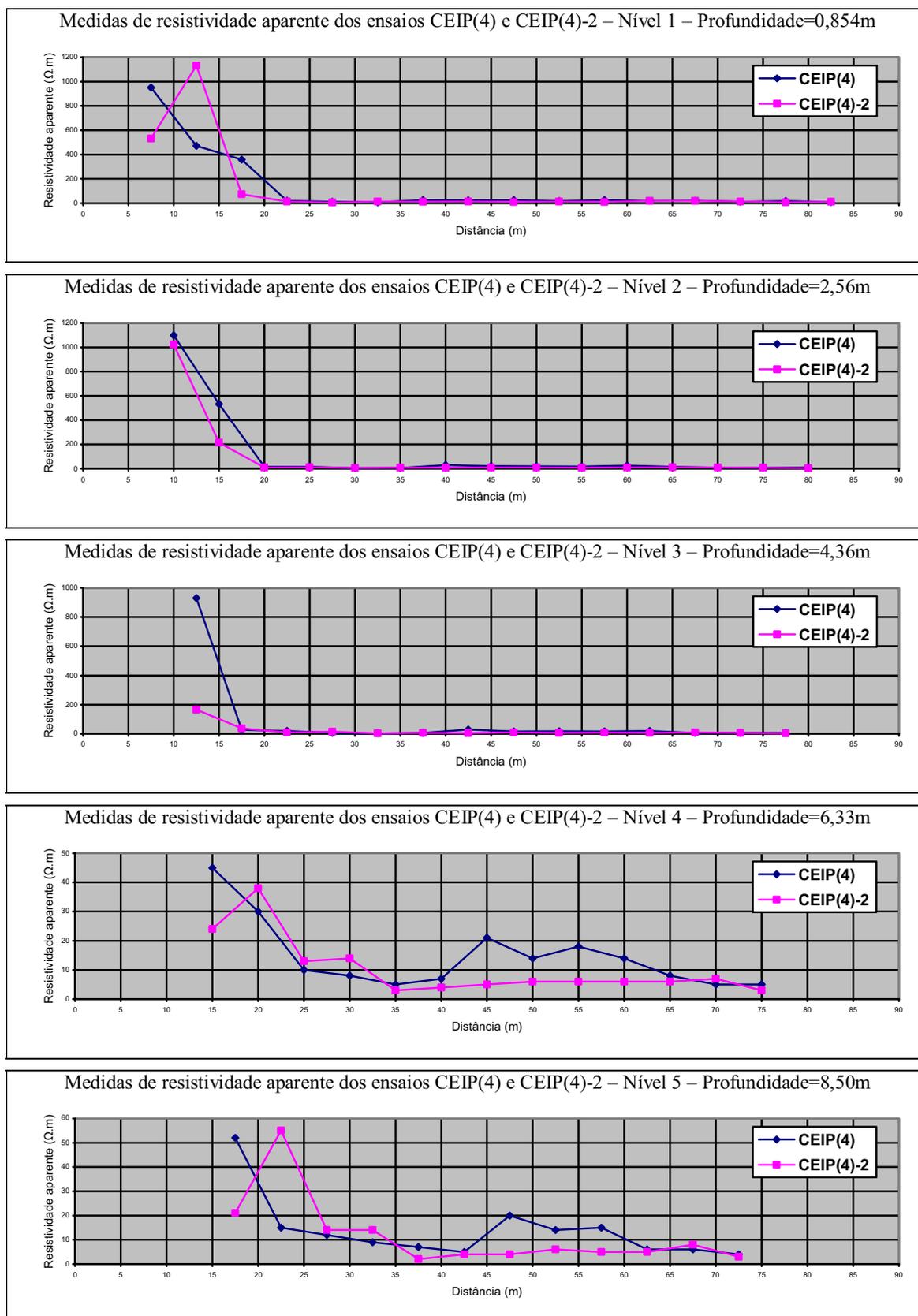


Figura 5.25: Variação da resistividade aparente dos ensaios CEIP(4) e CEIP(4)-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).

Nas seções da Linha 4 e da Linha 4-2, assim como verificado nas seções de 1999/2000, os valores máximos e mínimos de resistividade aparente não sofreram alterações expressivas, mantendo-se aproximadamente constantes, na faixa entre $0,3\Omega.m$ e $30000\Omega.m$. As condições climáticas distintas nos períodos em que os dados foram coletados refletem-se, novamente, como alterações na distribuição das resistividades aparentes nas seções.

No período de estiagem (Figura 5.26 acima), na região que corresponde à lateral da cava – da estaca de 0m até a estaca de 30m, com ocorrência de resistividades iguais ou acima de $140\Omega.m$ –, a resistividade aparente cresce com o aumento da profundidade, apresentando isolinhas bem definidas. O limite material natural/resíduos é bem demarcado. No período de chuvas (Figura 5.26, abaixo), os valores de resistividade dessa região caem significativamente, alterando, inclusive, a posição do contato entre material natural e resíduos.

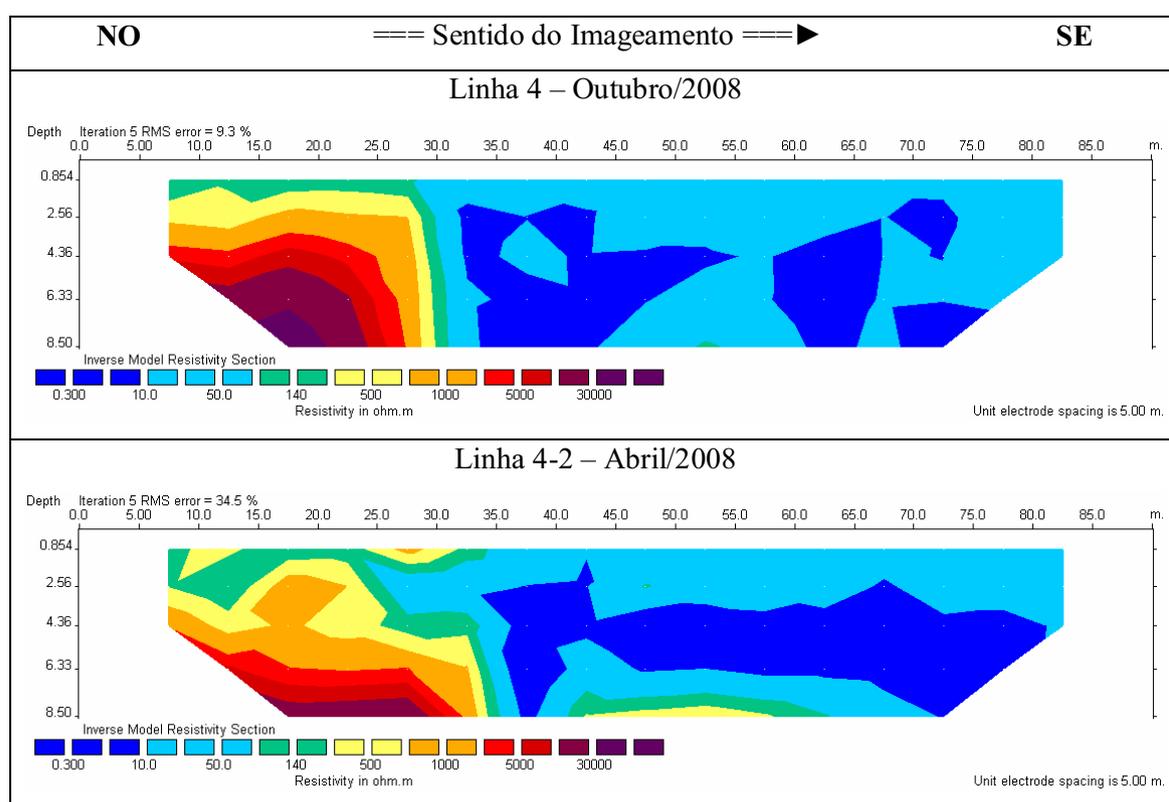


Figura 5.26: Acima: Seção de resistividade aparente da Linha 4, realizada no período de estiagem, em Outubro de 2008. Abaixo: Seção de resistividade aparente da Linha 4-2, realizada no período de chuvas, em Abril de 2008.

