

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

REGIANE VELOZO

**Caracterização geológico-geotécnica  
do lixão desativado de São Carlos-SP,  
com auxílio da geofísica**

São Paulo  
2006

REGIANE VELOZO

**Caracterização geológico-geotécnica  
do lixão desativado de São Carlos-SP,  
com auxílio da geofísica**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Área de concentração: Geotecnia Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Osni José Pejon

São Paulo

2006

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Regiane Velozo

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Área de concentração: Geotecnia Ambiental

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Banca Examinadora:

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Ao Fabrizzio, à minha mãe e  
aos meus irmãos Ricardo e Rozane

## AGRADECIMENTOS

À DEUS pela minha existência e por sua constante companhia;

À minha mãe e irmãos pelo amor, incentivo e apoio;

Ao Prof. Dr. Osni José Pejon, pela orientação, colaborando com críticas e sugestões para melhoria e andamento desse trabalho;

Ao Prof. Dr. Lázaro Valentim Zuquette pelas contribuições e sugestões ao trabalho;

Ao Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, por toda infra- estrutura oferecida;

Ao Departamento de Astronomia e Geofísica (IAG), da Universidade de São Paulo, pela disponibilização do equipamento para realizar os ensaios geofísicos, em especial ao Prof. Dr. Vagner Roberto Elis, por ter acompanhado os ensaios e pela prontidão e disponibilidade em auxiliar no tratamento dos dados geofísicos;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Capes, pela concessão da bolsa de pesquisa;

À da Prefeitura Municipal de São Carlos, em especial ao Paulo Mancini, pelas informações concedidas;

Aos proprietários da Fazenda Santa Madalena, Álvaro e Lucia, por disponibilizar a área para pesquisa;

Aos técnicos Seu Antônio, Décio, Dito, Zé Luis e Oscar, pelo auxílio nos ensaios de laboratório e nas saídas à campo, e ao Ademar pelo auxílio na coleta de amostras;

Aos funcionários Maristela, Neiva e Álvaro, sempre dispostos a ajudar na parte administrativa e Herivelto na parte de informática;

Ao Zé Caparica, pela amizade e disposição em ajudar com os dados geofísicos;

Aos amigos engenheiros feitos durante esta caminhada, Ovídio, Silvia, Jefersson, Cris, Thelma e Rafael, pela amizade, incentivo e auxílio nas disciplinas da engenharia;

À Nívea e Marcos, pelas sugestões e auxílio nos programas "novos", e pela tão importante amizade;

À Sylvia e Talles, grandes amigos, que tornaram os momentos difíceis mais fáceis;

Ao Fabrizzio, pelo amor, apoio, companheirismo e amizade, sempre;

Enfim, à todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho ou fizeram parte da minha vida neste período.

*Toda a nossa ciência, comparada com  
a realidade é primitiva e infantil – e, no  
entanto é a coisa mais preciosa que  
temos.*

*Albert Einstein (1879-1955)*

## RESUMO

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica**. 2006. 177f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Infelizmente os municípios brasileiros, em sua grande maioria, dispõem seus resíduos sólidos domiciliares sem nenhum controle, o que promove graves conseqüências, como contaminação do ar, do solo, das águas superficiais e subterrâneas. Este trabalho visou caracterizar geológica e geotecnicamente, com base em estudos geofísicos, o lixão desativado de São Carlos - SP, bem como analisar a evolução da contaminação já identificada por alguns autores anteriormente. Os resíduos foram dispostos inadequadamente nesta área por aproximadamente 17 anos, sobre os solos arenosos permeáveis da Formação Botucatu. Esta atividade cessou definitivamente em 1996, o que não finalizou o processo de contaminação, ainda atuante. Para investigação da evolução da pluma de contaminação realizaram-se caminhamentos elétricos (eletrorresistividade e polarização induzida), ensaios de infiltração e outros para caracterização dos materiais inconsolidados, associando estes dados aos já existentes. Os resultados mostram que a aplicação dessas técnicas permitiu caracterizar a situação de contaminação atual da área, mostrando que existe a propagação de uma pluma de contaminação com direção NW, e que verticalmente também pode estar ocorrendo contaminação. Essa contaminação no sentido vertical pode ser acentuada pela existência de uma descontinuidade sob o corpo do lixo, pela alta permeabilidade dos materiais arenosos da região, pela ausência de barreiras menos permeáveis e pela variação sazonal do nível d'água.

*Palavras-chave:* Resíduos sólidos urbanos; Resistividade elétrica; Ensaio de Infiltração, São Carlos.

## ABSTRACT

VELOZO, R. **Geological-Geotechnical characterization of the uncontrolled sanitary landfill of São Carlos-SP.** 2006. 177f. Dissertation (MS) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Unfortunately the Brazilian cities, in its majority, discharge its domestic solid wastes without any control, which produces grave consequences such as contamination of the air, earth, and both superficial and the groundwater. This work carried out a geological-geotechnical characterization and geophysical studies of the uncontrolled sanitary landfill of São Carlos – SP, and also the analysis of the evolution of the contamination previously identified by other authors in the area. The residues were disposed inadequately in this area for approximately 17 years, in an area constituted by porous soils overlapping sandstones of Botucatu Formation. This practice ceased completely in 1996, but the contamination process didn't stop up to now. For investigation of the development of the plume of contamination several procedures were used: geophysical surveys (eletrorresistivity and induced polarization), infiltration characterization testes of the unconsolidated materials and analysis of the results already existing. The results show that these techniques were enabled to characterizing the current situation of contamination of the area, showing that there is a propagation of a plume of contamination with direction NW, and that there also may be contamination occurring vertically. This contamination on the vertical direction may be allowed by the existence of a discontinuity under the sanitary landfill, high permeability of the sandy materials in the area, by the lack of less permeable layers and by the seasonal variation of the groundwater level.

*Keywords:* Solid domestic waste; Electrical resistivity, Induced polarization, Evaluation of Infiltration, São Carlos



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação esquemática de uma sondagem elétrica vertical.....	23
Figura 02 - Representação esquemática de um caminhamento elétrico.....	24
Figura 03 - Exemplo de condutivímetro e modo de operação (CETESB, 2001).....	26
Figura 04 - Exemplo de condutivímetro e modo de operação (CETESB, 2001).....	26
Figura 05 - Princípio de operação do método eletromagnético indutivo (Yokoyama, 2003)..	26
Figura 06 - Equipamento para operação do radar de penetração (CETESB, 2001).....	28
Figura 07 - Exemplo de modo de operação do radar de penetração (CETESB, 2001).....	28
Figura 08 - Localização da área de estudo (modificado de Gonçalves, 1986; Muro, 2000 e Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).....	33
Figura 09 - Localização da área de estudo em imagem de satélite (Imagem Landsat 7 – Miranda e Coutinho, 2001).....	35
Figura 10 - Figura 10: Localização da área de estudo na província de Cuestas Basálticas, segundo Almeida, 1964.....	36
Figura 11 - Vegetação na região do município de São Carlos, com indicação da área de estudo (modificado de SMA/SP, 2004).....	37
Figura 12 - Solos presentes na região do município de São Carlos, com indicação da área de estudo (modificado de Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia - baseado no levantamento pedológico semi-detalhado de estado de São Paulo <i>apud</i> Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).....	38
Figura 13 - Divisão de bacias hidrográficas na região da área de estudo (baseado em Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).....	41
Figura 14 - Foto da situação atual, com presença de resíduos, no córrego a jusante do corpo do lixo.....	42
Figura 15 - Localização do Aquífero Guarani (CETESB, 2004).....	43
Figura 16 - Mapa Geológico da região da área de estudo (modificado de Muro, 2000).....	46
Figura 17 - Arenito da Formação Botucatu presente na área de estudo.....	48

Figura 18 - Vista atual da área de estudo, a linha azul indica a antiga cava de resíduos.....	51
Figura 19 - Mapa com localização dos poços, linhas de caminhamento elétrico e contorno da cava de depósito dos resíduos. Topografia baseada nos mapas IGC folhas SF-23-Y-A-I-1-NE-(C, D, E e F) de escala 1:10.000 e contribuições de Álvares, 2000.....	55
Figura 20 - Equipamento Iris Syscal R2 utilizado no ensaio de resistividade e cargabilidade.....	56
Figura 21 - Representação esquemática do caminhamento elétrico executado.....	57
Figura 22 - Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração. ....	60
Figura 23 - Montagem do ensaio de infiltração IAD <i>in situ</i> .....	61
Figura 24 - Gráfico dos ensaios R,S e T, relacionando as três umidades, caracterizando a frente de molhamento.....	64
Figura 25 - Localização dos pontos onde foram coletadas amostras para os ensaios de caracterização de materiais inconsolidados. ....	66
Figura 26 - Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 0.....	70
Figura 27 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 0.....	71
Figura 28 - Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 1, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	72
Figura 29 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 1, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	73
Figura 30 - Figura 30: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 2, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	73
Figura 31 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 2, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	74
Figura 32 - Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 3, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	75
Figura 33 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 3, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	75
Figura 34 - Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 4, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	76

Figura 35 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 4, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	76
Figura 36 - Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 5, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	77
Figura 37 - Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 5, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).....	78
Figura 38 - Geologia conforme Muro (2000), com a localização da área de estudo em relação a falha por ele observada.....	79
Figura 39 - Seções de resistividade de 2005 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos.....	80
Figura 40 - Seções de cargabilidade 2005 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos.....	81
Figura 41 - Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:25.000) da área de estudo em 1962, com indicação do contorno da cava de resíduos que seria posteriormente instalada.....	82
Figura 42 - Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:25.000) da área de estudo em 1971, com indicação do contorno da cava de resíduos que seria posteriormente instalada.....	82
Figura 43 - Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:30.000) da área de estudo em 2000, com indicação do contorno da cava de resíduos.....	83
Figura 44 - Localização da área de estudo, com indicação da descontinuidade em imagem de satélite (Imagem Landsat 7 - Miranda, 2001).....	84
Figura 45 - Localização do perfil ABC, que corta o corpo do lixo em toda sua extensão.....	85
Figura 46 - Perfil ABC, que corta o corpo do lixo em toda sua extensão.....	85
Figura 47 - Seções de resistividade de 1995 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos.....	86
Figura 48 - Mapas de resistividade aparente das profundidades de 10, 20 e 30 metros.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Métodos geoeletricos e os parâmetros físicos correspondentes analisados (Braga, 1999).....	22
Tabela 02 - Comparativo de aplicações dos métodos geoeletricos (adaptado de CETESB, 2001 e Braga, 1999).....	29
Tabela 03 - Dados dos Ensaio de Infiltração.....	65
Tabela 04 - Dados obtidos com os ensaio de índices físicos realizados.....	67
Tabela 05 - Dados obtidos com os ensaio de granulometria conjunta (frações granulométricas segundo ABNT – NBR6502/95).....	67
Tabela 06 - Dados obtidos com os ensaio de adsorção de azul de metileno.....	68

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANA – Agência Nacional de Água
- APA - Área de Proteção Ambiental
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- CTAS - Câmara Técnica de Águas Subterrâneas
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GPR - Radar de Penetração
- IAD – Infiltrômetro de Anel Duplo
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IP - Polarização Induzida
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- MMA - Ministério do Meio Ambiente
- NBR - Norma Brasileira Registrada
- SEV - Sondagem Elétrica Vertical
- SMA - Secretaria do Meio Ambiente
- SP - Potencial Espontâneo
- UTM – Universal Transverse Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área transversal do anel

A-B – Eletrodos de emissão de corrente

A<sub>cb</sub> – Índice de atividade da fração argilosa

CTC – Capacidade de troca catiônica

e – Índice de vazios

H - Profundidade de água no anel quando ensaiado a regime constante

K – Condutividade hidráulica

M-N – Eletrodos de recepção de corrente

n – porosidade

Q – Volume de água infiltrada no solo

R – distância do centro de A-B até o centro de M-N

SE – Superfície específica

S<sub>r</sub> – Grau de saturação

t - Tempo entre medidas

V<sub>b</sub> – Valor de azul de metileno adsorvido

w – Umidade média natural

X – Espaçamento entre os dipolos A-B e M-N

Z - Profundidade da frente de saturação

$\rho$  – Massa específica do solo

$\rho_d$  - Massa específica seca do solo

$\rho_s$  – Massa específica dos sólidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Disposição de resíduos sólidos.....	3
2.1.1. Os resíduos.....	3
2.1.2. A disposição.....	4
2.1.3. O chorume.....	7
2.2. Águas Subterrâneas.....	8
2.2.1. Os Aquíferos.....	9
2.2.2. Contaminação e Poluição.....	10
2.2.3. Remediação.....	11
2.2.4. Movimento da água subterrânea e transporte de poluentes.....	12
2.2.5. Legislação e gestão.....	14
2.3. Investigações geológico-geotécnicas.....	17
2.3.1. Investigações diretas.....	17
2.3.2. Investigações indiretas.....	20
<b>3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>32</b>
3.1. Localização.....	32
3.2. Clima.....	33
3.3. Geomorfologia.....	34
3.4. Vegetação.....	36
3.5. Pedologia.....	38
3.6. Hidrologia.....	40
3.6.1. Águas Superficiais.....	40
3.6.2. Águas Subterrâneas.....	42
3.7. Geologia.....	45
3.8. Histórico e trabalhos anteriores.....	50
<b>4. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
4.1. Ensaio geofísicos.....	54

4.1.1. Locação das linhas.....	54
4.1.2. Execução do ensaio.....	55
4.1.3. Tratamento dos dados.....	58
4.1.4. Resultados da Geofísica.....	59
4.2. Ensaios de infiltração.....	59
4.2.1. Locação dos pontos ensaiados.....	60
4.2.2. Execução.....	60
4.2.3. Resultados.....	62
4.3. Ensaios de caracterização dos materiais inconsolidados.....	65
4.3.1. Locação dos pontos ensaiados.....	65
4.3.2. Resultados.....	66
<b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
5.1. Seções Geofísicas.....	69
5.1.1. Linha 0.....	70
5.1.2. Linha 1.....	71
5.1.3. Linha 2.....	73
5.1.4. Linha 3.....	74
5.1.5. Linha 4.....	76
5.1.6. Linha 5.....	77
5.2. Análise da evolução da contaminação no período de 1995 a 2005.....	78
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
ANEXO I - LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS.....	107
ANEXO II - PERFIS GEOFÍSICOS.....	109
ANEXO III - PLANILHAS DE CAMPO / ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO.....	125
ANEXO IV - PLANILHAS DE CÁLCULO E CURVAS DE INFILTRAÇÃO/ ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO.....	132
ANEXO V - CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	139



# 1. Introdução

O crescente avanço industrial e tecnológico da civilização concentrada em grandes centros urbanos gera a necessidade cada vez maior de produção de energia, além de uma quantidade de resíduos superior a que o ambiente pode suportar.

O depósito de lixo doméstico, industrial e de serviços de saúde, sem um prévio estudo geológico e hidrológico é um fenômeno nocivo a sociedade, uma vez que promove a degradação do meio ambiente.

Segundo IPT (1995) o depósito de resíduos sólidos pode ser feito de três formas: em lixões (simples despejo dos resíduos no solo), em aterros controlados (deposição dos resíduos no solo com um certo grau de controle, compactação e cobertura) ou em aterros sanitários (acomodação dos resíduos, associada a obras de engenharia, de maneira isolada e segura, no menor espaço possível).

Infelizmente a forma de disposição de resíduos sólidos predominante no Brasil ainda é em lixões, freqüentemente feita em depressões naturais ou em voçorocas, acentuando a possibilidade de contaminação e poluição das águas subterrâneas.

Em geral, essas águas subterrâneas apresentam características físicas perfeitamente compatíveis com os padrões de potabilidade, sendo uma fonte rica para o abastecimento hídrico das cidades, diante do aumento populacional, deterioração das reservas superficiais e menor custo de produção.

Para manter a potabilidade das águas subterrâneas os órgãos ambientais têm dado especial atenção as áreas de disposição de resíduos. Dentre os métodos utilizados nos estudos de detecção e monitoramento de plumas de contaminação nesses locais de depósito destacam-se os métodos geofísicos, em especial os geoelétricos.

Segundo Elis (1998) a aplicação de métodos geofísicos elétricos podem fornecer, se adequadamente escolhidos e dimensionados, informações importantes

com respeito a estrutura dos depósitos e definição do sentido de fluxo subterrâneo, assim como outras relações entre os resíduos e as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas do local de estudo.

A área de estudo foi definida por apresentar esse sério problema ambiental, o de contaminação devido a presença do lixão desativado do município de São Carlos, no estado de São Paulo, localizado na Fazenda Santa Madalena. Neste local foram depositados resíduos, inadequadamente em uma voçoroca, por aproximadamente 17 anos.

Como essa disposição de resíduos não foi feita da maneira ideal, não possui sistema de impermeabilização ou de coleta dos fluidos produzidos pela degradação do lixo, proporcionando a contaminação das águas superficiais e, pela percolação desses fluidos, das águas subterrâneas.

Essa contaminação já foi constatada anteriormente por outros autores, como Ellert *et al.* (1990), Bossolan (1993), Menezes (1995), Freitas (1996), Gadotti (1997) e Álvares (2000). Apesar de diversos estudos terem sido desenvolvidos na área anteriormente, existe uma carência de informações da situação atual da contaminação.

Isso reflete um problema para a cidade de São Carlos, uma vez que, o seu abastecimento de água é feito em parte por águas subterrâneas, e em parte por água superficial coletada na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, na qual insere-se o Córrego São José, que encontra-se a jusante do lixão.

O objetivo principal desse trabalho foi a caracterização geológico-geotécnica da área, de forma a estabelecer correlações entre os resíduos aterrados e a dinâmica hidrogeológica atuante, buscando delimitar uma possível pluma de contaminação, com base em dados produzidos em ensaios geofísicos, de infiltração e de caracterização dos materiais inconsolidados. Buscou-se também analisar os dados obtidos em estudos anteriores e compará-los com os atuais, estabelecendo a evolução e a situação atual da contaminação.

Neste estudo adotaram-se dois métodos elétricos de investigação geofísica, o de eletrorresistividade e o de polarização induzida, devido a estes métodos terem se mostrados adequados em estudos anteriores para determinações de relações entre os componentes de aterro e do meio físico, além do sentido do fluxo subterrâneo.

Espera-se que os estudos e dados gerados nesta pesquisa possam servir para um melhor conhecimento da situação atual da área, bem como na elaboração e aplicação de medidas mitigadoras do problema de contaminação existente.

## 2. Revisão Bibliográfica

Quando se fala em preservação do meio ambiente, nosso pensamento se volta para florestas, mares e biodiversidade, mas com o aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados, atentou-se para o fato que a disposição do lixo também pode gerar um problema ambiental de grande escala, afetando o solo, a água e a atmosfera.

Para tanto, segundo Aguiar (2001) são extremamente importantes pesquisas realizadas para que os parâmetros e os comportamentos mecânico e químico dos resíduos sejam conhecidos e compreendidos, bem como que desenvolvam novos mecanismos de investigação.

### 2.1. Disposição de resíduos sólidos

#### 2.1.1. Os resíduos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR (Norma Brasileira Registrada) 10.004 (1987), define resíduos sólidos como "resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.". Consideram-se também como resíduos sólidos os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e em instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública também é abordada na NBR-10004, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados. São adotados:

- Resíduos Classe I - Perigosos: Apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, como por exemplo, baterias e produtos químicos.
- Resíduos Classe II - Não Inertes: São os resíduos que não se enquadram como resíduos classe I e classe III, e podem ter as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, como por exemplo, matéria orgânica e papel.
- Resíduos Classe III - Inertes: Não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas, como por exemplo, rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

Embora o tratamento e disposição final deve ser diferenciado para cada classe de resíduos, isso nem sempre ocorre, sendo que usualmente são descartados resíduos potencialmente perigosos juntamente com os resíduos domésticos. Os resíduos perigosos mais encontrados são materiais para pintura (tintas, solventes, pigmentos, vernizes), materiais para jardinagem (pesticidas, inseticidas, repelentes, herbicidas), materiais automotivos (óleos lubrificantes, fluidos de freios e de transmissão, baterias), entre outros itens como pilhas, frascos de aerossóis e lâmpadas fluorescentes.

### 2.1.2. A disposição

Infelizmente, segundo Schalch *et al.* (2002), os municípios brasileiros, em sua grande maioria, dispõem seus resíduos sólidos domiciliares sem nenhum controle, uma prática que promove graves consequências, como contaminação do ar, do solo, das águas superficiais e subterrâneas, criação de focos de organismos patogênicos, vetores de transmissão de doenças, com sérios impactos na saúde pública.

Prima-se que a disposição final desses resíduos gere o menor impacto no meio, que seja de simples operação e de baixo custo. Atualmente um dos poucos métodos adequados, pelo menos em parte, a essas características é a disposição final em aterros sanitários, que, segundo Leite (1997), é difundido em quase todo o mundo.

Alguns processos como a compostagem ou a incineração podem se tornar viáveis economicamente em grandes centros urbanos, mas deve-se ressaltar que tais processos não descartam a existência de aterros sanitários como disposição final, pois

o tratamento nunca constitui um sistema de destinação completo ou definitivo, gerando sempre um remanescente inaproveitável.

✓ *Lixão e aterro sanitário*

Deve-se deixar claro que existe uma diferença conceitual, operacional e ambiental entre lixão e aterro sanitário.

O lixão representa o que há de mais primitivo em termos de disposição final de resíduos, onde todo o lixo coletado é transportado para um local afastado do centro urbano e descarregado diretamente no solo, sem tratamento algum, impactando diretamente todo o meio, manifestando vários efeitos negativos, como por exemplo, a proliferação de ratos e moscas, a exalação do mau cheiro, a contaminação dos lençóis freáticos, o surgimento e transmissão de doenças, além do transtorno do visual e olfativo.

O aterro sanitário é uma disposição baseada em técnicas sanitárias como impermeabilização do solo, compactação e cobertura diária das células de lixo, coleta e tratamento de gases, coleta e tratamento dos líquidos residuais, entre outras, que são responsáveis em evitar os aspectos negativos da deposição final do lixo (IPT, 1995).

Entretanto, apesar das vantagens, este método enfrenta limitações por causa do crescimento das cidades, associado ao aumento da quantidade de lixo produzido (Lopes, 2003).

O sistema de aterro sanitário precisa ser associado à coleta seletiva de lixo e à reciclagem, o que permitirá que sua vida útil seja bastante prolongada, além do aspecto altamente positivo de se implantar uma educação ambiental com resultado promissores na comunidade, desenvolvendo coletivamente uma consciência ecológica, cujo resultado é sempre uma maior participação da população na defesa e preservação do meio ambiente (Schalch, *et al.*2002).

Entretanto, dados do IBGE (2000) sobre a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, mostram que das 228.413 toneladas de resíduos produzidos por dia no Brasil, 37% são destinados a aterros controlados, 36% para aterros sanitários, 21,2% para lixões, 2,9% para compostagem, 1,0% para triagem de reciclagem, 0,6% para locais não fixos, 0,5% para incineração, 0,1% para áreas alagadiças e 0,7% para outros destinos.

Segundo, dados do IBGE (2002), também sobre a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, mostraram que apenas 13,4% dos municípios brasileiros dispõem seus resíduos em aterros sanitários, 18,3% em aterros controlados, e o restante dos

municípios (68,3%) dispõe seus resíduos em locais impróprios, como é o caso dos lixões.

Segundo Elis (1998), as fontes mais comuns de contaminação no Brasil são as áreas utilizadas para deposição de resíduos, devido ao descaso e a opção por alternativas de baixo custo para dispor esses resíduos, como lixões a céu aberto. A locação dessas áreas é de responsabilidade dos órgãos governamentais, que na maioria das vezes não respeitam as limitações do ambiente escolhido, nem seguem regras básicas de manejo de aterros sanitários.

Segundo Menezes, *et al.* (1995), os antigos lixões e aterros dificilmente se enquadram na legislação, pois, em geral, foram instalados em locais inadequados, sem estudo prévio, mesmo que sejam cumpridas as exigências da cobertura, irão continuar a emitir poluentes.

Essas áreas já existentes, ativas ou não, tem sido pouco abordadas, causando uma carência de propostas para esse setor. Um agravante para essas áreas é que comumente ocorria o depósito não só dos resíduos domiciliares, mais também os provenientes dos serviços e saúde e industriais (Hassuda *et al.*, 1998).

#### ✓ *Seleção de áreas*

As áreas destinadas para implantação de aterros têm uma vida útil limitada e novas áreas são cada vez mais difíceis de serem encontradas próximas aos centros urbanos. Aperfeiçoam-se os critérios e requisitos analisados nas aprovações dos Estudos de Impacto Ambiental pelos órgãos de controle do meio ambiente; além do fato de que os gastos com a sua operação se elevam, com o seu distanciamento.

Segundo Santos e Koide (1998), na seleção de área e execução do aterro sanitário, os recursos hídricos naturais devem ser preservados na medida do possível. Assim, locais com córregos ou nascentes devem ser evitados.

Zuquette e Gandolfi (2004), propuseram uma lista de atributos que devem ser considerados nos procedimentos de seleção e verificação de locais para implantação de aterros sanitários:

- Substrato rochoso: atributos como litologia e profundidade;
- Materias inconsolidados: descontinuidade, classificação textural, variação vertical, mineralogia, matações, pH/ $\Delta$ pH, salinidade, CTC, camada compressível, material colapsível, índice de erodibilidade, fator de retardamento e características de compactação;
- Água: profundidade da zona saturada, direção do fluxo saturado, fluxo superficial, condutividade hidráulica, áreas de recarga, distância da nascente e drenabilidade;

- Processos (feições): erosão, movimentos de massa gravitacionais, subsidências, feições cársticas e zonas de inundação;
- Relevo: formas de relevo, distância do limite entre bacias hidrográficas, zonas úmidas e declividade;
- Características climáticas: evapotranspiração, direção do vento e pluviosidade.

✓ *Cobertura do Aterro*

Deve ser dada atenção especial à cobertura de um aterro sanitário, que apresenta como função principal impedir a transferência de contaminantes para a biosfera e prevenir a infiltração das águas de precipitações para dentro da massa de lixo, limitando, assim, o risco de contaminação dos solos e das águas subterrâneas (IPT, 1995).

Segundo Saarela (1993) a cobertura de aterro sanitário tem as seguintes funções:

- Prevenção ou minimização de percolação;
- Melhoria estética;
- Supressão de vetores;
- Contenção de gases;
- Supressão do risco de incêndio;
- Prevenção de carreamento de lixo;
- Valorização do local do aterro.
- E deve apresentar os seguintes atributos:
  - Resistência à erosão pela água;
  - Resistência à erosão pelo vento;
  - Estabilidade contra recalques, fissuras e escorregamentos;
  - Resistência a baixas temperaturas;
  - Resistência a perfurações feitas por animais e plantas.

### 2.1.3. O chorume

Segundo Tressoldi e Consoni (1994), a disposição de resíduos é um efetivo agente contaminante do solo e subsolo, pois com a decomposição da matéria orgânica presente no lixo é gerado o percolado (chorume), um líquido escuro, ácido e de alta DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).

Quanto maior a demanda de oxigênio necessária para a decomposição biológica dos compostos orgânicos presentes no chorume, maior sua capacidade poluidora e, quanto mais ácido esse percolado, maior seu poder em carrear metais presentes na

massa de lixo. Seu volume e capacidade de lixiviação vão depender da quantidade de água e precipitação atmosférica que atinja os resíduos, da quantidade e qualidade da matéria orgânica e do tipo de solo (Tressoldi e Consoni, 1994).

A contaminação das águas subterrâneas ocorre através da percolação de águas pluviais e outros líquidos gerados pela própria degradação dos resíduos, que por infiltração no solo sob o aterro atingem o nível d'água (Bocanegra, *et al.*1998).

Esse percolado contém normalmente elevadas concentrações de amônia, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico, cloreto, ferro, além concentrações menores de um grande número de outros contaminantes inorgânicos e orgânicos. Esses contaminantes não são unicamente gerados a partir dos resíduos sólidos, mas também provenientes de resíduos líquidos industriais dispostos inadequadamente na maioria dos aterros (Mirecki e Parks, 1994).

Para tanto, o IPT (1995) sugere que seja feito um controle ambiental dessas áreas de disposição, com monitoramento da qualidade e quantidade do chorume produzido e carreado para as áreas vizinhas.

Os contaminantes, quando dispostos na superfície, atravessam os diferentes horizontes de solo não saturado e a zona capilar, atingindo a zona saturada, essa migração é controlada por diferentes processos físicos, químicos e biológicos (Foster, 1988).

Segundo Haitjema (1991), os aterros tradicionais são projetados e monitorados de forma imprópria para a proteção da água subterrânea, em virtude do conhecimento incompleto sobre o tempo de residência do chorume nas camadas compactas, a integridade das geomembranas, a heterogeneidade dos aquíferos e as trajetórias dos contaminantes.

As medidas para o controle e prevenção da poluição devem ser estudadas, e devem ser tomadas por todo tipo de organização, seja ela pública ou privada. As cidades ao realizarem planejamento e elaboração de Planos Diretores devem considerar essa questão, assim como as indústrias, desde o momento de sua implantação devem consideradas como estratégia para a garantia de um ambiente sustentável (Lopes, 2003).

## 2.2. Águas Subterrâneas

Segundo a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR-9896 de 1993, "água subterrânea é a água que ocupa a zona saturada do subsolo ou num sentido mais amplo, toda a água situada abaixo da superfície do solo, na litosfera".



As águas subterrâneas representam 28,8% da água doce líquida da Terra, que segundo Hirata (2000) já representaria seu valor, já que desempenha papel fundamental no abastecimento público e privado em todo o mundo. Estima-se que mais de 1,5 bilhões de pessoas em núcleos urbanos e uma grande parcela da população rural tenham suas necessidades supridas pelo manancial subterrâneo, com tendências mundiais ao crescimento contínuo desse uso.

### 2.2.1. Os Aquíferos

Cabe ressaltar que as águas subterrâneas podem ser encontradas em aquíferos, que segundo Hirata (2004), são unidades saturadas constituídas por rochas porosas e permeáveis, ou seja, aquíferos são formações geológicas capazes de transportar, e não somente armazenar, água.

Para saber a qualidade, a quantidade e a durabilidade da água de um aquífero, devem ser realizados estudos hidrológicos, hidrogeológicos, bacteriológicos, físico-químico, assim como os dados relativos à pluviosidade (Vangente e Gaspar, 2004).

Quanto mais homogêneos forem o tamanho e a distribuição dos poros e maior a interconexão entre esses poros, melhor será a capacidade do aquífero em transmitir água. A espessura do aquífero garante a quantidade de água e o seu grau de confinamento, além de propiciar uma maior ou menor proteção contra a poluição (CETESB, 2004).

Segundo Rebouças *et al.* (2002) os aquíferos podem desempenhar diversas funções, como:

- Função de produção, que é a mais comum, responsável pelo abastecimento de uma parcela considerável da população da Terra;
- Função ambiental e de filtro, pois a maioria dos aquíferos atua como verdadeiros "filtros bio-físico-geoquímicos", de forma a conduzir à atenuação natural de poluentes. Lembrando que dependendo da natureza da porosidade, comportamento hidráulico do aquífero, uma vez poluído, pode ser praticamente impossível uma restauração;
- Função estratégica e de regularização, a função estratégica aborda a função de atender a gerações presentes e futuras, sempre de forma sustentável e a função de regularização aborda a permissão de maximizar ofertas em períodos de escassez de água superficial, sendo utilizado, por exemplo, como meio para a reserva através de recarga artificial etc.;
- Função transporte e energética, pouco utilizadas no Brasil, um exemplo da função de transporte é quando se faz um poço tubular raso, em um aquífero aluvial, às margens de curso d'água, de modo que se está

bombeando, na verdade, água do rio, a qual flui através do meio granular, utilizando, dessa forma o aquífero com a função transporte e filtro. A função energética advém de aquíferos com águas termais, e pode ser utilizada, por exemplo, para a geração de energia elétrica.

### 2.2.2. Contaminação e Poluição

Segundo Branco (1991) deve ser feita uma distinção entre os termos contaminação e poluição, visto que contaminação refere-se à simples transmissão, pela água, de elementos, compostos ou microorganismos que possam prejudicar a saúde do homem ou de animais que a bebem. Já a poluição se caracteriza muito mais por seus efeitos ecológicos, que produzem transformações do meio ambiente.

A CETESB (2001) definiu área contaminada como:

Área onde há comprovadamente poluição causada por quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados, e que determina impactos negativos sobre os bens a proteger.

As áreas contaminadas podem gerar diversos problemas, entre eles Sanchez (1998) ressalta quatro principais:

- Existência de risco a segurança das pessoas e das propriedades;
- Riscos a saúde pública e dos ecossistemas;
- Restrições ao desenvolvimento urbano;
- Redução do valor imobiliário das propriedades.

Segundo Hirata (2000) as águas subterrâneas apresentam, em sua grande maioria, excelente qualidade física e química, permitindo sua utilização para o consumo humano sem tratamento. Embora a importância desse recurso na qualidade de vida da população seja inquestionável, está sujeito à degradação devido às atividades do desenvolvimento urbano (Melo *et al.*, 1996).

Segundo CETESB (2004) as principais fontes de poluição para as águas subterrâneas estão relacionadas com o uso do solo para disposição de resíduos (aterros, lixões, cemitérios, ferro velhos) e infiltração de efluentes das atividades química (instalação de indústrias, hospitais, farmácias), mecânica, metalúrgica e curtume, além de fontes consideradas difusas como a agricultura, notadamente a adubação pesada e o uso inadequado de pesticidas.

Apesar de serem uma reserva estratégica de água potável, os aquíferos estão cada vez mais expostos à poluição, a contaminação das águas subterrâneas, ao contrário da contaminação das águas superficiais, não são logo detectadas devido à lenta circulação de suas águas, capacidade de adsorção do solo e exploração

difusamente distribuída, o que dificulta e onera as soluções para o problema (Kyrillos e Cabral, 1996).

Segundo Cesarini *et al.* (2004) a alteração na qualidade da água subterrânea deve ser motivo de preocupação para a sociedade, já que a poluição do solo, que é um bem privado, é a principal causa desta alteração, que sendo uma reserva natural de água potável, não deve correr riscos de contaminação.

No que diz respeito à qualidade de água para consumo humano, a Portaria do Ministério da Saúde estabeleceu padrões de potabilidade mais restritivos e contemplando um maior número de parâmetros. Estabeleceu ainda os procedimentos e as responsabilidades relativas ao controle de qualidade para o consumo humano.

### 2.2.3. Remediação

Mesmo quando a água subterrânea não é utilizada diretamente (poços), deve ser feito um controle de contaminação, pois a maioria dos aquíferos aflora, recarregando os recursos hídricos superficiais, podendo contaminá-los.

Tendo isolado o avanço da pluma, trabalhos no controle da fonte e outras medidas de remediação podem ser executadas em ritmo usual (Fetter, 1993), tais como *bioventing* (injeção de ar através da zona não saturada e franja capilar); *air sparging* (injeção de ar através da zona saturada para remediação das águas subterrâneas pela volatilização e biodegradação dos contaminantes), atenuação natural monitorada (os microorganismos existentes em subsuperfície degradam os contaminantes com o tempo), entre outros.

Segundo Tressoldi e Consoni (1994), os trabalhos para a remediação de áreas contaminadas por resíduos devem necessariamente, passar pela etapa inicial de diagnóstico, quando são coletadas informações sobre o meio ambiente atingido e sobre as características da contaminação. É efetuada a avaliação de impactos com base em indicadores ou fatores ambientais e são conduzidas investigações e monitoramento detalhados para melhor caracterizar e quantificar os impactos e para efetuar o estudo das alternativas de remediação.

Ao final da fase de diagnóstico, deve-se ter completo conhecimento do fluxo de contaminantes no meio analisado. Devem ser considerados todos os parâmetros geológicos e hidrogeológicos, obtidos das investigações e monitoramento, de modo que se possa definir o projeto de descontaminação, implementar as medidas mitigadoras e prosseguir com o monitoramento.

Segundo CETESB, (2001) a aplicabilidade de um método de remediação depende de vários fatores, como características do meio contaminado e do contaminante, do objetivo da remediação, da localização da área, do tempo e dos

recursos disponíveis. São utilizadas, basicamente três abordagens no planejamento de um projeto de remediação:

- Mudança do uso;
- Remoção ou destruição dos contaminantes;
- Redução da concentração ou contenção dos contaminantes.

Os sistemas de contenção para isolar contaminantes do meio ambiente incluem remoção do solo para tratamento, sistemas de bombeamento com tratamento convencional e injeção de água tratada, sistemas de bombeamento e tratamento *in situ*, por meio de injeção de agentes químicos e biológicos, drenos e barreiras hidráulicas, barreiras impermeabilizantes, barreiras reativas *in situ*, barreiras geológicas, tapetes e selos (argila compacta ou geomembrana) com dispositivos associados para a drenagem e coleta de percolado e biodegradação natural (Tressoldi e Consoni, 1994).

#### 2.2.4. Movimento da água subterrânea e transporte de poluentes

A interação solo-contaminante é muito complexa, uma vez que, muitos fenômenos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer simultaneamente. São inúmeros os fenômenos que controlam o transporte de contaminantes em meios porosos, onde o contaminante considerado é a massa de alguma substância tóxica dissolvida (poluente), movendo-se com algum fluido (água) nos vazios do meio poroso (solo) seja ele saturado ou não (Nobre, 1987).

Nas áreas utilizadas para disposição de resíduos urbanos e industriais, a contaminação das águas subterrâneas ocorre através da percolação de águas pluviais e outros líquidos gerados pela própria degradação dos resíduos, que por infiltração no solo sob o aterro atingem o nível d'água. No caso dos resíduos urbanos, o líquido derivado desse processo de percolação através dos resíduos é o chorume.

Quando os resíduos são dispostos de maneira inadequada pode ocorrer infiltração de líquidos contendo substâncias contaminantes até atingir as águas subterrâneas, comprometendo sua qualidade (Elis, 2002).

Segundo Tressoldi e Consoni (1994), o fluxo da água na zona não saturada (poros preenchidos por água e ar) depende da força da gravidade e da forma dos poros, sendo vertical para baixo. Na zona saturada (poros preenchidos por água) o fluxo depende do gradiente hidráulico e os contaminantes podem espalhar-se por grandes áreas, cobrindo longas distâncias, após períodos de tempo variável. Caracterizam-se assim as plumas de contaminação com concentrações variáveis, no espaço e no tempo, dependendo das condições hidrogeológicas locais.

Segundo Fetter (1993) o movimento de poluentes não depende apenas do fluxo do fluido no qual essas substâncias estão dissolvidas, mas sim de mecanismos aos quais estas substâncias são submetidas, os principais mecanismos de transporte e retenção de contaminantes em meios porosos saturados são:

✓ *Advecção*

Advecção é o mecanismo de transporte de massa causado pelo movimento da água. Durante a evolução da maioria das plumas de poluição, a advecção é o mecanismo de transporte mais importante.

Segundo Shackelford (1988), na advecção, os contaminantes (solutos) presentes na água se movem na direção das linhas de fluxo com uma velocidade que, em princípio, é igual à velocidade média linear da água e sem alterar sua concentração na solução.

✓ *Dispersão Hidrodinâmica*

Segundo Freeze e Cherry (1979) a dispersão hidrodinâmica é o fenômeno que permite o espalhamento tridimensional do contaminante, proporcionando diluição do contaminante pelo caminho do escoamento.

O processo de difusão molecular não pode ser separado da dispersão mecânica no fluxo de água pelo solo, portanto esses dois processos são combinados para definir a dispersão hidrodinâmica.

① *Difusão molecular*: esse transporte ocorre devido ao gradiente de concentração existente em um fluido, ou seja, o soluto dissolvido em água desloca-se de uma área de maior concentração para uma área de menor concentração, visando equalizar a concentração em toda a massa de fluido.

Segundo Elbachá (1989), este fenômeno ocorre independente da velocidade do fluido, mas é acentuado pela turbulência resultante dos mecanismos de mistura mecânica.

Segundo Mitchell (1991), em um solo, especialmente de granulometria fina, a difusão é consideravelmente menor do que em uma solução livre. Isso se deve a tortuosidade das trajetórias de fluxo, pequeno volume de fluido para o fluxo e retenção de íons e moléculas nas superfícies das partículas.

② *Dispersão mecânica*: a mistura mecânica é decorrente da dispersão em canais individuais, do desenvolvimento de velocidades médias diferentes em canais diferentes, devido à variação das dimensões dos poros ao longo das linhas de fluxo, e do desvio da trajetória das partículas em decorrência da tortuosidade, reentrâncias e interligações entre os canais (Bear, 1972).

A dispersão que ocorre na direção do fluxo é chamada dispersão longitudinal e a que ocorre na direção perpendicular ao fluxo é chamada dispersão transversal.

✓ *Sorção*

A sorção engloba os processos que demonstram a capacidade do solo em reter substâncias. A adsorção é a adesão de moléculas ou íons à superfície de partículas no solo promovendo uma diminuição da concentração da fase aquosa e retardando o transporte de contaminante, já a desorção é a liberação da fase sólida. A habilidade do solo em reter substâncias é limitada, se a fonte de contaminação tiver alimentação contínua, a taxa de retenção tende a diminuir com o tempo, podendo chegar a se anular (Yong et al., 1992).

A transferência da substância para a fase sólida durante o fluxo provoca redução da frente de contaminação em relação à velocidade do fluido, resultando no fenômeno de retardamento da frente de contaminação (Nobre, 1987).

✓ *Decaimento*

O processo de decaimento é de importância relativamente menor e é de difícil quantificação. Os principais processos são os de ácido-base, solução-precipitação, oxidação-redução, complexação e processos microbiológicos, que tem como consequência o retardamento na velocidade de avanço do contaminante (Nobre, 1987).

## 2.2.5. Legislação e gestão

No Brasil, no contexto de recursos hídricos, a maior ênfase ainda é dada aos recursos superficiais, embora, segundo o Ministério do Meio Ambiente - MMA, (2001) as águas subterrâneas apresentem grande importância, com um volume armazenado estimado em 112.000 km<sup>3</sup>, sendo que diversos aquíferos se estendem por área subjacente a vários estados, chegando a alcançar países vizinhos, o que impõe uma articulação dos entes federados para a gestão deste recurso natural.

A água subterrânea vem assumindo importância relevante como fonte de abastecimento, mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provém das reservas subterrâneas (ANA, 2004).

A legislação brasileira deve se adequar a essas novas condições de uso, que se encontram em crescimento, impulsionado, segundo Domingues e Oliveira (2004), pelo comprometimento progressivo da qualidade das águas superficiais, especialmente nos grandes centros populacionais, o que eleva cada vez mais o custo do tratamento dessas águas, além do baixo custo da água subterrânea.

No Brasil, há uma série de leis federais que trazem em seu corpo artigos que tratam da água subterrânea, mas não há em vigor uma que trate exclusivamente da mesma.

No Código das Águas (1934) as águas subterrâneas eram consideradas bens imóveis, associados à propriedade da terra. Esta legislação inibia a monopolização da exploração e a poluição das águas subterrâneas e reconhecia sua estreita correlação com as águas superficiais.

Já a Constituição Federal de 1988, em vigência, previu a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos e alterou o Código das Águas, de forma que, no Brasil, a água é um bem público e seu disciplinamento de uso e sua proteção são regidos por legislações que delegam aos órgãos Federais e Estaduais atribuições específicas.

Com a Lei Federal nº 9.433, de 08/01/1997, regulamentada pelo Decreto nº 2.612 de 03.06.1998, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Esta Lei organizou o setor de planejamento e gestão dos recursos hídricos em âmbito nacional.

Quanto a sua dominialidade, a abordagem de águas subterrâneas na legislação federal brasileira, é de certa maneira dúbia, visto que, algumas vezes elas são tratadas como recurso hídrico e em outras como recurso mineral, o que implica diretamente na gestão, outorga, cobrança, fiscalização e direitos de uso dessas águas.

No artigo 26 da Constituição Federal Brasileira de 1988, a água subterrânea é tratada como um recurso hídrico, sendo sua dominialidade dos estados-membros. Já o artigo 20 permite tratá-la como recurso mineral, o que a remete ao Código de Águas Minerais e ao Código de Mineração, onde sua dominialidade é da união.

Para tanto se faz necessário definir o que são águas subterrâneas e quando elas são minerais, já que isso influencia diretamente na interpretação jurídica que deve ser dada.

Segundo Suguio (1998) água subterrânea pode ser definida como parte da água subsuperficial contida na zona de saturação, enquanto que águas minerais, conforme artigo 1º do Código de Águas Minerais, instituído pelo Decreto-Lei nº 7.841/45, "são aquelas provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que possuam composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns..."

Se as águas forem enquadradas como minerais será necessária a autorização do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) para sondagens, além de alvarás de pesquisa e no caso de exploração será necessária a obtenção de uma concessão de lavra, emitida pelo DNPM, segundo as portarias 222/1997 e 231/1998,

com base no Código de Minas (Decreto-Lei nº 227/67) e no Código de Águas Minerais (Decreto-Lei nº 7841/45).

Segundo Affonso e Monsores (2004), do ponto de vista jurídico, para a classificação das águas subterrâneas como recursos minerais é exigido, quando da captação dessas águas, o seu enquadramento aos dispositivos legais observados nos artigos 35 e 36 do Código de Águas Minerais, onde são definidas suas classificações químicas. Ao constatar-se que essas águas estão contaminadas, com necessidade de tratamento, fica descaracterizada sua qualificação como água mineral, passando a se enquadrar como água comum.

Portanto pode-se concluir que apenas em situações bem definidas é que as águas subterrâneas são consideradas como minerais, cabendo salientar que águas subterrâneas podem ter usos múltiplos, enquanto que as minerais têm usos específicos definidos por lei (engarrafamento, venda, balneoterapia e uso geotermal).

Segundo Acselrad *et al.* (2004) existe no meio técnico um entendimento de que há necessidade de legislação específica para as águas subterrâneas, apesar do reconhecimento do caráter de avanço e inovação da Lei de Recursos Hídricos.

Segundo Domingues e Oliveira (2004) foi um marco para a integração das águas subterrâneas e águas superficiais, no âmbito da Política Nacional de Recursos Hídricos, a elaboração, pela Câmara Técnica de Águas Subterrâneas - CTAS e a aprovação pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH de três resoluções:

- Resolução nº 9 de 21/06/2000 que instituiu a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas;
- Resolução nº 15 de 11/01/2001 que estabelece as diretrizes para gestão integrada das águas considerando a interdependência entre as águas superficiais, subterrâneas e meteóricas;
- Resolução nº 22 de 24/05/2002 que estabelece que os Planos de Recursos Hídricos Estaduais e dos Comitês de Bacia deverão considerar o monitoramento da qualidade e quantidade de águas subterrâneas, estudos hidrogeológicos e a inter-relação com as águas superficiais, visando a gestão integrada dos recursos hídricos.

Há ainda uma proposta de Emenda Constitucional que propõe a mudança da dominialidade dos corpos hídricos subterrâneos subjacentes a mais de uma unidade federada ou que ultrapassem a fronteira com outros países (caso do Aquífero Guarani, compartilhado por quatro países da América do Sul) para a União, definição similar ao conceito de dominialidade para os corpos hídricos superficiais (Acselrad *et al.*, 2004).



Segundo o MMA (2001), a maioria dos estados brasileiros ainda carece de uma legislação e ação específica para essa importante fração dos recursos hídricos que são, constitucionalmente, de domínio dos estados.

Estados como São Paulo e Pernambuco contam com lei específica de águas subterrâneas, outros estados têm procurado integrar as águas subterrâneas à Política Estadual de Recursos Hídricos.

No estado de São Paulo o licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente poluidores é considerado uma ação preventiva contra a poluição na medida em que estabelece exigências específicas para que as fontes de poluição se instalem de forma ambientalmente segura.

A fiscalização é considerada uma forma de atuação corretiva, onde procura-se adequar os processos visando a minimização dos riscos de poluição. A elaboração de instruções e normas técnicas, resoluções e legislações sobre disposição de efluentes e resíduos sólidos é outra importante ferramenta para a prevenção da poluição dos solos e águas subterrâneas (CETESB, 2004).

Segundo Custódio (1994), a gestão de aquíferos é o conjunto de guias, normas, leis, regulamentos e atuações destinadas a sustentar, conservar, proteger, restaurar e regenerar esses aquíferos. Faz referência à quantidade e à qualidade da água captável do aquífero, que se deve fazer de forma compatível com a demanda a servir, com outras demandas existentes, com o meio ambiente e com a ordenação e uso do território.

Se a gestão integrada dos recursos hídricos for adotada na sua forma ideal, deve evitar alguns problemas hoje existentes com relação a esses recursos, no caso de águas subterrâneas, pode evitar a exploração excessiva, a contaminação de aquíferos, intrusões salinas, interferência nos cursos d'água, rebaixamento excessivo, diminuição de escoamento de base dos rios, subsidências e colapsos.

## 2.3. Investigações geológico-geotécnicas

### 2.3.1. Investigações diretas

Primeiramente devem ser feitas investigações para as avaliações sobre a variabilidade geológica da área, sobre as condições de fluxo da água subterrânea e sobre o potencial de contaminação das fontes de água e dos solos.

---

✓ *Sondagens e amostragem de solo*

As sondagens e amostragens de solo têm por objetivos principais a caracterização da estratigrafia, da hidrogeologia, dos solos, das estruturas, da geoquímica, da extensão da pluma, da petrografia e mineralogia, resistência, deformabilidade, capacidade de troca catiônica, quantidade de matéria orgânica etc.

Para a caracterização de um maciço de solo deve ser coletado um volume, o mais representativas possível, do material original ou área a ser caracterizada.

O objetivo da amostragem do solo é assegurar a obtenção de informações confiáveis, para tanto, segundo CETESB (2001), os seguintes fatores devem ser considerados na elaboração do plano de amostragem do solo:

- Distribuição dos pontos de amostragem;
- Número de pontos de amostragem;
- Profundidade de amostragem;
- Quantidade de amostra necessária;
- Amostras simples e compostas;
- Preparação de amostras de solo;
- Técnicas de amostragem;

Segundo CETESB (2001), em áreas suspeitas de contaminação ou contaminadas, a distribuição das substâncias contaminadoras deve ser investigada tanto no sentido horizontal (superfície do solo) quanto no vertical (perfil do solo). Entretanto, a profundidade de amostragem do solo variará de acordo com alguns fatores que influenciam a distribuição dos contaminantes nesse meio, tais como: natureza da contaminação (substância), tipo de solo e condições do local (uso atual e passado).

De maneira geral, a definição do número de pontos a serem amostrados dependerá do tamanho da área investigada; da qualidade das informações prévias disponíveis, das hipóteses de distribuição espacial da contaminação e do grau de confiança requerido.

✓ *Poços de monitoramento*

Os poços de monitoramento têm como objetivos principais efetuar medições do nível d'água subterrânea (instalação de piezômetros), coletar amostras de água subterrânea para sua caracterização e efetuar ensaios hidrológicos para determinação de velocidade e direções de fluxo, condutividade hidráulica e dispersividade.

O sistema de monitoramento deve ser eficaz em identificar a influência de uma determinada fonte de poluição na qualidade da água subterrânea. As amostragens devem ser efetuadas num conjunto de poços distribuídos estrategicamente, nas

proximidades da área de disposição do resíduo, de forma a oferecer subsídios para o diagnóstico da situação.

A localização estratégica e a construção racional dos poços de monitoramento, aliadas aos métodos eficientes de coleta, acondicionamento e análise de amostras, permitem dados precisos quanto a influência do método de disposição dos resíduos, na qualidade da água subterrânea (CETESB, 2001).

✓ *Ensaio de permeabilidade*

Segundo Aguiar (2001), diversos ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo. Busca-se através disto uma maior representatividade nos resultados, a redução dos custos dos ensaios e o aperfeiçoamento dos aparelhos de medição em campo, tornando-os mais práticos e de fácil utilização.

Os ensaios mais utilizados para a determinação da condutividade hidráulica dos solos são:

- Ensaio em laboratório: de carga constante ou variável

Esses ensaios são realizados com amostras indeformadas, que são colocadas em um cilindro entre duas placas porosas.

No ensaio de carga constante a amostra é submetida a uma carga constante até que se atinja a saturação e que o fluxo de saída se torne constante. No ensaio de carga variável é utilizada a diferença entre as cargas em um determinado intervalo de tempo.

Segundo Vargas (1981) *apud* Aguiar (2001), o ensaio de carga constante é mais usado em solos arenosos, enquanto o ensaio de carga variável é mais usado em solos argilosos devido a grande diferença de permeabilidade dos dois solos e o tempo que seria necessário para um solo argiloso num ensaio de carga constante.

- Ensaio *in situ*: poços e furos

Nestes ensaios obtém-se a condutividade hidráulica saturada. Podem ser realizados tanto com carga constante quanto com carga variável e permitem trabalhar com infiltração ou bombeamento de água.

Para solos granulares os ensaios para obtenção da condutividade hidráulica não saturada têm duas fases, a fase transiente, enquanto o NA é rebaixado e a de regime estacionário, quando a vazão se torna constante. Para aquífero confinado, pode-se usar o ensaio de bombeamento (Aguiar, 2001).

- *Ensaio in situ: Hvorslev*

Segundo Aguiar (2001), no método de Hvorslev são usados piezômetros instalados até a profundidade ensaiada. Da mesma forma que o método anterior, este ensaio pode ser realizado através de adição ou remoção de água do piezômetro. A variação do nível d'água em determinado intervalo de tempo é registrada até que se atinja o estado de equilíbrio.

- *Ensaio in situ: infiltrômetro de duplo anel*

Nesse ensaio é utilizado um infiltrômetro provido de dois cilindros metálicos de diferentes diâmetros, com uma das bordas biseladas para facilitar a penetração no solo.

Para a realização do ensaio, coloca-se água no cilindro interno e externo, de maneira a tornar o fluxo d'água unidimensional. São feitas leituras em tempos subsequentes (1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos) até que o fluxo estabilize-se, de maneira constante.

O ensaio do Infiltrômetro do Anel Duplo (IAD) é estabelecido segundo a norma ASTM-D 3385-88 (1988), e é importante por fornecer informações acerca do comportamento hidráulico dos materiais inconsolidados.

- *Ensaio in situ: câmara de fluxo*

Nesse ensaio utiliza-se um cilindro metálico de aço inox, com a base composta por um material de aço-carbono para dar maior resistência à cravação.

Essa câmara é cravada a 70cm de profundidade, seguindo-se as mesmas rotinas do infiltrômetro de anel duplo (Fabian e Ottoni Filho, 1997 apud Aguiar 2001).

- *Ensaio in situ: perfil instantâneo*

São instalados instrumentos no solo para medição da carga de pressão e do conteúdo de água. Inicialmente este solo é submetido a uma taxa de infiltração até que se alcance um regime estacionário. Depois de alcançado, interrompe-se a recarga, sendo permitida a redistribuição da água dentro do solo. Este processo de redistribuição é acompanhado por medidas periódicas de umidade que são utilizadas no cálculo da condutividade hidráulica (Aguiar, 2001).

## 2.3.2. Investigações indiretas

Dentre os métodos de investigação indireta, os métodos geofísicos elétricos são os mais utilizados em estudos ambientais, principalmente para a detecção de contaminação de águas subsuperficiais (Elis, 1998). Os métodos geofísicos são

técnicas de investigação das estruturas de subsuperfície através da aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se como métodos não invasivos ou não destrutivos.

Esses métodos permitem avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de subsuperfície, com a vantagem da rápida avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor, além da execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (CETESB 2001).

Segundo Elis e Zuquette (1995), os métodos e técnicas geofísicas podem ser utilizados nas mais diversas vertentes do mapeamento geotécnico, como para obter informações básicas para fundações, escavabilidade, disposição de resíduos, estradas, poluição, obras enterradas, estabilidade de taludes, erodibilidade, irrigação e loteamento.

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, os levantamentos geofísicos podem contribuir na identificação da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados. A interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Segundo CETESB (2001), para a seleção de um método geofísico a ser empregado, o ideal é ter conhecimento da geologia local, das características físico-químicas das águas subterrâneas e do contaminante, do tipo de material utilizado e da proximidade de edificações e instalações.

Dentre os aspectos mencionados, dois deles são preponderantes e decisivos na escolha do método geofísico a ser empregado, que são: o tipo de contaminação e o ambiente geológico onde está disposto o contaminante.

Os métodos geoeletricos subdividem-se em eletrorresistividade, polarização induzida (IP), potencial espontâneo (SP), eletromagnéticos e radar de penetração (GPR) e utilizam os parâmetros físicos expostos na Tabela 1 para a determinação de seções geoeletricas.

Tabela 01: Métodos geoeletricos e os parâmetros físicos correspondentes analisados (Braga, 1999).

<b>METODOS GEOELÉTRICOS</b>	<b>PARÂMETROS FÍSICOS</b>
Eletrorressistividade	resistividade elétrica
polarização induzida	variações de voltagem
potencial espontâneo	potencial natural
eletromagnético	condutividade
radar de penetração	constante dielétrica/permisividade

Segundo Braga (1999), as superfícies de separação de uma seção geoeletrica nem sempre coincidem com os limites geológicos determinados pelos caracteres litológicos genéticos e geológicos em geral. Um pacote com geologia homogênea pode gerar seções subdivididas em camadas geoeletricas distintas, assim como pode ocorrer de várias camadas geológicas diferentes gerarem uma seção sem descontinuidades.

✓ *Eletrorressistividade*

Dentre os métodos elétricos, o método da eletrorressistividade, por fazer o uso da condução direta de corrente, é provavelmente o mais simples para manipulação e também o mais simples para entendimento. Este método procura identificar a distribuição da resistividade no solo e utilizá-la como subsídio no estudo da subsuperfície. O método tem sido empregado em pesquisas de águas subterrâneas visando a monitoração de aquíferos em terrenos sedimentares, na prospecção de minérios condutivos, em estudos arqueológicos, em estudos ambientais e de fontes geotermiais, e na geologia de engenharia visando determinar a profundidade da rocha sã (Telford *et al.* 1990).

O método da eletrorressistividade consiste basicamente no uso de medidas da diferença de potencial elétrico entre dois pontos do terreno, associadas às distribuições de correntes elétricas contínuas ou de baixa frequência, de origem artificial, visando determinar a resistividade elétrica dos materiais geológicos em subsuperfície (Santos, 2003).

Segundo Elis (1998), o método da eletrorressistividade consiste na introdução de uma corrente elétrica artificial através de dois eletrodos (A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo a determinação da resistividade real ou aparente em subsuperfície.

Nas profundidades de interesse a resistividade da Terra é função principalmente da porosidade das rochas/estruturas e do conteúdo em água, ou seja, uma alta porosidade gera um alto grau de saturação em água, proporcionando baixa resistividade/alta condutividade.

Segundo Elis (1998) a resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é função principalmente de quatro fatores: composição mineralógica, porosidade, teor de água e quantidade e natureza dos sais dissolvidos. Nos estudos ambientais os fatores mais importantes são a quantidade de água contida e a salinidade dessa água, pois o aumento desses valores leva a uma diminuição de valores de resistividade.

Existem duas técnicas de aplicação do método de eletrorresistividade, o de sondagem elétrica vertical (SEV) e o de caminhamento elétrico, sendo que cada um permite uma gama de configurações de eletrodos, promovendo uma versatilidade muito boa do método.

✓ *Sondagem elétrica vertical (SEV)*

A técnica de sondagem elétrica vertical é normalmente utilizada quando deseja-se informação pontual, consiste numa série de determinações de resistividade aparente, em um ponto fixo, a profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos A e B (Fernandes, 1984), como ilustrado na Figura 01.

Em investigações ambientais, a técnica da SEV desempenha papel importante na detecção e caracterização da poluição do subsolo e seus recursos hídricos (Lima e Porsani, 1994).

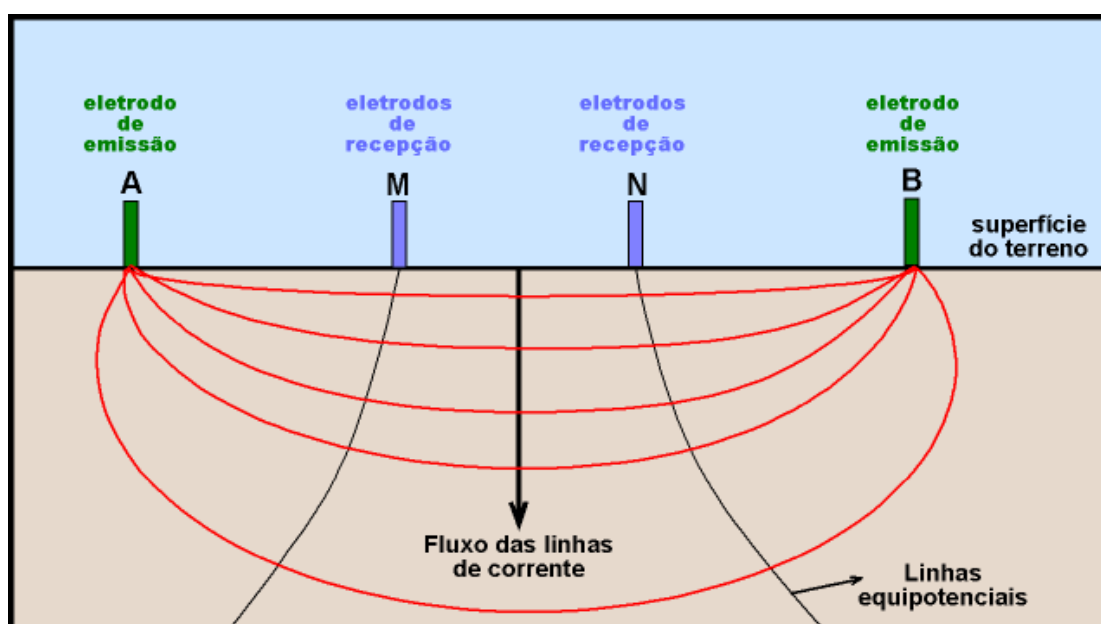


Figura 01: Representação esquemática de uma sondagem elétrica vertical.

A aplicação de técnicas adequadas durante a fase de coleta de dados de SEV associada a métodos robustos de interpretação permite estimar parâmetros importantes na caracterização geológico-hidroológica de áreas de disposição de resíduos tais como a profundidade da rocha sã, a profundidade do nível estático e a direção do fluxo da água subterrânea (Cavalcante *et al.* 1996).

Os métodos geelétricos são viabilizados para investigações hidroológicas pela quantidade e as propriedades físico-químicas da água intersticial, bem como a sua interação com a rocha hospedeira, que norteiam o comportamento da condução elétrica na rocha (Cavalcante *et al.* 1996).

✓ *Caminhamento elétrico*

O método de caminhamento elétrico consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Fixa-se um espaçamento entre eletrodos e caminha-se ao longo de perfis, efetuando medidas de resistividade aparente (Elis, 1998), como indicado na Figura 02.

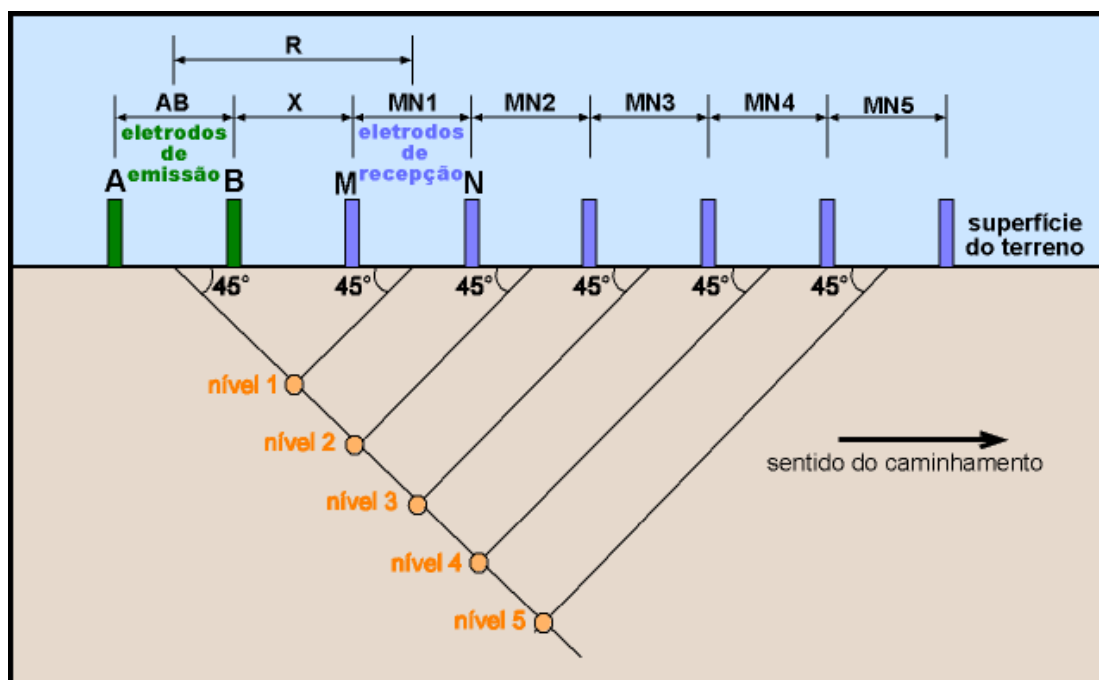


Figura 02: Representação esquemática de um caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo.

As múltiplas possibilidades de disposição geométrica de eletrodos correspondem a uma grande variedade de arranjos. Os mais utilizados nos levantamentos elétricos são Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo.

A técnica mais apropriada, sobretudo em áreas complexas, consiste na combinação sondagem-caminhamento, que permite definir tanto as variações verticais como horizontais de resistividade (Azambuja *et al.* 1999).



---

✓ *Polarização Induzida*

Segundo Sumner (1976) *apud* Elis (1998) a polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente, observado como reposta retardada a voltagem, em materiais naturais. Consiste na passagem de corrente elétrica, que quando cortada, o campo elétrico não desaparece imediatamente nem exponencialmente, mas de um modo lento, o que caracteriza a polarização induzida ou residual. A resposta da polarização induzida é medida, na prática, como uma variação de voltagem em função do tempo ou da frequência, denominados, respectivamente, IP-Domínio do Tempo e IP-Domínio da Frequência.

✓ *Potencial Espontâneo*

O método de potencial espontâneo utiliza o campo natural, é baseado no fato de que em determinadas condições, heterogeneidades condutoras do subsolo se polarizam e originam correntes elétricas no solo.

Segundo Braga (1999), o potencial natural ou espontâneo é causado por atividades eletroquímicas ou mecânicas, sendo a água o agente mais importante desse mecanismo.

Esses potenciais podem ser gerados pela presença de corpos metálicos, contatos geológicos de matérias de diferentes condutividades, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, gradientes térmicos e de pressão nos fluidos de subsuperfície (Gallas, 2000).

O equipamento utilizado restringe-se apenas ao circuito de recepção e a interpretação é realizada por mapas e seções de isovalores de potencial. Esse método pode ser utilizado para estudos ambientais, inclusive para determinação das direções de fluxo da água subterrânea.

✓ *Eletromagnético Indutivo*

O método eletromagnético indutivo caracteriza-se pelo uso de equipamentos de operação muito simples e rápida (Figura 03 e 04), o que permite extensa aplicação da metodologia em estudos ambientais, como mapeamento de plumas de contaminação, intrusões salinas, exploração arqueológica, entre outros.



Figura 03 e 04: Exemplos de condutímetro e modo de operação (CETESB, 2001).

O equipamento mede diretamente a condutividade dos materiais geológicos com base nos princípios da indução eletromagnética.

Segundo Yokoyama (2003), este sistema é composto por duas bobinas: uma transmissora (Tx) e outra receptora (Rx). Acoplada à bobina transmissora há um módulo de controle e emissão de corrente elétrica, alimentado por uma bateria e na bobina receptora está acoplado um módulo de leitura, esses módulos são ligados por um cabo de referência.

A operação desse método consiste na injeção de uma corrente alternada na bobina transmissora, que gera um campo magnético primário, ortogonal a disposição da bobina. Esse campo magnético primário induz correntes elétricas no subsolo. Essas correntes, ao passar por um condutor, dão origem a um campo magnético secundário, que pode ser lido pela bobina receptora, juntamente com o campo magnético primário (Figura 05).

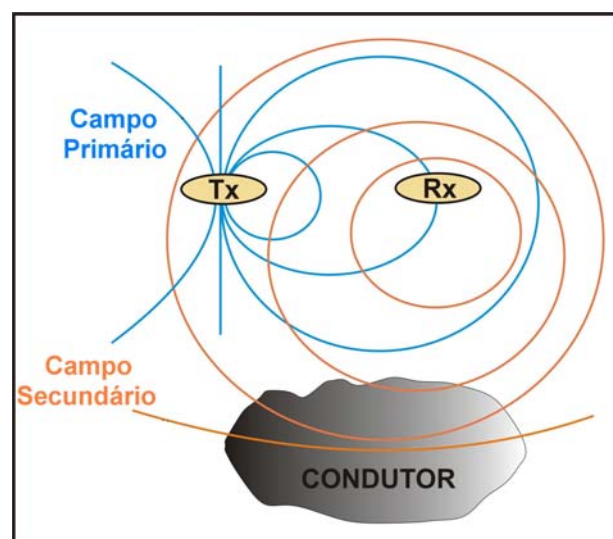


Figura 05: Princípio de operação do método eletromagnético indutivo (Yokoyama, 2003).

Segundo CETESB (2001), o método eletromagnético indutivo apresenta as seguintes potencialidades na investigação de áreas contaminadas:

- Rápida aquisição de dados, resultando em levantamentos de alta densidade e definição;
- Instrumentos de registros contínuos podem aumentar a velocidade, densidade e definição dos levantamentos, permitindo a cobertura total do local investigado;
- Os limites da pluma de condutividade do solo ou das águas subterrâneas podem ser detectados e medidos;
- A faixa de profundidade de aquisição de dados varia de 0,75 a 60 metros, aproximadamente, dependendo do equipamento utilizado;
- As leituras são realizadas diretamente em unidades de condutividade elétrica (miliSiemens/m), possibilitando o uso direto dos dados de campo, e correlacionando-os à condutividade de amostras do solo e da água subterrânea;
- Capacidade de mapear variações das diferentes porções hidrogeológicas;
- A direção de fluxo da pluma de contaminação pode ser determinada através dos mapas e seções de isocondutividade;
- Medidas levantadas em épocas diferentes podem fornecer taxas da migração dos contaminantes no solo e na água subterrânea, contribuindo para o monitoramento local;
- Possibilidade de mapear minerações abandonadas, estimar seus volumes e detectar resíduos enterrados;
- Detecção e mapeamento de dutos metálicos enterrados.

✓ *Radar de Penetração (GPR)*

O radar de penetração consiste na emissão contínua de ondas eletromagnéticas e recepção dos sinais refletidos nas interfaces ou estruturas em subsuperfície.

O GPR produz uma onda eletromagnética de alta frequência que é transmitida ao solo, onde a propagação do sinal depende das propriedades elétricas dos materiais existentes. Um pulso de energia é irradiado para o subsolo por intermédio de uma antena transmissora, sofrendo reflexões, refrações e difrações, sendo então captado por uma antena receptora (Gandolfo, 1999).

O sistema consiste, basicamente, de seis unidades: computador, unidade de controle, transmissor, receptor, antena transmissora e antena receptora (Figuras 06 e 07). Tanto a unidade transmissora como a receptora são acopladas às antenas que, estão conectadas a unidade de controle por cabos de fibra ótica, que por sua vez é

conectada a um computador portátil, que envia sinais para o módulo transmissor e receptor, permitindo assim uma visualização quase que imediata do sinal registrado (Yokoyama 2003).



Figura 06: Equipamento para operação do radar de penetração (CETESB, 2001).



Figura 07: Exemplo de modo de operação do radar de penetração (CETESB, 2001).

O radar de penetração, segundo CETESB (2001), apresenta as seguintes potencialidades na investigação de áreas contaminadas:

- Realização de perfis ao longo de linhas, produzindo seções contínuas e instantâneas;
- A faixa de velocidade varia de 0,5 a 2,0 km/h para perfis detalhados e velocidades superiores a 8,0 km/h em perfis de reconhecimento;
- Os registros gráficos podem ser interpretados no campo;
- Boa definição para corpos de poucos centímetros a 1 metro, dependendo da antena a ser utilizada;
- Adequação do equipamento às condições locais através da mudança de antenas (altas frequências obtêm melhor definição, baixas frequências fornecem maior profundidade de investigação);

- Profundidades aproximadas e relativas são facilmente estabelecidas, assumindo-se simples condições e técnicas de interpretação;
- Possibilidade de detecção de contaminação por compostos orgânicos;
- Utilização do método em áreas urbanas;
- Aplicabilidade sobre água, concreto, asfalto ou qualquer outro tipo de superfície, com exceção das superfícies metálicas e água do mar);
- Uma ampla variedade de técnicas de processamento pode ser aplicada aos dados de radar, para aperfeiçoar a interpretação e apresentação;
- Capacidade de detecção de dutos ou galerias subterrâneas de qualquer tipo de material;
- Possibilidade de identificação de vazamentos em tubulações.

✓ *Métodos geoeletricos no estudo de contaminação de águas subterrâneas*

Cada método geoeletrico, que pode ser utilizado na investigação de contaminação, é aplicado visando sua melhor resposta e definição, para tanto deve-se analisar as condições locais e objetivos da investigação, adequando assim o melhor método, na Tabela 2 é exposto um resumo de algumas situações e métodos indicados.

Tabela 02: Comparativo de aplicações dos métodos geoeletricos (adaptado de CETESB, 2001 e Braga, 1999).

	<b>Eletroresis-tividade</b>	<b>Polarização Induzida</b>	<b>Potencial espontâneo</b>	<b>Eletromag-nético</b>	<b>Radar de Penetração</b>
<b>Caracterização geológica</b>	adequado	adequado	alternativo	alternativo	adequado
<b>Direção de fluxo da água</b>	adequado	adequado	adequado	adequado	não recomendado
<b>Detecção de contaminação</b>	adequado	alternativo	adequado	adequado	alternativo
<b>Espessura do aquífero</b>	adequado	alternativo	não recomendado	alternativo	alternativo
<b>Determinação do nível d'água</b>	adequado	não recomendado	não recomendado	alternativo	adequado

Segundo CETESB (2001), devido à alta condutividade elétrica apresentada pelas argilas, o contraste entre o valor da condutividade natural do meio e a condutividade dos contaminantes inorgânicos pode ser pequeno, podendo mascarar a detecção da contaminação. Além disso, a presença de argila atenua a propagação dos campos e ondas eletromagnéticas, reduzindo a profundidade de investigação dos

métodos eletromagnéticos indutivos e do radar de penetração, que atingem suas maior profundidades de investigação em terrenos arenosos.

Os sedimentos superficiais não consolidados e os materiais intemperizados tendem a apresentar maior resistividade e menor teor de argila em relação aos materiais mais compactados. Assim, esse tipo de meio favorece a aplicação dos métodos de eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e o radar de penetração.

A aplicação dos métodos geofísicos elétricos em investigações hidrológicas e ambientais é bastante difundida (Buselli *et al.* 1990). Em estudos ambientais, particularmente na avaliação de áreas de disposição de resíduos sólidos, tanto na identificação litológica dos materiais de sub-superfície, como na estimativa da profundidade do lençol freático e sentido do fluxo da água subterrânea, os métodos de eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo podem ser empregados a custos e prazos relativamente reduzidos, sem alterar o meio físico.

A inclusão da geofísica elétrica em estudos hidrogeológicos convencionais possibilita uma visão mais completa e, portanto mais segura da área, uma vez que os métodos fornecem informações sobre a subsuperfície de maneira extensiva e praticamente contínua com um mínimo de impacto ambiental. Além disso, esta técnica é uma forma otimizada para efetuar o monitoramento e proteger a qualidade dos recursos hídricos, em áreas de elevados riscos de poluição subterrânea. (Cavalcanti *et al.* 2002).

Ellert *et al.* (1986) utilizou métodos geofísicos para a determinação da profundidade e extensão da migração de agentes poluentes, bem como os locais de maior concentração em aterro sanitário (Santo André -SP) e em área de rejeito industrial (vinho em Novo Horizonte-SP). Indica a aplicabilidade do método para fins de locação da extensão e da intensidade de contaminação do subsolo.

Mendes (1987) aplicou sondagem elétrica vertical, caminhamento elétrico, sondagem eletromagnética e caminhamento eletromagnético no mapeamento e monitoramento da poluição de águas subterrâneas gerada por aterros sanitários, áreas de infiltração da vinhaça, intrusão de água salgada em aquíferos costeiros e áreas com infiltração e vazamentos de produtos e efluentes industriais, em varias regiões do estado de São Paulo. Concluiu a viabilidade da utilização de técnicas geofísicas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.

Cottas *et al.* (1991) definiu a superfície e o fluxo do lençol freático, para orientar a instalação de piezômetros em um aterro em Rio Claro - SP, utilizando sondagens elétricas, e concluiu a eficiência do método para tal aplicação.

Elis (1993) aplicou caminhamento elétrico na definição de limites da cava preenchida por lixo, em um lixão desativado em Ribeirão Preto – SP. Concluiu que o método geofísico utilizado se presta bem para fins de definição da área de resíduos e contaminantes em subsuperfície.

Malagutti Filho *et al.* (1997) com utilização de caminhamento elétrico, sondagens elétricas, sísmica de refração e eletromagnético indutivo, caracterizou os materiais geológicos, resíduos, nível d'água e fluxo subterrâneo no aterro controlado de Rio Claro – SP e também percebeu a eficiente aplicabilidade dos métodos geofísicos para os fins utilizados.

Mota e Fialho Rodrigues (1998) caracterizaram sub-superficialmente um aterro desativado, instalado em meio cárstico e puderam detectar focos de contaminação com o auxílio da eletrorresistividade, comprovando a aplicabilidade dos métodos geofísicos elétricos para identificação de tais contrastes.

Elis e Zuquette (2002) aplicaram o caminhamento elétrico e puderam mapear de maneira eficiente a zona contaminada e com sondagens elétricas determinaram a profundidade da zona saturada e a espessura dos materiais inconsolidados e resíduos no lixão desativado e no aterro sanitário de Ribeirão Preto – SP.

Mendes e Verma (2002) utilizaram diferentes métodos geofísicos na pesquisa hidrogeológica, com intuito de minimizar interpretações ambíguas, na prospecção de água subterrânea na região de Belém (PA) e puderam caracterizar duas zonas aquíferas distintas na região de Belém, comprovando a aplicação eficiente dos métodos utilizados.

Cavalcanti *et al.* (2002) aplicaram sondagem elétrica vertical, polarização induzida e potencial espontâneo para a avaliação das condições hidrológicas subterrâneas na região do novo aterro sanitário de Salvador – BA, antes de sua efetiva utilização, obtendo bons resultados, que permitiram uma caracterização consistente do local.

Carbonell, *et al.* (2002) utilizou, com sucesso, métodos geofísicos para determinação de uma pluma de contaminação em um aquífero superficial na Base Área Militar de Wurstmith em Oscoda, Michigan, USA. Percebeu a eficiência dos métodos utilizados, mostrando vantagens oferecidas, como a investigação de grandes extensões em tempo relativamente pequeno.

## 3. Localização e Características Gerais da Área de Estudo

### 3.1. Localização

A área de estudo, na qual insere-se o lixão desativado de São Carlos, localiza-se na Fazenda Santa Madalena, no município de São Carlos, no estado de São Paulo. Fica situada entre as coordenadas UTM 209678-210361 Leste e 7555344-7554535 Norte.

O município de São Carlos limita-se ao norte com os municípios de Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia; ao sul com Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina; a oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense e a leste com Descalvado e Analândia.

Segundo a Prefeitura Municipal de São Carlos (2005), a área estudada insere-se na Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí, como pode ser observado na Figura 08.

O lixão desativado fica cerca de 20 km do centro da cidade de São Carlos, o acesso pode ser feito pela rodovia Washington Luís (SP-310) no sentido São Carlos – São Paulo por aproximadamente 17 km, tomando-se estrada vicinal a leste, aproximadamente no km 221 da rodovia, em direção ao município de Analândia por mais 3 km, conforme representado na Figura 08.



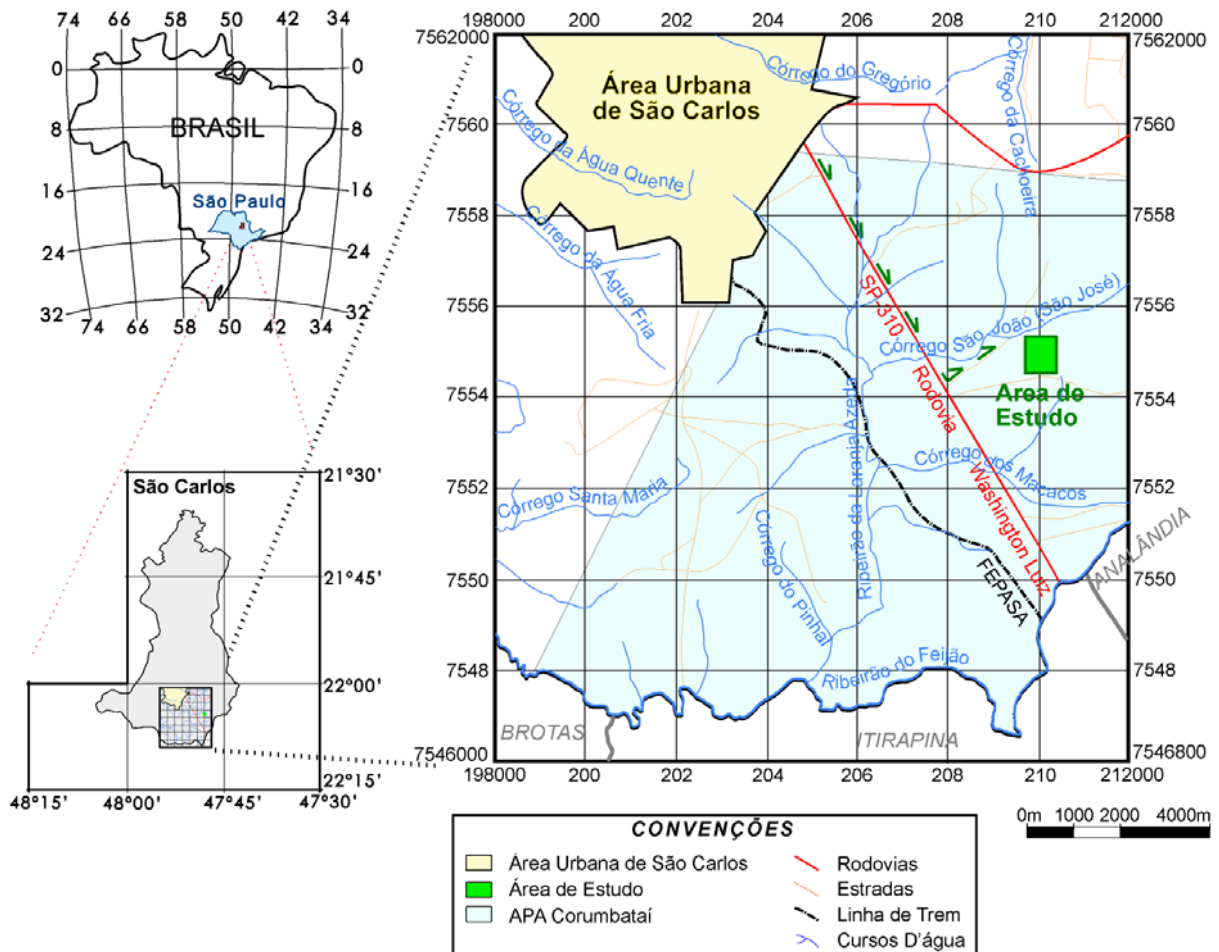


Figura 8: Localização da área de estudo (modificado de Gonçalves, 1986; Muro, 2000 e Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).