Verifica-se, também nesse período, uma zona de $50\Omega.m$ próxima à superfície (até a profundidade aproximada de 2,60m) e que pode tratar-se de infiltração do percolado na lateral da cava, ocasionada pelo aumento do teor de água em subsuperfície ou, então, pelo transporte

inapropriado de chorume do aterro sanitário em atividade para as “lagoas” de recirculação do aterro controlado desativado. Constatou-se, em uma das campanhas de campo, que o trator que faz o transporte do chorume de um local para o outro (Figura 5.27), apresenta falha na vedação do bocal do tanque por onde se faz o esvaziamento do mesmo. Conseqüência disso é o derrame indesejável de chorume pelo trajeto e que pode ter sido detectado na Linha 4-2.

Na porção associada aos resíduos (após a estaca dos 30m), as variações na distribuição das resistividades aparentes são também perceptíveis, porém com menor significância que na porção da lateral da cava. Essa alteração de valores aparece na forma de queda de resistividade no período das chuvas, em relação ao período de estiagem, com valores em torno de $0,3\Omega.m$, e incremento nas dimensões da anomalia condutiva, apresentando até certa continuidade.

Na Figura 5.28 nota-se, novamente, que a variação dos valores de resistividade aparente não é tão expressiva se comparada aos resultados da Linha 1 e da Linha 1-2. A partir da estaca dos 25m, onde encontra-se, aproximadamente, o limite material natural/resíduos, os valores de ambas as linhas são bastante idênticos e não refletem significativa variação. Entretanto, do ponto inicial até a estaca dos 25m, é notável que os valores da Linha 4 são relativamente maiores que os valores da Linha 4-2 (com exceção do nível 5).

Acredita-se, assim como defendido para os ensaios CEIP(4) e CEIP(4)-2, que a variação quase insignificante dos valores da Linha 4 e da Linha 4-2 esteja associada ao elevado número de íons dispersos existentes no local, devido à presença dos resíduos, independentemente do volume de água pluvial infiltrada.



Figura 5.27: Trator que faz o transporte de chorume do aterro sanitário para o aterro controlado.

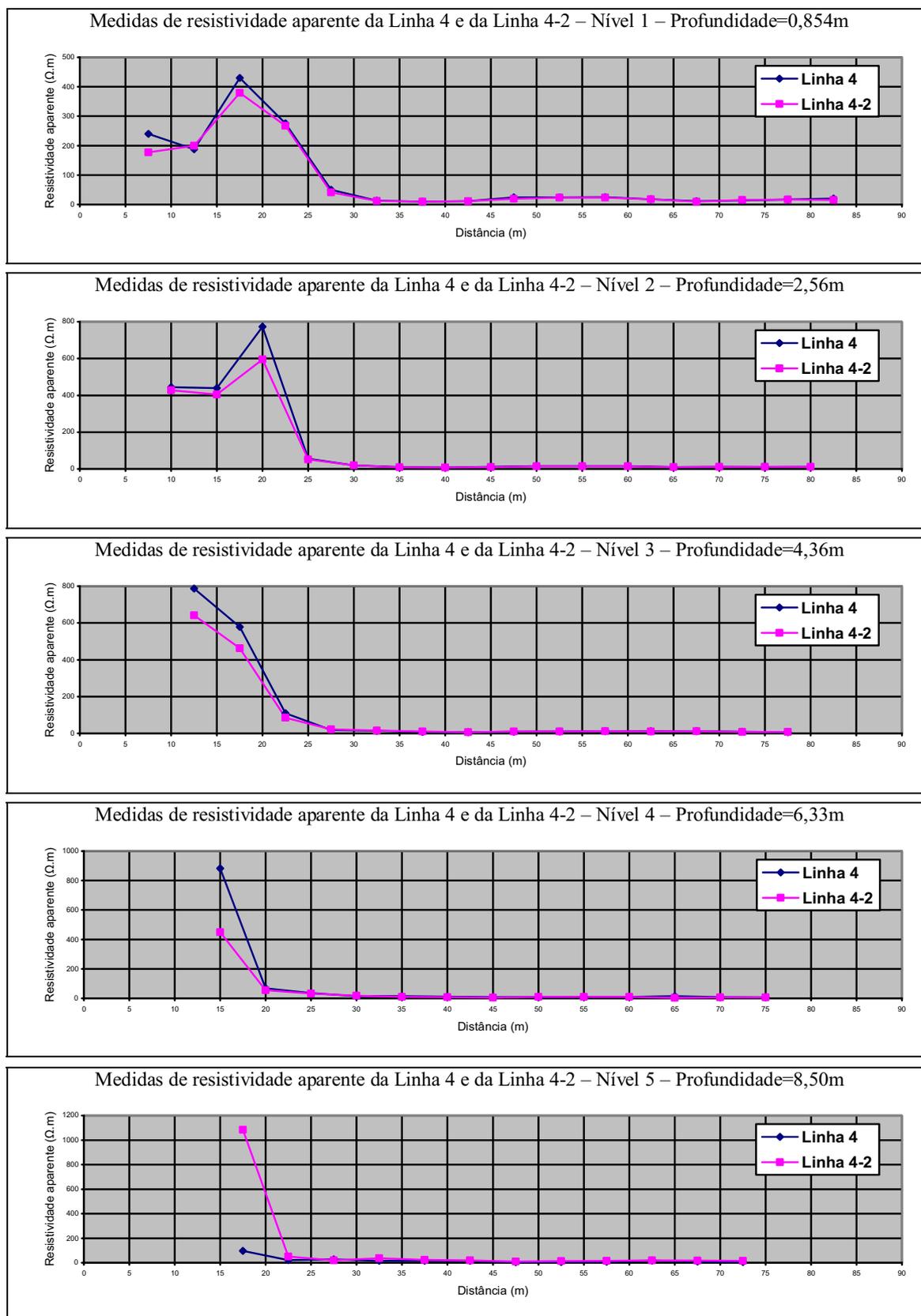


Figura 5.28: Variação da resistividade aparente da Linha 4 e da Linha 4-2 conforme o nível de investigação (profundidades teóricas segundo o Res2dinv, v. 3.4).

5.6 Mapas de resistividade aparente

Com a finalidade de se obter uma visão integrada dos resultados das linhas de Imageamento Elétrico, elaborou-se o mapa de resistividade aparente para cada nível de investigação.

5.6.1 Mapa de resistividade aparente: Nível 1

Na Figura 5.29, que representa a distribuição de resistividades aparentes no primeiro nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica de 1,70m), é possível verificar que os menores valores concentram-se na região central da imagem, que corresponde ao eixo maior do aterro controlado. Nesse local, onde foi executada a Linha 3, encontrou-se somente valores de resistividade aparente iguais ou menores a $50\Omega.m$, indicando contaminação por chorume. Os valores de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10\Omega.m$) encontrados no centro da imagem e destacados por círculos vermelhos podem ser relacionados às “lagoas” do sistema de recirculação de chorume existentes no topo da cava de resíduos (Figura 1.3).