### 3.2. Clima

Clima pode ser definido como o conjunto de ocorrências meteorológicas que caracterizam as condições médias em uma determinada região da superfície do globo terrestre.

A área de estudo localiza-se na zona considerada como tropical de altitude, no domínio de clima Cwa da classificação de Köppen, que é caracterizado por clima quente com inverno seco, no qual a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (Miranda, 2005).

Segundo Miranda (2005), já ocorreram temperaturas extremas com mínimas de -0,3°C (em 27/6/94) e máximas de 35,8°C (em 26/11/91). Sendo que as médias diárias variam de 5,5 a 28,1°C, as médias mensais de 17,3 a 23,6°C, e as médias anuais entre 20,8 e 21,7°C.

No mês mais seco o total das chuvas não chega a atingir 30 mm, enquanto que do mês mais chuvoso atinge valores dez ou mais vezes maiores do que os do mês mais seco. Embora o período seco seja de junho a agosto, de maneira geral varia num período de seis meses, de junho a novembro, com déficit hídrico mais intenso, ou de abril a setembro, considerando o período com menos chuvas (Miranda, 2005).

A precipitação pluvial máxima mensal é de 470 mm, com até 26 dias chuvosos, e a máxima diária de 104,6 mm, com valores acumulados anuais variando entre 1.138 e 1.593 mm, concentrada de outubro a março (Miranda, 2005).

Segundo Tolentino (1967) os ventos predominantes no município sopram de nordeste (30,2%, em fevereiro e março), sudeste (19,4%, de setembro a novembro e abril), leste (14,8%, de maio a julho) e norte (12,3%, em janeiro), com médias de velocidades, respectivamente de 3,5, 4,0, 3,1 e 3,1 m.s<sup>-1</sup>. Os ventos menos frequentes sopram de noroeste (8,2%), oeste (5,9%), sul (4,7%) e sudoeste (5,9%), com médias de velocidades de 3,3, 3,0, 3,3 e 2,9 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente. A média mensal da pressão atmosférica varia de 913 a 923 milibares.

Segundo Miranda (2005) a média diária da umidade relativa do ar varia entre 30 e 100%, com médias mensais entre 53 e 89%, e médias anuais entre 71 e 77%.

### 3.3. Geomorfologia

A geomorfologia de uma região é resultante da atuação de processos da dinâmica interna da Terra e da interação da ação do sol, da água e da litologia. A localização geomorfológica geral da área de estudo pode ser observada na imagem de satélite da Figura 09.

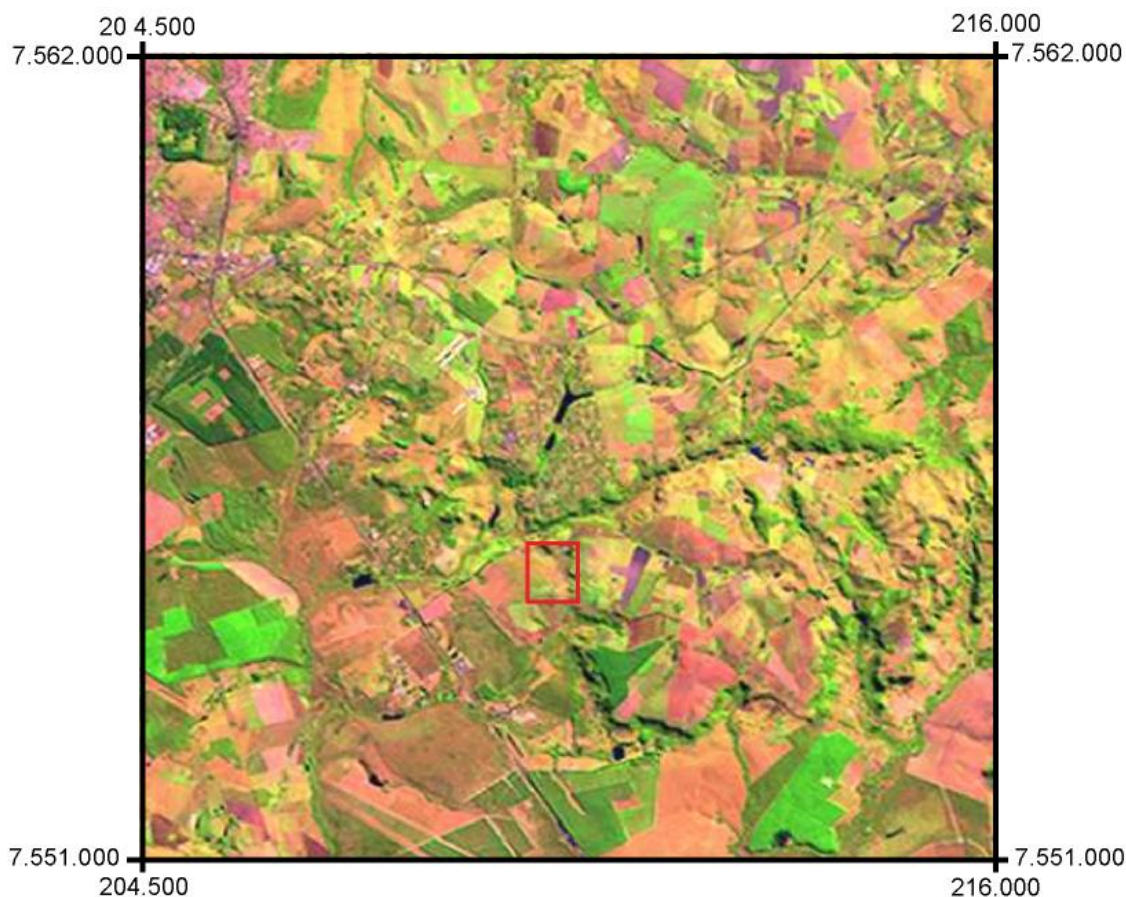


Figura 09: Localização da área de estudo em imagem de satélite (Imagem Landsat 7 – Miranda e Coutinho, 2001).

De acordo com a proposta de Almeida (1964) o Estado de São Paulo foi dividido em cinco províncias geomorfológicas: Planalto Atlântico, Província Costeira, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental, sendo que a área de estudo localiza-se na província de Cuestas Basálticas, como indicado na Figura 10.

Segundo IPT (1981) as *cuestas* constituem uma das feições mais marcantes do relevo paulista. São formas de relevo sustentadas por rochas basálticas e caracterizadas por exibirem escarpas nos seus limites com a depressão periférica, seguidas de uma sucessão de grandes plataformas estruturais de relevo suavizado, inclinadas para o interior em direção a calha do Rio Paraná. Internamente as plataformas apresentam escarpas menores, dando um caráter misto de colinas e escarpas ao relevo geral.

Os reversos das *cuestas* formam feições geomorfológicas que receberam a designação de Planaltos Residuais e foram divididas em cinco setores por Ross e Moroz (1997), sendo que a área de estudo situa-se no Planalto Residual de São Carlos, localizada no interflúvio Tietê/Mogi-Guaçu.

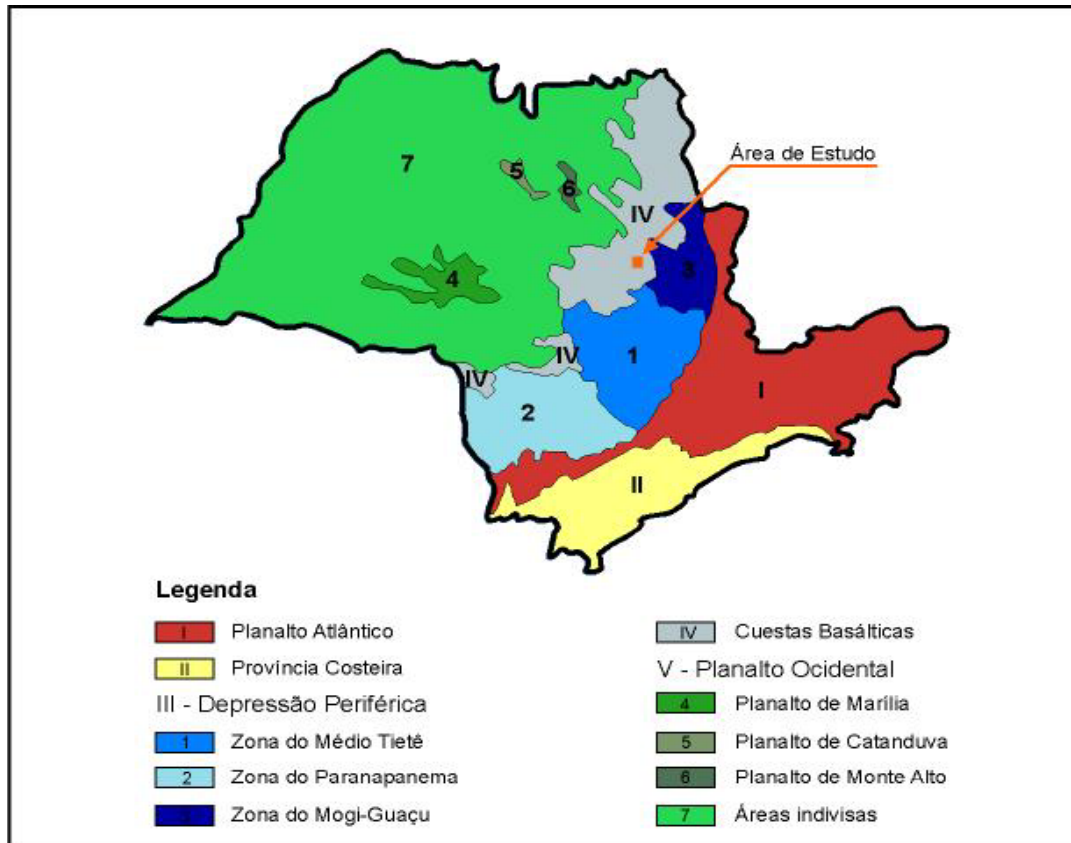


Figura 10: Localização da área de estudo na província de Cuestas Basálticas, segundo Almeida, 1964.

Segundo Ross e Moroz (1997) as altitudes do Planalto residual de São Carlos variam de 600 a 900m, com vertentes de baixa declividade, entre 2 e 20%, atingindo 30% apenas nas porções de relevo mais dissecadas. As formas de relevo predominante são as denudacionais, basicamente formadas por colinas de topos convexos e tabulares. Os vales têm entalhamentos que variam de 20 a 80m e a dimensão média interfluvial varia de 250 a 3750m. Nessa área a densidade de drenagem é classificada como média a alta.

### 3.4. Vegetação

Segundo Miranda (2005) no município de São Carlos correm os seguintes tipos de vegetação: savana, floresta estacional, floresta secundária e vegetação ripária, além de áreas de reflorestamento.

Segundo SMA/SP (2004), na região do município de São Carlos, a vegetação apresenta a distribuição ilustrada na Figura 11.

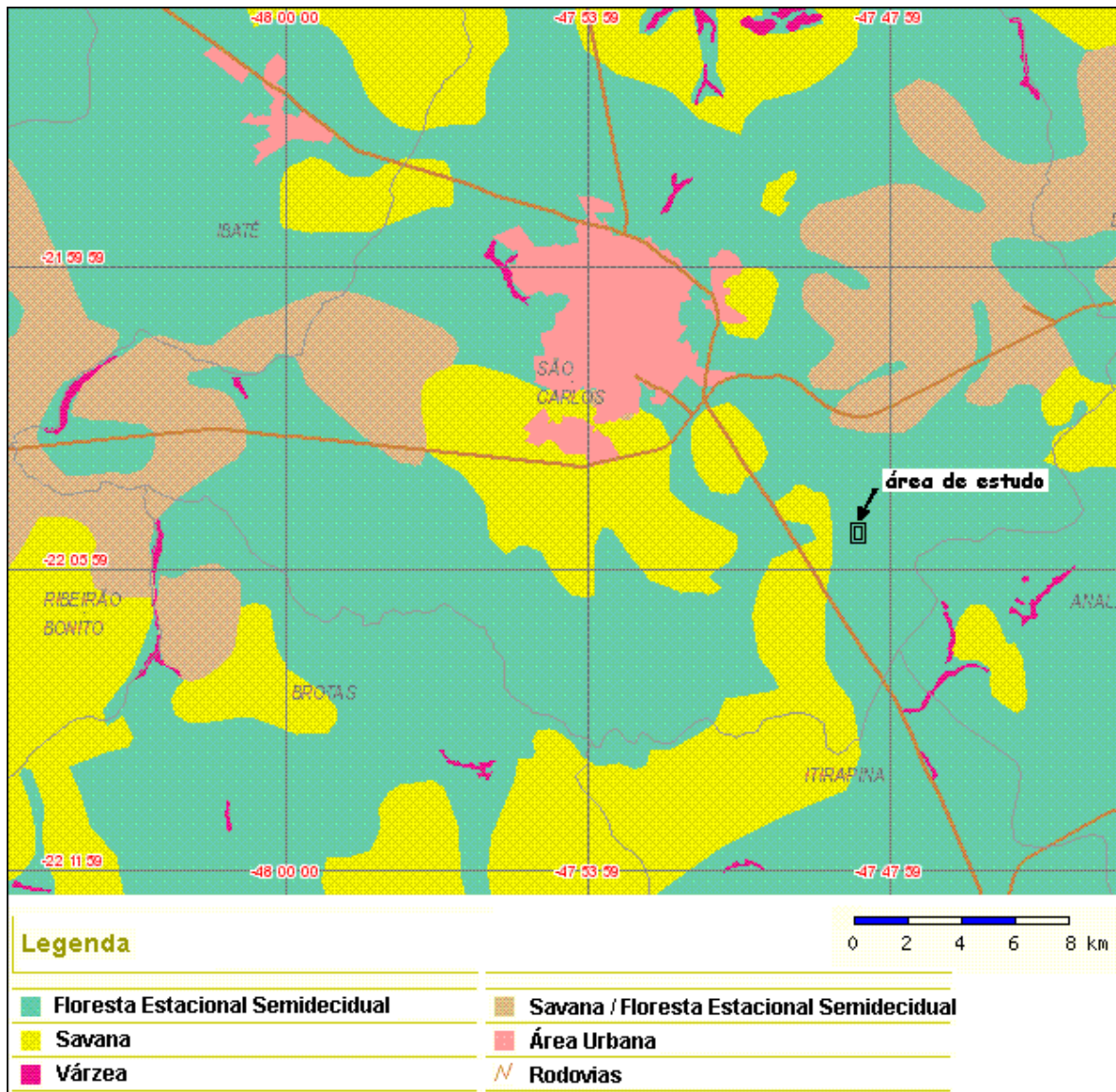


Figura 11: Vegetação na região do município de São Carlos, com indicação da área de estudo (modificado de SMA/SP, 2004).

A floresta estacional semidecidual está condicionada a estacionalidade climática (verão chuvoso e inverno seco ou clima subtropical sem seca, mas com intenso frio, temperaturas médias abaixo de 15°C) e pela queda das folhas durante o período seco, em 20 a 50% das árvores caducifólias da floresta. Hoje, as pequenas extensões de florestas estacionais semidecíduais correspondem às Unidades de Conservação e a matas residuais em propriedades privadas (IBGE, 1991).

Atualmente na área de estudo a vegetação existente é o capim “brachiaria”, com áreas de pastagem de búfalos e porções ocupadas com o plantio de goiabas.

### 3.5. Pedologia

A classe de solos predominante na área de estudo, assim como no Estado de São Paulo (52% da área do Estado), é a dos Latossolos, em relevo pouco declivoso (Miranda, 2005). Na Figura 12 pode ser observada a distribuição das classes de solos que ocorrem na região do município de São Carlos, assim como na área de estudo.

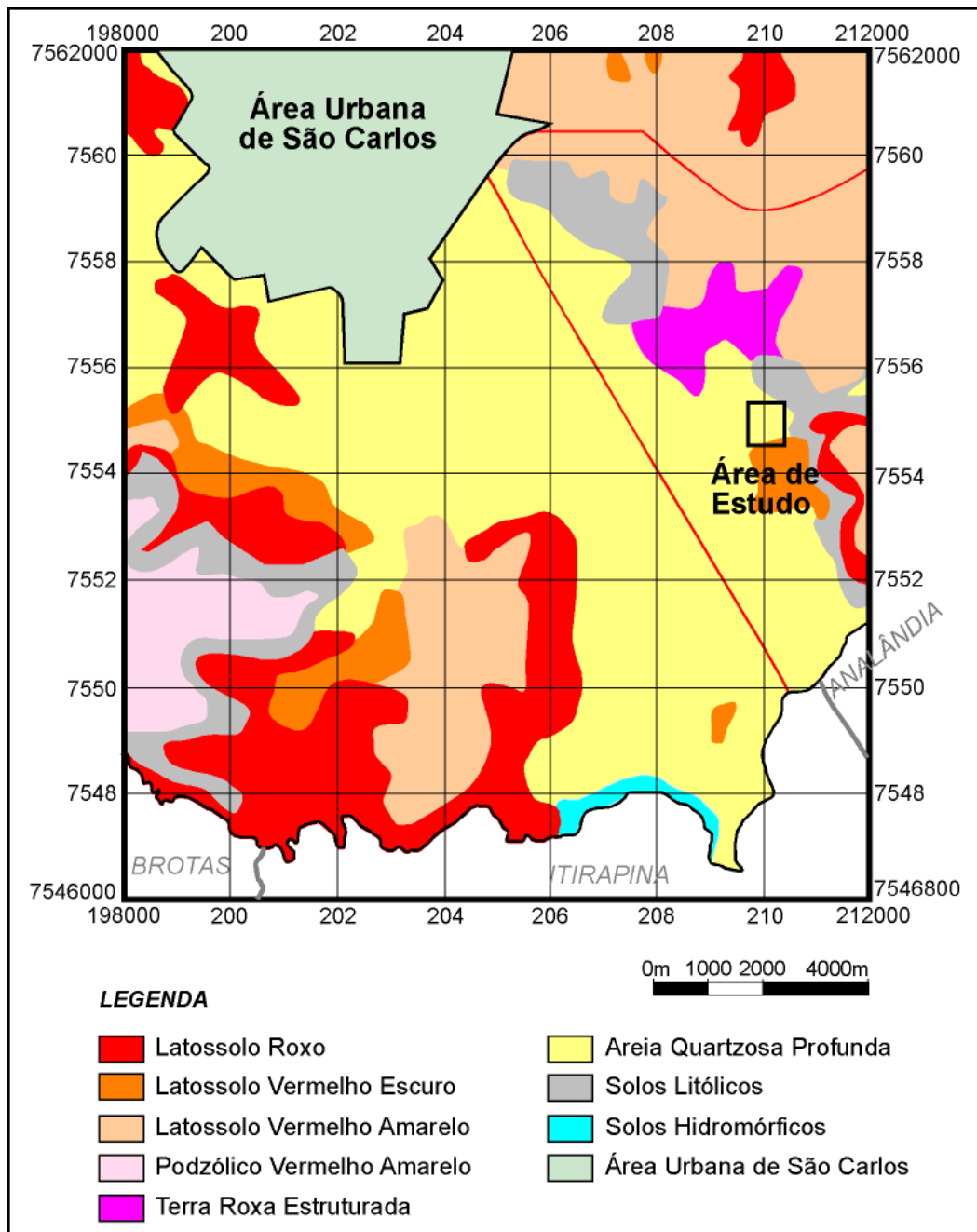


Figura 12: Solos presentes na região do município de São Carlos, com indicação da área de estudo (modificado de Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia - baseado no levantamento pedológico semi-detalhado de estado de São Paulo *apud* Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).

Os Latossolos Roxos (LR) são solos bem drenados, com seqüência de horizontes A-B-C e pequena diferenciação entre horizontes. São solos de coloração vermelho-arroxeadada, argilosos, bastante porosos e profundos, com pequena variação de cor entre os horizontes. Apresentam saturação de bases variável, sendo que a fertilidade natural pode ser alta ou baixa. Os teores de óxido de ferro e manganês são altos (Lepsch, 1994).

Os Latossolos Vermelho Escuros (LE, LEa) são solos bem drenados, com seqüência de horizontes A-B-C e pequena diferenciação entre horizontes. São solos de coloração vermelho escura, ácidos, com saturação de bases baixa e com teores de óxido de ferro intermediários entre o latossolo roxo e o latossolo vermelho amarelo (Lepsch, 1994).

Os Latossolos Roxo e Vermelho Escuro estão relacionados à classe de Latossolos Vermelhos, segundo Oliveira (1999).

Os Latossolos Vermelho Amarelos (LV, LVa) são solos bem drenados, com seqüência de horizontes A-B-C, pequena diferenciação entre horizontes, relação textural (% de argila do horizonte B / % de argila do horizonte A) em torno de 1,3. Apresentam coloração de amarela até vermelha, ácidos, com saturação de bases baixa e baixos teores de óxidos de ferro (Lepsch, 1994).

Esta classe de solo está relacionada aos Latossolos Vermelho-Amarelos, segundo Oliveira (1999). Geralmente são solos profundos, em relevo suavemente ondulado a quase plano.

Os solos Podzólicos Vermelho Amarelos (PV, PVp, PVIs) são solos bem drenados, com seqüência de horizontes A-E-B-C e nítida diferenciação entre os horizontes. Apresentam o teor de argila do horizonte B bem mais elevado que dos horizontes superficiais. São ácidos e com saturação de bases baixa (Lepsch, 1994).

De acordo com Oliveira (1999) esse solo podzolizado pode ser relacionado à classe dos Argissolos (Vermelho-amarelos). Os Argissolos compreendem grande área do Estado de São Paulo, sendo considerada a classe de maior expressão espacial, depois dos Latossolos.

As Areias Quartzosas ou Regossolos (R) são solos pouco desenvolvidos, constituídos de um horizonte A assentado sobre um horizonte C, profundo e arenoso, o material de origem constitui-se de arenitos (Lepsch, 1994). De acordo com Oliveira (1999) os regossolos estão relacionados à classe Neossolos Quartzarênicos. Em geral são solos profundos e muito porosos, porém desprovidos de minerais primários intemperizáveis.

Os Solos Litólicos ou Litossolos (Ligr, Liac) são solos muito rasos, pouco desenvolvidos, constituídos pelo horizonte superficial, de pequena espessura, formado

com acumulação de matéria orgânica, seguido de rochas pouco alteradas, consolidadas ou semibrandas (Lepsch, 1994). Estes solos estão relacionados à classe Neossolos Litólicos, segundo Oliveira (1999).

Os Solos hidromórficos (Hi) são solos intrazonais, nos quais as características equivalentes dos solos zonais não se desenvolveram, em grande parte devido à grande influência da água no perfil. Essa influência da água está condicionada, principalmente, pelo relevo (Lepsch, 1994). Estes solos estão relacionados aos Gleissolos, de acordo com Oliveira (1999). Os Gleissolos apresentam sérias limitações em função da presença de lençol freático e da pouca profundidade, além do encharcamento.

## 3.6. Hidrologia

### 3.6.1. Águas Superficiais

Os rios são as principais unidades morfológicas da bacia hidrográfica e interagem diretamente com a atmosfera e seu entorno. As bacias hidrográficas são unidades naturais da paisagem, refletindo os recursos presentes e as atividades interligadas e interdependentes, não sendo delimitadas por limites políticos (Miranda, 2005).

A área de estudo insere-se na macrobacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, na bacia do Feijão (Figura 13). A Bacia do Feijão é responsável por 40% do abastecimento da água de São Carlos, além de ser área de recarga do Aquífero Guarani.

Uma das fontes de degradação da qualidade da água dos cursos formadores da bacia é a presença do lixão (área de estudo), situado sobre nascentes da sub-bacia do Córrego São José (Menezes, *et al.*, 1995).

Segundo Ferrante (1990) a Bacia do Feijão apresenta drenagem bastante densa, do tipo dendrítica, sendo o Córrego São José um canal de ordem 3, com densidade hidrográfica alta.



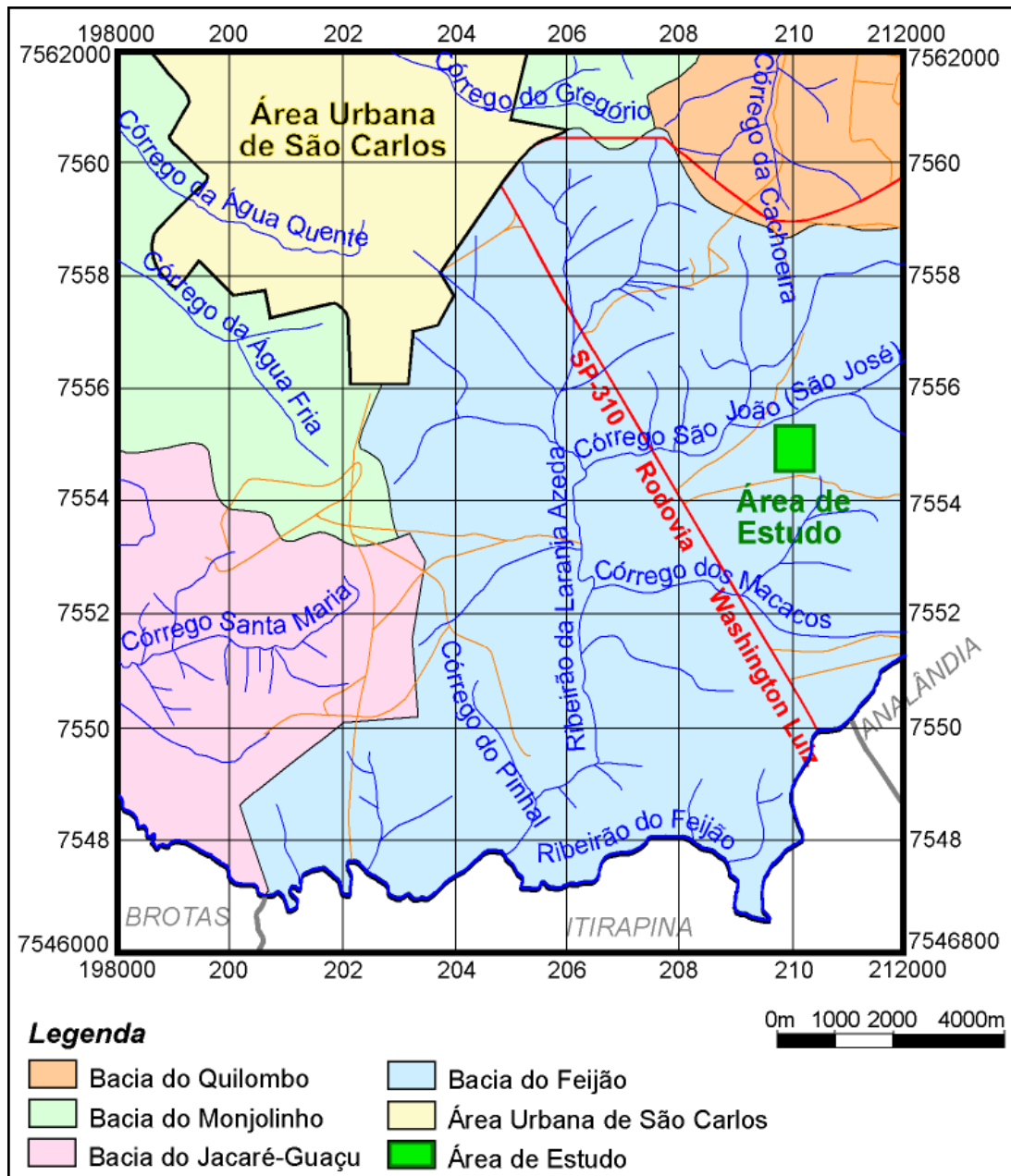


Figura 13: Divisão de bacias hidrográficas na região da área de estudo (baseado em Prefeitura Municipal de São Carlos, 2005).

Segundo dados de Rios (1993) a qualidade do Córrego São José variou de boa a muito boa na região a montante do lixão, tornando-se péssima imediatamente após a passagem pelo lixão, nessa região pode ser observada a presença de resíduos carreados até o local nos períodos de chuvas intensas (Figura 14).



Figura 14: Foto da situação atual, com presença de resíduos, no córrego a jusante do corpo do lixo.

Após atravessar extensa várzea à jusante do lixo, a qualidade variou de boa a pobre. Segundo Matheus *et al.* (1992) essa melhora de qualidade se deve a várzea, que representa um filtro biológico e ecológico.

### 3.6.2. Águas Subterrâneas

O estado de São Paulo situa-se sobre um grande manancial de água subterrânea, o Aquífero Guarani, de grande importância na captação de água para abastecimento.

De acordo com a EMBRAPA (2004), a água contida nesse aquífero é de excelente qualidade e suficiente para abastecer a atual população brasileira por 2.500 anos. É a maior reserva de água doce subterrânea do mundo. Sua área se estende por 1,15 milhões de quilômetros quadrados, sendo a maior parte (71%) localizada sob território brasileiro. Em seguida vem a Argentina, com 19%, o Paraguai com 6% e o Uruguai com 4%.

No Brasil, ele está presente nos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Minas Gerais e Goiás (Figura 15).

O Aquífero Guarani, de acordo com a EMBRAPA (2004), tem recarga de 140 bilhões de metros cúbicos por ano, mas apenas 40 bilhões de metros cúbicos poderiam ser utilizados, para que a sustentabilidade do lençol freático fosse mantida e não existem dados seguros que comprovem o quanto já é consumido.



Figura 15: Localização do Aqüífero Guarani (CETESB, 2004).

O aqüífero Botucatu é um dos mais importantes mananciais de água subsuperficial do estado de São Paulo, assim como do país, não só pela sua grande área de ocorrência como também pela qualidade físico-química de suas águas. Além de apresentar 90% de sua área recoberta pelos derrames básicos da Formação Serra Geral, o que o torna confinado em quase toda a sua extensão. O sistema aqüífero encontra-se sobreposto ao Grupo Passa Dois, que funciona como um substrato impermeável e apresenta mergulho geral para oeste, em direção à calha do Rio Paraná (Davino *et al.*, 1982).

Silva (1983) definiu alguns parâmetros hidráulicos e hidrogeoquímicos desse aqüífero:

- *capacidade específica*: encontra-se em 30% dos casos abaixo de  $1\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ , em 38% entre 1 e  $5\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$  e nos 32% restante acima de  $5\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ;
- *transmissividade*: varia de  $4,7\text{E}^{-4}$  a  $1,5\text{E}^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ ;
- *condutividade hidráulica*: oscila entre  $2,4\text{E}^{-6}$  e  $4,5\text{E}^{-5}\text{m}/\text{s}$ ;
- *armazenabilidade*: em torno de  $2\text{E}^{-4}$  a  $4\text{E}^{-5}$ ;
- *porosidade efetiva*: entre 0 e 15%;
- *gradiente regional médio*:  $6\text{m}/\text{km}$ , podendo atingir até  $30\text{m}/\text{km}$ ;
- *pH*: varia de 5,4 (ácido) a 10,35 (alcalino), com predomínio do alcalino;
- *temperatura média*: 22 a  $25^\circ\text{C}$  nas porções livres, aumentando com a profundidade.

A recarga do aquífero está associada principalmente às áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia, e também através da drenagem de zonas de fissuras dos basaltos em alguns altos estruturais situados no interior da bacia. A água infiltrada para o aquífero apresenta um fluxo geral para Oeste, porém a maior parte do escoamento subterrâneo é drenada para os rios como escoamento básico, ainda na área de recarga (CETESB, 2004).

Segundo Rocha (2002) o Aquífero Botucatu era praticamente desconhecido até 1969. A partir de 1970 teve um surto exploratório, principalmente em sua porção brasileira. Atualmente esse aquífero é mais explorado nas bordas da bacia, com mais de duzentos poços, a profundidades de cem a trezentos metros, sendo que alguns poços atingem até 1.500 m de profundidade.

Em decorrência disso, por falta de políticas governamentais, o reservatório vêm sendo explorado de maneira desordenada. Com a persistência dessas condições, problemas de superexploração localizada ou de contaminação a partir das bordas da bacia poderão comprometê-lo (Rocha, 2002).

O relatório da situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo (CCPERH, 1999) classifica o eixo Botucatu - São Carlos - Ribeirão Preto como de alta vulnerabilidade, numa escala de seis níveis este eixo ocupa o segundo nível mais crítico, se forem considerados os critérios estabelecidos por Foster e Hirata (1993), que são baseados em relações entre a caracterização geológica (litológica) do aquífero e a carga poluidora.

Segundo CETESB (1997), o município de São Carlos, situado na região centro oeste do estado, apresenta 72% de sua área no afloramento do Aquífero Botucatu.

Segundo Freitas (1996), o Aquífero Botucatu ocorre em todo o município de São Carlos, tendo sua principal área de recarga na porção sul da cidade, na qual ocorre livre e onde está inserida a área de estudo, o antigo lixão da cidade. Na porção norte encontra-se confinado sob os basaltos.

A cidade de São Carlos retira, para mais da metade de seu abastecimento, as águas desse manancial, o restante provém de cursos superficiais, como o Ribeirão do Feijão, o Córrego Santa Maria do Leme e o Córrego São José (Gonçalves *et al.*, 1992).

Segundo Menezes, *et al.* (1995), o aquífero Botucatu apresenta, na região da área de estudo, temperatura em torno de 22,1°C, pH de 5,1 e permeabilidade da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$ m/s (Gonçalves, 1986).

### 3.7. Geologia

A região de São Carlos situa-se no contexto geológico da Bacia do Paraná, que segundo Milani *et al.* (1994) desenvolveu-se sobre crosta continental, em uma sinéclise intracratônica e foi preenchida por rochas sedimentares vulcânicas. Apresenta um formato de elipse com maior eixo na direção NE-SW e recobre uma superfície de aproximadamente 1.200.000 km<sup>2</sup>, estendendo-se pelo Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, chegando a atingir 8.000 m de espessura.

Na borda leste da bacia, na região de São Carlos, afloram os grupos São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) e Baurú, como pode ser observado na Figura 16.

#### a) Grupo São Bento

Estratigraficamente, o Grupo São Bento encontra-se acima do Grupo Passa Dois e seus sedimentos são considerados como do Triássico médio ao Cretáceo inferior (Milani e Ramos, 1998).

As duas unidades da porção inferior, formações Pirambóia e Botucatu, constituem-se de sedimentos continentais predominantemente arenosos, enquanto que a porção superior do Grupo é representada por rochas basálticas da Formação Serra Geral. Incluem-se ainda, no Grupo São Bento, as soleiras e diques de diabásio, bastante freqüentes, correlatas à Formação Serra Geral, na área da Depressão Periférica Paulista.

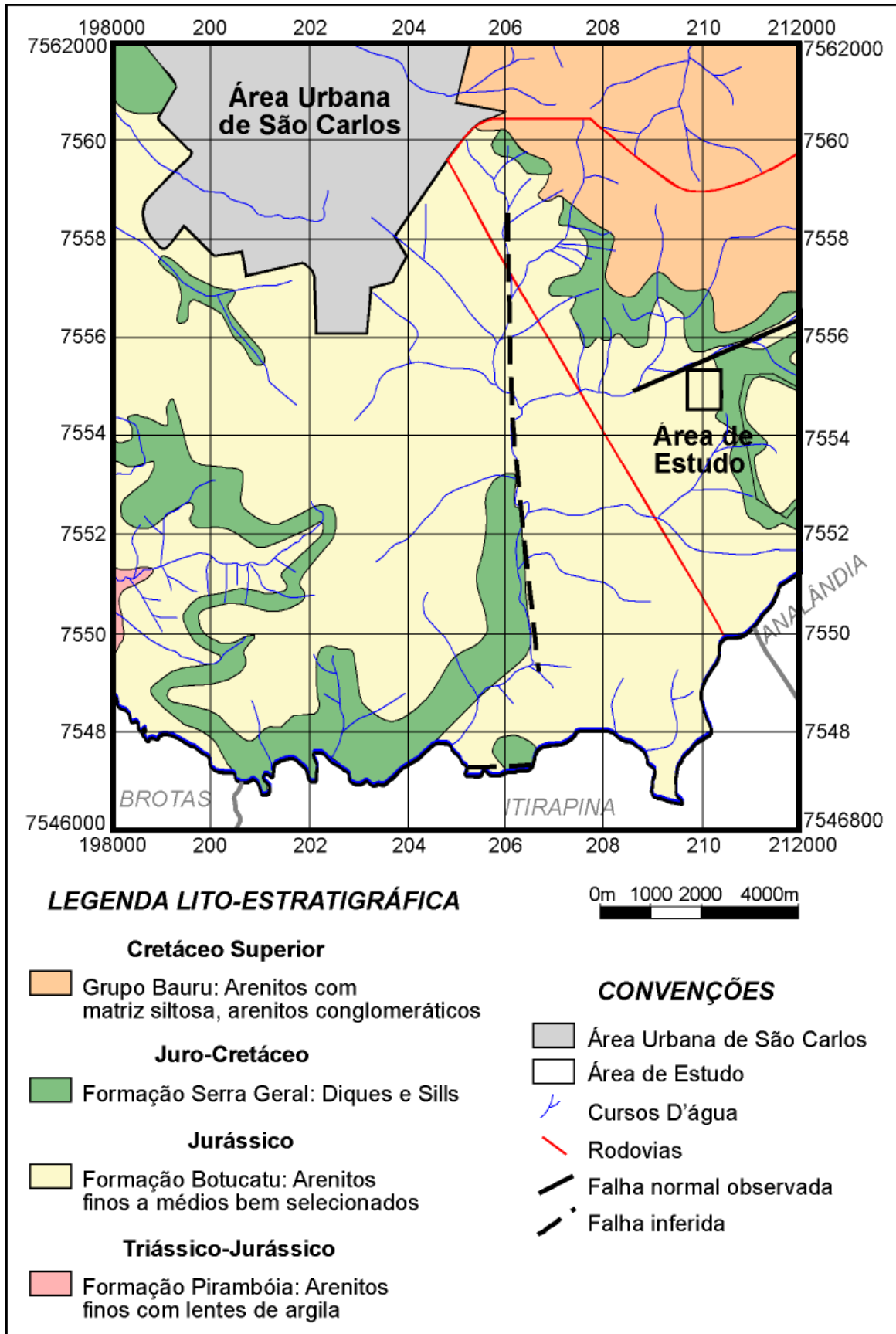


Figura 16: Mapa Geológico da região da área de estudo (modificado de Muro, 2000).

✓ *Formação Pirambóia*

A Formação Pirambóia é constituída pela parte inferior da seqüência sedimentar Mesozóica, de origem fluvio-lacustre, caracterizada por arenitos esbranquiçados amarelados, avermelhados e róseos, de granulação muito fina a média, muito a pouco argilosos; intercalando finas camadas de lamitos argilosos, exibindo estratificação cruzada planar, acanalada e plano-paralela que representam uma progressiva continentalização da bacia Milani et al. (1994).

Foi depositada em ambiente continental úmido, oxidante, geralmente fluvial, em canais meandantes e planícies de inundação, com pequenas lagoas esparsas (IPT, 1981 apud Freitas, 1996).

Soares (1973) dividiu esta formação em dois membros; o inferior mais argiloso, com estratificações de pequeno porte; e o superior, caracterizado pela sucessão de bancos de arenitos pouco argilosos, com estratificação cruzada e bancos de arenitos mais argilosos com estratificação plano-paralela.

O contato com a Formação Botucatu é dado por uma superfície de brusca mudança textural, de estrutura e cor, definido por uma superfície regional como uma notável inconformidade, havendo um hiato deposicional de cerca de 90 Ma entre as duas unidades (Milani, 1997).

✓ *Formação Botucatu*

A Formação Botucatu, sobrejacente aos sedimentos subaquosos da Formação Pirambóia, engloba quartzo-arenitos e subarcóseos, com grau de seleção bom a muito bom e maturidade textural variando de maturo a supermaturo. Localmente podem ocorrer arenitos argilosos, mas sempre com uma porcentagem de material síltico-argiloso inferior a 5%, e estratos lenticulares grossos (conglomerados e arenitos conglomeráticos), depositados por correntes torrenciais efêmeras e arenitos grossos, interpretados como lençóis de areia, na base (Caetano-Chang e Wu, 1993).

A presença de magnetita e ilmenita pode ser devido à contribuição do magmatismo juro-cretácico na deposição da unidade. Nas partes mais profundas da unidade a calcita e a dolomita são os cimentos mais abundantes (Caetano-Chang e Wu, 1993).

Apresenta estratificações cruzadas de grande porte, caracterizando uma gênese de origem eólica em ambiente desértico. Apresenta estratificações cruzadas de porte médio a grande, com inclinação em torno de 30° e espessura máxima em torno de 130 m, raramente ultrapassando os 100 m. (IPT, 1981 apud Freitas, 1996).

Esta formação é limitada na base por uma inconformidade regional que se estende por toda a bacia, gerando uma vasta superfície de deflação eólica

estabelecida com o climax de aridez do Gondwana ocidental (Milani, 1997), e é sobreposto por rocha vulcânicas básicas e ácidas da Formação Serra Geral.

Os materiais da Formação Botucatu, bem como os da Formação Pirambóia, são derivados de áreas de relevo pouco acentuado, advindos de rochas cristalinas e sedimentares preexistentes, depositados em bacia estável, com transporte relativamente prolongado e fortemente retrabalhados por abrasão seletiva em clima semi-árido e árido de ambiente desértico, eventual e temporariamente cortado por rios (Milani, 1997).

Na área de estudo essa formação é representada por um pacote homogêneo de arenitos avermelhados a amarelados (Figura 17), com granulação variando de areia média a grossa e muito fina a fina, predominando fina a média, com grãos arredondados a bem arredondados na fração grossa e subangulares a arredondados na fração fina, alta esfericidade e foscos, muito friáveis ou silicificados.



Figura 17: Arenito da Formação Botucatu presente na área de estudo.

✓ *Formação Serra Geral*

A Formação Serra Geral é constituída por rochas vulcânicas de caráter básico com extensa distribuição em toda área da Bacia do Paraná tanto na forma de derrame como em corpos intrusivos (Pfeiffer, 1993).

O magmatismo mesozóico da Bacia do Paraná apresenta características regionais relacionadas a anomalias químicas, indicando uma pluralidade de fontes e mecanismos na formação do magma. O derrame vulcânico continental é composto em mais de 90% do volume por basaltos toleíticos e andesito basáltico, geralmente exibindo vesículas e amígdalas no topo do derrame (Milani, 1997).

Os basaltos são toleíticos e apresentam espessura individual bastante variável, desde poucos metros a mais de 50 m e extensão individual que pode ultrapassar dez



quilômetros. Nesses basaltos ocorre a intercalação de arenitos com as mesmas características dos arenitos da Formação Botucatu, a maioria com estruturas típicas de dunas e outros indicando deposição subaquosa (Milani, 1997).

Os diabásios são em geral de granulação fina, cinza escuro a negros, maciços, no qual se destacam ripas de plagioclásio (Milani, 1997).

A espessura máxima da Formação Serra Geral foi medida em sondagem em Cuiabá Paulista (Pontal do Paranapanema, Estado de São Paulo), indicando 1.700 m de derrames (Almeida, 1986). Tal pacote adelgaça-se para as bordas do Planalto Ocidental, onde as serras basálticas possivelmente não alcançam um terço desse valor (IPT 1981).

Segundo Zuquette (1981) *apud* Menezes (1995), a espessura dessa formação na região é em torno de 165 m.

A Formação Serra Geral ocorre próximo a área de estudo, aproximando-se do topo das cristas (acima de 875 m), onde ocorre de forma bastante alterada, sendo comum encontrar-se apenas o solo residual.

Para cobertura do lixão desativado de São Carlos foi utilizado principalmente o solo residual dessa formação.

## b) Grupo Bauru

Cessados os derrames de lavas da Formação Serra Geral, que marcaram o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da Bacia do Paraná, observou-se uma tendência geral para o soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul-Americana em território brasileiro (Milani, 1997).

A porção norte da Bacia do Paraná, entretanto, comportou-se como área negativa relativamente aos soerguimentos marginais e à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo, nessa área deprimida acumulou-se o Grupo Bauru (Milani, 1997).

O grupo Bauru corresponde, portanto as coberturas pós-lavas que foram acumuladas na depressão flexural ocorrida devido ao peso dos derrames da Formação Serra Geral, (Milani et al. 1994) e é composto pelas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília, inclui ainda os Analcimitos Taiúva, rochas vulcânicas localmente intercaladas na seqüência (Fernandes, 2004).

Na região próxima a área estudada o Grupo Bauru é representado por sedimentos arenosos-conglomeráticos que apresentam clastos de variadas litologias, como vulcânicas, arenitos, rochas do embasamento etc.

### 3.8. Histórico e trabalhos anteriores

Os resíduos coletados no município de São Carlos foram depositados nesse local inadequado, onde estava instalada uma voçoroca de grandes dimensões, por aproximadamente 17 anos, totalizando um volume de resíduos de aproximadamente 440.000 m<sup>3</sup>. Segundo Zuquette e Gandolfi (1991) essa área apresenta muitas características desfavoráveis para o uso a qual foi destinada, ressaltando:

- A profundidade do nível da água subterrânea, máxima de 8,7 m e mínima de 1,97 m;
- A litologia da área, constituída por arenitos permeáveis com poucos finos;
- Os materiais inconsolidados predominantemente arenosos;
- A alta permeabilidade dos arenitos, em torno de 10<sup>-4</sup>cm/s;
- O baixo coeficiente de troca catiônica do substrato do lixão, de 2,71 a 2,73 meq/100g;
- O alto potencial a erosão.

As atividades de depósito, que incluíam desde resíduos domiciliares, de serviços de saúde até industriais, iniciaram-se aproximadamente em 1979, foram interrompidas em junho de 1994, reiniciaram-se em fevereiro de 1995 e se encerraram finalmente em junho de 1996.

De acordo com estudos realizados por Gomes (1991) em 1988, a cidade de São Carlos produzia cerca de 2.200 toneladas de lixo/mês, o que representava uma produção de cerca de 470 gramas/habitante/dia, aproximadamente. De acordo com a caracterização dos resíduos sólidos foram gerados cerca de 56,7% de matéria orgânica; 21,3% de papéis; 8,5% de plásticos; 5,4% de metais e 1,1% de vidro, sobre o total gerado durante o período de um mês.

De acordo com a Secretaria de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia do Município de São Carlos esse lixão encerrou suas atividades e agora mantém uma situação "controlada", pois recebe monitoramento da CETESB a cada seis meses.

Embora exista um "Plano de Recuperação e Conservação do Antigo Lixão de São Carlos Sitio Santa Madalena, SP" e de alguns dos itens nele propostos terem sido realizados, o passivo ambiental está instalado, possibilitando a contaminação do solo e do lençol freático subjacentes.

A área atualmente é ocupada por atividades rurais como criação de gado leiteiro e plantação industrial de goiabas, como pode ser observado na foto da Figura 18.



Figura 18: Vista atual da área de estudo, a linha azul indica a antiga cava de resíduos.

Estudos anteriores já revelaram que existe contaminação e poluição da água subterrânea no local, situação preocupante, já que a área situa-se em zona de recarga do Aquífero Guarani e faz parte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, principal fonte de abastecimento de água da cidade.

Dentre os trabalhos já realizados anteriormente na área, pode-se citar:

- Ellert *et al.* (1990) realizaram levantamentos geofísicos no lixão de São Carlos, com o emprego de eletrorresistividade e de eletromagnetometria indutiva, determinaram a pluma de poluentes e o comportamento vertical e horizontal da geologia local. Como resultados obtiveram a direção da pluma de contaminante para WNW e a detecção de zonas silicificadas em subsuperfície. Durante a execução desse trabalho,  $\frac{3}{4}$  da extensão da vala (voçoroca) do lixão já estavam preenchidos, com difícil definição dos limites laterais.
- Nishiyama e Zuquette (1991) em um estudo preliminar para elaboração de uma carta de deposição de rejeitos sépticos da região de São Carlos, classificaram a área onde se encontra o lixão de Santa Madalena, bem como a maior porção do município, como inadequado, por encontrar-se sobre área de recarga do aquífero Botucatu, além de outros fatores analisados, como declividade, erodibilidade e permeabilidade.
- Gonçalves *et al.* (1992) com a instalação de 10 poços piezométricos determinaram a direção do fluxo do lençol freático para direção NW, a direção do fluxo e a alta permeabilidade do solo no local indicam que grande parte do chorume deve estar infiltrando para o aquífero profundo.
- Schalch (1992) analisou percolados de dois aterros experimentais, construídos na região do lixão de São Carlos e com o mesmo lixo a ele destinado, encontrou altas concentrações de metais pesados.
- Bossolan (1993) realizou estudos sobre a contaminação da água subterrânea do local, enfocando aspectos bacteriológicos e químicos definiu a direção do fluxo subterrâneo a partir de linhas isopiezométricas e

verificou a direção NW como predominante. Observaram-se valores de pH, oxigênio dissolvido e de alguns metais (Ca, Mg, Fe), indicando forte influência do líquido percolado sobre a água subterrânea, os indicadores bacteriológicos de poluição fecal, analisados na água subterrânea, estavam acima dos limites, embora a autora ressalte que o lixão pode não ser a única fonte de poluição do recurso hídrico, pois as bactérias encontradas podem ser provenientes da matéria orgânica gerada por pastagens de gado próximas ao local.

- Menezes (1995) levantou diversos dados de contaminação de poços e encontrou valores de condutividade, nas amostras de água coletadas, muito acima do aceitável para a área atingida pela pluma, além desses valores terem aumentado em relação a dados coletados anteriormente por Bossolan (1993).
- Freitas (1996) evidenciou, de levantamentos geológicos e geofísicos, heterogeneidades (transmissividade) e anisotropia (condutividade hidráulica) no aquífero, também determinou a direção de fluxo do aquífero para WNW a partir de linhas equipotenciais.
- Gadotti (1997) estudou a contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos-SP e concluiu que existe um escoamento na direção SW, pelo mapa do escoamento subterrâneo apresentado pelo autor é perceptível a presença de duas direções principais de escoamento, uma obedecendo à direção da drenagem superficial, NW, e outra em direção WSW. Detectou ainda altas concentrações de nitrato, bário e cloreto, que ultrapassaram os limites de potabilidade nas águas superficiais e subterrâneas ao redor do aterro.
- Contin Neto *et al.* (1997) obteve resultados de modelagem matemática que indicam o fluxo de água subterrânea que carrega o soluto com sentido NE-NW. Extrapolando os dados obtidos, encontraram valores de velocidade para a pluma que em 100 anos andaria aproximadamente 1000 m, respeitando-se as condições de contorno atuais.
- Matsuzaki (1998) realizou uma simulação computacional da trajetória da pluma no aquífero, com dados da geologia, da hidrografia e da pluviometria local, demonstrando o deslocamento preponderante da frente da pluma em direção SW, caminhando para um reservatório de água do córrego São José e alguns poços das proximidades.
- Fusconi e Godinho (1999) estudaram aspectos ecológicos dos microorganismos das águas subterrâneas do local e encontraram a

influência do chorume proveniente do aterro nas populações microbianas analisadas.

- Álvares (2000) realizou estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos, para o conhecimento do meio físico da região e indicou a existência de transporte superficial advectivo de contaminantes muito superior ao de sub-superfície, identificando a presença de superfícies resistivas que supostamente protegem o aquífero profundo, indicou o movimento da pluma seguindo a topografia do terreno, portanto, NW.
- Penner, *et al.* (2003) simularam, pelo método dos elementos analíticos, três técnicas de controle hidráulico para contenção do avanço da possível pluma de contaminação. Por se tratar de um método computacional não convencional, utilizaram a alternativa de poço de captura para uma comparação com uma outra simulação já empregada à contenção da pluma do lixão encontrando bons resultados. A partir daí, a simulação da alternativa de dreno horizontal conseguiu a captura aspirada com a menor vazão de bombeamento. A aplicação do dipolo, apesar de trazer em geral um bom isolamento da pluma, não teve um bom ajuste aos contornos da região.

---

## 4. Procedimentos e Resultados

### 4.1. Ensaio geofísicos

Foram realizadas seis linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo conjuntamente com caminhamento IP domínio tempo, produzindo perfis de resistividade e de cargabilidade.

#### 4.1.1. Locação das linhas

Um dos parâmetros utilizados para locar as linhas de caminhamento desse trabalho foi o de passar por alguns dos poços de monitoramento já instalados e ainda existentes, permitindo uma "aferição" da profundidade de investigação geofísica a partir das leituras de nível d'água. A localização desses poços foi realizada por Álvares (2000) com GPS de precisão e esses dados podem ser visualizados no Anexo I.

Outro parâmetro utilizado para locar as linhas foi o de que pelo menos algumas linhas coincidisse com as anteriormente realizadas por Freitas (1996), para permitir uma comparação no tempo, avaliando a evolução da pluma de contaminantes. Três linhas coincidem, quase que perfeitamente, com esses caminhamentos, como pode ser observado na Figura 19.

As linhas geofísicas foram dispostas na direção NE-SW, de maneira a abranger as áreas dos resíduos e parte das áreas adjacentes. Foram posicionadas perpendiculares ao corpo do lixo e à possível direção preferencial do fluxo subterrâneo, igual ao superficial, como sugerido por Ellert *et al.* (1990), Gonçalves *et al.* (1992), Bossolan (1993), Freitas (1996), Gadoti (1997) e Álvares (2000).

Também foram dispostas linhas a jusante do corpo do lixo (linhas 0 e 1), para permitir um estudo de como a possível contaminação se comporta e afeta essas porções (Figura 19).

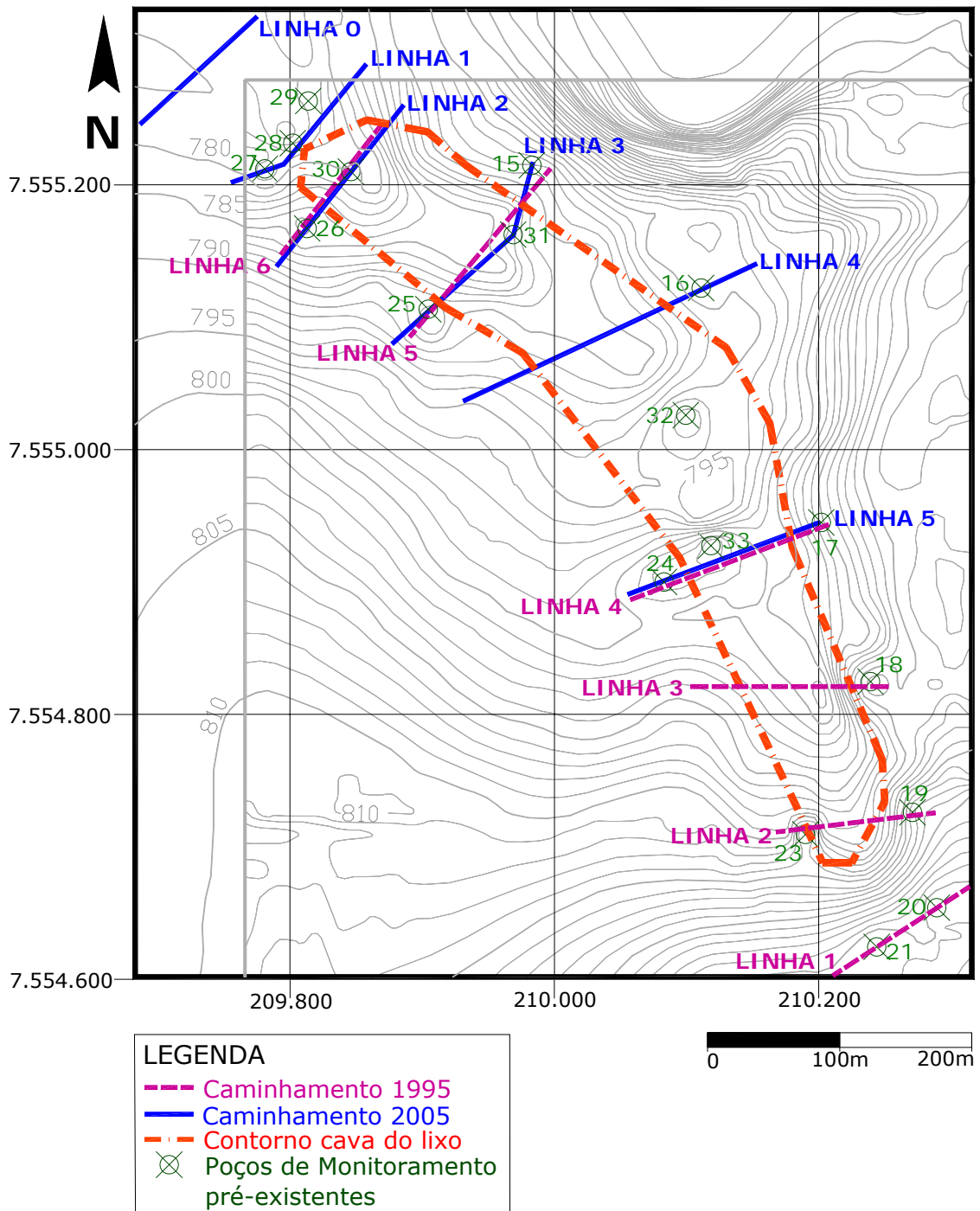


Figura 19: Mapa com localização dos poços, linhas de caminhamento elétrico e contorno da cava de depósito dos resíduos. Topografia baseada nos mapas IGC folhas SF-23-Y-A-I-1-NE-(C, D, E e F) de escala 1:10.000 e contribuições de Álvares, 2000.

#### 4.1.2. Execução do ensaio

Nesse trabalho foi utilizado o método da eletrorresistividade, simultaneamente com o de polarização induzida (IP), com a utilização do equipamento Iris Syscal R2 (Figura 20).



Figura 20: Equipamento Iris Syscal R2 utilizado no ensaio de resistividade e cargabilidade.

O ensaio de campo consistiu na introdução de uma corrente elétrica artificial através de dois eletrodos (A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N), permitindo a determinação da resistividade aparente em subsuperfície, avaliando-se a variação vertical.

Nesse arranjo os eletrodos são dispostos em um mesmo perfil, contínuo, sendo que o arranjo é definido pelo espaçamento  $X=AB=MN$  (Figura 21). Neste trabalho o espaçamento adotado entre dipolos foi de 10 metros ( $X=AB=MN=10m$ ).

A profundidade investigada varia conforme o espaçamento  $R$ , que é a distância do centro de A-B até o centro de M-N (Figura 21), quanto maior  $R$ , maior a profundidade a ser investigada, sendo que cada dipolo M-N se refere a um nível de investigação. Nesse estudo investigaram-se 5 níveis, atingindo uma profundidade teórica de 30 metros no nível 5.

As medidas usualmente são efetuadas em profundidades distintas, em níveis, sendo que os pontos são plotados nas intersecções das linhas que partem do centro de A-B e do centro de M-N, com ângulos de  $45^\circ$  (Figura 21).

A partir desses pontos faz-se uma interpolação, gerando assim, as seções de resistividade aparente. Essas seções são interpretadas de maneira a delimitar zonas com diferentes resistividades, que podem ser relacionadas com o estado real do terreno, como nível d'água, profundidade e sentido da pluma de contaminantes, entre outros.



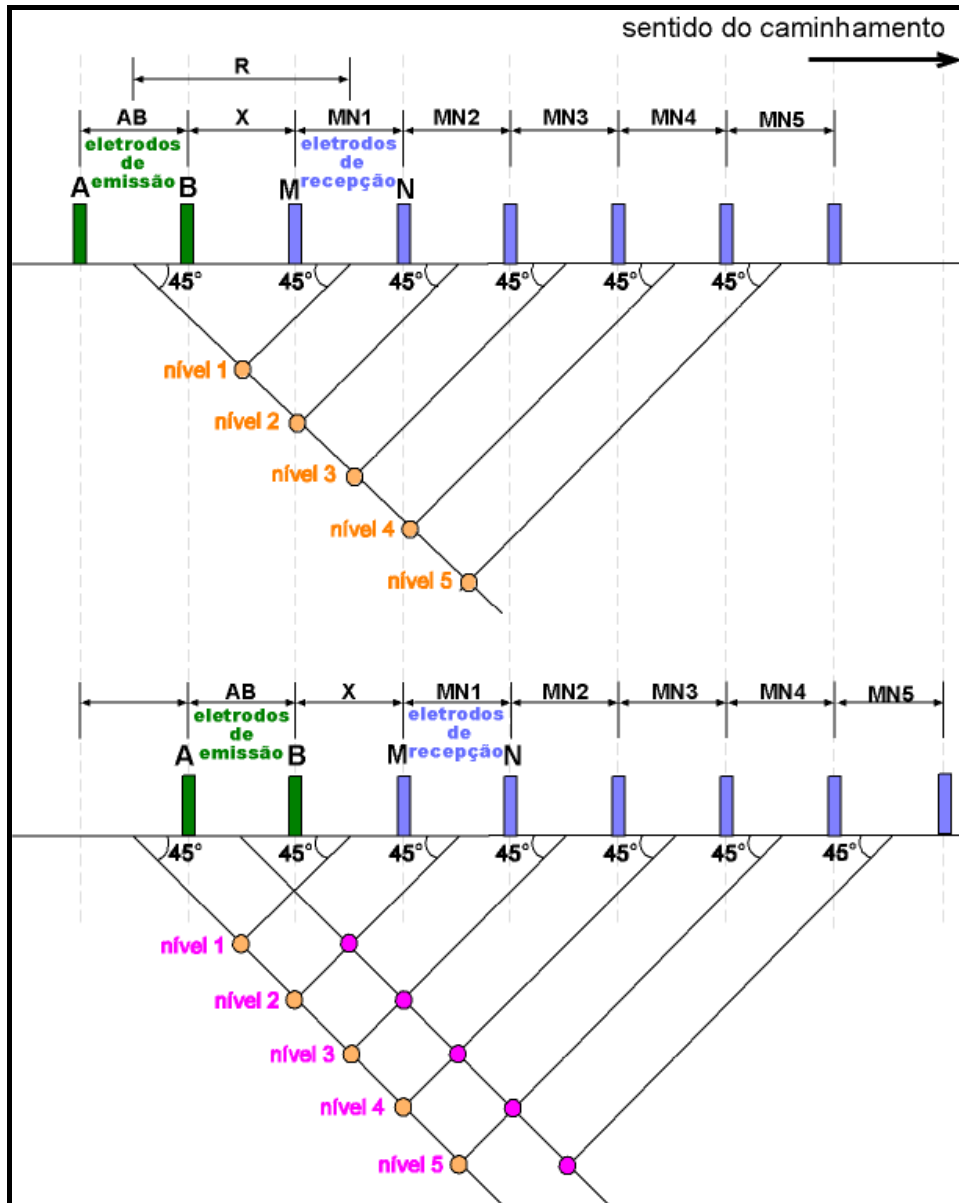


Figura 21: Representação esquemática do caminhamento elétrico executado.

Outro método de medida utilizado nesse estudo, conjuntamente com o de caminhamento elétrico, foi o de polarização induzida no domínio tempo, que segundo Sumner (1976) apud Elis (1998), consiste em um fenômeno elétrico estimulado por corrente, observando-se como resposta retardada a voltagem.

Esse efeito resultante da passagem de corrente elétrica gera um campo elétrico, que mesmo depois de cessada a corrente não desaparece imediatamente, mas de um modo lento, o que caracteriza a polarização induzida ou residual.

Durante o tempo do fluxo original de corrente ocorre armazenamento de várias formas de energia nos materiais, sendo que a energia química, segundo Elis (1998), é a mais importante e resulta da variação da mobilidade de íons fluindo através da

estrutura dos materiais e da variação entre a condutividade iônica e eletrônica, onde minerais metálicos estão presentes.

A resposta da polarização induzida é medida como uma variação de voltagem em função do tempo ou da frequência, sendo denominados, respectivamente, IP-Domínio do Tempo e IP-Domínio da Frequência. Nesse estudo utilizou-se o IP-Domínio do Tempo, no qual o parâmetro cargabilidade é obtido com a integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo.

Segundo Elis (1998) alguns casos de aplicação de caminhamento IP e resistividade são apresentados por Vogelsang (1995) e mostram que a polarização induzida pode apresentar mais detalhes sobre o tipo de resíduos enterrados, baseado nos materiais eletricamente polarizáveis, mas, ainda não são conhecidos satisfatoriamente os materiais que apresentam altas cargabilidades.

No entanto os estudos de Vogelsang (1995) *apud* Elis (1998) indicam que os valores anômalos de cargabilidade dos resíduos enterrados são geralmente muito altos, e que usualmente refletem sua heterogeneidade.

### 4.1.3. Tratamento dos dados

Os dados geofísicos obtidos nesse trabalho foram tratados em dois programas, o Surfer 8.0, que é um programa para interpolação, e o RES2DINV 3.2, que é um programa próprio para inversão da resistividade e polarização induzida (IP).

A interpretação inicial fez-se a partir das seções de resistividade aparente geradas no Surfer 8.0, mas como o parâmetro resistividade aparente representa uma resultante de um volume do subsolo investigado constituído de diferentes resistividades, sentiu-se a necessidade de trabalhar com a resistividade mais próxima da real.

Para tanto tornou-se necessária a aplicação de processos de inversão, que buscam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície, sendo que eventuais distorções nas pseudoseções são teoricamente eliminadas por este procedimento.

Então as seções foram modeladas no RES2DINV, que utiliza um processo automático de inversão bi-dimensional (2-D), com a técnica de otimização dos mínimos quadrados com suavização não linear (Loke e Barker, 1996).

Na interpretação pelo RES2DINV houve a possibilidade de plotar os dados juntamente com a topografia, permitindo melhor análise dos dados obtidos. Contudo, uma desvantagem desse programa foi a impossibilidade de alterar os valores da escala de cores, portanto a escala de cores corresponde a valores diferentes em cada

seção, dificultando a comparação, que deve ser feita analisando diretamente os valores.

Para que pudesse ser feito o estudo comparativo dos dados de caminhamento elétrico realizados em diferentes datas, de forma a representar a evolução da contaminação na área, optou-se por tratar novamente os dados coletados por Freitas (1996), da mesma forma e nos mesmos programas utilizados para os dados dos caminhamentos atuais.

Para permitir uma relação da geofísica com os dados litológicos e de campo foram confeccionados perfis topográficos das linhas de caminhamento. Esses perfis foram baseados nos dados obtidos por Freitas (1996) quando executou os poços de monitoramento na área e nos dados gerados por Álvares (2000) a partir de perfilagens geofísicas associados a perfis geológicos, esses dados foram então comparados com os dados obtidos em campo nesta pesquisa.

Para aferir os perfis geofísicos foram medidas as profundidades dos níveis de água (NA) em cada um dos poços de monitoramento após a realização dos ensaios de caminhamento, correlacionando essas profundidades as anomalias encontradas na geofísica, ajustando desta forma, o NA das anomalias geofísicas com o NA verdadeiro observado em campo.

#### 4.1.4. Resultados da Geofísica

Os resultados dos ensaios geofísicos são apresentados no Anexo II na forma de seções de resistividade e cargabilidade, geradas ao longo de cada linha de caminhamento elétrico executada.

São apresentados também, para efeito de comparação, as seções com os dados de Freitas (1996), reinterpretados nos mesmos programas utilizados neste trabalho (Surfer 8.0 e RES2DINV). A análise e discussão destes resultados serão realizadas no Capítulo 5.

## 4.2. Ensaio de infiltração

Foram realizados 5 ensaios de infiltração *in situ* visando caracterizar os materiais inconsolidados quanto as suas propriedades hidráulicas.

Segundo Jorge e Uehara (1998), a capacidade de infiltração corresponde ao máximo de água que pode ser absorvida pelo solo. Normalmente, quando a água começa a entrar no solo, apresenta taxas de infiltração altas, que progressivamente vão diminuindo até atingir um comportamento constante de infiltração.

### 4.2.1. Localização dos pontos ensaiados

Os cinco ensaios foram locados de maneira que pelo menos dois ensaios fossem realizados sobre o corpo do lixo (U e V), e os demais (R, S, T) distribuídos em diferentes pontos, mas que estivessem distantes do NA, para que tornasse possível a caracterização de maior profundidade do subsolo não saturado. A localização dos pontos de ensaio pode ser observada na Figura 22.

Os ensaios realizados sobre o corpo do lixo (U e V) tiveram como objetivo avaliar as características de infiltração da camada de cobertura do lixo.

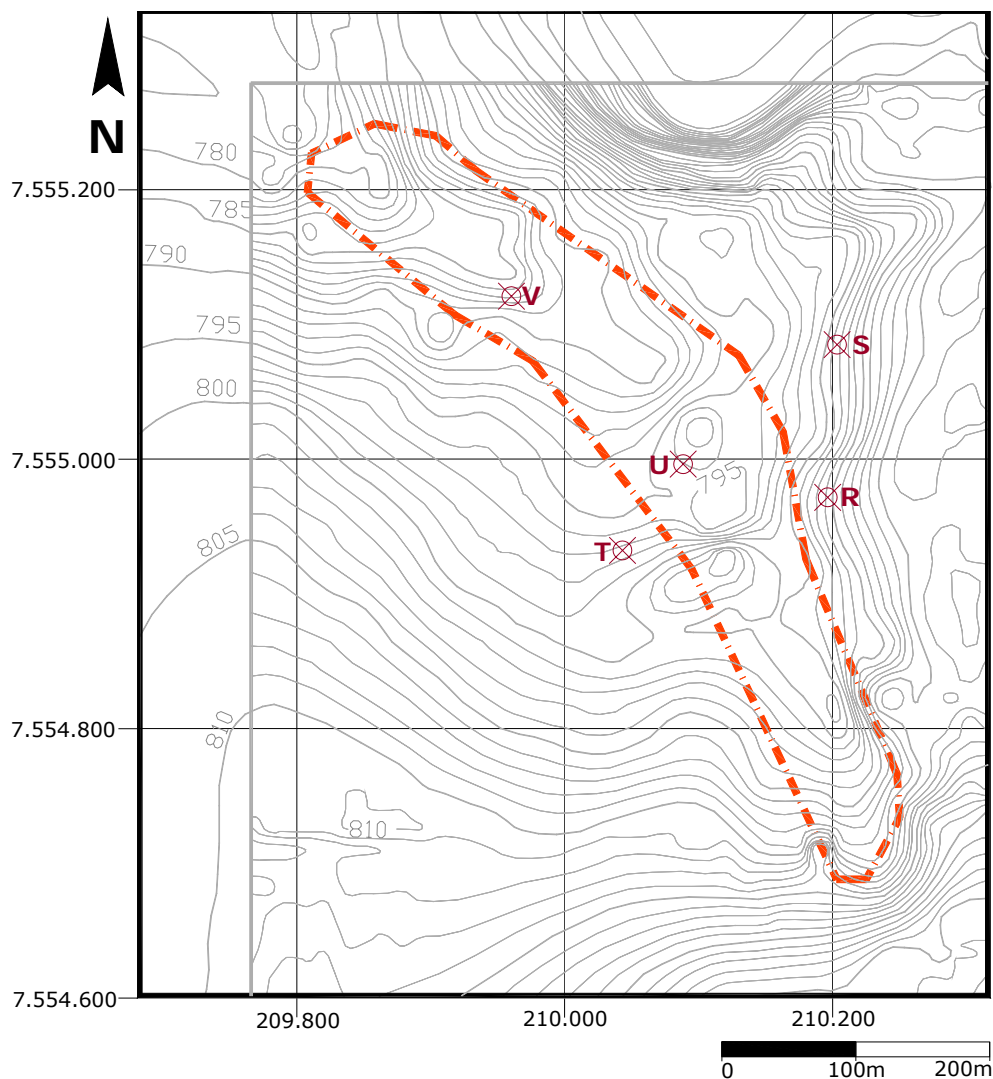


Figura 22: Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração.

### 4.2.2. Execução

No ensaio de infiltração foi utilizado o infiltrômetro do duplo anel (IAD), normalizado pela ASTM-D 3385-88 (1988) que constitui uma ferramenta importante para determinação do comportamento hidráulico dos materiais de subsuperfície.

O IAD consiste em dois cilindros de chapas de aço de 3 mm de espessura, sendo um com dimensões de 30cm de altura por 30cm de diâmetro (cilindro interno – número 2 da Figura 23) e o outro com 25 cm de altura por 60 cm de diâmetro (cilindro externo - número 1 da Figura 23). Também compõem o ensaio um balde plástico graduado (número 3 da Figura 23) e uma mangueira que une o balde até os anéis (número 4 da Figura 23), dotada de uma bóia na extremidade dos anéis, além de baldes pra encher o anel externo (número 5 da Figura 23) e de um cronômetro.



Figura 23: Montagem do ensaio de infiltração IAD *in situ*.

A execução do ensaio inicia-se com a cravação dos cilindros, que deve ser executada de tal maneira que não perturbe as estruturas do solo.

Após a cravação desses anéis, de forma que o anel interno fique no centro do anel externo, deve-se enchê-los com água até que o anel interno fique com lâmina d'água de aproximadamente 10 cm e o anel externo, com uma lâmina levemente inferior a do anel interno.

Essas alturas de lâmina d'água devem permanecer constantes. Conforme a água infiltrar no terreno, o anel interno será abastecido pela mangueira, que é dotada de uma bóia em uma de suas extremidades, de tal forma que quando o nível d'água baixa dentro do anel a bóia desce, permitindo o fluxo d'água da mangueira. Como a mangueira está conectada a um cilindro graduado, é possível que seja medida a quantidade de água infiltrada em tempos determinados.

O anel externo deverá ser cheio manualmente com os baldes, também mantendo a sua lâmina d'água constante. Esse anel externo é importante no ensaio para que se mantenha um fluxo unidimensional no anel interno.

Assim que os anéis estiverem cheios deve-se iniciar o ensaio, realizando as leituras de água infiltrada no anel interno em tempos cronometrados.

Iniciam-se as leituras em intervalos de 1 minuto (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 min), passando para intervalos de 5 minutos (15, 20, 25, 30, 35, 40 min) e posteriormente para intervalos de 10 minutos (50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 min, etc), até que pelo menos 3 leituras de infiltração sejam iguais, indicando um fluxo de água constante, finalizando o ensaio.

O tempo para a execução do ensaio vai depender das condições do terreno, de tal forma que pode levar de alguns minutos até horas, quando a taxa de infiltração atinge um comportamento constante.

Nos locais escolhidos para realização desse ensaio também foram coletadas amostras deformadas, de 20 em 20 centímetros, para a obtenção da umidade natural do solo e umidade do solo saturado, indicando a profundidade que a "frente de molhamento" atingiu. Esse procedimento também auxiliou na caracterização dos materiais de subsuperfície.

Para a coleta dessas amostras foram realizados 3 furos a trado manual. O primeiro realizado antes do ensaio, a aproximadamente 2 metros de distância do local de cravação dos anéis, para caracterização da umidade natural do solo.

O segundo furo foi realizado no centro do anel interno, imediatamente após a finalização do ensaio, para caracterização da umidade do solo saturado. O terceiro furo foi realizado ao lado do segundo, após duas horas da finalização do ensaio, para caracterização da umidade do solo saturado após 2 horas.

### 4.2.3. Resultados

As planilhas com os dados obtidos nos ensaios são apresentadas no Anexo III, enquanto que as planilhas de cálculo e as curvas de infiltração no Anexo IV.

A condutividade hidráulica foi calculada através da Equação 1.

$$K = \frac{Q}{\frac{H+Z}{Z} \times A \times t} \quad (1)$$

Onde,

K: Condutividade hidráulica;

Q: Volume de água infiltrado no solo;

H: Profundidade de água no anel quando ensaiado a regime constante;

Z: Profundidade da frente de saturação;

A: Área transversal do anel;

t: Tempo entre medidas.

Embora a infiltração se dê de maneira distinta nos diferentes materiais (solo e lixo), de modo geral, a condutividade hidráulica na área estudada é da ordem de  $10^{-5}$  m/s, sendo que isto pode variar pontualmente, principalmente sobre o lixo, por sua falta de uniformidade.

De maneira geral quanto maior a infiltração de água em um solo, menor a possibilidade de escoamento superficial direto, conseqüentemente maior a possibilidade de ocorrer contaminação.

Também foi possível determinar a profundidade que a "frente de molhamento" atingiu em cada um dos ensaios (Figura 24), calculando as umidades de cada uma das amostras coletadas.

No ensaio "T" a frente de molhamento atingiu a maior profundidade, em torno de 3,6 m, no ensaio "R" chegou a 1,8 m e no ensaio "S" atingiu 1,0 m.

Nos ensaios "U" e "V" realizados em cima do corpo do lixo pode-se perceber, com a tradagem, que a cobertura dos resíduos é delgada, em torno de 20 centímetros, e isso impossibilitou a identificação da profundidade da frente de molhamento.

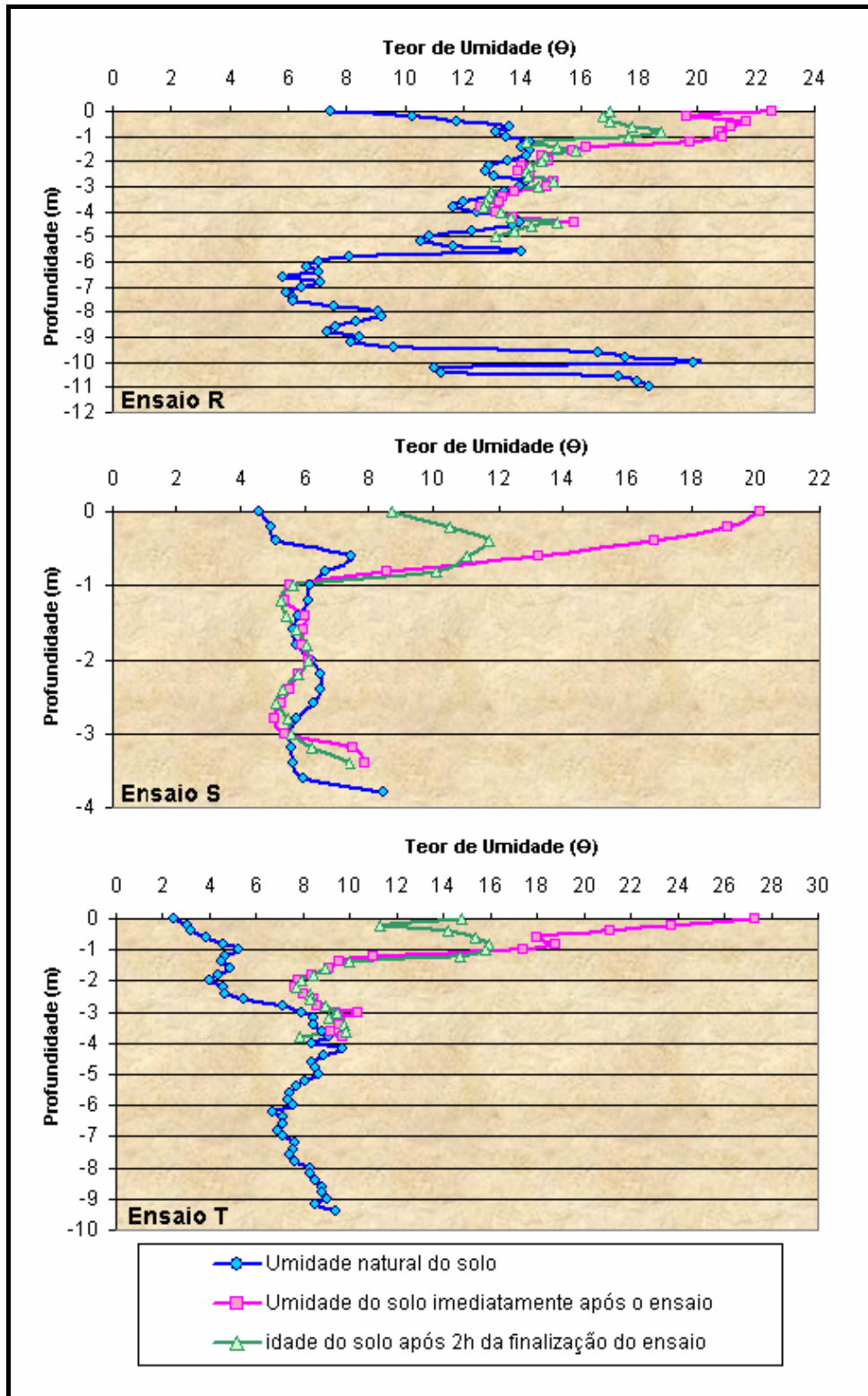


Figura 24: Gráfico dos ensaios R,S e T, relacionando as três umidades, caracterizando a frente de molhamento.

Também nota-se que a condutividade hidráulica nesses pontos não apresenta diferenças significativas para as condutividades encontradas para os ensaios "R", "S" e "T", onde não existe porções de lixo (Tabela 3).



Tabela 3: Dados dos Ensaios de Infiltração

Ensaio	Prof. Máx. Tradagem (m)	Prof. frente Molhamento (m)	Taxa de infiltração estabilizada (mm/h)	Condutividade Hidráulica (m/s)
R	11	1,8	90	$2,37 * 10^{-5}$
S	3,8	1,0	240	$6,19 * 10^{-5}$
T	9,4	3,6	235	$6,25 * 10^{-5}$
U	0,2	0,2	50	$7,73 * 10^{-6}$
V	0,15	0,15	100	$1,33 * 10^{-5}$

### 4.3. Ensaios de caracterização dos materiais inconsolidados

Para caracterização dos materiais inconsolidados foram realizados os seguintes ensaios:

- determinação da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) segundo a norma ABNT-NBR6508/84;
- determinação da massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), conforme proposto por Zuquette (1987);
- granulometria conjunta conforme a norma ABNT - NBR7181/84;
- adsorção de azul de metileno segundo procedimentos apresentados por Pejon (1992).

#### 4.3.1. Locação dos pontos ensaiados

Para realização dos ensaios de caracterização foram coletadas amostras em superfície em 9 pontos e em 5 furos a trado (Figura 25).

Nos furos a trado (pontos R, S, T, U e V) foram coletadas amostras de metro em metro para os ensaios de granulometria,  $\rho_s$ , e adsorção de azul de metileno. Nos demais pontos foram obtidos também amostras indeformadas com anel de PVC (10 cm de diâmetro por 5 cm de altura) para determinação de  $\rho_d$ .



Tabela 4: Dados obtidos com os ensaio de índices físicos realizados.

Amostra	massa específica ( $\rho = g/cm^3$ )	umidade média (w =%)	massa específica seca ( $\rho_d = g/cm^3$ )	massa específica dos sólidos ( $\rho_s = g/cm^3$ )	índice de vazios (e)	porosidade (n=%)	grau de saturação (Sr=%)
1	1,66	2,27	1,62	2,67	0,65	39,2	9,4
2	1,60	1,80	1,57	2,67	0,70	41,2	6,9
3	1,62	2,26	1,58	2,67	0,69	40,8	8,8
4	1,70	2,89	1,65	2,67	0,62	38,2	12,4
5	1,62	2,81	1,57	2,67	0,70	41,1	10,8
6	1,66	2,86	1,61	2,67	0,66	39,8	11,6
7	1,71	2,93	1,66	2,67	0,61	37,8	12,9
8	1,68	4,41	1,61	2,67	0,66	39,7	17,9
9	1,75	22,25	1,43	2,69	0,88	46,9	67,7
10	1,76	8,77	1,61	2,68	0,66	39,8	35,6
11	1,56	2,28	1,52	2,67	0,75	42,9	8,1
12	1,73	5,90	1,64	2,67	0,63	38,7	25,0
13	1,68	3,85	1,62	2,67	0,65	39,5	15,8
14	1,63	3,50	1,57	2,67	0,70	41,1	13,4
15	1,72	5,05	1,63	2,67	0,64	38,8	21,2
16	1,92	11,92	1,72	2,67	0,55	35,7	57,4

Com a caracterização dos sedimentos da área do lixo pôde-se concluir que são predominantemente arenosos finos a médios, pontualmente mais argilosos, com no máximo 34% de argila, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Dados obtidos com os ensaio de granulometria conjunta (frações granulométricas segundo ABNT – NBR6502/95).