A seta vermelha no canto inferior direito da imagem indica o provável sentido do fluxo subterrâneo principal de contaminantes, relacionado à zona de baixa resistividade ($\rho_a \leq 50\Omega.m$) nessa porção do mapa. O sentido do fluxo de contaminantes é, aproximadamente, o mesmo do fluxo d'água subterrâneo, determinado através das SEV e do mapa potenciométrico.

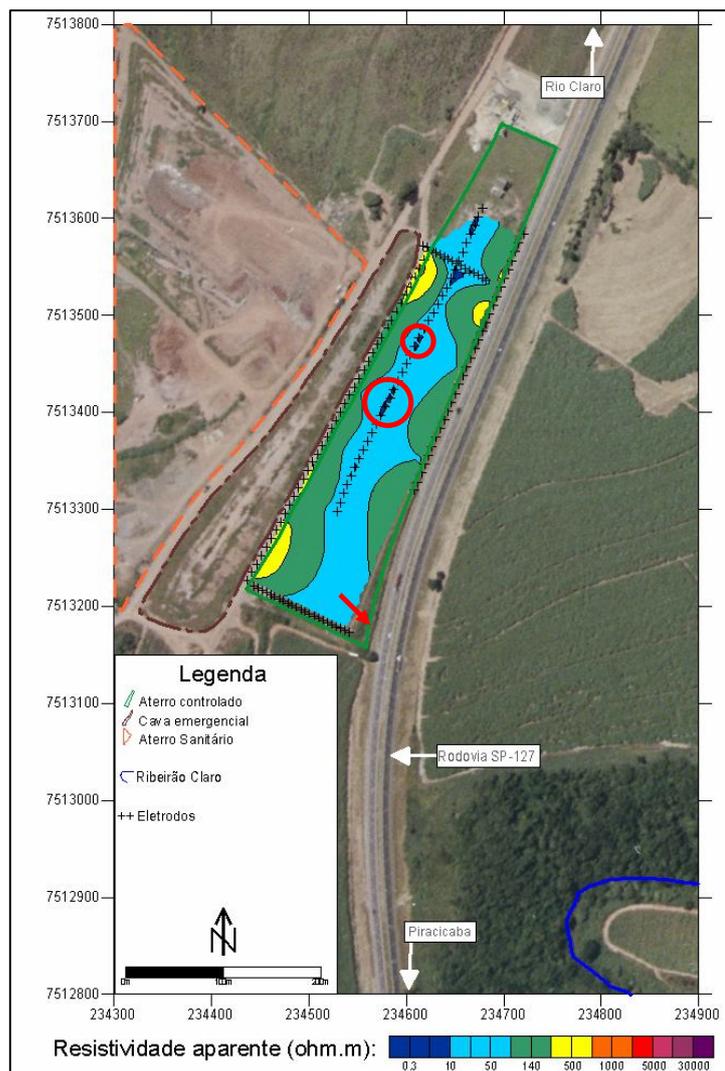


Figura 5.29: Mapa de resistividade do primeiro nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=1,70m).

5.6.2 Mapa de resistividade: Nível 2

No mapa referente ao segundo nível de investigação (Figura 5.30), com profundidade teórica de 5,10m, pode-se observar o sentido principal de migração do percolado para SE (seta vermelha), assim como na Figura 5.29. O sentido do fluxo acompanha, aproximadamente, a declividade da topografia, a qual pode ser verificada no modelo digital do terreno – MDT – do aterro, na Figura 3.3 do item 3.1.

A essa profundidade pode-se notar a existência de um fluxo secundário de contaminantes (setas laranjas), cujo sentido é em direção à estrada não-pavimentada existente entre o aterro controlado e a cava de emergência, conforme pode ser observado na Figura

5.30. Este fluxo pôde ser constatado em campo, como visto na Figura 5.31, aflorando pela parede externa da cava de resíduos.

Na porção central da imagem podem ser verificadas zonas de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10 \Omega.m$), corroborando as informações da Linha 3 e indicando tratar-se de provável concentração de percolado ocasionada pela existência das “lagoas” de chorume no topo da cava de resíduos.

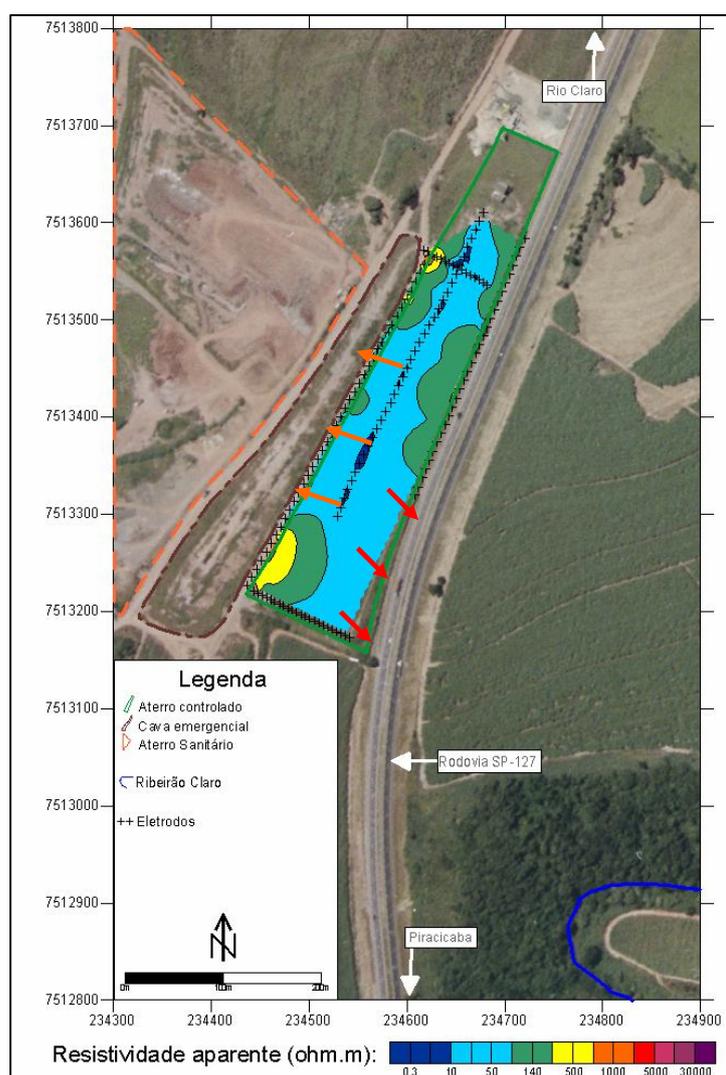


Figura 5.30: Mapa de resistividade do segundo nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=5,10m).



Figura 5.31: Chorume aflorando através da parede externa da cava de resíduos e migrando em direção à estrada não pavimentada.

5.6.3 Mapa de resistividade aparente: Nível 3

No terceiro nível de investigação (Figura 5.32), a uma profundidade teórica de 8,70m, é notável a grande zona de baixa resistividade ($\rho_a \leq 50 \Omega.m$), ocupando a quase totalidade do mapa e indicando contaminação do subsolo. Quando comparado aos mapas anteriores, este mapa do terceiro nível apresenta a zona de baixa resistividade com maior área, relativamente aos segundo e primeiro níveis, explicitando que a migração do percolado é regida por dois sentidos de fluxo: um vertical, já que atinge profundidades cada vez maiores, e um horizontal, fazendo com que ocorra a dispersão do contaminante em direção às laterais do aterro (setas vermelhas e laranja).