Amos- tra	Argila %	Silte %	Areia Fina %	Areia Média %	Areia Gros. %	Amos- tra	Argila %	Silte %	Areia Fina %	Areia Média %	Areia Gros. %
5	6	2	50	42	0	S 0	7	3	41	49	0
9	21	13	33	31	2	S 1	10	3	40	47	0
10	19	7	36	37	1	S 2	10	28	45	17	0
11	4	5	52	38	1	S 3	7	3	41	49	0
13	7	4	42	46	1	S 4	10	4	42	42	2
15	12	24	41	22	1	T 0	6	7	47	40	0
16	10	5	46	38	1	T 1	13	4	43	40	0
R 0	20	9	35	35	1	T 2	10	5	43	42	0
R 1	29	8	33	30	0	T 3	14	6	46	33	1
R 2	28	9	33	30	0	T 4	17	8	37	34	4
R 3	28	9	32	31	0	T 5	15	5	43	36	1
R 4	24	6	35	35	0	T 6	12	5	43	39	1
R 5	18	5	38	38	1	T 7	10	5	47	38	0
R 6	8	4	40	48	0	T 8	10	13	50	27	0
R 7	9	4	39	46	2	T 9	8	8	50	34	0
R 8	10	7	39	42	2	U 0	24	12	34	29	1
R 9	9	3	33	55	0	U 1	29	10	33	26	2
R 10	34	8	31	27	0	V 0	11	5	44	38	2
R 11	16	6	40	38	0	V 1	11	5	38	40	6

A partir do volume de corante gasto durante cada ensaio de adsorção de azul de metileno, foram calculados os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE) dos argilominerais, além do Índice de Atividade da fração argilosa (Acb) e do Valor de Azul de Metileno Adsorvido (Vb), que podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6: Dados obtidos com os ensaio de adsorção de azul de metileno.

Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m <sup>2</sup> /g)	Vb	Acb	Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m <sup>2</sup> /g)	Vb	Acb
5	1,209	9,440	0,386	7,015	S 0	0,749	5,852	0,239	3,680
9	2,452	19,145	0,783	3,762	S 1	1,040	8,117	0,332	3,351
10	1,857	14,502	0,593	3,187	S 2	0,922	7,198	0,294	3,065
11	0,469	3,661	0,150	4,156	S 3	0,800	6,244	0,255	3,545
13	1,007	7,866	0,322	4,798	S 4	1,471	11,488	0,470	4,388
15	0,694	5,420	0,222	1,816	T 0	0,609	4,757	0,194	3,136
16	3,089	24,116	0,986	9,759	T 1	1,091	8,522	0,348	2,700
R 0	2,260	17,645	0,721	3,606	T 2	0,915	7,144	0,292	2,808
R 1	4,311	33,666	1,376	4,811	T 3	1,240	9,678	0,396	2,786
R 2	3,534	27,597	1,128	4,000	T 4	2,492	19,457	0,795	4,820
R 3	3,903	30,476	1,246	4,433	T 5	2,311	18,047	0,738	4,918
R 4	3,485	27,213	1,112	4,693	T 6	1,739	13,576	0,555	4,784
R 5	1,819	14,204	0,581	3,207	T 7	1,583	12,357	0,505	4,904
R 6	0,886	6,915	0,283	3,671	T 8	1,618	12,632	0,516	4,964
R 7	1,481	11,567	0,473	5,029	T 9	1,187	9,272	0,379	4,986
R 8	2,403	18,764	0,767	7,374	U 0	3,673	28,679	1,172	4,824
R 9	1,046	8,168	0,334	3,882	U 1	4,588	35,822	1,464	4,980
R 10	4,568	35,669	1,458	4,339	V 0	1,620	12,648	0,517	4,743
R 11	2,652	20,704	0,846	5,356	V 1	1,711	13,358	0,546	4,875

A partir desses resultados, conjuntamente com os valores de porcentagem de argila obtidos nos ensaios de granulometria conjunta pôde-se constatar que, em sua maior parte, as argilas são de composição caulínica, além de serem inativas a pouco ativas, predominantemente.

# 5. Análise e Discussão dos Resultados

## 5.1. Seções Geofísicas

Para análise dos resultados foi feita a interpretação dos perfis geofísicos, que consiste na busca de anomalias. Como os dados geofísicos foram tratados em dois programas, o Surfer 8.0 e o RES2DINV 3.2, foram gerados duas seções geofísicas para cada linha, que foram inicialmente comparadas (Anexo II).

Como o Surfer 8.0 é um programa apenas de interpolação, enquanto que o RES2DINV é um programa próprio para inversão de dados de resistividade e polarização induzida, as seções modeladas a partir do RES2DINV são resultantes de um processo automático de inversão bi-dimensional e representam a provável distribuição real dos valores de resistividade e cargabilidade em subsuperfície, de tal forma que optou-se por trabalhar com essas seções. Outra vantagem do RES2DINV é que este programa permite a plotagem dos valores de topografia conjuntamente com as seções modeladas.

O Surfer 8.0 mostrou-se útil para geração dos mapas de resistividade, apresentados no fim deste capítulo, bem como na comparação imediata entre as linhas realizadas nos mesmo locais, mas em datas distintas, já que permite manuseio em sua escala de cores, proporcionando as mesmas cores para mesmos valores de resistividade ou cargabilidade, opção não disponível no RES2DINV 3.2.

Para uma análise mais completa dos dados geofísicos, agrupou-se a esse conjunto de informações os dados obtidos por Freitas (1996) na execução de poços de monitoramento na área e os dados gerados por Álvares (2000) a partir de perfilagens

geofísicas nesses poços, além das observações de campo e ensaios de laboratório realizados no presente estudo, que serão discutidos linha a linha.

Deve-se lembrar que a resistividade elétrica, e seu inverso, a condutividade elétrica, estão diretamente ligadas aos mecanismos de propagação de corrente elétrica dos materiais. Essas propriedades podem variar devido a presença de materiais metálicos e grafita no solo ou devido a deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras de solos e rochas.

De maneira geral essa condutividade pode ser afetada pela composição mineralógica, pela porosidade, pelo teor de água ou pela quantidade e natureza dos sais dissolvidos, nesse estudo acredita-se que as anomalias geofísicas encontradas nos perfis de resistividade, em sua maioria, estão associadas aos resíduos e a contaminação gerada pelo percolado, de elevada quantidade de sais dissolvidos.

Esses valores devem ser analisados em conjunto, de maneira relativa para identificação dos contrastes, pois o parâmetro resistividade pode variar entre largos limites, mesmo para um único tipo de rocha, segundo Orellana (1972) *apud* Elis (1998) as águas doces superficiais podem apresentar resistividades da ordem de 10 a  $10^3$  ohm.m, os arenitos de 10 a  $10^8$  ohm.m, as argilas de 10 a  $10^2$  ohm.m, e as areias de  $10^2$  a  $10^4$  ohm.m.

### 5.1.1. Linha 0

Como a linha 0 não passa por nenhum dos poços de monitoramento não foi possível a confecção do perfil geofísico juntamente com os dados de substrato, mas observando a seção de resistividade (Figura 26), pode-se notar valores baixos na porção de topografia menos elevada, mas não se pode afirmar com tanta certeza que correspondam a contaminação subsuperficial, já que esses valores estão situados onde passa o córrego.

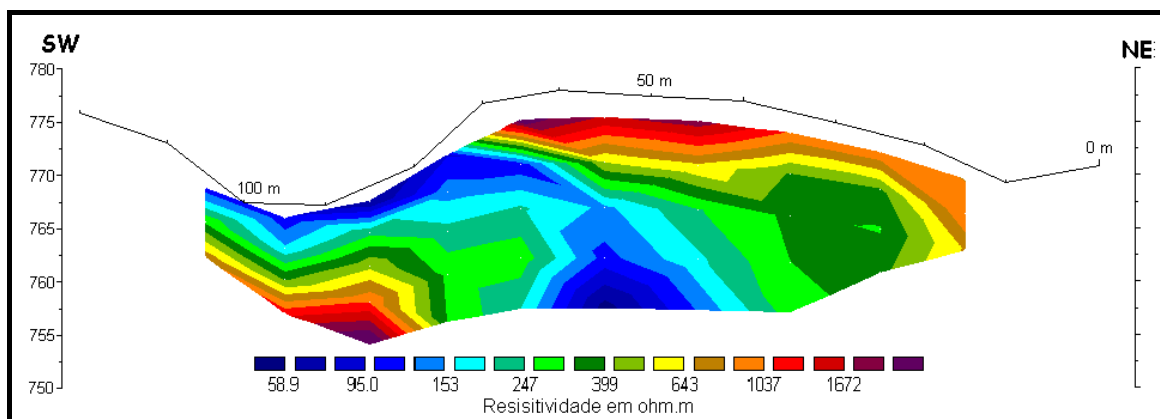


Figura 26: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 0.

Para confirmação desses valores foi realizada a coleta de água desse córrego em dois pontos distintos, um logo a jusante do corpo de lixo e o outro próximo a linha 0. Pôde-se verificar valores de baixa resistividade em ambos os pontos (70,4 ohm.m e 84,03 ohm.m, respectivamente), caracterizando portanto a contaminação da água do córrego, em superfície.

Os valores de baixa resistividade encontrados no centro da linha, em sua porção inferior, pode caracterizar que os percolados que seguem o fluxo preferencial SE-NW, estejam se deslocando pela porção inferior nessa seção.

Quando analisam-se os dados de cargabilidade desta linha (Figura 27), pode-se perceber a coincidência de valores de baixa resistividade com os de baixa cargabilidade ou alta cargabilidade, dependendo da porção analisada. Apesar da identificação da anomalia, não é possível fazer nenhuma associação concreta, uma vez que a cargabilidade tende a crescer com o aumento da concentração de sais, mas que a partir de uma determinada concentração o comportamento se inverte, tendendo a valores muito baixos (Elis, 2000).

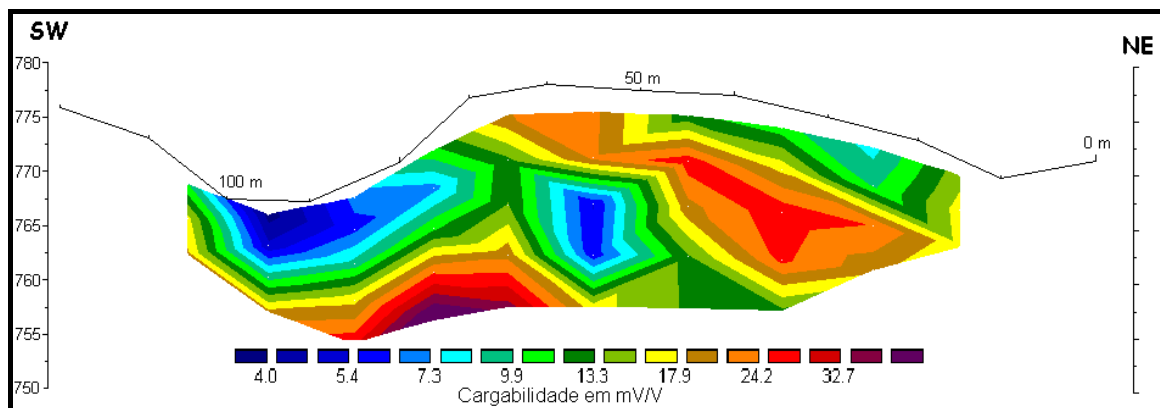


Figura 27: Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 0.

### 5.1.2. Linha 1

Quando Freitas (1996) instalou os poços de monitoramento e analisou as amostras que eram deles retiradas, percebeu a presença de uma delgada porção com resíduos (1 metro de areia fina com resíduos no poço 28) e logo abaixo uma zona (8 m, até o fim do poço) afetada pela presença de percolados. Quando analisamos o perfil desse poço, conjuntamente com os dados geofísicos, observamos a correlação dessas porções (resíduos e percolados) com as de baixa resistividade (até 150 ohm.m), como era de se esperar.

Pode-se perceber que o poço 27, no qual não foi encontrada a presença nem de resíduos, nem de percolados, apresenta altos valores de resistividade.

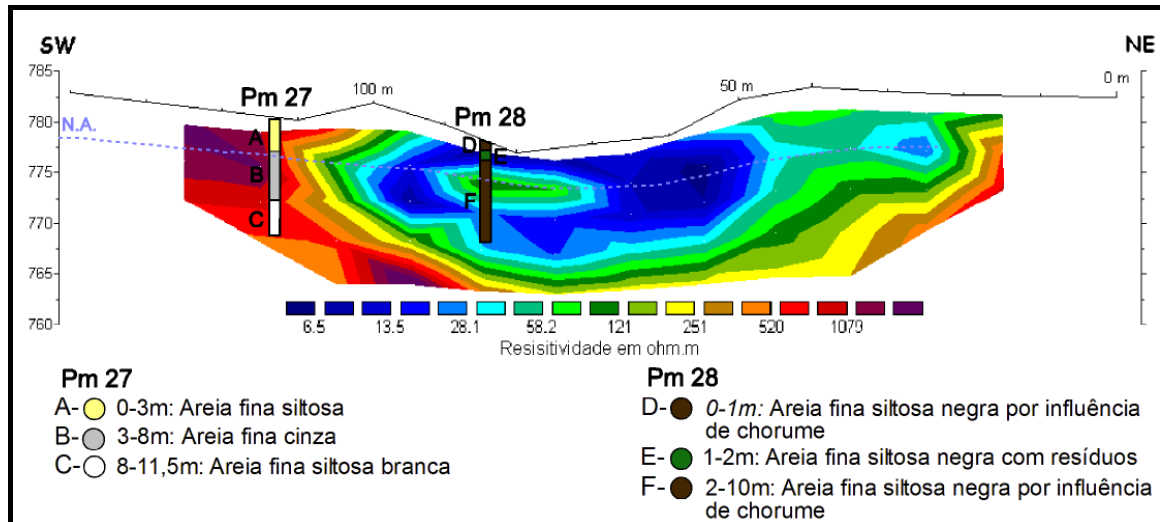


Figura 28: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 1, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

Essa zona de baixa resistividade (até 150 ohm.m pelo menos) pode indicar uma zona contaminada por percolados, fortalecendo a idéia de um fluxo subterrâneo de sentido NW, como sugerido por Ellert (1990), Gonçalves *et al.* (1992), Bossolan (1993), Freitas (1996), Gadoti (1997) e Álvares (2000).

Observando a seção de polarização induzida da linha 1 (Figura 29) pode-se perceber a presença de uma anomalia de baixa cargabilidade junto ao poço 28, provavelmente provocado pela presença de seus materiais constituintes. Mas observa-se que este comportamento não é via de regra, já que no poço 27, construído como o 28, não é observada a mesma resposta de cargabilidade, portanto não se pode confirmar essa associação.

Já a anomalia de alta cargabilidade no centro da seção, que corresponde a uma porção de baixa resistividade, pode estar associada a uma zona de percolação dos fluidos. Essa anomalia está presente em outras linhas, e será melhor discutida posteriormente.



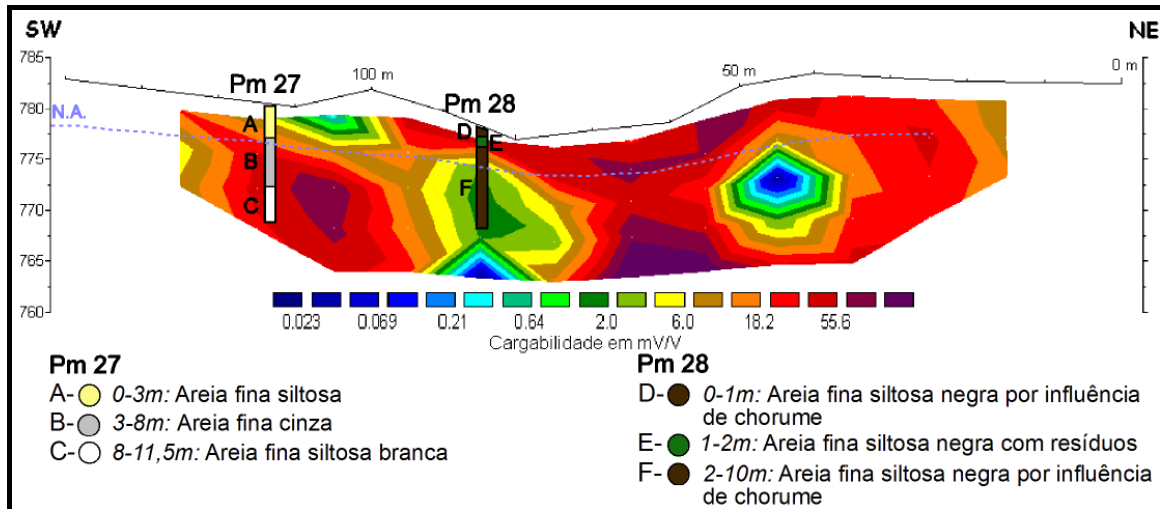


Figura 29: Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 1, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

### 5.1.3. Linha 2

Tanto na seção de resistividade (Figura 30), quanto na seção de cargabilidade (Figura 31), em conjunto com a composição dos poços que se encontram nessa linha, pode-se fazer as mesmas análises feitas na linha 1. Ou seja, as anomalias de baixa resistividade coincidem com as porções compostas por resíduos e percolados, assim como as de alta cargabilidade.

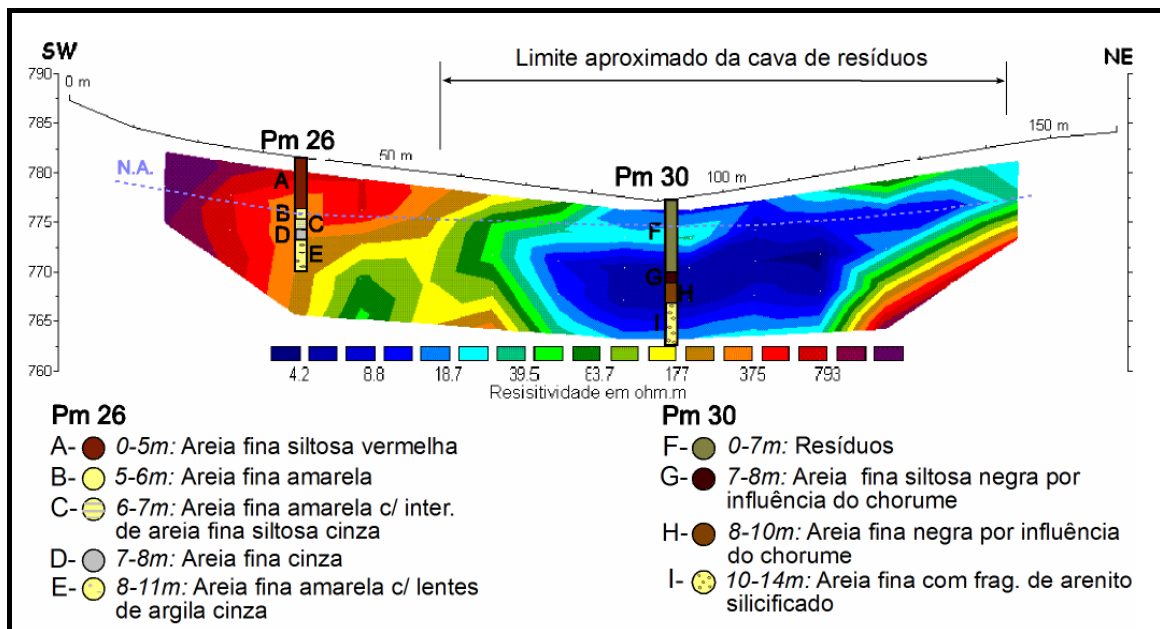


Figura 30: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 2, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

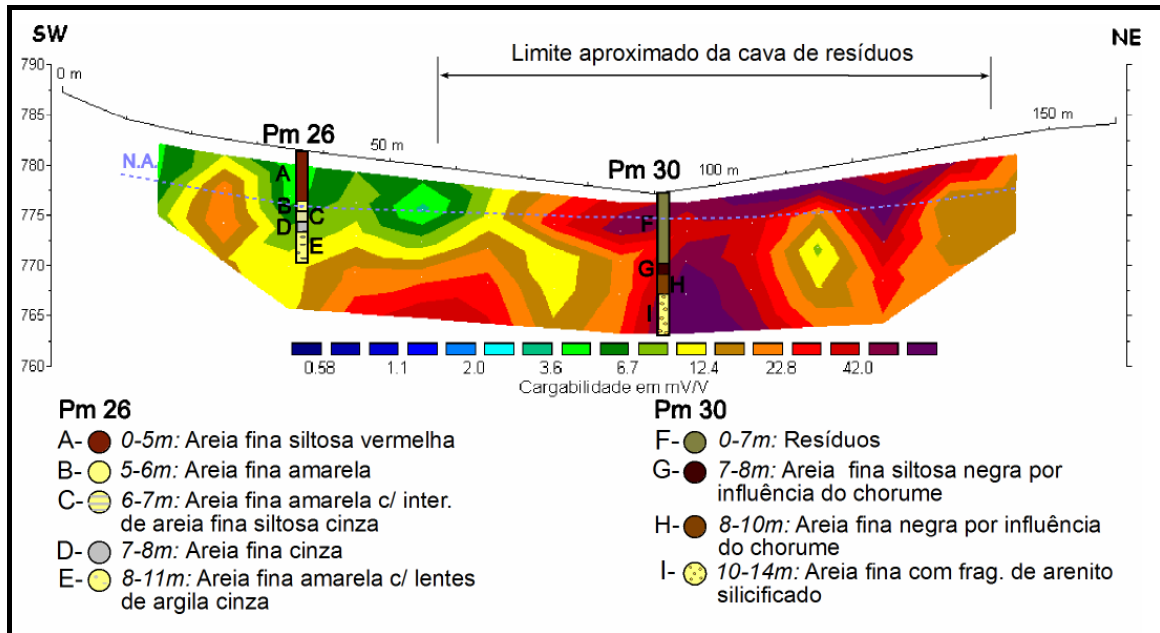


Figura 31: Seção de cargaabilidade (RES2DINV) da linha 2, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

#### 5.1.4. Linha 3

Na seção de resistividade produzida para esta linha (Figura 32) observa-se novamente a presença de uma área de baixa resistividade correspondente a área da cava de resíduos e seus percolados. Observando o poço 31 pode-se perceber que a profundidade de resíduos chega a 6,5 metros, mas que a presença de percolados encontra-se abaixo desse valor, sendo que até 15 metros é confirmada pelos dados de Freitas (1995), e abaixo disso indicada em algumas porções pelos baixos valores de resistividade.

Foram encontrados valores de baixa resistividade que interceptam o poço 25, no entanto, os dados do material retirado do poço não indicam a presença de lixo ou chorume. Quando analisa-se o perfil correspondente de 1995 (Anexo II – linha 5 de 1995), já é observada essa anomalia de baixa resistividade nessa porção.

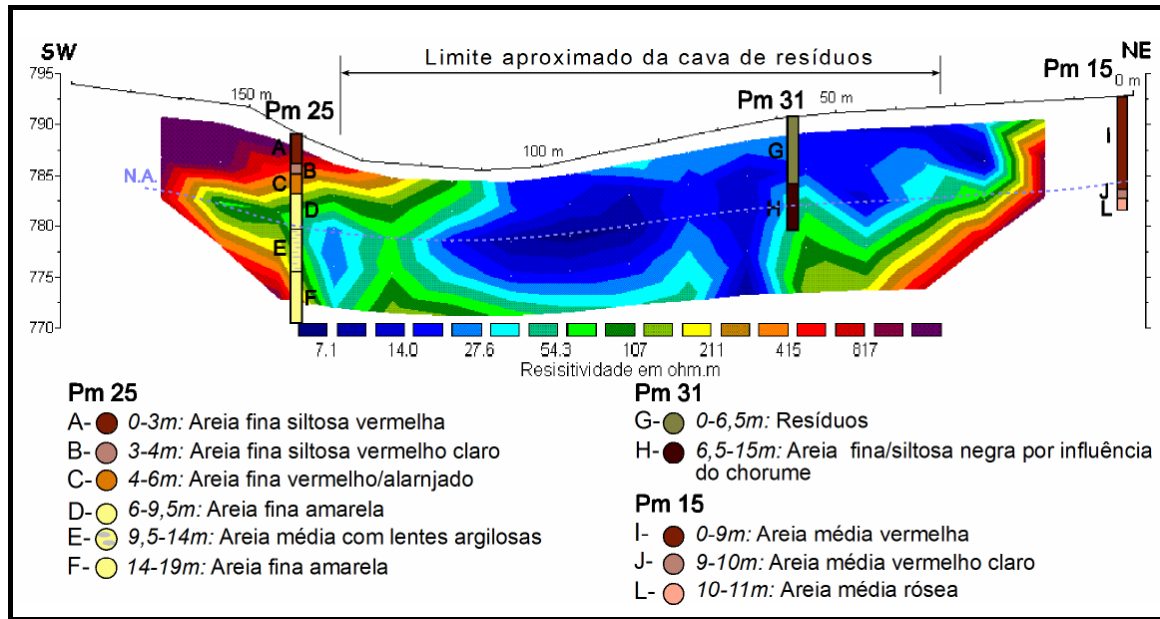


Figura 32: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 3, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

Na seção de cargabilidade da linha 3 (Figura 33) pode-se confirmar os valores altos relacionados aos locais em que encontram-se os resíduos e percolados, bem como, mais uma vez, pode-se observar a presença de uma porção de alta cargabilidade praticamente vertical, quase no centro da linha, que pode indicar um caminho preferencial de percolação.

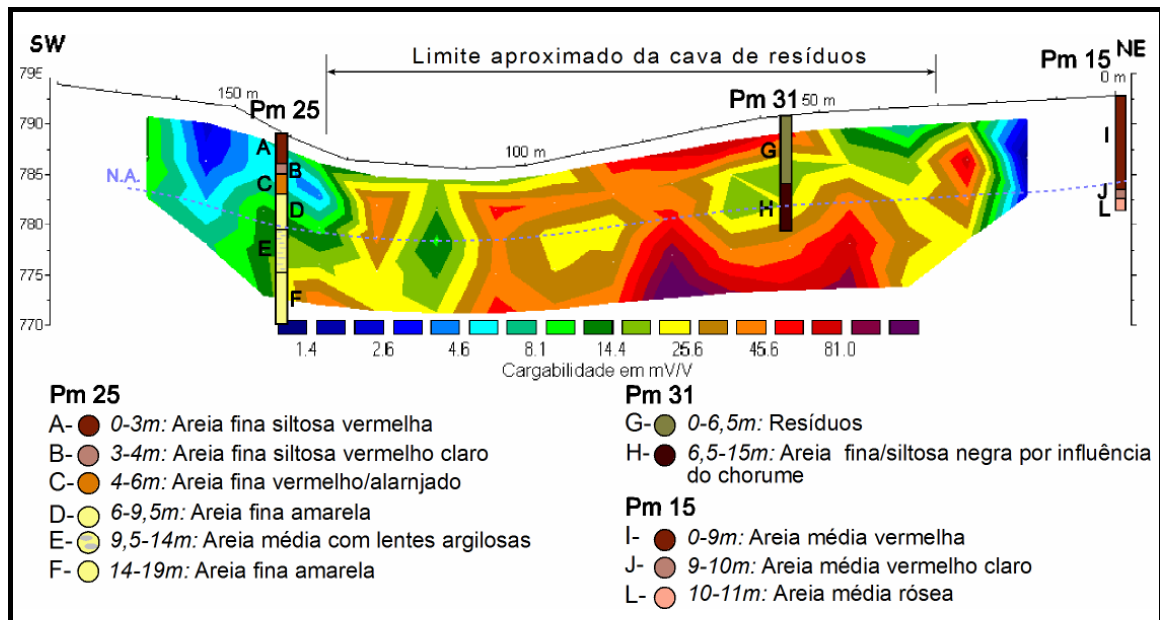


Figura 33: Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 3, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

### 5.1.5. Linha 4

Como o único poço que a linha 4 intercepta (poço 16) encontra-se fora do limite da cava de resíduos, não foi possível correlacionar os dados de poços com os de resistividade ou cargabilidade, no entanto, a presença de uma zona de baixa resistividade no centro da linha (Figura 34) indica a presença de resíduos e percolados até a profundidade de, pelo menos, 15 metros.

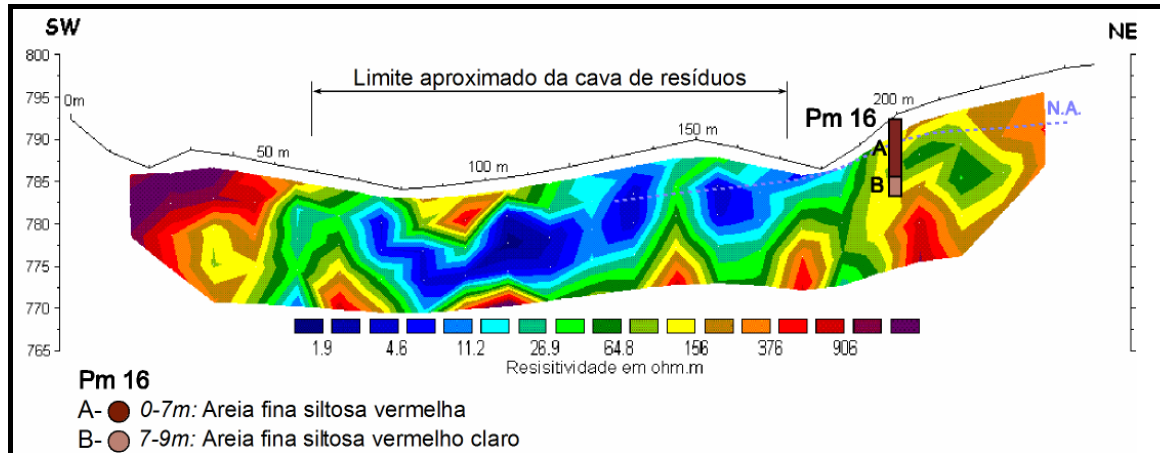


Figura 34: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 4, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

Na seção de cargabilidade da linha 4 (Figura 35) podem ser observados os valores de alta cargabilidade concentrados nas regiões correspondentes a da cava de resíduos. As anomalias de cargabilidade ocorrem de forma localizada dentro dos resíduos, refletindo a sua heterogeneidade.

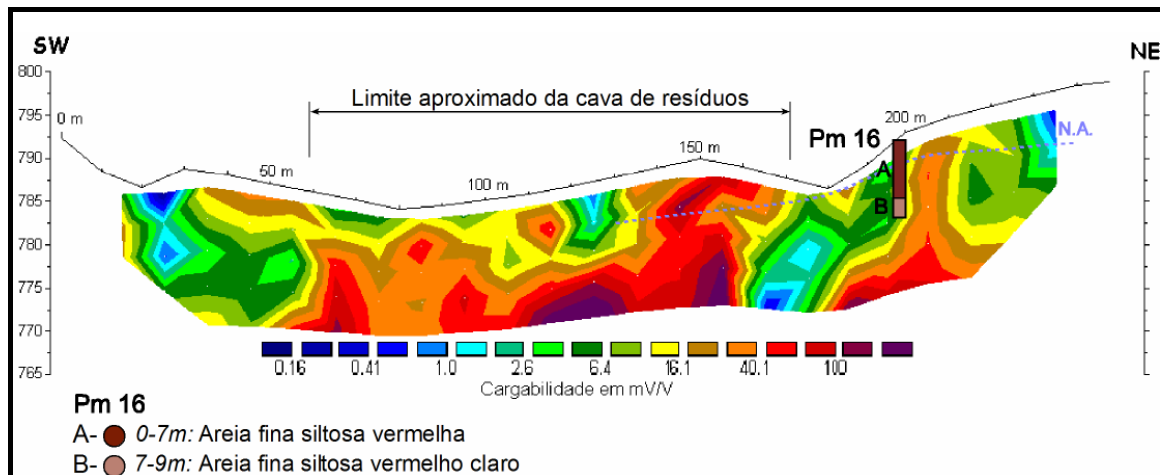


Figura 35: Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 4, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

### 5.1.6. Linha 5

Na seção de resistividade da linha 5, conjuntamente com o posicionamento e composição dos poços que ela intercepta (Figura 36), observa-se a correspondência da localização dos baixos valores de resistividade com a dos resíduos e percolados encontrados no poço 33, e pode-se perceber também que um eventual espalhamento lateral a linha (SW-NW), não é efetivo, visto os valores mais altos de resistividade encontrados nessas porções.

Na seção de cargabilidade da linha 5 (Figura 37), pode-se constatar, mais uma vez, que os maiores valores de cargabilidade encontram-se em zonas correspondentes as de menor resistividade, ou seja, na porção preenchida por resíduos e influenciada pelos percolados.

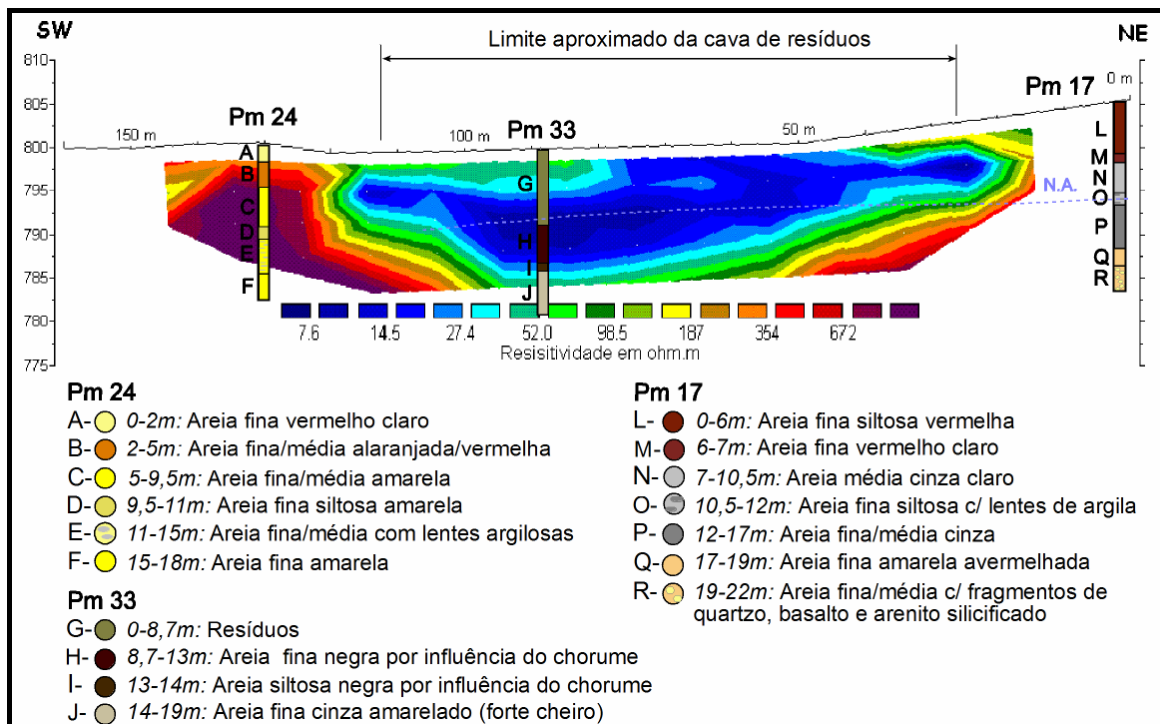


Figura 36: Seção de resistividade (RES2DINV) da linha 5, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

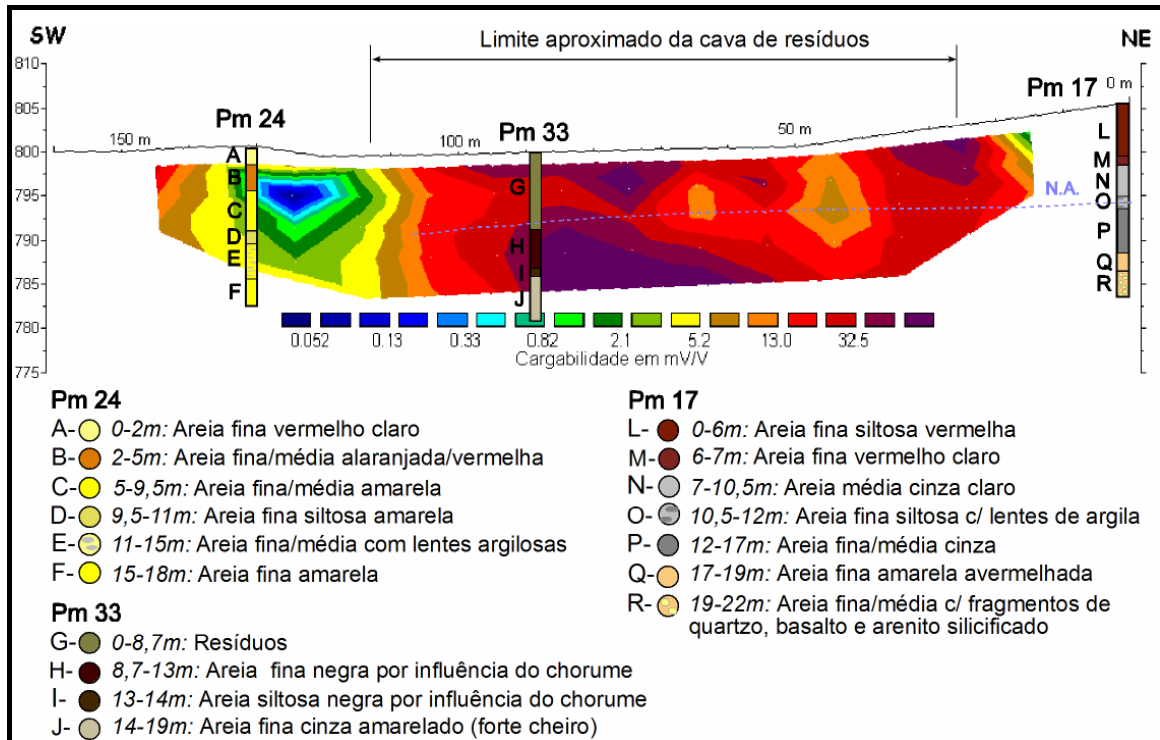


Figura 37: Seção de cargabilidade (RES2DINV) da linha 5, nível d'água medido e dados da composição dos poços (Freitas, 1995 e Álvares 2000).

## 5.2. Análise da evolução da contaminação no período de 1995 a 2005

Para análise da evolução da contaminação, causada pela instalação inadequada do lixão de São Carlos, comparou-se os dados obtidos com os caminhamentos elétricos realizados em 1995 com os realizados em 2005 (Anexo I).

Pode-se perceber que embora os valores de resistividade encontrados em 1995 sejam um pouco mais baixos que os de 2005, em parâmetros de valores que indicam contaminação (pelo menos até 150 ohm.m) percebe-se que a situação não é muito diferente.

Analisando verticalmente as linhas percebe-se que antes já existia contaminação e hoje continua ocorrendo, praticamente nas mesmas proporções, como pode ser observado na comparação das linhas 5 de 1995 e 3 de 2005 (Anexo II). Este mesmo comportamento pode ser observado comparando a linha 2 de 2005 com a linha 6 de 1995 e a linha 5 de 2005 com a 4 de 1995, também apresentadas no Anexo II.

A direção de fluxo SW-NE sugerida anteriormente por outros autores, como Gadotti (1997) e Matsuzaki (1998) não foi evidenciada pelas seções geofísicas

produzidas, mas pode estar associada a presença de uma descontinuidade mapeada por Muro (2000) como uma falha normal, que apresenta essa mesmo sentido SW-NE (Figura 38).

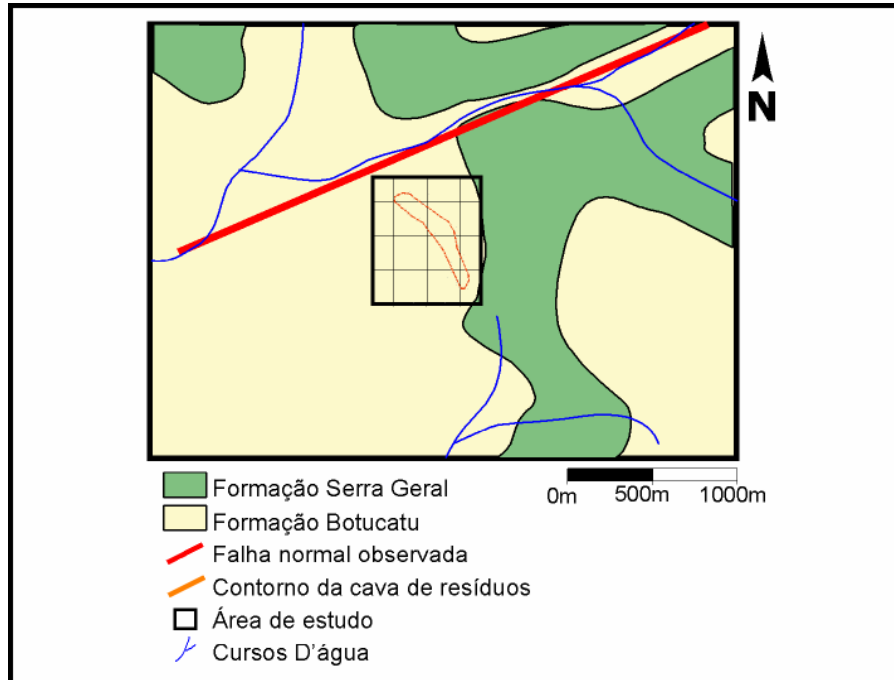


Figura 38: Geologia conforme Muro (2000), com a localização da área de estudo em relação a falha por ele observada.

Observando os perfis de cargabilidade percebe-se nas linhas 1, 2, 3, 4 e 5 de 2005 (Anexo II) uma anomalia no sentido vertical, que quando analisada conjuntamente com o perfil topográfico da região, anterior a instalação do lixão, correspondem a porção onde encontrava-se instalada a voçoroca, que evoluiu a partir de uma simples erosão até atingir o nível de base. Esse nível de base poderia ser o nível regional, ou como sugere Álvares (2000), poderia ser relativo a um aquífero suspenso, sustentado por sedimentos siltsos argilosos confinantes.