Destacada por uma elipse vermelha, encontra-se uma grande anomalia condutiva ($\rho_a \leq 10 \Omega.m$), provavelmente originada pelo fluxo de percolado das “lagos” de chorume do topo da cava (Figura 1.3). Essa zona de muito baixa resistividade reforça a hipótese levantada para explicar a evolução da Linha 5, apresentada no item 5.4.6. Apesar do local de execução da Linha 5 estar a uma cota média, aproximada, de 579m, o topo da cava de resíduos juntamente com as “lagos” de chorume encontram-se em uma cota média, aproximada, de 581m, fazendo com que ocorra migração do chorume em direção à estrada não-pavimentada (representada pelas setas laranjas).

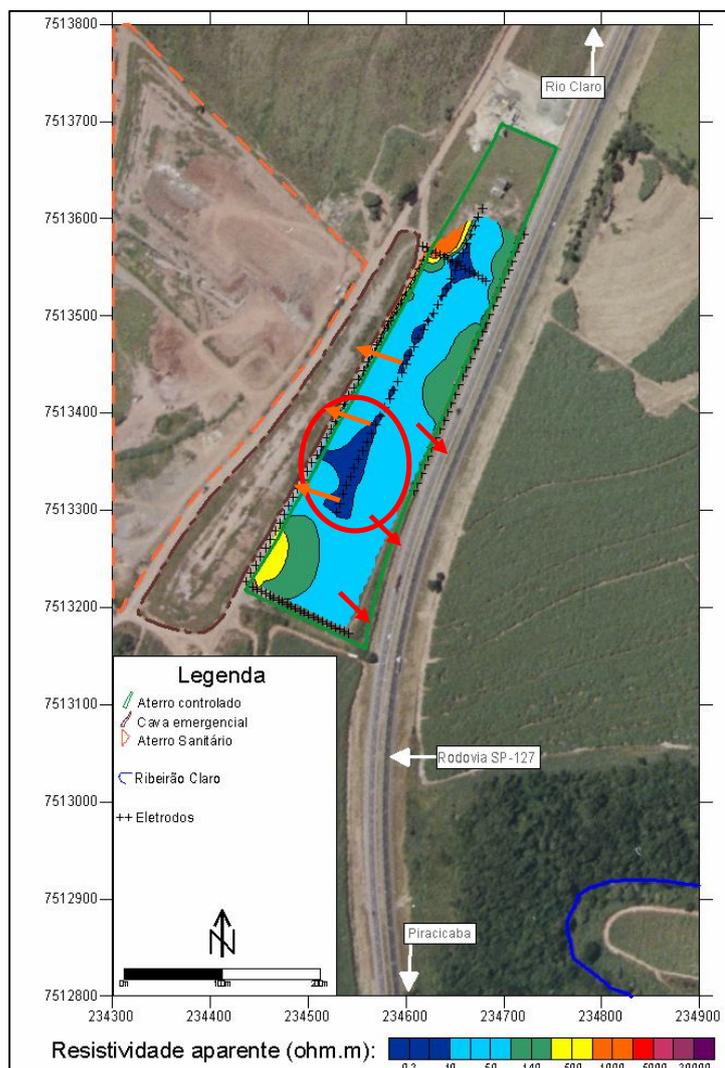


Figura 5.32: Mapa de resistividade do terceiro nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=8,70m).

5.6.4 Mapa de resistividade aparente: Nível 4

No quarto nível de investigação, apresentado na Figura 5.33, nota-se a quase totalidade do mapa afetada pela contaminação por chorume. São exceções os dois cantos (superior e inferior) do lado oeste do aterro, que ainda conservam valores de resistividade de ambiente sem contaminação. Nesse nível ficam mais evidentes as zonas de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10 \Omega.m$) concentrando-se na porção oeste do aterro e destacadas por elipses vermelhas, assim como verificadas na Linha 5.

Devido às irregularidades existentes em subsuperfície, ocasionadas pelos resíduos e pelo material utilizado na cobertura dos resíduos das camadas inferiores, e até mesmo pela topografia da base do aterro (a profundidade teórica desse nível é de 12,7m, o que corresponde, aproximadamente, à profundidade da base do aterro em relação ao topo da cava de resíduos), é

possível que existam divisores do fluxo de contaminante aproximadamente como representado na Figura 5.33. As linhas amarelas contínuas representam os divisores e as setas amarelas indicam o sentido e a velocidade do fluxo: maior é a seta quanto maior é a velocidade.

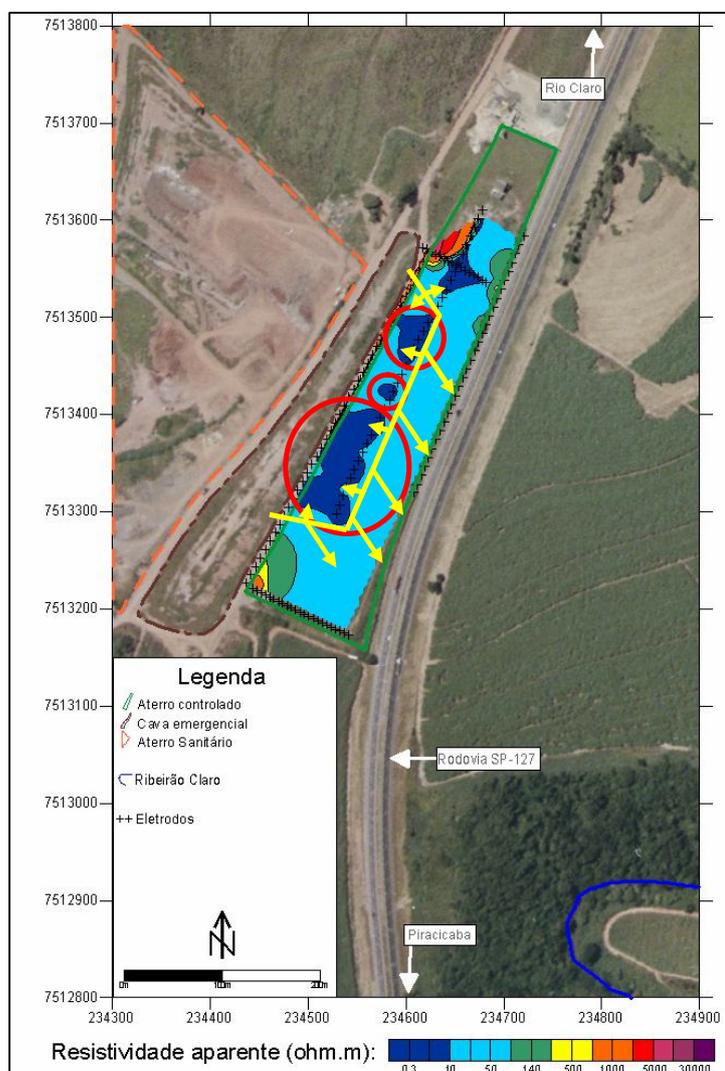


Figura 5.33: Mapa de resistividade do quarto nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=12,7m).

Essa hipótese é, em parte, sustentada pela Figura 5.31, que exhibe um fluxo de chorume aflorando pela parede externa da cava de resíduos e dirigindo-se para a estrada não pavimentada. É provável que o chorume aflorante seja somente uma parcela do fluxo secundário, que migra em subsuperfície, direcionando-se à estrada.

Justificada pela topografia local, a velocidade do fluxo que migra para leste deve ser maior que o fluxo que migra para oeste. Assim, a dispersão do percolado, ajudada pelo fluxo d'água subterrâneo, deve ser maior para a direção leste, tornando menor a concentração de íons e

aumentando, relativamente, a resistividade aparente nessa região. Seguindo o mesmo raciocínio, a dispersão do percolado que migra para oeste deve ser relativamente menor, ocasionando a concentração de íons nessa região e conseqüente diminuição da resistividade aparente.

Entretanto, a confirmação dessa hipótese somente seria possível com a execução de novos ensaios geofísicos, que pudessem revelar a existência de irregularidades em subsuperfície e causando a divisão do fluxo de contaminante.

5.6.5 Mapa de resistividade aparente: Nível 5

O mapa do quinto e último nível de investigação (profundidade teórica de 17,0m) somente vem a reforçar a hipótese defendida nos comentários do mapa do quarto nível.

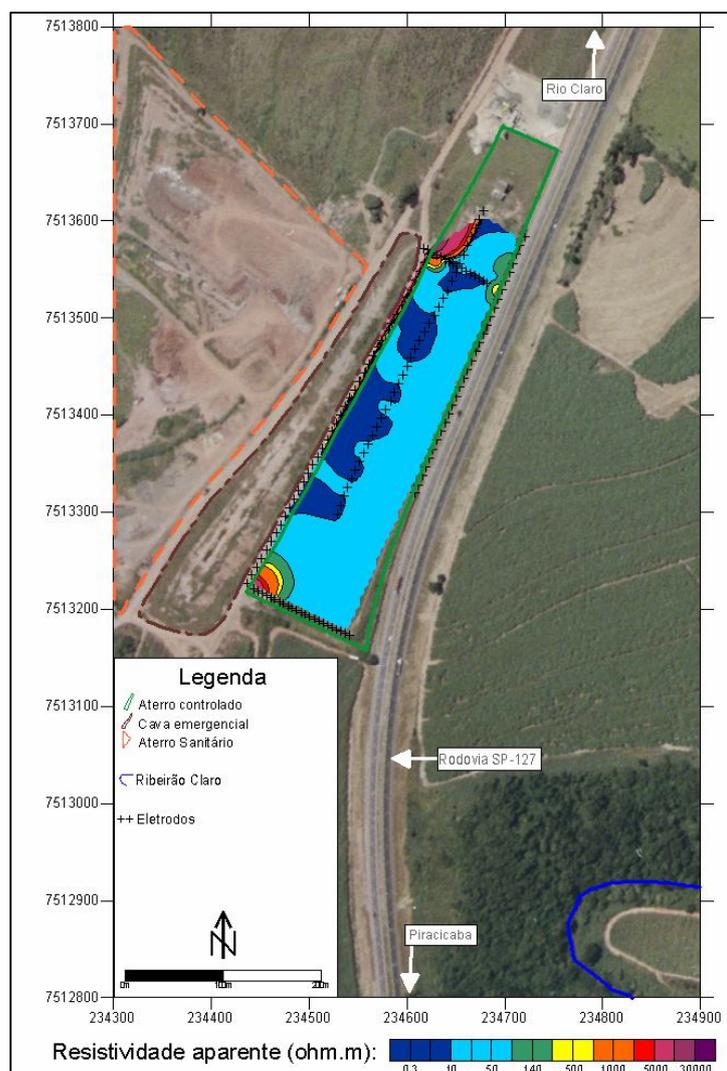


Figura 5.34: Mapa de resistividade do quinto nível de investigação das linhas de IE (profundidade teórica=17,0m).

Na porção oeste do mapa (Figura 5.34) encontram-se zonas de muito baixa resistividade ($\rho_a \leq 10 \Omega.m$) e que podem ser causadas pela concentração de íons metálicos devido à geometria da base do aterro.

Relativamente aos outros níveis de investigação, o quinto nível é o que apresenta maior ocorrência de zonas de muito baixas resistividades, explicitando a migração vertical dos contaminantes.

Na Figura 5.35, foram integrados os cinco mapas de resistividade aparente, de modo que se pode observar os cinco níveis de investigação simultaneamente, facilitando o entendimento e a interpretação através de uma figura em três dimensões. No primeiro nível de investigação é mostrada a posição dos eletrodos dos cinco ensaios, representados pelo caractere +.

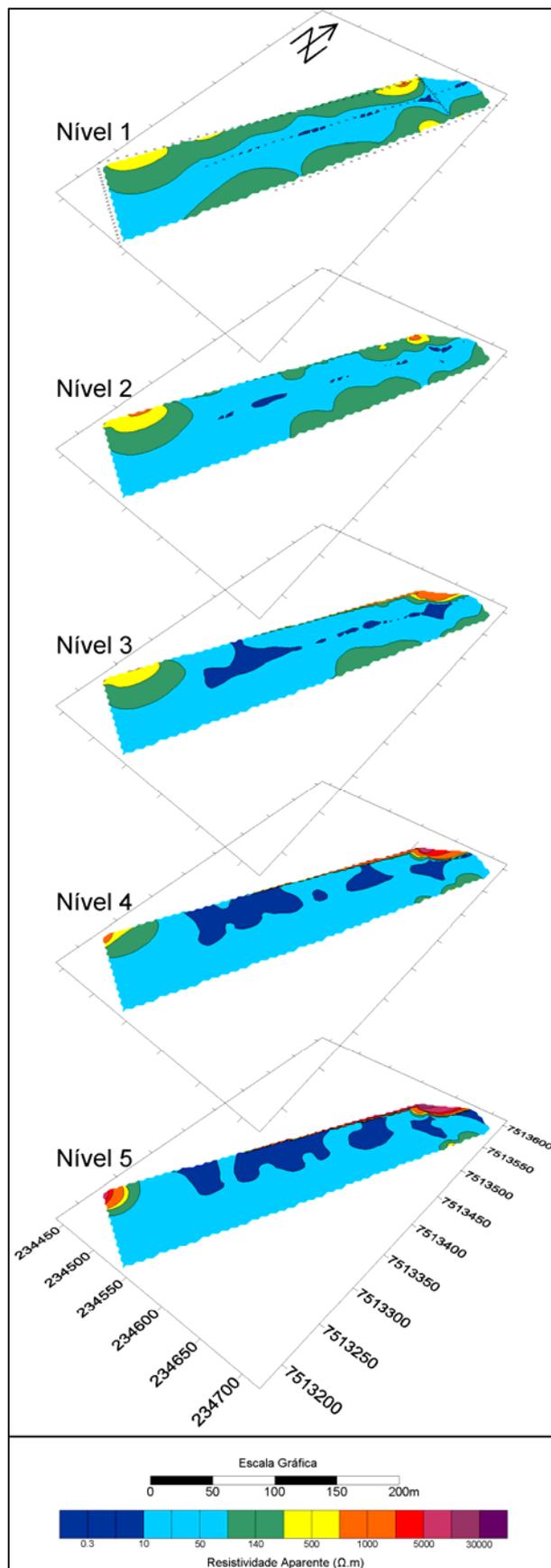


Figura 5.35: Integração dos mapas de resistividade dos cinco níveis de investigação.

Capítulo 6 – Conclusões

6.1 Em relação à metodologia adotada

6.1.1 Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

Os ensaios geofísicos do tipo SEV permitiram caracterizar e identificar – em função da espessura, profundidade e resistividade – diferentes estratos geoeletricos, associando-os com a geologia local (interpretação). Em suma, as SEV 01 a 07 permitiram caracterizar e identificar duas formações geológicas distintas: a Formação Rio Claro e a Formação Corumbataí, sotoposta à primeira.