Na figura 39 foram podem ser visualizadas as seções de resistividade e na Figura 40 as seções de cargabilidade, ambas obtidas no RES2DINV e plotadas conjuntamente com o mapa topográfico da área (Álvares, 2000), de maneira a permitir uma visualização espacial da disposição das linhas, bem como do alinhamento das anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade.

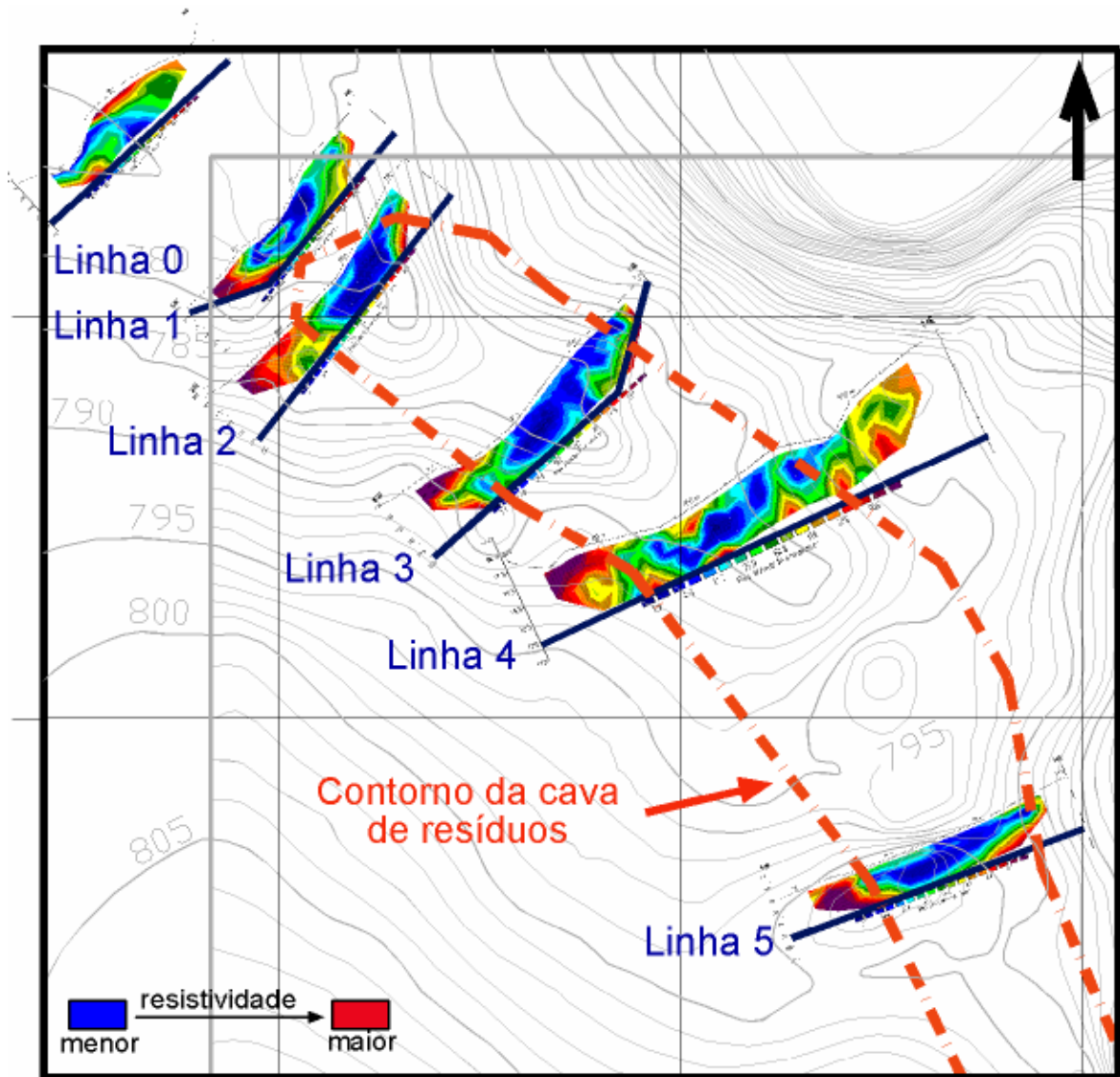


Figura 39: Seções de resistividade de 2005 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos (as escalas de cores em cada seção são diferentes, para visualização das escalas individuais de cada seção observar as figuras 26, 28, 30, 32, 34 e 36).

Quando se comparam os perfis de resistividade e os de cargabilidade observa-se que a anomalia de alta cargabilidade coincide com a zona onde encontram-se os valores de menor resistividade, indicando que pode haver uma contaminação em profundidade, com os contaminantes infiltrando por uma descontinuidade nessa região. Isso pode ser observado, por exemplo, nas seções de resistividade da linha 6 de 1995, 2 de 2005 e na seção de cargabilidade da linha 2 de 2005 (Anexo I).



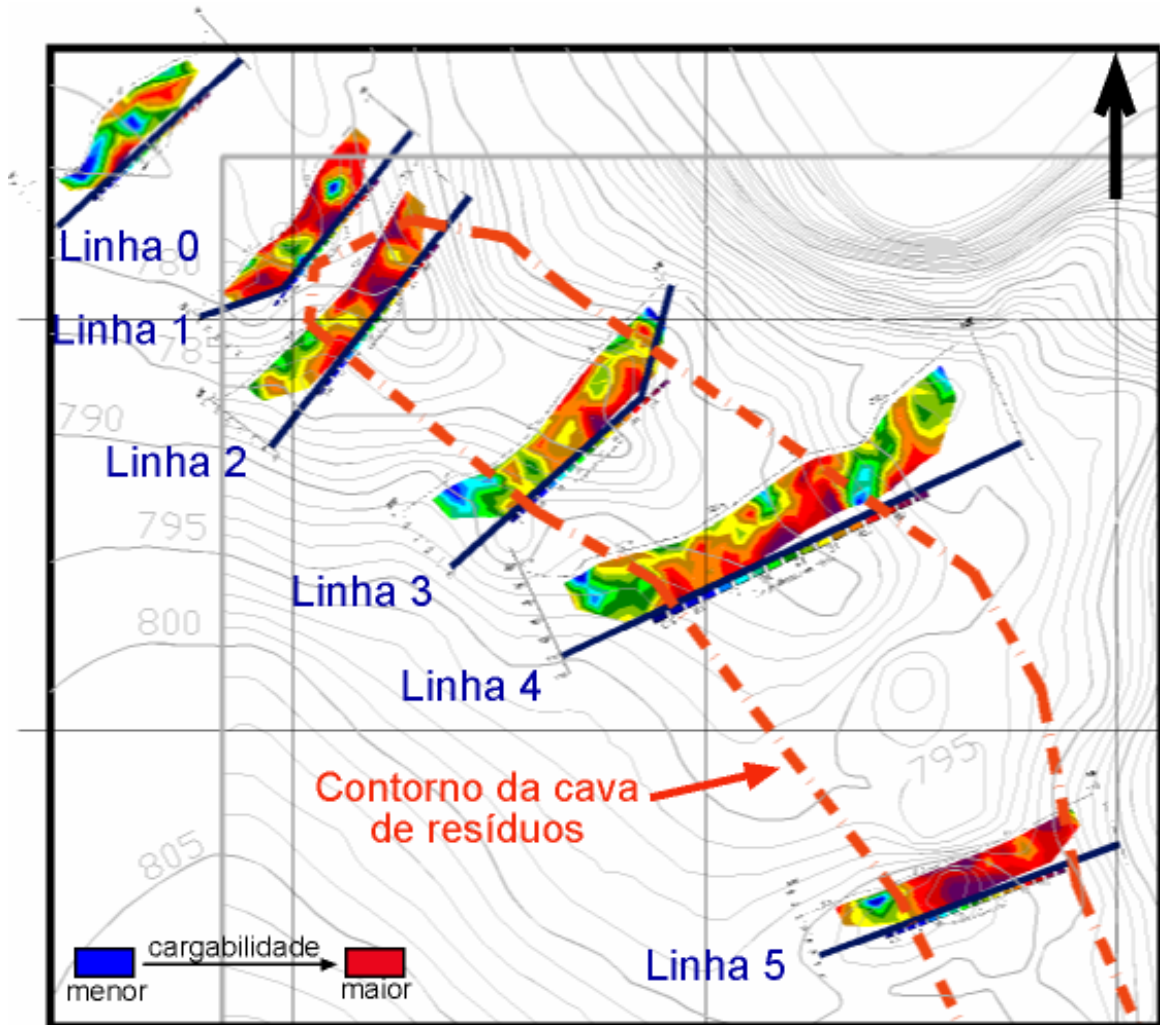


Figura 40: Seções de cargabilidade 2005 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos (as escalas de cores em cada seção são diferentes, para visualização das escalas individuais de cada seção observar as figuras 27, 29, 31, 33, 35 e 37).

Analisando as fotos aéreas da região de 1962 e 1971 (Figuras 41 e 42 respectivamente), e comparando-as com as de 2000 (Figura 43), podemos observar a mudança do relevo, devido principalmente a atividades antrópicas.

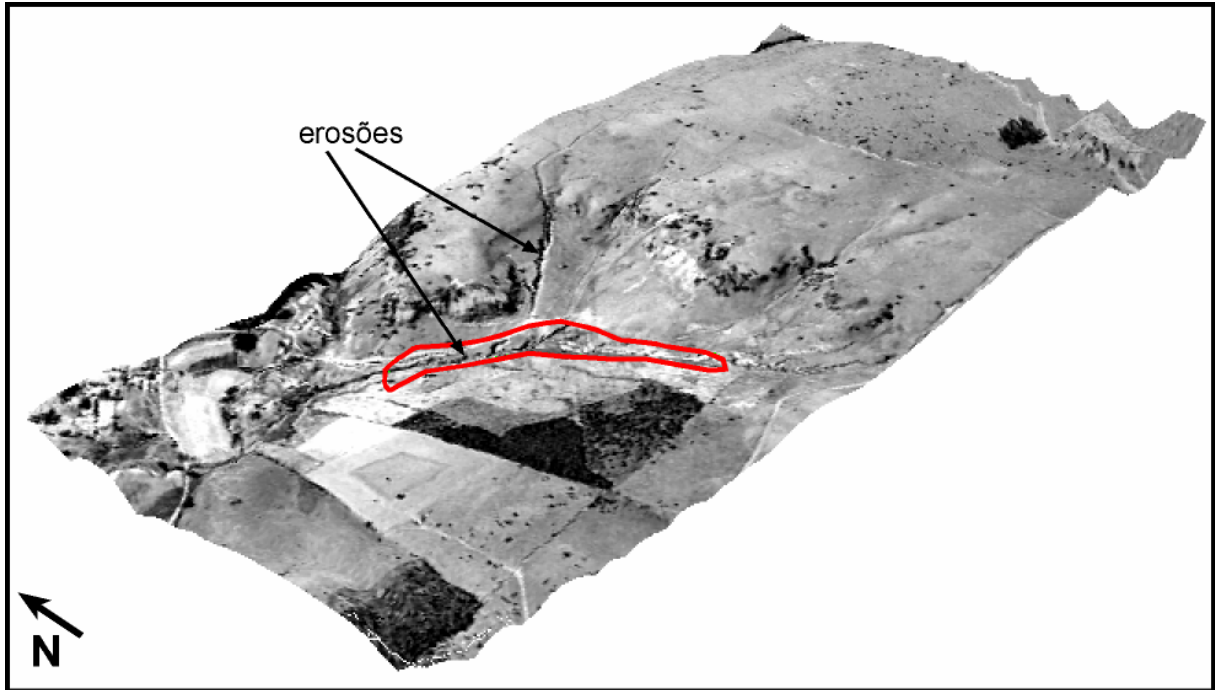


Figura 41: Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:25.000) da área de estudo em 1962, com indicação do contorno da cava de resíduos que seria posteriormente instalada.

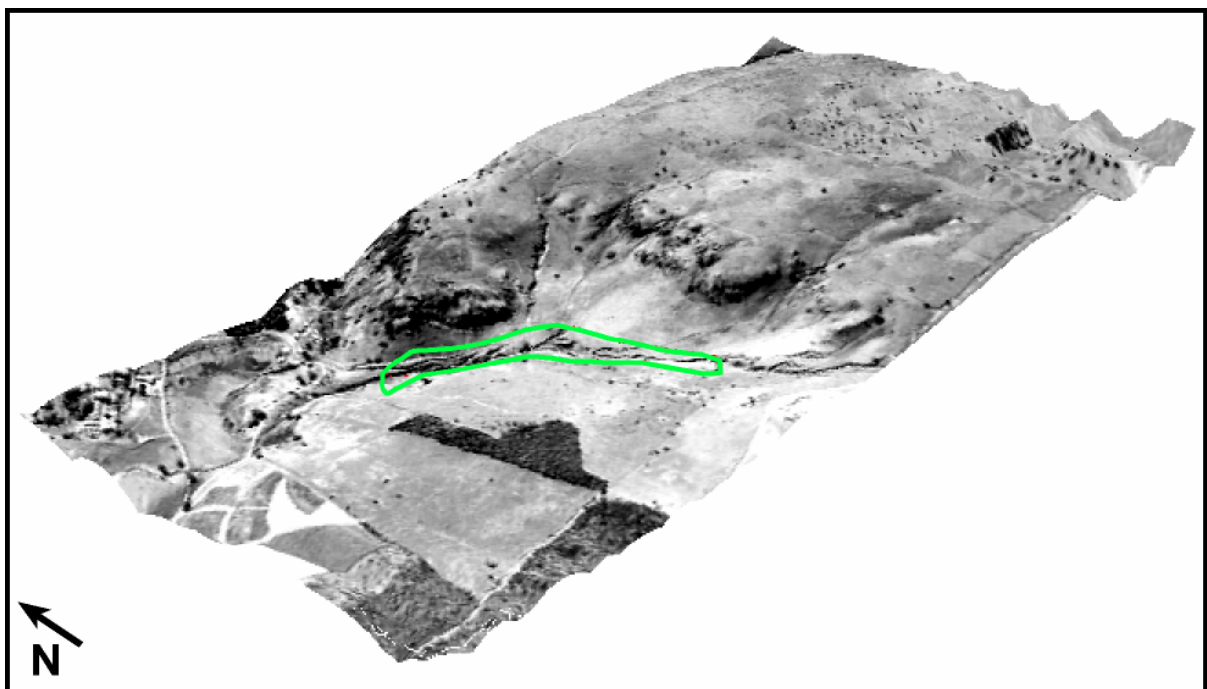


Figura 42: Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:25.000) da área de estudo em 1971, com indicação do contorno da cava de resíduos que seria posteriormente instalada.

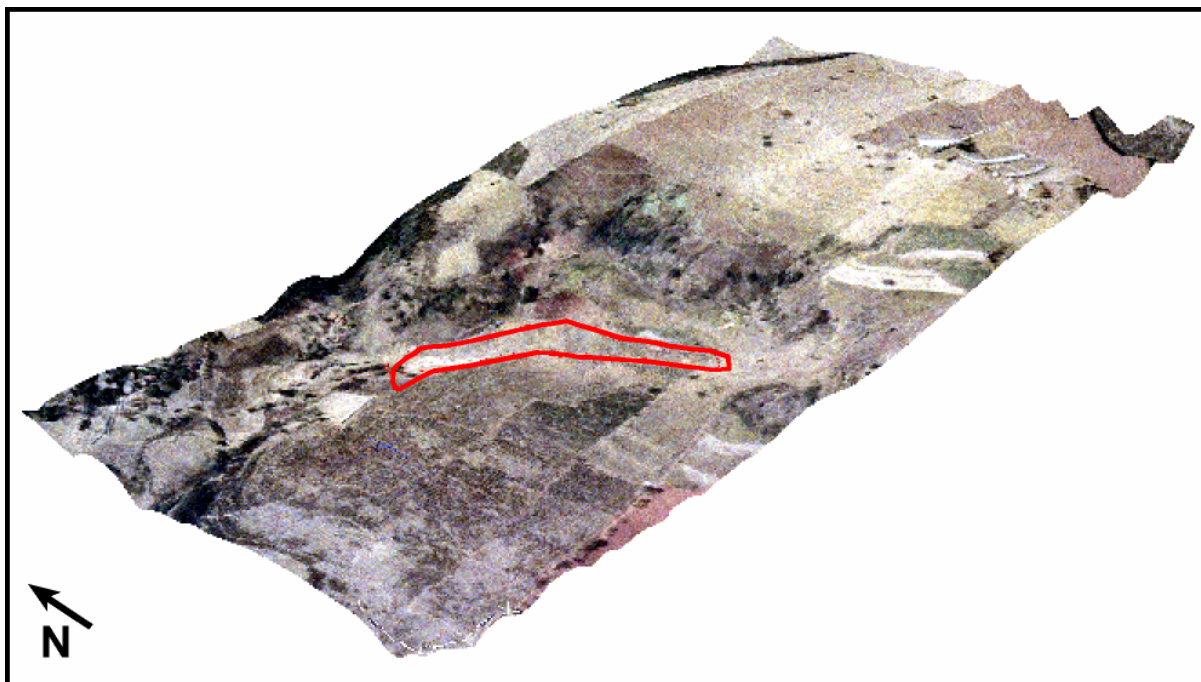


Figura 43: Modelo digital do terreno com sobreposição da foto aérea (1:30.000) da área de estudo em 2000, com indicação do contorno da cava de resíduos.

Para confirmar a possibilidade da existência de uma descontinuidade nessa região resolveu-se analisar com maior detalhe as fotos aéreas dessa área, além de retornar ao campo em busca de indícios.

Nos afloramentos de campo não foi possível identificar evidências que caracterizem essa descontinuidade, mas analisando as fotos percebe-se uma quebra de relevo marcante nessa porção, separando um relevo mais íngreme na porção leste de um relevo mais plano na porção oeste da descontinuidade.

Analisando regionalmente a área, em uma imagem de satélite, percebe-se evidência dessa descontinuidade de maneira regional, como pode ser observado na Figura 44.

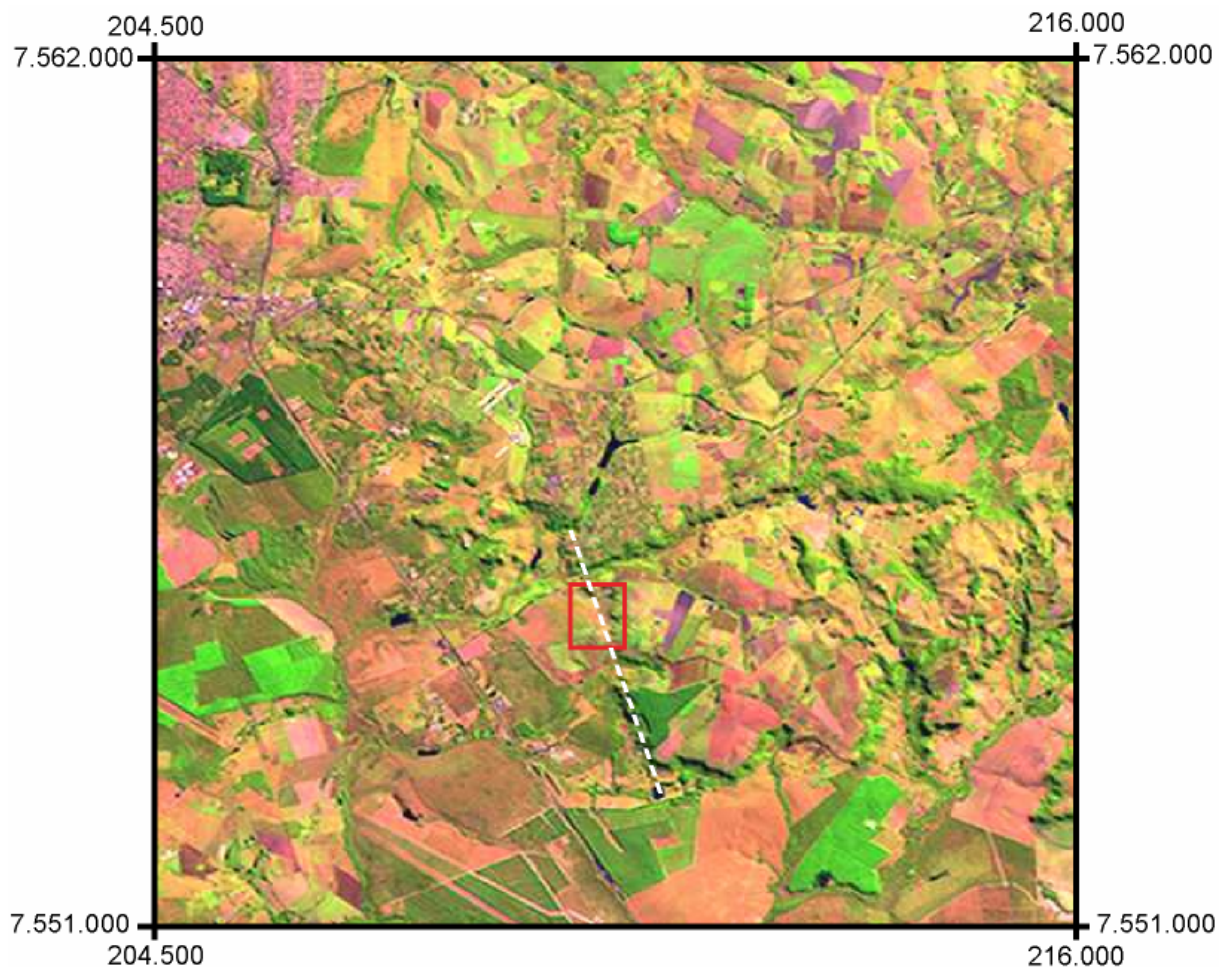


Figura 44: Localização da área de estudo, com indicação da descontinuidade em imagem de satélite (Imagem Landsat 7 - Miranda, 2001).

Isso dá indicações de que pode estar ocorrendo contaminação em maior profundidade como já sugerido anteriormente por Gonçalves *et al.* (1992). Essa contaminação de zonas mais profundas estaria associada a essa descontinuidade penetrante sob o corpo do lixo, provavelmente sobre a qual a antiga voçoroca instalou-se.

Outro fator que favorece a percolação do chorume é a variação sazonal do nível d'água. As leituras do nível d'água foram realizadas em maio/2005, e quando comparadas com as obtidas por Álvares (2000), medidas em julho, observa-se que estas encontram-se, em média, 50 cm abaixo. Os valores de nível d'água medidos por Freitas (1996) encontram-se ainda inferiores, cerca de 70 cm, no entanto não foi possível obter o período em que realizou-se esta leitura.

Para análise espacial da contaminação decidiu-se traçar um perfil longitudinal ao corpo do lixo, a localização desse perfil pode ser observado na Figura 45, e o perfil na Figura 46.

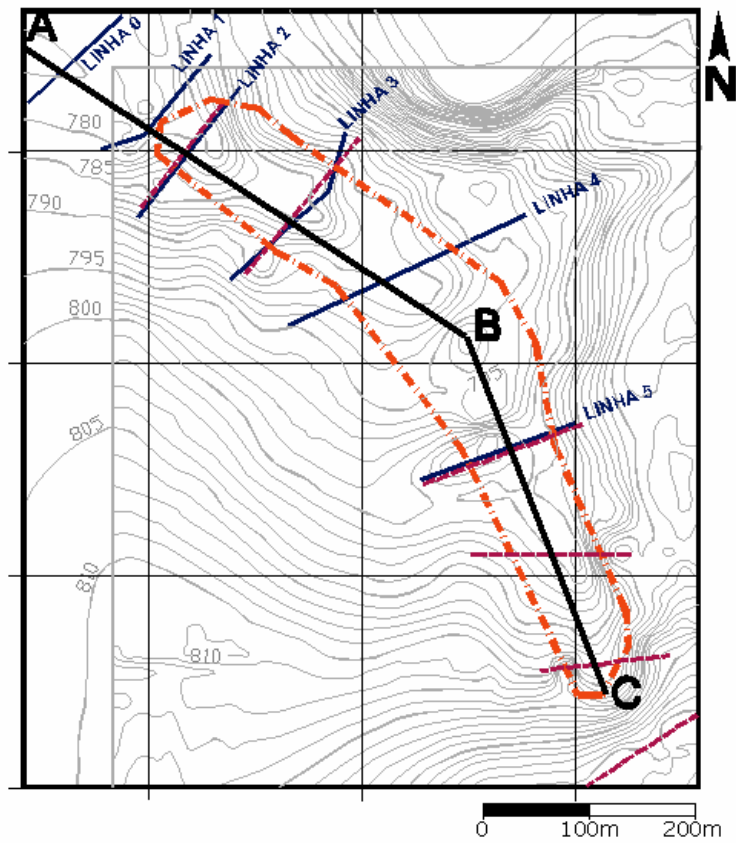


Figura 45: Localização do perfil ABC, que corta o corpo do lixo em toda sua extensão.

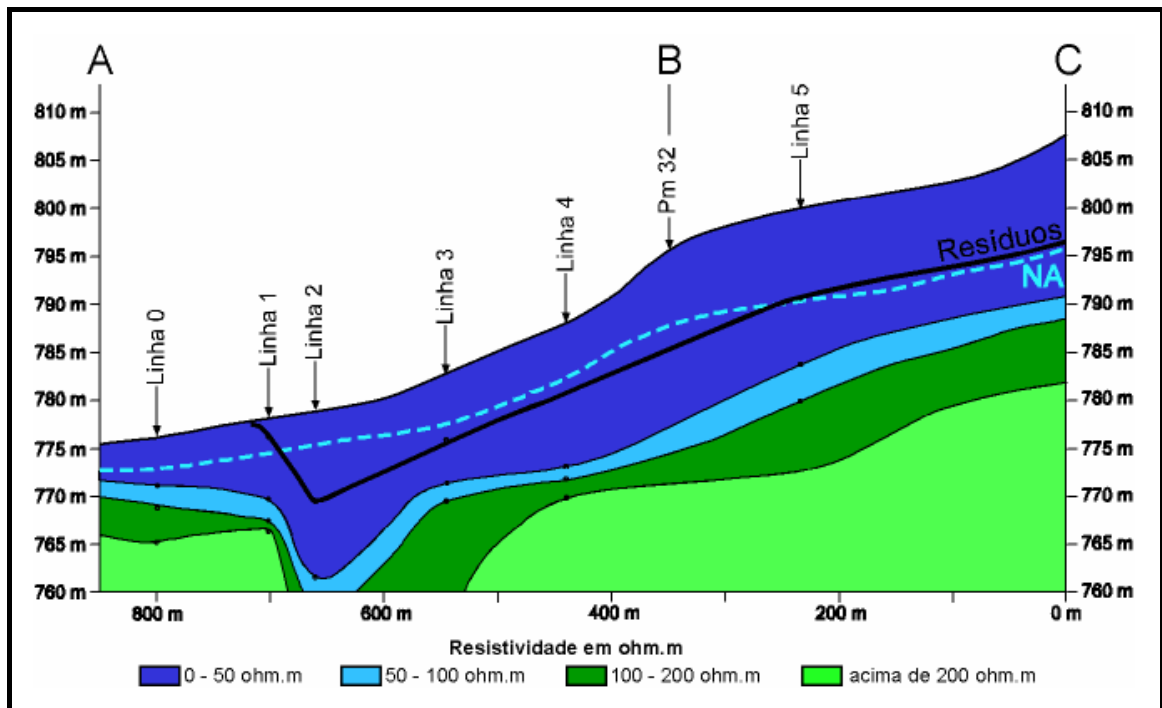


Figura 46: Perfil ABC, que corta o corpo do lixo em toda sua extensão.

Observando esse perfil pode-se perceber que na porção do perfil cortado pela linha 2 de eletrorresistividade é a região que apresenta resistividade mais baixa em regiões mais profundas, isso se deve, principalmente, ao fato da grande espessura de resíduos depositados nessa região.

Também se nota que grande parte dos resíduos está depositado abaixo do nível d'água, propiciando a contaminação das águas subterrâneas.

Quando se analisa esse perfil (Figura 46) em conjunto com a Figura 39, onde estão plotadas as seções de resistividade, percebe-se que o sentido preferencial do fluxo concentra-se na direção NW.

Ao comparar-se a Figura 39, que apresenta os dados de resistividade de 2005, com a 47, com os dados de 1995, nota-se que a distribuição da contaminação não encontra-se muito diferente da situação de 10 anos atrás.

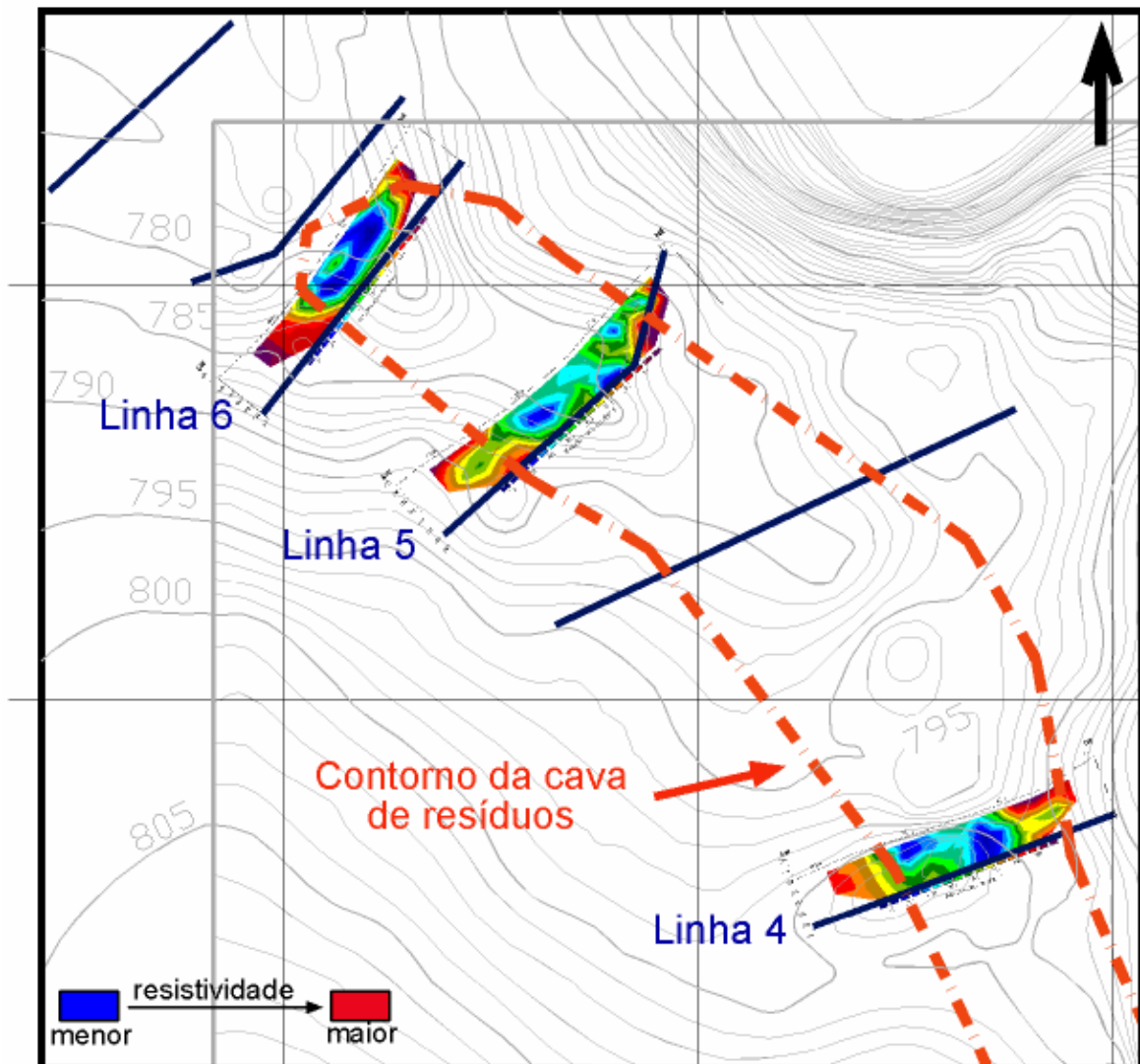


Figura 47: Seções de resistividade de 1995 dispostas espacialmente com o contorno da cava de resíduos.

Nos mapas de resistividade produzidos no Surfer 8.0, com profundidades aparentes de 10, 20 e 30 metros, exibidos na Figura 48, a anomalia condutora pode ser interpretada como uma frente de contaminação desenvolvendo-se a partir dos resíduos e caminhando no sentido NW, seguindo o fluxo subsuperficial, sendo que isso é melhor observado no mapa de profundidade aparente de 20 metros. Nestes mapas pode-se notar que em profundidade ocorre também um suave espalhamento da pluma de contaminação.

Nessa figura também são expostos os valores de resistividade aparente em ohm.m correlacionados com a concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS) em mg/l, conforme Equação 1, proposta por Meju (2000), onde o  $\sigma_w$  é a condutividade elétrica da solução aquosa em mS/m e  $\sigma_w = 1000 / \text{resistividade em ohm.m}$ .

$$TDS = -54,4 + 7,04\sigma_w \quad (1)$$

Os valores de TDS obtidos evidenciam níveis de contaminação elevada sob o corpo do lixo, sendo que até a profundidade aparente de 20 metros podem ser observados valores da ordem de 600 mg/l. Em níveis mais profundos (30 metros) a concentração de sólidos dissolvidos não atinge concentrações tão altas, apresenta no máximo valores da ordem de 200 mg/l, no entanto pode-se perceber uma continuidade lateral dessa ordem de valores.

Deve-se resaltar que esses valores de sólidos totais dissolvidos podem, neste caso, corresponderem a valores subestimados nas porções de solo e superestimados nas porções de lixo, já que nesta equação os valores de condutividade elétrica são em solução aquosa.

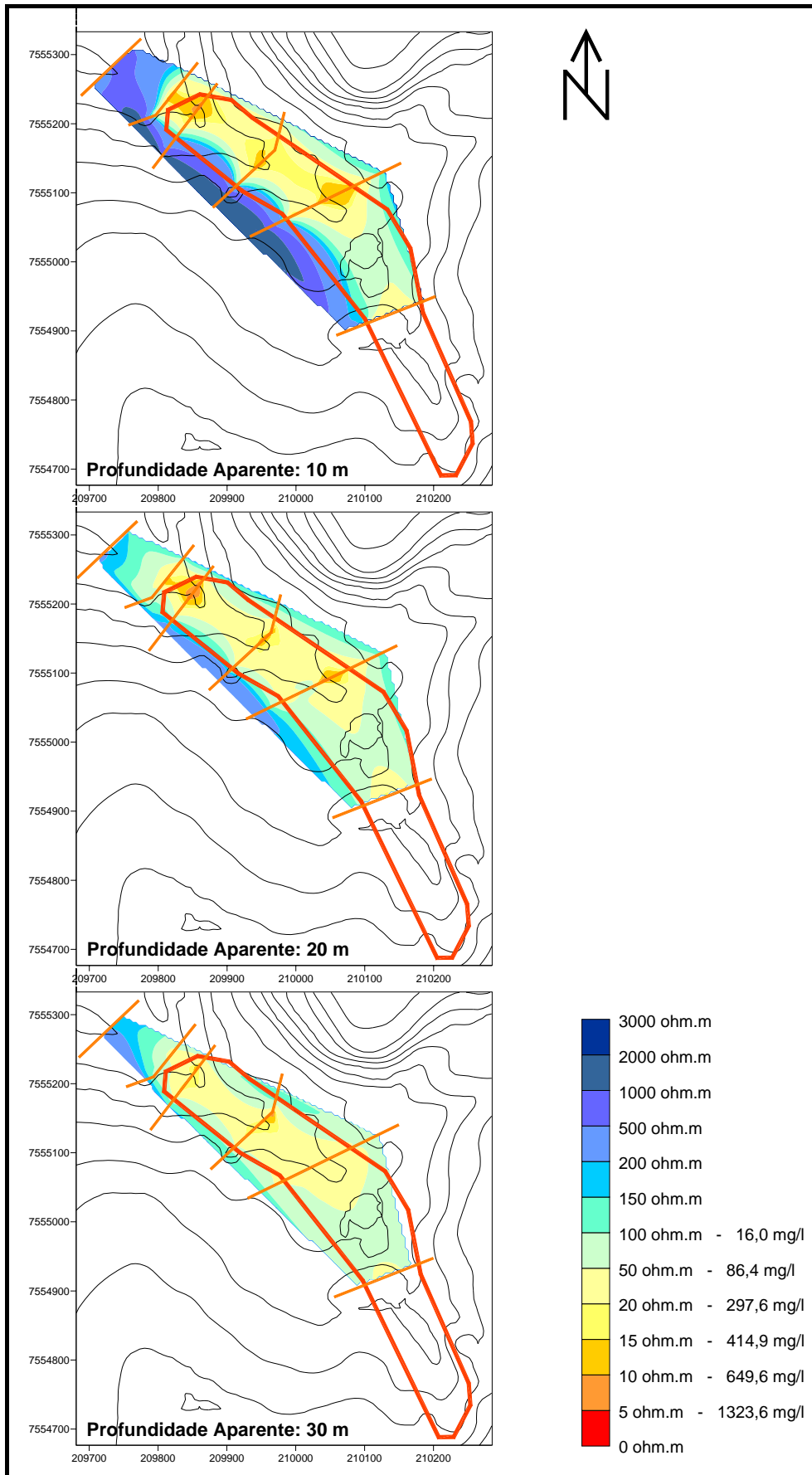


Figura 48: Mapas de resistividade aparente das profundidades de 10, 20 e 30 metros.



Esse fluxo de contaminantes, de direção NW, é facilitado pelo meio de alta permeabilidade dos materiais arenosos da região, que nos ensaios de granulometria conjunta executados mostraram-se predominantemente areias finas a médias, esses resultados são compatíveis com os encontrados por Freitas (1996), que também realizou esses ensaios, mas em pontos distintos.

Como pode ser constatado nos ensaios de infiltração, a permeabilidade na área encontra-se na faixa de  $10^{-5}$  m/s, sendo que isto pode variar pontualmente, principalmente sobre o corpo do lixo, de composição muito heterogênea.

Freitas (1996), a partir de testes de bombeamento, caracterizou o aquífero na região de estudo como de comportamento heterogêneo (transmissividade) e anisotrópico (condutividade hidráulica), mas ressaltou a facilidade com que ocorre o fluxo subterrâneo e o deslocamento da pluma de poluentes.

Outro fator que facilita a percolação é a ausência de barreiras menos permeáveis, que quando existem são de argilas pouco ativas a inativas, como constatado pelos ensaios de adsorção de azul de metileno empregados, sendo que essas eventuais camadas argilosas ou silticas são de reduzida espessura, como foi observado em campo, durante a execução da gradagem para obtenção de amostras para o ensaio de infiltração.

Esses dados são compatíveis com os encontrados nos estudos de Meneses (1995) e Freitas (1996), que determinaram os solos da área como de baixa capacidade de troca catiônica, ou seja, com baixa capacidade de retenção de contaminantes.

Já Álvares (2000) sugere que o corpo do lixo poderia estar assentado sobre um acamamento areno siltoso, que possibilitaria uma proteção ao risco de contaminação do aquífero profundo, sugerindo transporte superficial advectivo de contaminantes superior ao de subsuperfície. Com os estudos desenvolvidos nesta pesquisa não foi observada a presença ou influência dessas possíveis zonas protetoras do aquífero profundo.

## 6. Conclusões

Como a alteração da qualidade da água subterrânea é de extrema importância para a população atual e futura, esse trabalho mostrou-se de grande valia, já que a área de estudo trata-se de um lixão instalado sobre a Formação Botucatu, detentora do maior manancial brasileiro de águas subterrâneas.

O objetivo de caracterização geológico-geotécnica, associada a aplicação de métodos geoeletricos, foi alcançado, sendo que após a análise dos dados gerados conjuntamente com os ensaios e pesquisas de estudos anteriores, constatou-se que na área do lixão o aquífero apresenta-se livre e sua contaminação pôde ser confirmada até aproximadamente 25 metros de profundidade.

Como foram aplicados no caminhamento geofísico as técnicas de resistividade e polarização induzida, foram produzidas seções com diferentes parâmetros (resistividade e cargabilidade), que se complementaram.

As zonas contaminadas puderam ser melhor definidas nas seções de resistividade, sendo os dados de cargabilidade utilizados de maneira auxiliar. No entanto, ambas comprovaram a boa aplicabilidade do caminhamento elétrico para visualização de contrastes entre áreas contaminadas e não contaminadas, com continuidade lateral dos resultados.

Pôde-se constatar uma boa aderência entre os dados geofísicos e os reais, já que os valores de baixa resistividade coincidem com as porções onde foram encontrados resíduos ou chorume nas amostras coletadas durante a execução dos poços por Freitas (1996).

Há indicações de que pode estar ocorrendo contaminação do aquífero profundo, ao contrário do que sugeriram anteriormente alguns autores. Essa contaminação de

---

zonas mais profundas estaria associada a uma possível descontinuidade geológica sob o corpo do lixo.

Associado a estes fatores tem-se como agravante a alta permeabilidade dos materiais arenosos da região, que é da ordem de  $10^{-5}$  m/s, a ausência de barreiras menos permeáveis, que quando existem são de argilas pouco ativas a inativas e a variação sazonal do nível d'água, facilitando o fluxo dos contaminantes.

Essa contaminação das águas subterrâneas estaria ocorrendo através da percolação de águas pluviais e outros líquidos gerados pela própria degradação dos resíduos, que por infiltração atingem o nível d'água, compondo a pluma de contaminação, que em algumas porções apresenta concentrações elevadas de sólidos dissolvidos, da ordem de 600 mg/l. Essa pluma apresenta fluxo preferência para NW, seguindo o sentido do fluxo do escoamento superficial.

Também se percebe que a infiltração de água no corpo do lixo se dá de maneira semelhante a medida no solo, embora no corpo do lixo possam ser encontradas maiores variações, devido a sua composição heterogênea.