Por meio das SEV 01 a 07, associou-se as diversas faixas de variação de valores de resistividade aos seguintes materiais geológicos (Tabelas 6.1 e 6.2):

Formação Rio Claro	
Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Arenoso com contaminação e saturado	2 a 12
Arenoso com contaminação	22 a 65
Arenoso com intercalação de argilito	108 a 197
Arenoso saturado	211 a 270
Arenoso seco	403 a 5446
Arenoso com conglomerados	10400 a 11555

Tabela 6.1: Materiais geológicos identificados da Formação Rio Claro e suas respectivas variações de valores.

Formação Corumbataí	
Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Silto-argiloso não fraturado	36
Silto-argiloso fraturado	62 a 172
Silto-arenoso fraturado	192

Tabela 6.2: Materiais geológicos identificados da Formação Corumbataí e suas respectivas variações de valores.

Nas adjacências do aterro controlado, a Formação Rio Claro ocorre entre as cotas 581m e 570m, com espessura variando entre 13m e 24m. O topo da Formação Corumbataí ocorre entre as cotas 566m e 554m. Sua espessura, porém, não pôde ser determinada devido à abertura máxima empregada dos eletrodos **AB** não ser suficiente para esse tipo de investigação (ver item 2.6.1).

As SEV do Grupo 1 permitiram, também, interpretar a profundidade do nível freático local – entre 9,10m e 14,80m –, sendo que este ocorre entre as cotas 557m e 569m, e tem sentido de fluxo para sudeste (SE), em direção ao Ribeirão Claro (Figura 5.11).

Todos os valores de resistividade, de espessura e de profundidade dos níveis geoeletricos e de suas respectivas formações geológicas estão de acordo com a literatura consultada.

A camada composta por sedimentos predominantemente arenosos com estruturas conglomeráticas aparenta possuir continuidade no eixo SEV 03 – SEV 05, hipótese reforçada pelos resultados de uma sondagem SPT realizada próxima ao limite norte do aterro, assim como as SEV em questão (ver itens 5.1.1.1 e 5.1.1.2).

A lente de argilito intercalada aos sedimentos arenosos da Formação Rio Claro, parece ter continuidade no eixo SEV 01 – SEV 03, mas não se pode garantir que atinja a região dos ensaios SEV 04 a SEV 07, já que não foi possível identificá-la nos resultados de tais ensaios.

O Grupo 1 de SEV permitiu caracterizar geoeletricamente os sedimentos predominantemente siltosos da Formação Corumbataí em função da porção de argila/areia e de ocorrência de fraturamento.

A variação da porção argila/areia dos sedimentos siltosos da Formação Corumbataí aparenta ocorrer da seguinte forma: sedimentos predominantemente silto-arenosos na porção NO da área de estudos (SEV 05) e sedimentos predominantemente silto-argilosos no restante da área (SEV 01 a 04, 06 e 07).

A ocorrência de sedimentos siltosos fraturados e de sedimentos siltosos não-fraturados da Formação Corumbataí parece obedecer, aproximadamente, ao eixo NE–SO, onde a NE (SEV 03) os sedimentos mostram-se não-fraturados e em direção a SO (SEV 01, 02, 04 a 07) apresentam-se fraturados.

As SEV do Grupo 2 (SEV 08 e 09) permitiram identificar a forma de disposição dos resíduos no aterro controlado em camadas, conforme resumido na Tabela 6.3:

Estrutura do aterro	
Resíduos	Material de cobertura
Número de camadas: 3	Número de camadas: 3
Intervalo de variação da resistividade das camadas: 3 Ω .m a 16 Ω .m	Intervalo de variação da resistividade das camadas: 12 Ω .m a 120 Ω .m
Espessura média das camadas: 3,00m	Espessura das camadas: 0,50m a 1,50m

Tabela 6.3: Estrutura do aterro controlado de Rio Claro (SP).

Ainda por meio do Grupo 2, identificou-se um estrato geoeletrico sotoposto à sucessão de camadas material de cobertura/resíduos, com resistividades entre 1760 Ω .m e 3253 Ω .m, o qual foi interpretado como sedimentos predominantemente arenosos da base do aterro (ver itens 5.1.2 e 5.2.3).

As seções representativas do subsolo do item 5.2, gerados com base na interpretação das SEV, auxiliaram no entendimento da geologia local, explicitando a ocorrência e a disposição das camadas litológicas.

Enfim, o Método da Eletroresistividade aplicado com a técnica da SEV e arranjo Schlumberger, na área do aterro controlado de Rio Claro (SP), mostrou-se eficaz na caracterização geoeletrica da cava de resíduos e do entorno do aterro, determinando níveis geoeletricos associados às formações geológicas, ocorrência de contaminação por chorume, profundidade do substrato rochoso local (Fm. Corumbataí), profundidade do nível freático e sentido do fluxo de água subterrânea.

6.1.2 Imageamentos Elétricos (IE)

As seis linhas de Imageamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo permitiram identificar zonas de resistividade distribuídas tanto em profundidade quanto em extensão lateral, em todo o entorno do aterro. Tais zonas exibem grande variação de valores de resistividade, entre 0,3 Ω .m e 30000 Ω .m.

Por meio da Linha 6, realizada a montante do aterro e em local isento de contaminação por chorume, interpretou-se que o *background* da área apresenta valores de resistividade iguais ou

acima de $140\Omega.m$. Entretanto, o método de investigação não pôde diferenciar os sedimentos da Fm. Rio Claro dos sedimentos da Fm. Corumbataí.

Os resultados das Linhas 2 e 4 permitiram definir duas regiões distintas: a primeira à esquerda das seções, com resistividades iguais ou maiores a $140\Omega.m$, interpretada como o limite oeste da cava de resíduos; e a segunda, nas porções central e esquerda das seções, com resistividades iguais ou menores a $50\Omega.m$, interpretada como a cava de resíduos.

Por meio da Linha 3, executada no topo do aterro, interpretou-se que todo o material encontrado em subsuperfície, com resistividades iguais ou menores a $50\Omega.m$, corresponde à cava de resíduos. Entretanto, não foi possível explicitar a sucessão de camadas de resíduos e de material de cobertura contaminado por chorume, como feito por meio das SEV 08 e 09.

Desse modo, conclui-se que as investigações com IE e seus resultados apresentados como seções de resistividade aparente mostraram-se eficientes no entendimento da geometria da cava de resíduos.

Os resultados das Linhas 1 e 5 indicam dois possíveis sentidos de fluxo da pluma de contaminação: (1) em direção à Rodovia SP 127, acompanhando, aproximadamente, o declive da topografia; (2) em direção à estrada não-pavimentada entre o aterro controlado e a cava emergencial.

O fluxo principal de contaminantes tem sentido principal para sudoeste (SO) dentro do aterro e para sudeste (SE) fora da área do aterro, acompanhando, aproximadamente, o fluxo da água subterrânea. O fluxo secundário tem sentido oeste (O) dentro do aterro.

A integração dos dados de IE em mapas de resistividade permitiu visualizar e determinar a extensão tridimensional e os sentidos dos fluxos de contaminantes. Por isso, afirma-se que constituem uma eficiente maneira para se compreender o comportamento de plumas de contaminação em estudos semelhantes.

As “lagoas” do sistema de recirculação de chorume (Figura 1.3) existentes no topo do aterro controlado mostraram-se contribuidoras potenciais dos dois fluxos de contaminantes detectados.

6.2 Em relação ao monitoramento temporal

O procedimento de monitoramento temporal adotado – através da comparação das seções de resistividade obtidas nos mesmos locais em diferentes períodos – permitiu verificar alterações dos valores de resistividade ocorridas no intervalo entre a realização das duas séries de ensaios geofísicos. Também permitiu determinar que a pluma de contaminação adquiriu dimensões maiores relativamente àquelas determinadas por Moura (2002), justificada com base,

principalmente, na comparação entre as seções CEIP(2) e Linha 2, e entre as seções CEIP(6) e Linha 5.

Do mesmo modo, comparando-se as seções CEIP(6) e Linha 5, percebe-se que a pluma de contaminantes atingiu profundidades maiores em 2008, em comparação às registradas em 1999.

O avanço da pluma de contaminação em direção ao sul e ao oeste da área do aterro pôde ter recebido significativa contribuição das “lagoas” do sistema de recirculação de chorume, mantidas quase que constantemente cheias.

Por outro lado, comparando-se, respectivamente, as seções CEIP(1) e Linha 1, CEIP(3) e Linha 3, e CEIP(4) e Linha 4, identificou-se variações de resistividade ocorridas no intervalo entre a realização das duas séries de ensaios geofísicos. De um modo geral, essas variações refletem-se em discretos incrementos nos valores de resistividade e na distribuição das zonas de resistividade.

A elevação dos valores de resistividade pode representar um reflexo da diminuição da produção de chorume pelos resíduos existentes no local. Essa constatação pode significar que, em áreas de disposição de resíduos sólidos contaminadas por chorume, o valor da resistividade elétrica dos materiais em subsolo parece ser inversamente proporcional ao volume de chorume.

As alterações dos valores de resistividade podem indicar, ainda que discretamente, uma tendência de recuperação natural do ambiente, fazendo com que tais valores retornem ao nível do *background*. Entretanto, para que seja possível chegar-se a essa conclusão, é necessária a realização de novos ensaios geofísicos comprobatórios.

6.3 Em relação às variações sazonais

Assim como verificado em trabalhos anteriores realizados na mesma área de estudos, também se verificou variações significativas nos valores de resistividade em função da umidade presente no solo, determinada por períodos de chuvas e estiagem.

De um modo geral, as resistividades dos ensaios realizados após as chuvas, tanto em 1999 quanto em 2008, apresentam menores valores quando comparadas aos ensaios realizados no período de estiagem (ver item 5.5.1).

Nas seções dos ensaios CEIP(1) e CEIP(1)-2, a variação dos valores máximos chegou a 90%, e nas seções da Linha 1 e da Linha1-2, a variação dos valores mínimos foi de 99,4%.

A diminuição da resistividade no período pós-chuvas é causada pela quantidade relativamente maior de íons dispersos provenientes dos resíduos, favorecida pela alteração significativa do volume de águas pluviais infiltradas e aumentando, assim, a geração de percolado dentro da cava.

Capítulo 7 - Recomendações

7.1 Recomendações com relação ao Monitoramento Temporal

Com o término do presente projeto de pesquisa, ficam algumas recomendações para futuros trabalhos da mesma natureza:

- Realização de ensaios semelhantes, novamente, num período de 5 ou 10 anos, dando continuidade ao monitoramento temporal da área
- Realização de análises físico-químicas em amostras de solo e de água, coletadas no local, para comprovar a contaminação e determinar os níveis de contaminantes
- Inclusão dos métodos sísmicos, de GPR e de IP nos trabalhos futuros, de forma a reduzir ambigüidades na interpretação dos resultados
- Compilação completa de todos os ensaios geofísicos realizados na área do aterro, e de seus resultados, para facilitar a continuação do monitoramento temporal. Para tanto, todos os dados levantados na presente pesquisa estão disponibilizados nos anexos, ao final desse volume
- Manutenção de uma padronização nos próximos ensaios geofísicos a serem executados na área, pois em trabalhos anteriores verificou-se a adoção das mais diferentes metodologias de investigação, dificultando a continuidade de um possível monitoramento
- Realização de uma série de ensaios investigativos na cava emergencial, buscando determinar o grau de contaminação e as dimensões da pluma de contaminação no local, pois, pelo que se pôde verificar durante o levantamento bibliográfico, em momento algum ensaios semelhantes foram ali executados.

7.2 Recomendações com relação ao aterro controlado

Diante da situação verificada, durante as etapas de campo, no aterro controlado de Rio Claro (SP), recomenda-se cessar imediatamente o lançamento de chorume retirado do aterro sanitário (em funcionamento) nas “lagos” do sistema de recirculação de chorume do aterro desativado. Com a constante infiltração de percolato na área desativada, as dimensões da pluma de contaminação estão, hoje, maiores em relação ao verificado em 1999. Mostra-se necessário rever e reavaliar o sistema de coleta e tratamento de chorume do aterro sanitário.

A recuperação e a reativação dos poços de monitoramento, juntamente com a retomada do processo de monitoramento dos índices de contaminação das águas subterrâneas por meio de análises físico-químicas mostram-se medidas necessárias e constituem uma forma de auxílio eficiente para o procedimento de monitoramento temporal da pluma de contaminação por meio do método da eletrorresistividade, proposto no presente trabalho.

A implantação de um projeto de recuperação e/ou revitalização da área do aterro, assim como realizada nos aterros desativados de Sapopemba, em São Paulo, e de Andradina (SP), ou ainda a instalação de equipamentos que capturem os gases gerados pela decomposição dos resíduos e os convertam em energia elétrica e créditos de carbono, como nos aterros Bandeirantes e São João, em São Paulo, mostram-se como opções ambientalmente corretas a serem adotadas. Ações de recuperação de áreas contaminadas por resíduos sólidos são previstas no Artigo 51 da Lei Estadual nº 12.300/2006, a Política Estadual de Resíduos Sólidos.

Por fim, projetos de conscientização da população municipal envolvendo a prática dos três R's – Reduzir, Reaproveitar e Reciclar – mostram-se igualmente importantes no sentido de se aumentar a vida útil do novo aterro sanitário, na medida em que o volume de resíduos ali depositados tornar-se menor.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ANTUNES, C. **Geografia e participação**. São Paulo: Scipione, 1996. 184p.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 332p.

BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S.A. **Rio Claro**. São Paulo, 2006. 1 fotografia aérea. Escala 1:30.000.

BERRÍOS, R. M. **O lixo domiciliar: a produção de resíduos sólidos residenciais em cidade de porte médio e a organização do espaço – o caso de Rio Claro, SP**. 175f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 1986.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP**. 169f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 1997.

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geoeletricos Aplicados: Módulo: Hidrogeologia**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/geoeletricos-V3.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2007.

BRASIL. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2000**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2008.

_____. **Contagem da População – 2007**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/contagem.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2008.

_____. **Indicadores de desenvolvimento sustentável – 2008**. Disponível em: <<ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/ids/ids2008.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2008.

BRAZ, J. A.; SILVA, C. L. Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** Florianópolis: 2001. Paginação Irregular.

CAVALCANTI, S. S.; SATO, H. K.; LIMA, O. A. L. Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p.155-168, mai/ago. 2001.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **A evolução da coleta seletiva e reciclagem de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Disponível em:

<<http://www.cempre.org.br/imprensa.php?codeps=fHx8fHx8fHx8fHx8fDE1>>. Acesso em: 5 dez. 2008.

CEPAM – Fundação Prefeito Faria Lima (Estado de São Paulo). **Lixo: o desafio do futuro.**

Disponível em:

<http://www.cepam.sp.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=220&Itemid=21>. Acesso em: 3 dez. 2008.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Glossário Ecológico Ambiental.** Disponível em:

<http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/glossario/glossario_a.asp>. Acesso em: 8 dez. 2008.

_____. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas: Métodos físicos.** 1999.

Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp>. Acesso em: 6 dez. 2006.

_____. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares - 2007.** Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/publicacoes.asp>>. Acesso em: 1 dez. 2008.

COLLETT, L. S. History of Induced-Polarization Method. In: FINK, J. B. *et al.* **Induced Polarization: applications and case histories.** Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 5-21.

COOPERATIVA quer estimular reciclagem em RC. **Jornal Cidade de Rio Claro**, Rio Claro, 25 out. 2007. Disponível em: <<http://jornalcidade.uol.com.br/paginas.php?id=17182>>. Acesso em: 5 dez. 2008.

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP.** 1983. 171f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1983.

EMERGÊNCIA no aterro sanitário é necessária para atender notificação da CETESB. **Jornal Diário do Rio Claro**, Rio Claro, 27. mar. 2009. Disponível em:

<<http://www.diariodorioclaro.com.br/product.asp?pid=18492>>. Acesso em: 21 jul. 2009.

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**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p.129-138, jan/mar. 2006.

FADINI, P. S.; FADINI, A. A. B. **Lixo: desafios e compromissos.** Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química. n. 1, p.9-18, mai. 2001.

FERREIRA, F. J. F. **Técnicas e Aplicações de Imageamentos Elétricos 2-D e 3-D.** Curitiba: LPGA, DG, SCT, UFPR, 2002. 69p.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental.** 2000. 174f. Tese

(Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2000.

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**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p.51-59, jan/mar. 2005.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa**. 2007. 215f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2007.

GARCIA, H. C.; GARAVELLO, T. M. **Lições de Geografia: Iniciação aos estudos geográficos**. São Paulo: Scipione, 1996. 144p.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer v. 8.01**. Golden Software, 2002.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.4**: 2D Resistivity and IP Inversion. Geotomo Software, 2002.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.56 for Windows 98/Me/2000/NT/XP**: User's Manual. Penang, Malasya: Geotomo Software, 2007. 138p.

HELLER, L.; MÖLLER, L. M. Saneamento e Saúde Pública. In: _____. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. v. 2. 10 p.

HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W. *et al.* **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 421-444.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. 1 mapa. Escala 1:1.000.000.

INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, n. 40, p.789-817. 1975.

INTERPEX LIMITED. **IX1D v. 2.17**: User's Manual. Golden, Colorado: Interpex Limited, 2008. Não paginado.

INTERPEX LIMITED. **IX1D v. 2.17**. Interpex Limited, 2008.

KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical Methods in Geophysical Prospecting**. Oxford, Great Britain: Pergamon Press. 1966. 517p.

KOEFOD, O. **Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company. 1979. 276p.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p.357-374, jul/set. 2006.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 354p.

MASSAI, L. **Pesquisa aponta riscos do descarte de pilhas**: O professor Lélío Massai, da PUC-Campinas, critica a legislação que permite o depósito de algumas pilhas e baterias em aterros sanitários. [jan 2005]. Entrevistador: Tatiana Fávaro. Disponível em: <http://www.cpopular.com.br/cenarioxxi/conteudo/mostra_noticia.asp?noticia=1346103&area=2259&authent=269FEA0212FEDB2154EDC91535DCEA>. Acesso em: 2 jul. 2008.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Office Excel 2003**. Microsoft Corporation, 2003.

MOREIRA, C. A. **Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares**. 2009. 159f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2009.

MOREIRA, C. A.; AQUINO, W. F.; DOURADO, J. C. Aplicação do método eletromagnético indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 25. n. 4. p.413-420, out/dez. 2007.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 14. n. 2. p.257-264, abr/jun. 2009.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Caracterização geoeétrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Ambiente e Água**. v. 4. n. 2. p.106-114, mai/ago. 2009.

MOREIRA, C. A.; DOURADO J. C. Análise temporal da pluma de contaminação por meio de GPR. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. Paginação Irregular.

MOREIRA, C. A.; DOURADO J. C. Monitoramento da atenuação natural de pluma de contaminação pelo método de radar de epenetração no solo (GPR). **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 25. n. 4. p.389-398, out/dez. 2007.

MOURA, H. P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geoeétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 231f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2002.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 22, n. Especial, p. 129-139, 2003.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida aplicados no estudo do aterro controlado de Piracicaba-SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 35-43, 2007.

NEVES, R. L. S. **Avaliação da contaminação de óleo no ambiente estuarino da Baía de Guanabara (RJ) pela determinação fluorimétrica de Hidrocarbonetos Policíclicos**

- (HPAS) na bilis de peixes *Mugil liza*.** 2006. 120f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/db2www/PRG_0490.D2W/INPUT?CdLinPrg=pt>. Acesso em: 15 dez. 2008.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422p.
- OLIVA, A. **Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no município de Rio Claro – SP.** 2002. 71f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo. 2002.
- OLIVEIRA, J. B. et al. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Araras.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1982. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, J. B. et al. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Campinas.** Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 172p.
- OLIVEIRA, J. B. et al. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Piracicaba.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1989. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, J. B. et al. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Ribeirão Preto.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 133p. Disponível em: <<http://library.wur.nl/isric/index2.html?url=http://library.wur.nl/WebQuery/isric/6827>>. Acesso em: 6 nov. 2008.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **Relatório de Desenvolvimento Humano – 2006: A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água.** Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/arquivos/rdh/rdh2006/rdh2006.zip>>. Acesso em: 9 nov. 2008.
- ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua.** Madrid, España: Paraninfo, 1972. 523p.
- PARASNIS, D. S. **Principles of Applied Geophysics.** 2. ed. London: London Chapman and Hall, 1972. 214p.
- PRADO, H. et al. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1981. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética.** 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 516p.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Newton Mizuho Miura. **Meio Ambiente: Aterros em valas solucionam problema do lixo nos pequenos municípios.** 2003. Disponível em: <<http://www.web-resol.org/arquivoNot/Aterros%20em%20vala.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2008.
- SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R.; PORSANI, J. L.; BORGES, W. R. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p.181-186, set/dez. 2002.

- SIBSON, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation. In: BARNETT, V. **Interpreting Multivariate Data**. Chichester: John Wiley, 1981. p. 21-36.
- SHERIFF, R. E. **Geophysical Methods**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1989. 605p.
- SILVA, A. C. **Potabilidade das águas subterrâneas do município de Ji-Paraná. Estudo de caso: bairro Nova Brasília**. 91f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2001.
- SILVA, J. E.; LOUREIRO, E. M. L.; ELIS, V. R.; HODO, F. Y.; PORSANI, J. L. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p.193-198, set/dez. 2002.
- SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 163-196.
- TANDEL, Y. R. **Contribuição ao estudo da poluição provocada no aquífero freático e no solo pelo aterro controlado da cidade de Rio Claro, SP**. 1998. 144f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 770p.
- TIPLER, P. A. **Física para engenheiros e cientistas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. v. 2, 476p.
- VIEIRA, E. A. **A questão ambiental do resíduo/lixo em Ribeirão Preto (SP)**. 153f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2002.
- WORLD BANK. **Solid Waste Management in LAC: Actual and Future CH4 Emissions and Reductions**. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTUWM/Resources/340232-1221149646707/Solid_Waste_Management_in_LAC.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2008.
- ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)**. 1994. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

ANEXO 1

CD-ROM com todos os arquivos de Sondagens Elétricas Verticais e Imageamentos Elétricos de Moura (2002) e Bortolin (2009).