Quanto a evolução da contaminação, pode-se perceber que em 1995 já existia contaminação e que hoje continua ocorrendo, praticamente nas mesmas proporções até a profundidade investigada, isso é confirmado pelas seções geofísicas de 1995 e 2005, e pelos dados dos poços.

Para trabalhos futuros na área, sugere-se que a investigação alcance maiores profundidades, de maneira a constatar efetivamente a contaminação do aquífero profundo; além de estudos químicos e geoquímicos baseados em coletas de amostras de água subterrânea e superficial, de maneira a caracterizar os contaminantes presentes.

## Referências Bibliográficas

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993) - NBR 9896 - **Glossário de poluição das águas**. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987) - NBR 10.004 - **Resíduos sólidos: classificação**. São Paulo.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) - *NBR 7.181* – **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro.
- ACSELRAD, M.V.; AZEVEDO, J.P.S.; MAGALHÃES, P.C. (2004) Uma proposta preliminar de incorporação da água subterrânea ao sistema de gerenciamento e recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Águas Subterrânea.
- AFFONSO, A.O.; MONSORES, A.L.M. (2004) O Conflito conceitual entre águas subterrâneas e águas minerais – uma contribuição jurídica e técnica para uma gestão integrada entre recursos hídricos e minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Águas Subterrânea, 2004.
- AGUIAR, A.B.O. (2001) **Emprego do Permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo de camadas de lixo e sua cobertura**. 2001. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- ALMEIDA, F.F.M. (1964) Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, p. 169-263, 1964.
- ÁLVARES, C.M.B. (2000) **Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos – SP, através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos**. 158p Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2004). **Informações Hidrogeológicas**. Disponível em <[www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos](http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos)>. Acesso em 24/nov/04.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1988) – D3385-88 - **Standard test method for infiltration rate of soils in field using double ring infiltrometers**.
- AZAMBUJA, E.; COSTA, A.F.U.; NANNI, A.S. (1999) **O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos**. Disponível em <<http://www.azambuja.com.br/acervo/REGEO99.pdf>>. Acesso em 03/dez/04.
- BEAR, J. (1972) **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover Publications, 1972, 764 p.
- BOCANEGRA, E.M.; MARTÍNEZ, D.E.; FARENGA, M.O.; CIVIT, E.M. (1998) Modelación del balance hidráulico y del flujo contaminante de um relleno sanitario en mar del Plata, Argentina. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 4., 1998, Montevideo. **Anais...** Montevideo: ALHSUD. p.299-311.
- BOSSOLAN, N.R.S. (1993) **Aspectos ecológicos das populações bacterianas em águas subterrâneas sob efeito de um aterro controlado – São Carlos – SP**. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Biológicas da Saúde. Universidade Federal de São Carlos.
- BRAGA, A.C.O. (1999) Métodos geoeletricos aplicados. Rio Claro. **Apostila...** Rio Claro: Universidade Estadual Paulista. 27p.

- BRANCO, S. M. (1991). **A água e o homem**. In: PORTO, Hidrologia ambiental. Editora da Universidade de São Paulo. Cap. 1, p.14-15.
- BRASIL. Constituição (1998). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1998.
- BRASIL. Decreto nº 24.643, 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 227, 28 de fevereiro de 1967. Decreta o Código de Minas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 7.841/45, 8 de agosto de 1945. Decreta o Código Águas Minerais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.
- BRASIL. Lei nº 9.433, 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.
- BUSELLI, G., BARBER, C., DAVIS, G.B.; SALAMA, R.B. (1990). Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. **Geotechnical and Environmental Geophysics**, Oklahoma, v. 2, p. 27-39.
- CAETANO-CHANG, M. R. WU, F.T. 1993 A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no centro-leste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1, Rio Claro. 1993. **Resumos...** Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, p. 93.
- CARBONELL, B J.L; SAUCK, W., ATEKWANA, E. (2002) **Aplicaciones geofísicas en el descubrimiento de plumas de contaminación en acuíferos superficiales**. Disponível em: <[http://www.igme.es/internet/web\\_aguas/igme/publica/con\\_recu\\_acuiferos/002.pdf](http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/con_recu_acuiferos/002.pdf)>. Acesso em 15/fev/2005.
- CESARINI, D.C.P.; DIAS, C.L.; BARBOUR, E.D.; TOFFOLI, F.F. (2004) Gestão da qualidade e risco de contaminação do recurso hídrico subterrâneo. In:

- CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Águas Subterrânea.
- CAVALCANTE, A.T.; SANTOS, R.J.Q. (1996) Estudos hidrogeológicos para a pré-seleção de áreas destinadas à implantação de um lixão na região de Japaratinga e Maragogi – Alagoas – Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9., 1996, Salvador **Anais...** Salvador: Associação Brasileira de Águas Subterrânea.
- CAVALCANTI, S.S.; SATO, H.K.; LIMA, O.A.L. (2002) Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 19, n. 2, p 155-67.
- CCPERH - COMITÊ COORDENADOR DO PERH, (1999). **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**, 128 p. São Paulo.
- CETESB- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2004) **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001 – 2003**. Série Relatórios. São Paulo.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001) **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 389 p. São Paulo.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1997) **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. Série Relatórios. 106 p. São Paulo.
- CONTIN NETO, D.; MATSUZAKI, S.S.; GADOTTI, R.F.; FREITAS, A.L.S.; BARBOSA, D.O. (1997) Avaliação da poluição e da contaminação das águas superficiais e subterrâneas em região de aterro controlado. In: SIMPÓSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA SANITÁRIA AMBIENTALE, 1997. Ravello. **Anais...** Ravello: ABES/ADIS/AIDIS. p. 556-563.
- COTTAS, L.R. (1991) Definição de áreas adequadas para instalação de aterros industriais e sanitários em Rio Claro - SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS

- DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 2., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGC. p. 253-261.
- CUSTÓDIO, E. (1994) Gestion y protection del agua subterranea. Curso de actualizacion profesional. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA, 2., **Anais...** Santiago.
- DAVINO, A.; SINELLI, O.; SOUZA, A.; CORREIA, C.T. (1982) Diabásios na região nordeste da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32.,1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 1736-1744.
- DOMINGUES, A.F.; OLIVEIRA, F. R. (2004) Gestão integrada de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Águas Subterrânea.
- ELBACHÁ, A.T. (1989) **Estudo da Influência de Alguns Parâmetros no Transporte de Massa em Solos Argilosos. 178p.** Dissertação (Mestrado). PUC-RIO.
- ELIS, V.R. (2000) Modelagem 2D de ensaios de caminhamento elétrico dipolo-dipolo realizados em áreas de disposição de resíduos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 1, p. 119-34.
- ELIS, V.R. (1998) **Avaliação da aplicação de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos.** 264 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- ELIS, V.R. (1993) **A aplicação de geofísica para análise do meio físico: importância para elaboração de mapeamento geotécnico.** 120p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.
- ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. (2002) Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 1, p. 103-112.



- ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. (1996) Caminhamento elétrico dipolo-dipolo – Uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro.
- ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. (1995) Aplicação de geofísica na obtenção de informações para mapeamento geotécnico. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, volume especial, p.125-130, 1995.
- ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.; WILLIAMS, M.M.; MENDES, J.M.B.; HASSUDA, S. (1986). A geofísica aplicada na identificação da poluição do sub-solo por depósitos de rejeitos urbanos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4., 1986, Brasília. **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. p. 528-531.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2004). Disponível em <<http://www.cnpma.EMBRAPA.br/projetos/index.php3?sec=guara>>. Acesso em 11/nov/2004.
- FERNANDES, C.E.M. (1984) **Fundamentos de Prospecção Geofísica**, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- FERNANDES, L.A. (2004) Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, p. 53-66.
- FERRANTE, J.E.T. (1990) **Mapeamento Geotécnico Regional da Bacia do Alto Jacaré-Guaçu – SP, com base nas aplicações técnicas de sensoriamento remoto e sistema geográfico de informação**. 183p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FETTER, C. W. (1993). **Contaminant hydrogeology**. First Edition. Book Press, Inc. New York. 458p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.C.; ROCHA, G.A. (1988) Riscos de poluição de águas subterrâneas: Uma proposta metodológica de avaliação regional. In:

- CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5., 1988, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. p. 175-246.
- FOSTER, S. (1998) Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. In: CONFERENCIA INAUGURAL: POLÍTICAS DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÂNEAS EN EUROPA, 1998, Valencia. **Atas...** Valencia: AIH-GE. p. 25-38.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. (1993). Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. **Instituto Geológico** (Boletim 10), São Paulo.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J. A. (1979) **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1979. 604p.
- FREITAS, A.L.S. (1996) **Caracterização do aquífero Botucatu na região do Lixão de São Carlos – SP**. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FUSCONI, R.; GODINHO, M.J.L. (1999) bactéria and protozoa populations in groundwater in a landfill área in São Carlos, SP. **Revista de Microbiologia**, v. 30, p.196-202.
- GADOTTI, R.F. (1997) **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos**. 151p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GALLAS, J.D.F. (2000) **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental** . 172p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- GALLAS, J.D.F.; MAGALUTTI FILHO, W.; PRADO, R.L.; TAIOLI, F. (1993) Lixão do Alvarenga – Mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos geoeletricos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN

- GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica. p. 82-88.
- GONÇALVES, A.R.L. (1986) **Geologia ambiental da área de São Carlos**. 138p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- GONÇALVES, A.R.L.; BOSSOLAN, N.R.S.; ORLANDO, M.J.G. (1992) Determinação da direção do fluxo defreativo no aterro sanitário de São Carlos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- GANDOLFO, O.C.B. (1999) **Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): Um estudo comparativo**. 110p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp.
- GOMES, L. P. (1991). Caracterização Física dos resíduos sólidos urbanos da cidade de São Carlos - SP. **Estudos Tecnológicos**. Engenharia 9 e 10. v.14, p.91-105.
- HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A.C.; CUNHA, R.C.A.; MARKER, A. (1998) Critérios para classificação de áreas contaminadas por resíduos sólidos – Estudo de caso na região metropolitana de São paulo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 4., 1998, Montevideo. **Anais...** Montevideo: ALHSUD. p.927-943.
- HAITJEMA, H.M. (1991) Ground water hydraulics considerations regarding landfills. **Water Resources Bulletin** – American Water Resources Association, V 27, n 5, p 791-96.
- HIRATA, R. (2004) Hidrologia aplicada ao controle da poluição: conceitos básicos. In: CURSO DE EXTENSÃO: Contaminação de solo e água subterrânea: caracterização, monitoramento e Remediação, 2004, Curitiba. **Apostila...** Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004. 164p.
- HIRATA, R. (2000) Recursos Hídricos. In: Wilson Teixeira; Fábio Taioli; Maria Cristina Motta de Toledo; Thomas Rich Fairchild (Org). **Decifrando a Terra**. Cap. 20: p. 421-444. São Paulo.

- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2002) **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em 03/mar/2006.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2000) **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em 03/mar/2006.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1991) **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro. 122 p.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (1995) **Lixo municipal**: Manual de gerenciamento integrado. São Paulo. Publicação 2163. 278p.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1981) **Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. V. 1 (texto). São Paulo.
- KYRILLOS, D.S.; CABRAL, J.J.S.P. (1996) modelagem de propagação de poluentes em água subterrânea utilizando o método de elementos de contorno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- LEITE, W.C. A. (1997). **Estudo da gestão de resíduos sólidos**: uma proposta de modelo tomando a unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI – 5) como referência. 270p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LEPSCH, I. F. (1994) **Solos do Estado de São Paulo**. In: LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. I. (coord.). Manual Técnico de Manejo e Conservação de Solo e Água. Campinas, v. 2, n. 39, p 70-120, : CATI, 1994. p.70-120, 1994.
- LIMA, O.A.L.; PORSANI, M.J., (1994). Monitoramento geo-elétrico da contaminação aquífera no pólo petroquímico de Camaçari, Bahia, **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 12, n.2, p.147-161.

- LOKE, M.H.; BARKER, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting** , v. 44, p. 131–152.
- LOPES, A.A. (2003). **Estudo da gestão e do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos no município de São Carlos (SP)**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MALAGUTTI FILHO, W; JOSÉ, C.; BRAGA, A.C.O.; ELIS, V.R.; TANDEL, R.Y.; PORSANI, J.L. (1997) Aplicação integrada de técnicas geofísicas no aterro sanitário de Rio Claro – SP, resultados preliminares. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 5., 1997 **Anais...** p. 422-424.
- MATHEUS, C. E. ; MORAES, A. J. ; TUNDISI, J. G. (1992) Áreas alagadas da bacia Hidrográfica do ribeirão do Feijão como sistema de proteção da qualidade das águas de abastecimento de São Carlos. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ECOLOGIA, 2.; CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 1., 1992, Caxambu. **Resumos...** Rio Claro: SEB.
- MATSUZAKI, S.S. (1998) **Aplicação de modelo computacional de escoamento de água subterrânea no lixão de São Carlos**. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MELO, J.G.; REBOUÇAS, A.C.; QUEIROZ, M.A. (1996) Avaliação dos riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas na zona sul de Natal, RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: Associação Brasileira de Águas Subterrânea.
- MENDES, J.M.B. (1987) **Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas**. 196p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MENDES, L.R.L.; VERMA, O.P. (2002) Prospecção de água subterrânea na região de Belém (PA) através de perfilagem geofísica de poço e eletrorressistividade. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 1, p. 87-94.

- MENEZES, D.B. (1995) **Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos – SP, no meio físico**. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MENEZES, D.B.; CONTIN NETO, D.; SCHALCH, S.; (1995) Diagnóstico de impactos no meio físico causados por depósitos de resíduos sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 18., 1995, Salvador. **Anais...** Salvador: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. (1998) Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484.
- MILANI, E.J. 1997. **Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. (1994) Bacia do Paraná. **Boletim Geociências Petrobrás**. São Paulo, v. 8, n. 1, p. 69-82.
- MIRANDA, E. E. - Coord. (2005) **Sistema de gestão territorial para a ABAG/RP**. EMBRAPA Monitoramento por Satélite, Campinas. Disponível em: <<http://www.abagrpnpm.EMBRAPA.br>>. Acesso em 02/fev/2006.
- MIRANDA, E. E.; COUTINHO, A. C. - Coord. (2001) **Brasil Visto do Espaço**. EMBRAPA Monitoramento por Satélite, Campinas. Disponível em: <<http://www.cdbrasil.cnpm.EMBRAPA.br>>. Acesso em 22/mar/2005.
- MIRECKI, J.E.; PARKS, W.S. (1994) Leachate geochemistry at a municipal landfill, Memphis, Tennessee. **Ground Water**, v.32, n. 3, p. 390-398.
- MITCHELL, J.K. (1991) **Conduction phenomena**: from theory to geotechnical practice. *Geotechnique*, v. 41, n. 3, p. 299-340, 1991.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2001) **Programa de Águas Subterrâneas**. Brasília, 2001. 21 p.

- MOTA, R.; FIALHO RODRIGUES, L. (1998). **Prospecção geofísica no local do Açude de Pedrogão**. Lisboa: LNEC, (Relatório 191/98 - NP, LNEC).
- MURO, M.D. (2000) **Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP**. 172p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NISHIYAMA, L.; ZUQUETTE, L.V. (1991) Carta para deposição de rejeitos da região da quadrícula de São Carlos – SP: Estudo preliminar. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2., 1991, São Paulo. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geofísica. p. 315-322.
- NOBRE, M.M.M. (1987) **Estudo experimental do transporte de poluentes em solos argilosos compactados**. 214p. Dissertação (Mestrado). PUC-RIO.
- OLIVEIRA, J.B. (1999) Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. **Boletim Científico do IAC** – Instituto Agrônomo, Campinas, n. 45. 112p, 1999.
- PENNER, G.C. (2003) Alternativas de controle hidráulico aplicadas à pluma de poluentes do antigo lixão de São Carlos – SP. **Resumos** São Carlos: CRHEA/EESC-USP.
- PFEIFFER, S.C. (1993) **Avaliação da viabilidade técnico-econômica de aproveitamento de águas subterrâneas na área urbana de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (2005) **Processo de Elaboração do Plano Diretor do Município de São Carlos**. Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano-SMHDU. São Carlos.
- REBOUÇAS, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (2002) **Águas Doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. 2ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 704p.

- RIOS, L. (1993) **Estudo limnológico e fatores ecológicos em córregos e ribeirões da Bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo)**. 146p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROCHA, G. A. **Um copo d'água**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2002. 107p.
- ROSS, J.L.S. & MOROZ, I.C. (1997) **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. Departamento de Geografia FFLCH – USP - IPT - FAPESP. São Paulo.
- SAARELA, J., (1993) Types and costs of covers of closed landfill sites. In: International Landfill Symposium, 4., Sardinia. **Anais...** Sardinia
- SANCHEZ, L.E. (1998) **A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental**. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
- SANTIAGO, R.C. (2002) **Avaliação geofísica do sistema aquífero da área costeira entre Ipiranga e rio Joanes**. Trabalho de Graduação - Universidade Federal da Bahia.
- SANTOS, C.P.L. (2003) **Análise geofísica das características hidráulicas da Falha de Salvador na Região de Arembepe – Ba**. 93p. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.
- SANTOS, L.J.; KOIDE, S. (1998) Poluição dos recursos hídricos em áreas de aterro de lixo – Caso: Lixão do Jockey Club (DF). In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 4., 1998, Montevideo. **Anais...** Montevideo: ALHSUD. p.700-719.
- SCHALCH, V. (1992) **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia**. 220p. Tese (Doutorado) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.



- SCHALCH, V.; LEITE, W.C.A.; FERNANDES JÚNIOR, J.L.; CASTRO, M.C.A.A. (2002). Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. **Apostila...** São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, 93p.
- SHACKELFORD, C.D. (1988) Diffusion as a Transport Process in Fine Grained Materials. **Geotechnical News**, v. 6, n. 2, p. 24-27, 1988.
- SILVA, R.B.G. (1983) **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SMA/SP – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (2004) **Mapa de Vegetação Remanescente do estado de São Paulo**. Programa Biota/Fapesp, Instituto Florestal. São Paulo Disponível em: <<http://sinbiota.cria.org.br/atlas>>. Acesso em: 03 fev 2006.
- SOARES, P.C. (1973) **O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo**. 152p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro.
- SUGUIO, K. (1998) **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas Afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 1217p.
- TELFORD, W.M.; Geldart, L.P. e Sheri. R.E. (1990) **Applied Geophysics**, Cambridge University Press, 2ed. 770p.
- TOLENTINO, M. (1967) **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. 1967. 78 p. Concurso de Monografias Municipais - Prefeitura Municipal de São Carlos.
- TRESSOLDI, M.; CONSONI, A.J. (1994) Disposição de resíduos. In: Antônio Manoel dos santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito (Org). **Geologia de Engenharia**. Cap 21: p. 361-380. São Paulo.
- VAGENTE, A.O.C.; GASPAR, R.L. (1994) A gestão integrada de águas subterrâneas e águas superficiais. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS

DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6., Montevideo. **Anais...** Montevideo: ABRH/APRH. p.643-646.

VOGELSANG, D. (1995) **Environmental Geophysics**. A practical guide. Springer-Verlag, Berlim, 172p.

YOKOYAMA, L.M.L. (2003) **O uso integrado de métodos geofísicos visando a caracterização geológica em um estudo de contaminação**. Trabalho de Graduação – Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo.

YONG, R.N.; MOHAMED, A.M.O. (1992) **Principles of contaminant transport in soils**. Netherlands: Elsevier Science Publishers, 327p, 1992.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. (2004) **Cartografia geotécnica**. São Paulo : Oficina de Texto. 190p, 2004.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. (1991) Análise da relação entre disposição de rejeitos de baixa periculosidade e meio geológico receptor. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 1991, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: REGEO. p.221-232.

# **Anexo I**

## **Localização dos Poços**

Tabela com as coordenadas UTM e as cotas dos poços de monitoramento instalados por Freitas (1995), localizados por Álvares (2000) com GPS de precisão.

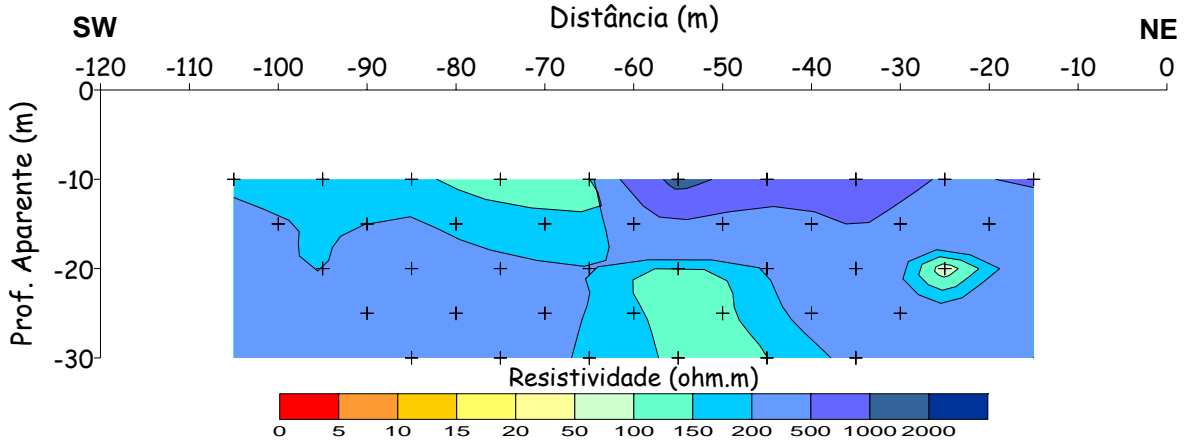
<b>POÇO</b>	<b>COTA (m)</b>	<b>COORDENADA NORTE</b>	<b>COOREDENADA LESTE</b>
15	793	7.555.212	209.988
16	794	7.555.127	210.113
17	806	7.554.943	210.204
18	812	7.554.826	210.242
19	818	7.554.730	210.274
20	827	7.554.654	210.297
21	828	7.554.621	210.250
23	819	7.554.708	210.190
24	802	7.554.905	210.086
25	789	7.555.100	209.905
26	782	7.555.167	209.815
27	777	7.555.209	209.784
28	775	7.555.232	209.798
29	777	7.555.264	209.814
30	778	7.555.210	209.850
31	792	7.555.159	209.973
32	798	7.555.026	210.099
33	801	7.554.932	210.117

# **Anexo II**

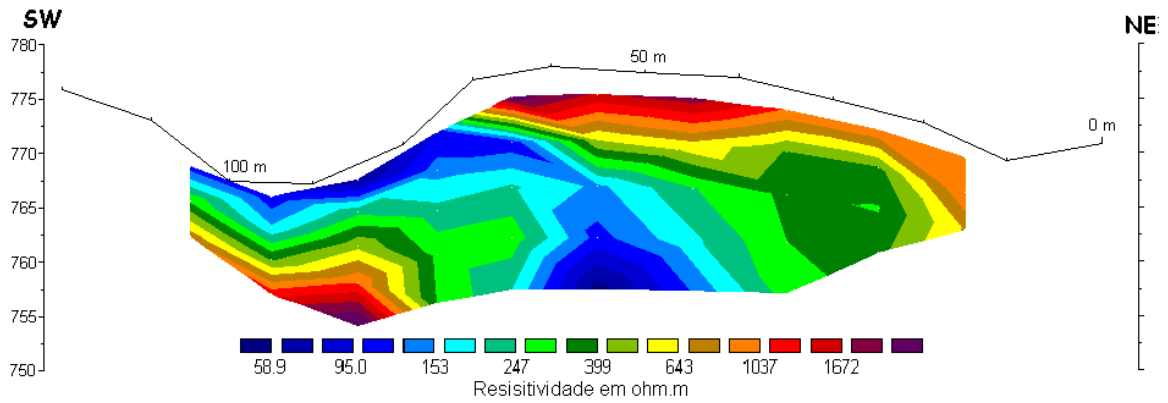
## **Perfis Geofísicos**

### Linha 0-2005

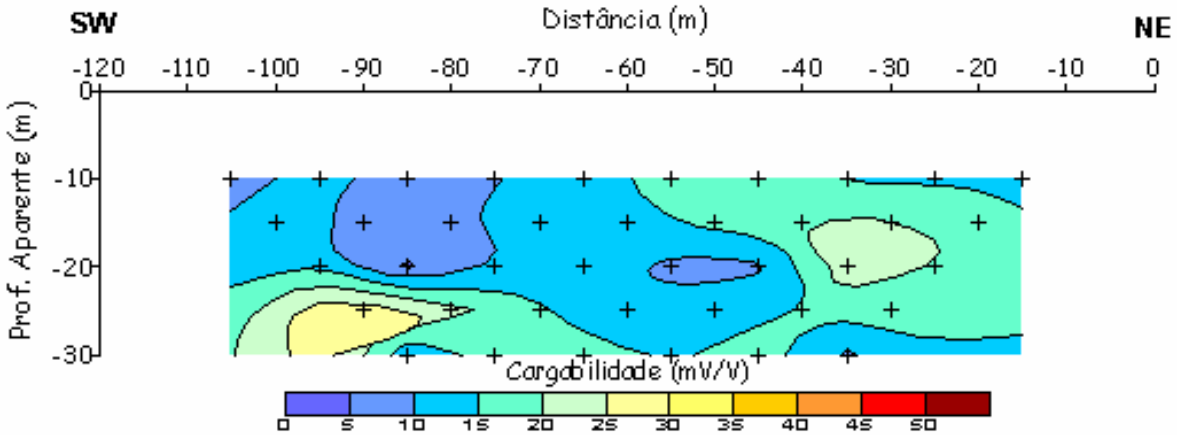
- ✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 0 – 2005:



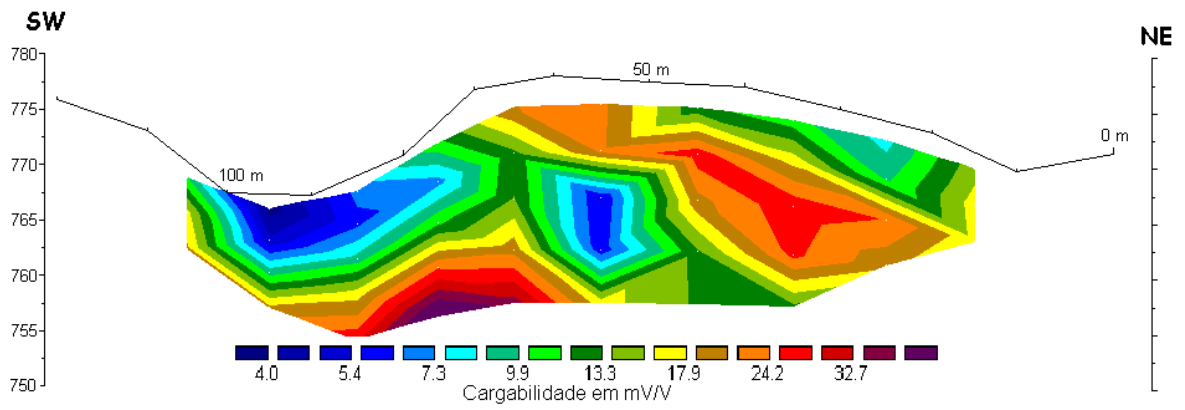
- ✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 0 – 2005:



- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 0 – 2005:

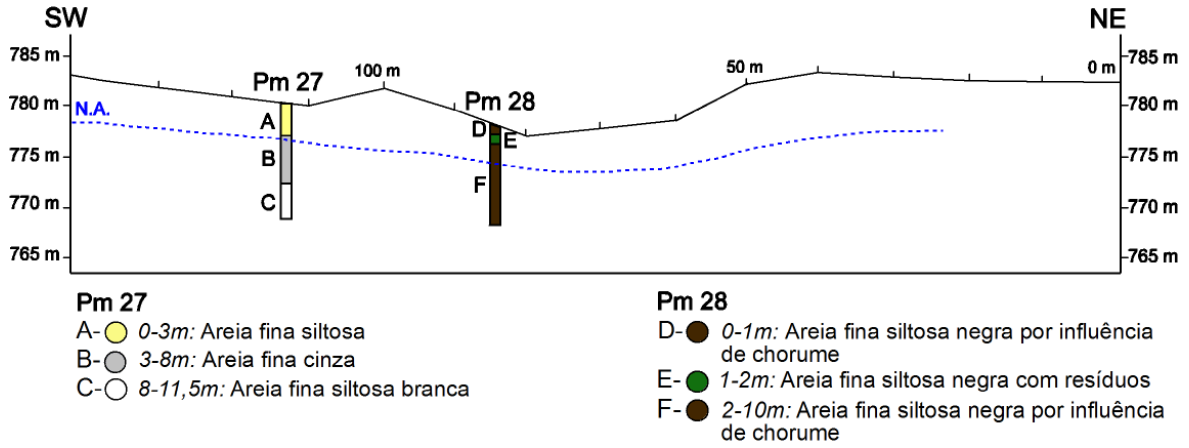


✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 0 – 2005:

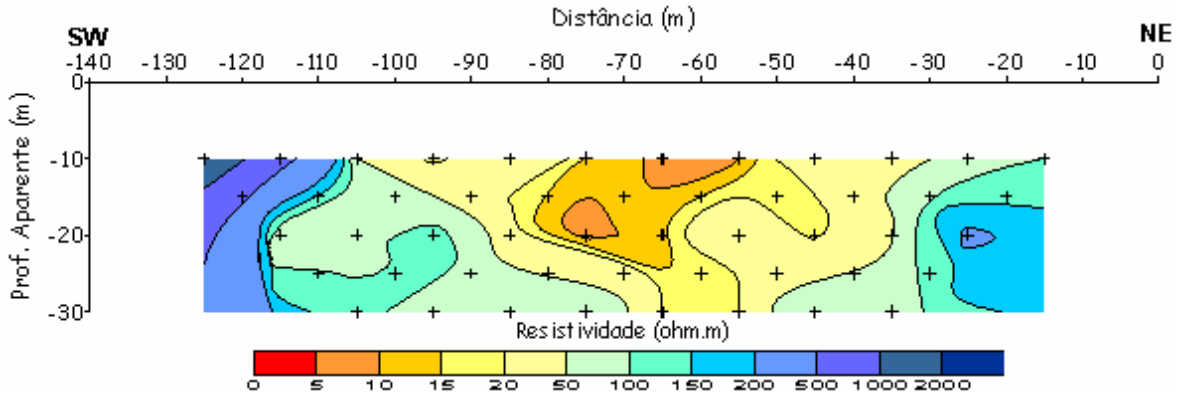


### Linha 1-2005

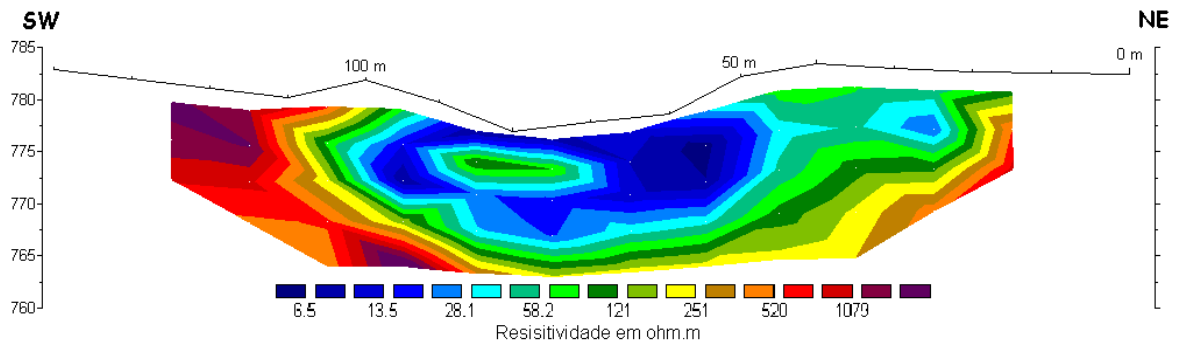
✓ Perfil linha 1 - 2005:



✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 1 – 2005:

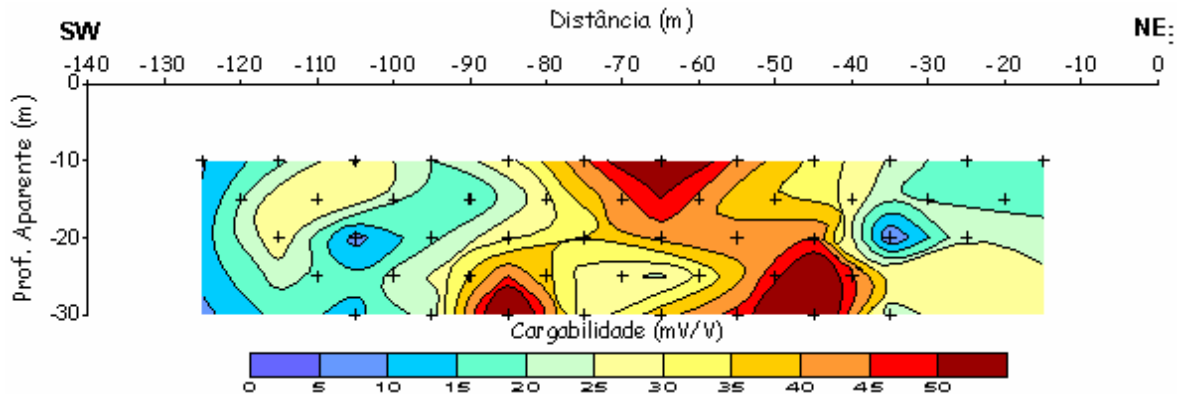


✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 1 – 2005:

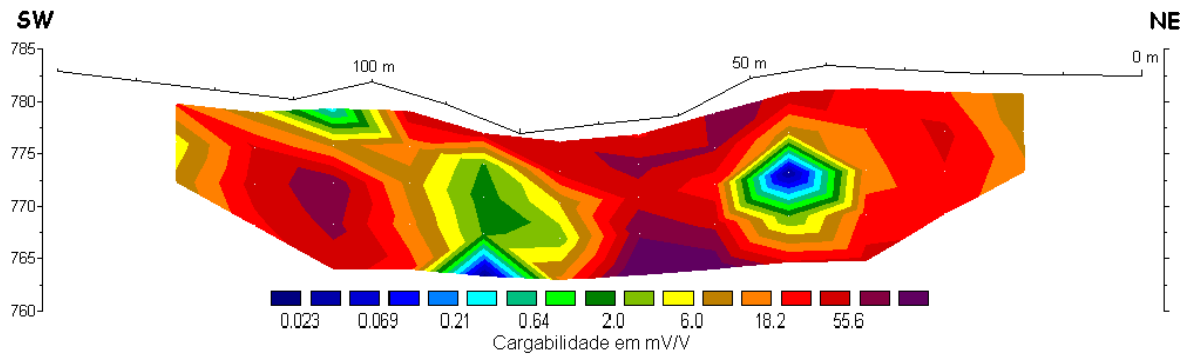


✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 1 – 2005:



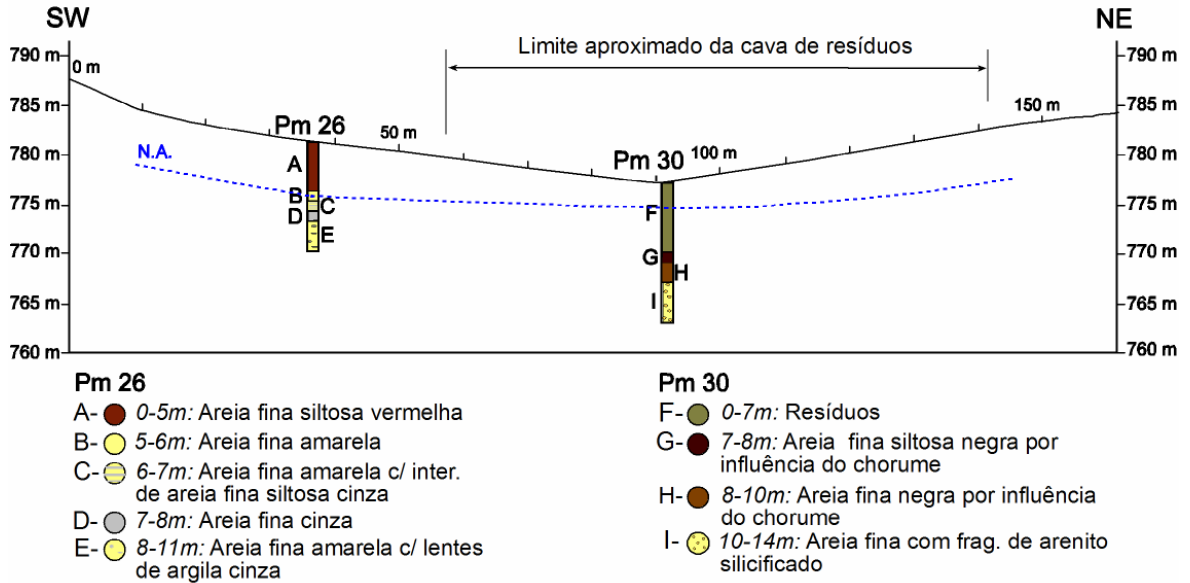


✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 1 – 2005:

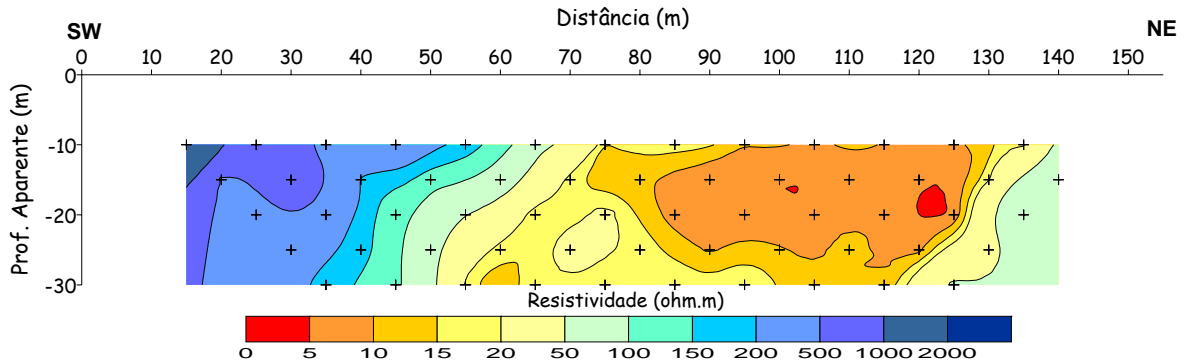


### Linha 2-2005 / 6-1995

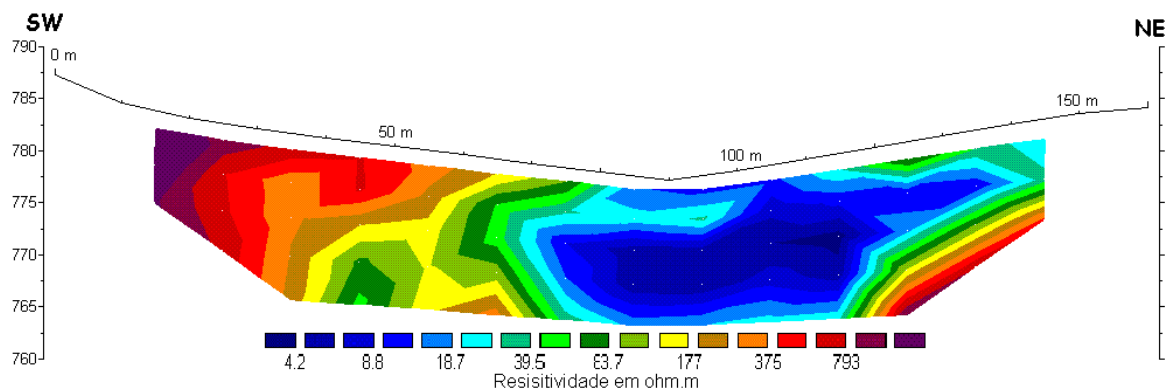
✓ Perfil linha 2 – 2005 / 6 - 1995:



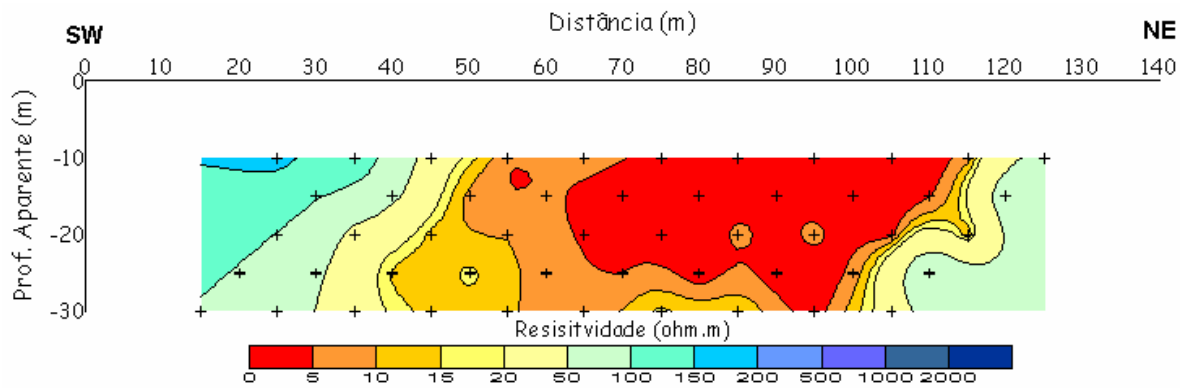
✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 2 – 2005:



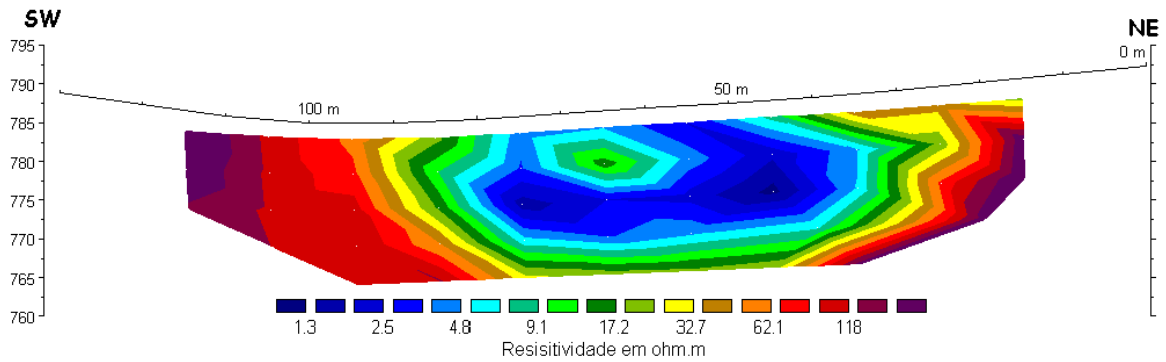
✓ Dados de resistividade tratados no Res2div, linha 2 – 2005:



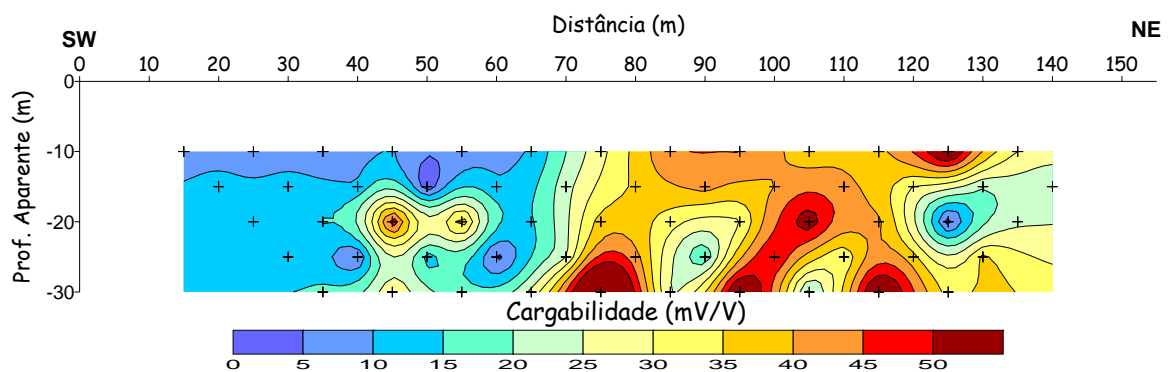
- ✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 6 – 1995:



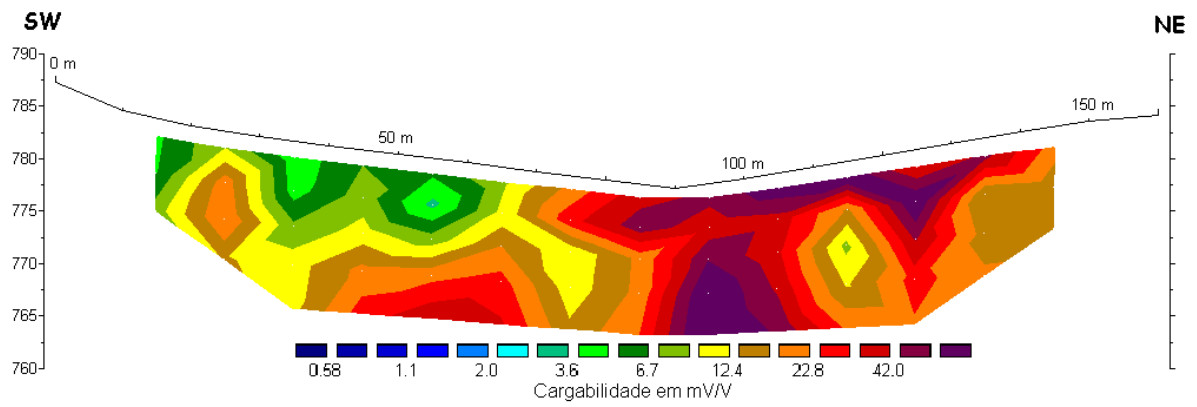
- ✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 6 – 1995:



- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 2 – 2005:

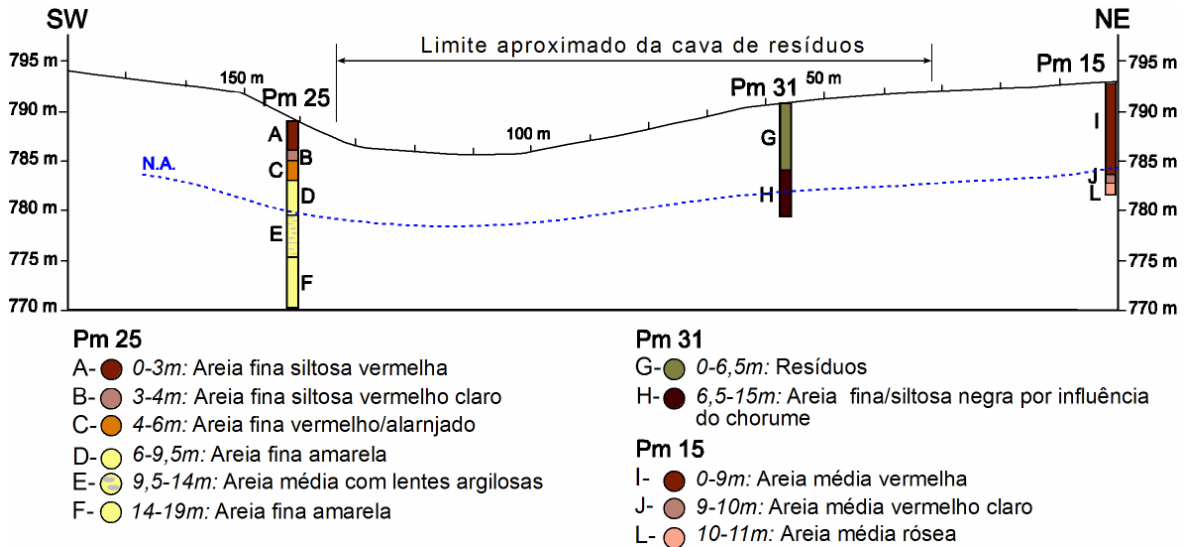


✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 2 – 2005:

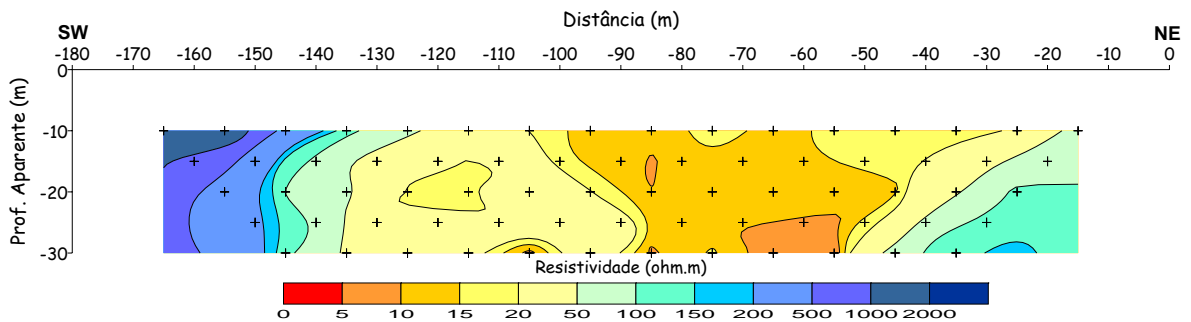


### Linha 3-2005 / 5-1995

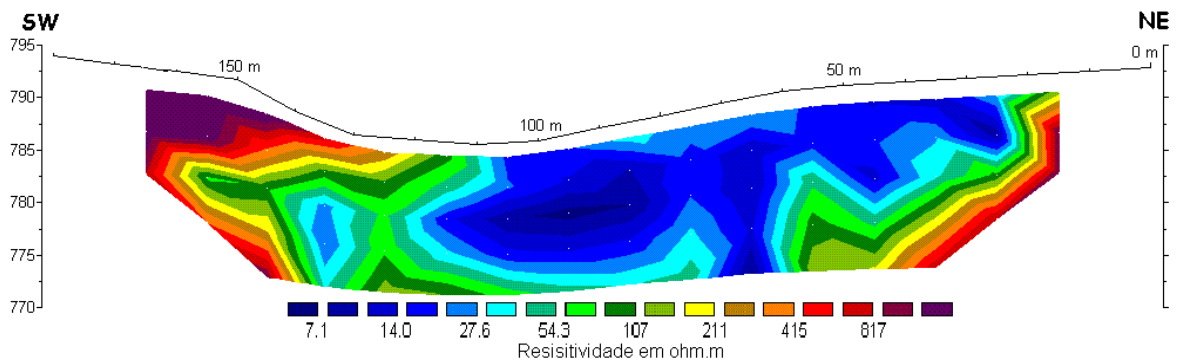
✓ Perfil linha 3 – 2005 / 5 - 1995:



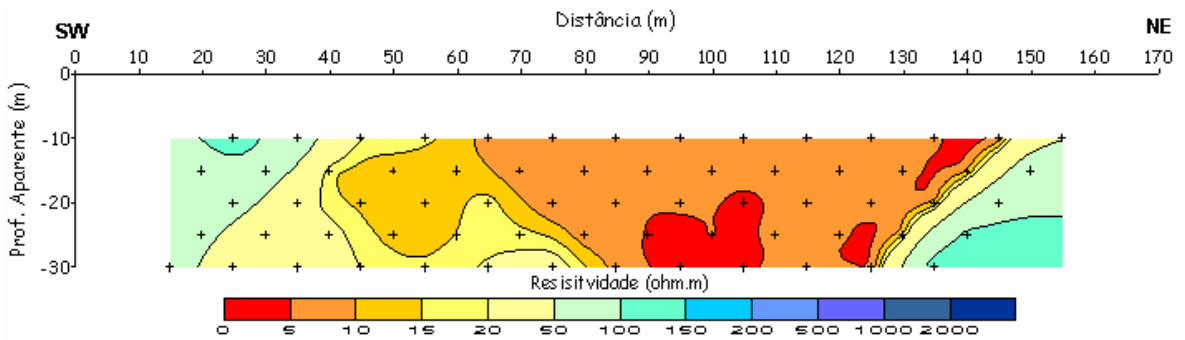
✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 3 – 2005:



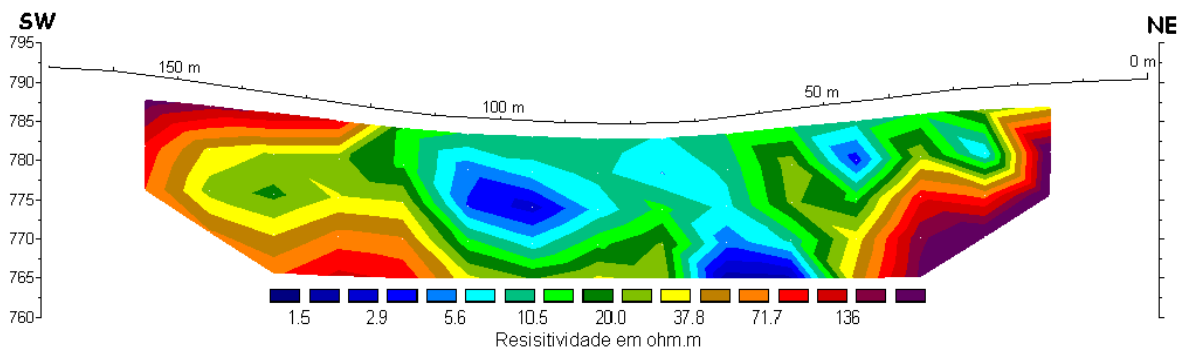
✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 3 – 2005:



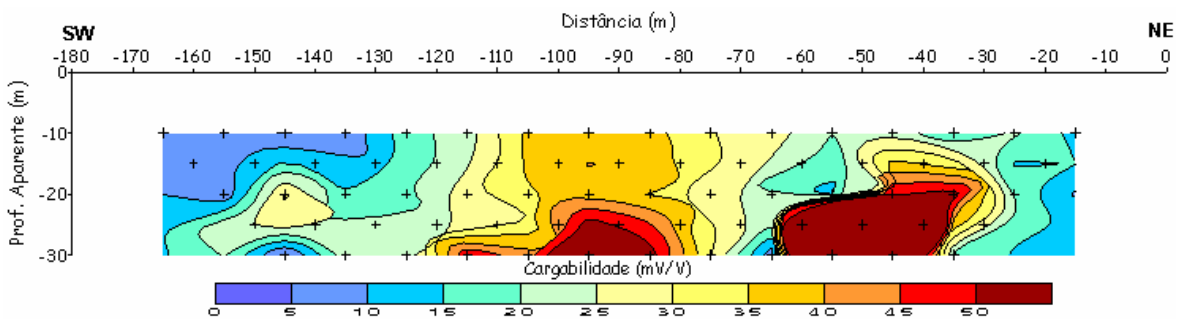
- ✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 5 – 1995:



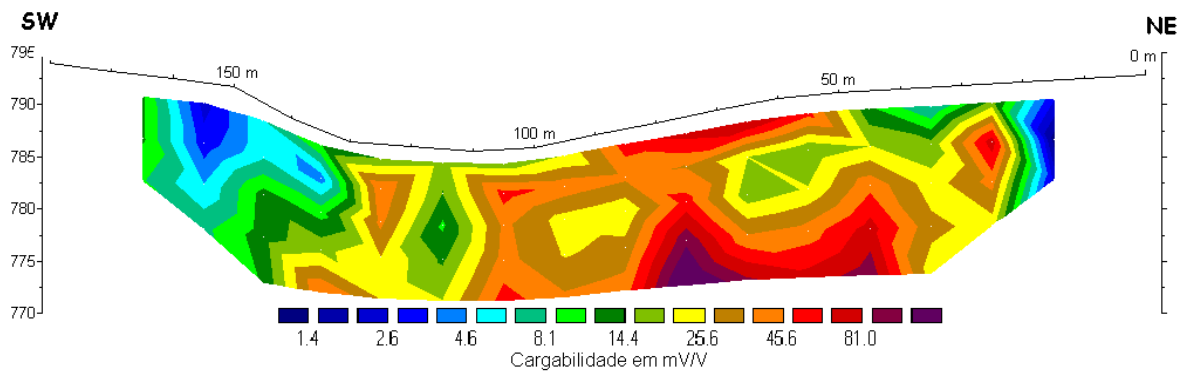
- ✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 5 – 1995:



- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 3 – 2005:

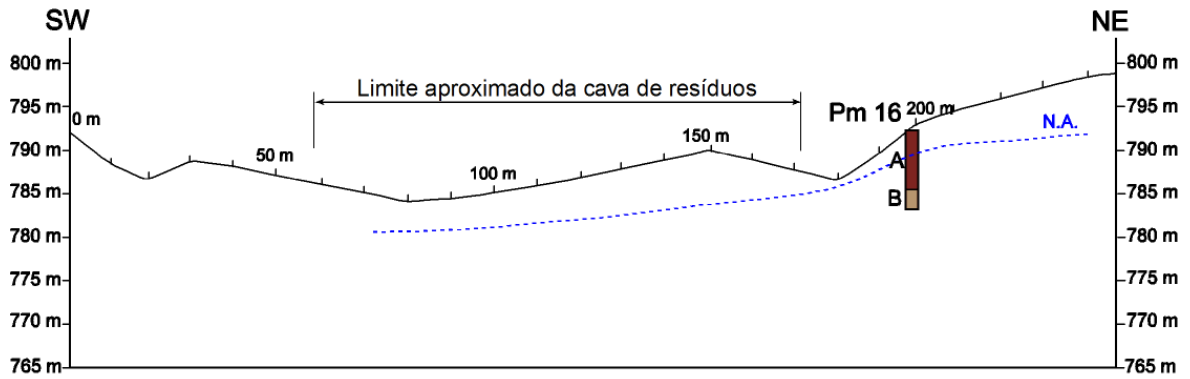


✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 3 – 2005:



### Linha 4-2005

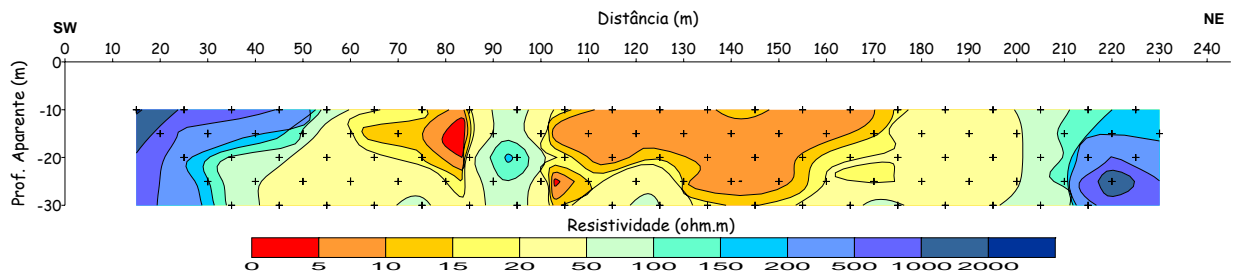
✓ Perfil linha 4 – 2005:



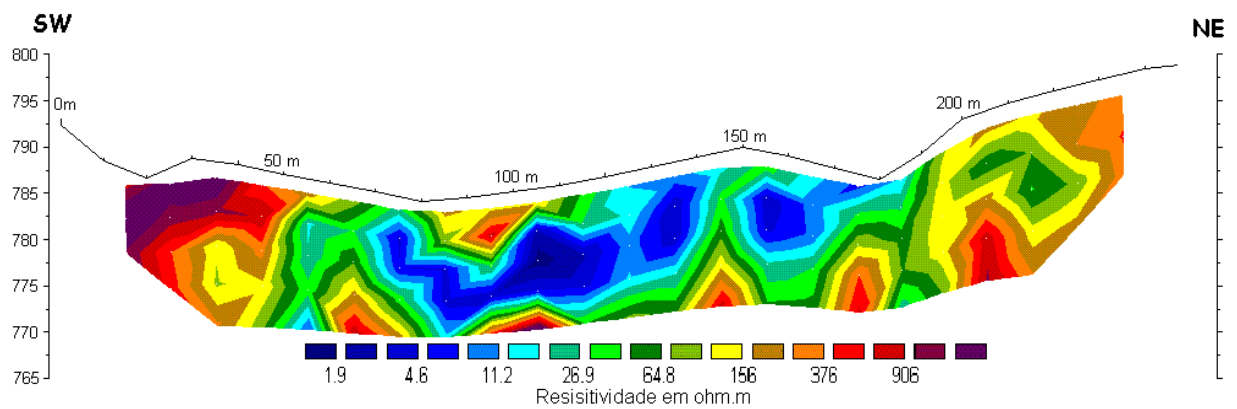
**Pm 16**

- A- ● 0-7m: Areia fina siltosa vermelha
- B- ● 7-9m: Areia fina siltosa vermelho claro

✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 4 – 2005:

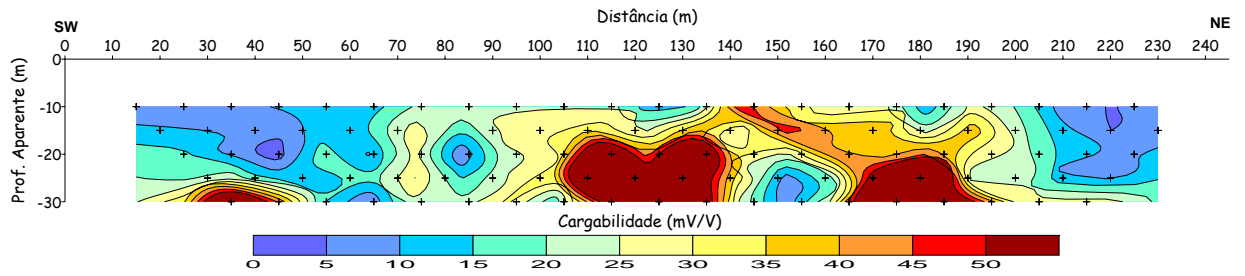


✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 4 – 2005:

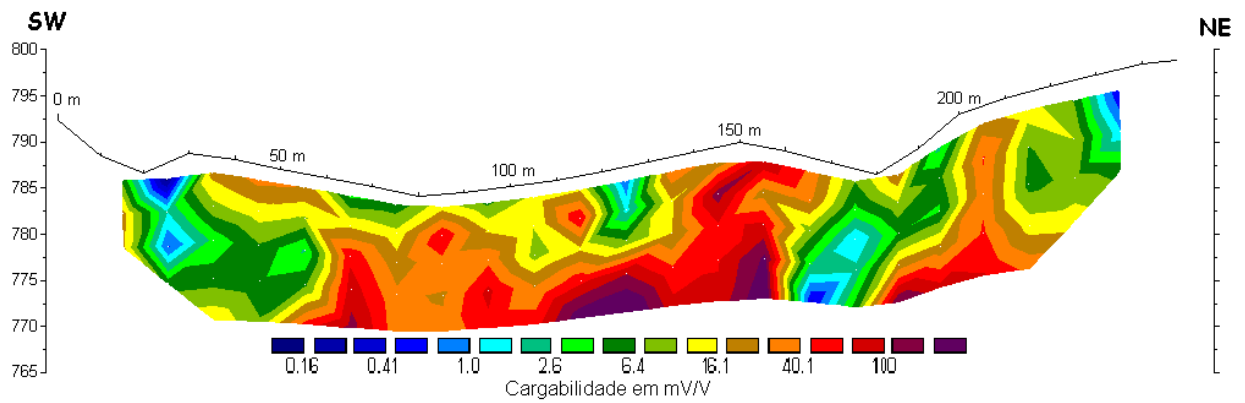




- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 4 – 2005:

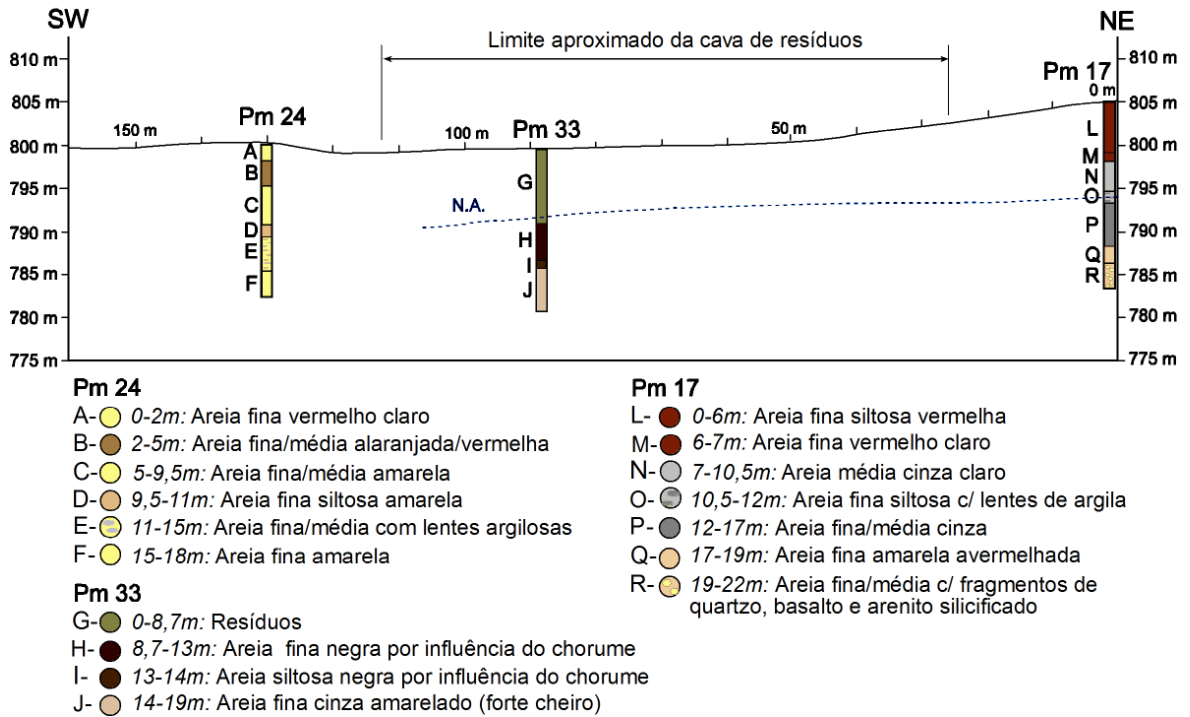


- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 4 – 2005:

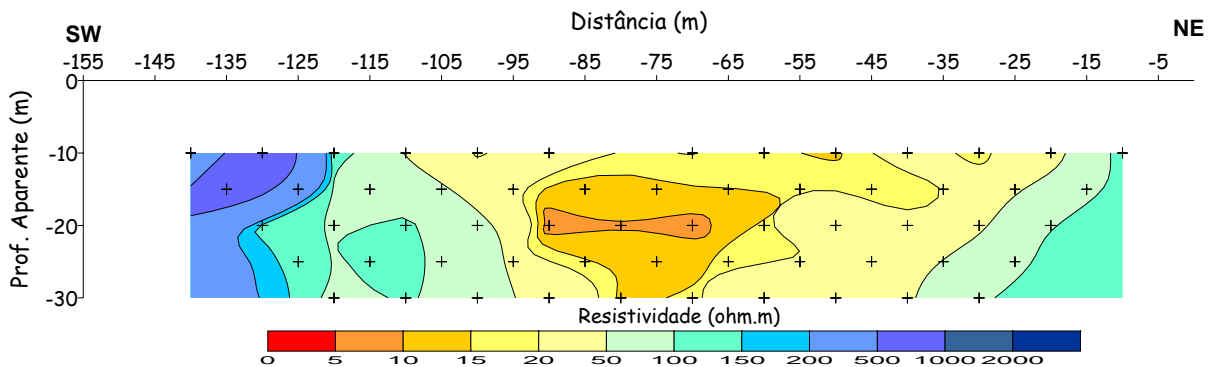


### Linha 5–2005 / 4-1995

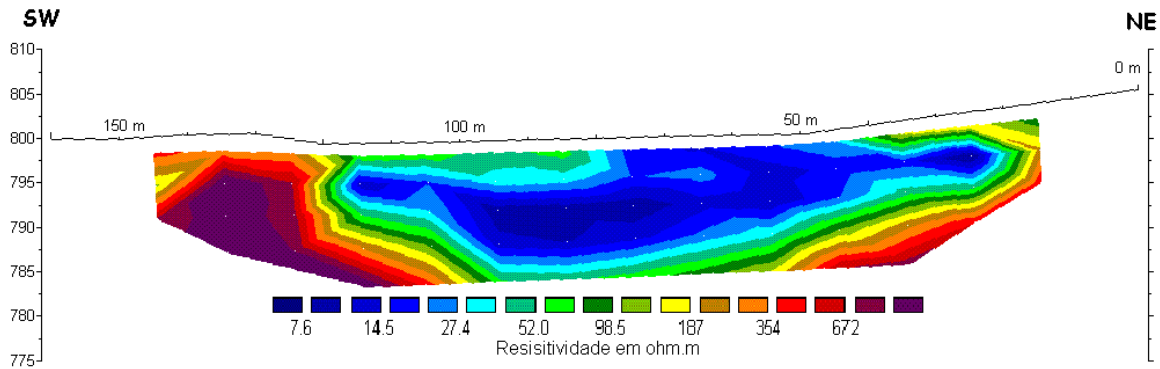
✓ Perfil linha 5 – 2005 / 4 - 1995:



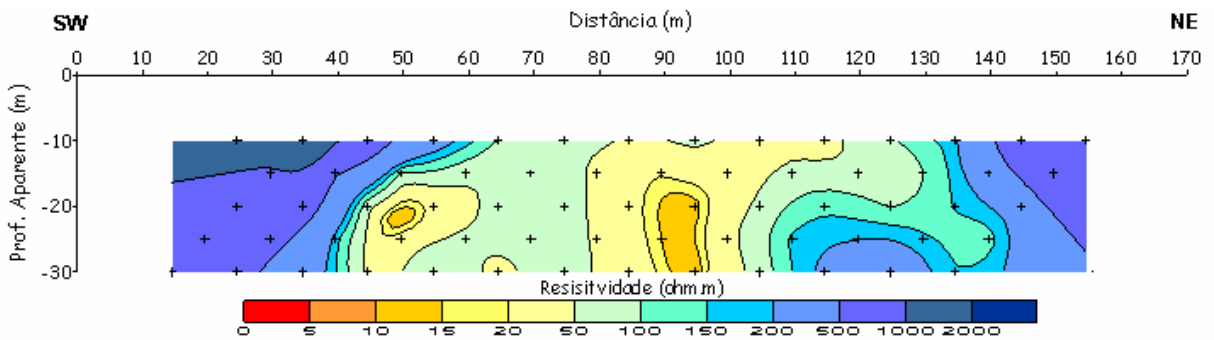
✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 5 – 2005:



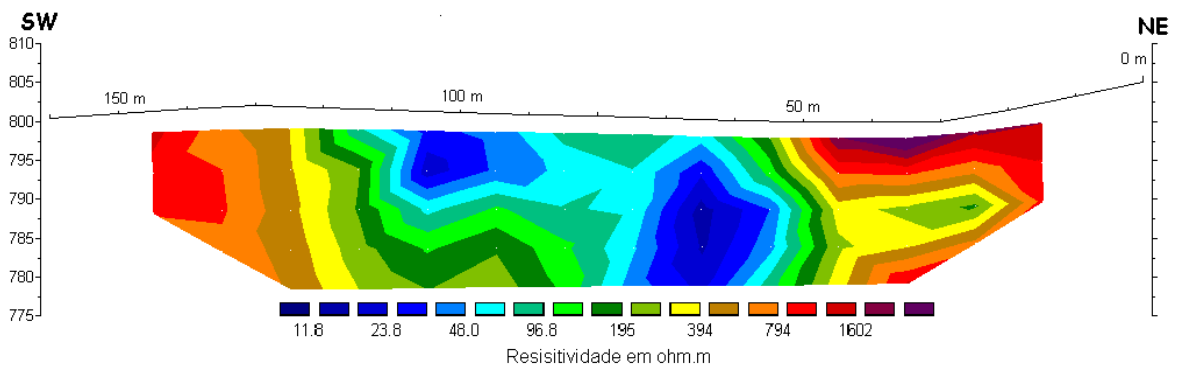
- ✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 5 – 2005:



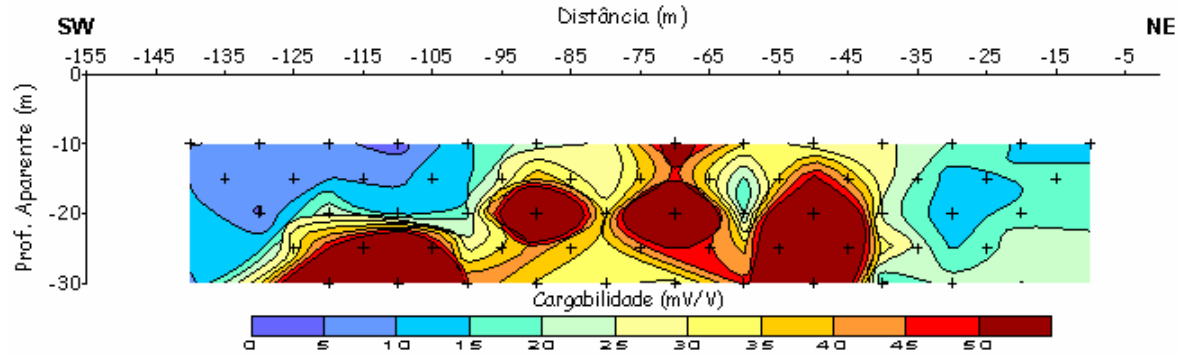
- ✓ Dados de resistividade tratados no Surfer, linha 4 – 1995:



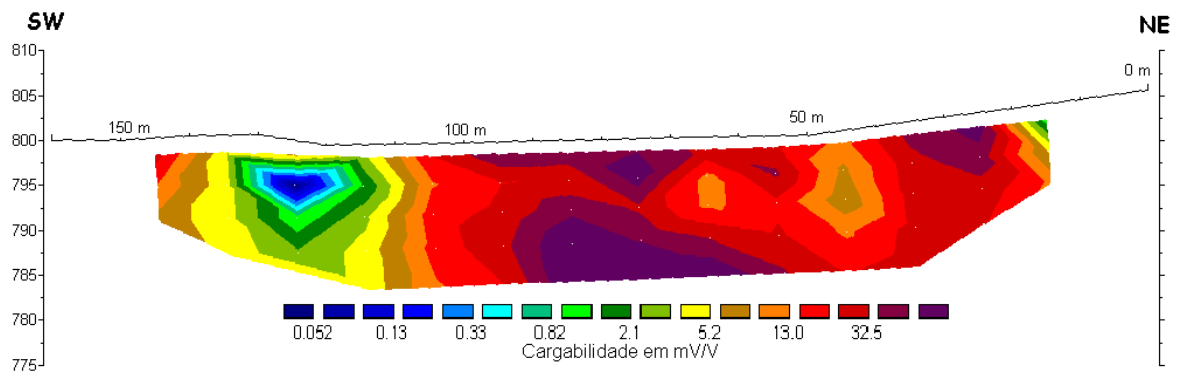
- ✓ Dados de resistividade tratados no Res2dinv, linha 4 – 1995:



- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Surfer, linha 5 – 2005:



- ✓ Dados de cargabilidade tratados no Res2dinv, linha 5 – 2005:



# **Anexo III**

## **Planilhas de Campo - Ensaios de Infiltração**

**ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - DUPLO ANEL - R**

<b>Data:</b> 08 out 2005	<b>Localização:</b> Lixão desativado de São Carlos - Poço 17
<b>Horário de início:</b> 09:50	<b>Coordenadas UTM:</b> 210.196
<b>Horário final:</b> 15:10	7.554.971
<b>Horário das Coletas:</b> 09:00/15:05/17:00	<b>Profundidade da amostragem deformada:</b> 11,00m

**DADOS CONSTANTES**

<b>Anel</b>	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura de Lâmina de Água:</b> 9 cm
Externo	30	Obs.:
Interno	15	

**MEDIDAS DO ENSAIO**

<b>Medida</b>	<b>Hora</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura (Régua do balde)</b>	<b>Varição de altura</b>
1	09:50	0	0	0
2	09:51	1	0,0080	0,0080
3	09:52	2	0,0100	0,0020
4	09:53	3	0,0120	0,0020
5	09:54	4	0,0150	0,0030
6	09:55	5	0,0170	0,0020
7	09:56	6	0,0190	0,0020
8	09:57	7	0,0200	0,0010
9	09:58	8	0,0210	0,0010
10	09:59	9	0,0230	0,0020
11	10:00	10	0,0250	0,0020
12	10:15	15	0,0330	0,0080
13	10:20	20	0,0410	0,0080
14	10:25	25	0,0500	0,0090
15	10:30	30	0,0560	0,0060
16	10:35	35	0,0640	0,0080
17	10:40	40	0,0710	0,0070
18	10:50	50	0,0850	0,0140
19	11:00	60	0,1000	0,0150
20	11:10	70	0,1140	0,0140
21	11:20	80	0,1280	0,0140
22	11:30	90	0,1430	0,0150
23	11:40	100	0,1570	0,0140
24	11:50	110	0,1700	0,0130
25	12:00	120	0,1850	0,0150
26	12:10	130	0,2000	0,0150
27	12:20	140	0,2130	0,0130
28	12:30	150	0,2280	0,0150
29	12:40	160	0,2390	0,0110
30	12:50	170	0,2550	0,0160
31	13:00	180	0,2700	0,0150
32	13:10	190	0,2850	0,0150
33	13:20	200	0,3010	0,0160
34	13:30	210	0,3150	0,0140
35	13:40	220	0,3280	0,0130
36	13:50	230	0,3420	0,0140

---

37	14:00	240	0,3580	0,0160
38	14:10	250	0,3730	0,0150
39	14:20	260	0,3890	0,0160
40	14:30	270	0,4030	0,0140
41	14:40	280	0,4180	0,0150
42	14:50	290	0,4330	0,0150
43	15:00	300	0,4480	0,0150
44	15:10	310	0,4630	0,0150

**ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - DUPLO ANEL - S**

<b>Data:</b> 09 out 2005	<b>Localização:</b> Lixão desativado de São Carlos
<b>Horário de início:</b> 09:55	<b>Coordenadas UTM:</b> 210.203
<b>Horário final:</b> 13:20	7.555.085
<b>Horário das Coletas:</b> 09:00/13:25/15:20	<b>Profundidade da amostragem deformada:</b> 3,80m

**DADOS CONSTANTES**

<b>Anel</b>	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura de Lâmina de Água:</b> 10 cm
Externo	30	<b>Obs.:</b> ponto dentro da erosão fim da amostragem: encontro da rocha.
Interno	15	

**MEDIDAS DO ENSAIO**

<b>Medida</b>	<b>Hora</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura (Régua do balde)</b>	<b>Varição de altura</b>
1	09:55	0	0,0	0
2	09:56	1	0,012	0,0120
3	09:57	2	0,020	0,0080
4	09:58	3	0,026	0,0060
5	09:59	4	0,031	0,0050
6	10:00	5	0,035	0,0040
7	10:01	6	0,040	0,0050
8	10:02	7	0,043	0,0030
9	10:03	8	0,049	0,0060
10	10:04	9	0,051	0,0020
11	10:05	10	0,056	0,0050
12	10:10	15	0,076	0,0200
13	10:15	20	0,094	0,0180
14	10:20	25	0,113	0,0190
15	10:25	30	0,128	0,0150
16	10:30	35	0,147	0,0190
17	10:35	40	0,163	0,0160
18	10:45	50	0,199	0,0360
19	10:55	60	0,232	0,0330
20	11:05	70	0,266	0,0340
21	11:15	80	0,299	0,0330
22	11:25	90	0,328	0,0290
23	11:35	100	0,369	0,0410
24	11:45	110	0,428	0,0590
25	11:55	120	0,452	0,0240
26	12:05	130	0,500	0,0480
27	12:15	140	0,544	0,0440
28	12:25	150	0,590	0,0460
29	12:35	160	0,630	0,0400
30	12:45	170	0,680	0,0500
31	12:55	180	0,723	0,0430
32	13:05	190	0,768	0,0450
33	13:15	200	0,813	0,0450
34	13:25	210	0,858	0,0450



**ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - DUPLO ANEL - T**

<b>Data:</b> 11 out 2005	<b>Localização:</b> Lixão desativado de São Carlos
<b>Horário de início:</b> 09:40	<b>Coordenadas UTM:</b> 210.043
<b>Horário final:</b> 12:10	7.554.932
<b>Horário das Coletas:</b> 09:05/12:15/14:10	<b>Profundidade da amostragem deformada:</b> 9,40m

**DADOS CONSTANTES**

<b>Anel</b>	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura de Lâmina de Água:</b> 13 cm
Externo	30	<b>Obs.:</b>
Interno	15	

**MEDIDAS DO ENSAIO**

<b>Medida</b>	<b>Hora</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura (Régua do balde)</b>	<b>Varição de altura</b>
1	09:40	0	0	0
2	09:41	1	0,008	0,0080
3	09:42	2	0,013	0,0050
4	09:43	3	0,019	0,0060
5	09:44	4	0,021	0,0020
6	09:45	5	0,024	0,0030
7	09:46	6	0,028	0,0040
8	09:47	7	0,032	0,0040
9	09:48	8	0,037	0,0050
10	09:49	9	0,041	0,0040
11	09:50	10	0,045	0,0040
12	09:55	15	0,067	0,0220
13	10:00	20	0,089	0,0220
14	10:05	25	0,109	0,0200
15	10:10	30	0,129	0,0200
16	10:15	35	0,148	0,0190
17	10:20	40	0,168	0,0200
18	10:30	50	0,208	0,0400
19	10:40	60	0,244	0,0360
20	10:50	70	0,288	0,0440
21	11:00	80	0,320	0,0320
22	11:10	90	0,356	0,0360
23	11:20	100	0,397	0,0410
24	11:30	110	0,433	0,0360
25	11:40	120	0,469	0,0360
26	11:50	130	0,507	0,0380
27	12:00	140	0,545	0,0380
28	12:10	150	0,583	0,0380

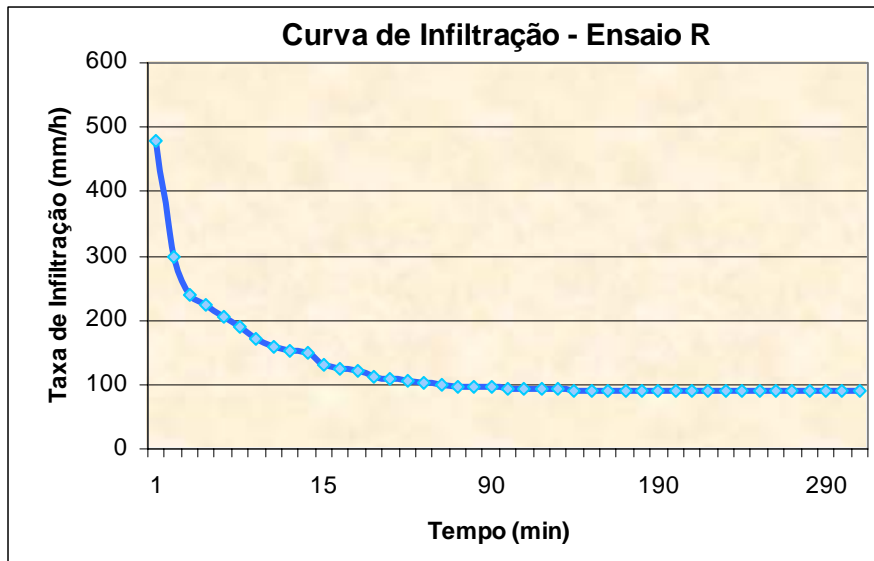
<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - DUPLO ANEL - U</b>				
Data: 11 out 2005		Localização: Lixão desativado de São Carlos		
Horário de início: 14:00		Coordenadas UTM: 210.088		
Horário final: 15:30		7.554.996		
Horário das Coletas: 13:30/15:30/17:30		Profundidade da amostragem deformada: 0,20m		
<b>DADOS CONSTANTES</b>				
<b>Anel</b>	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura de Lâmina de Água: 15 cm</b>		
Externo	30	<b>Obs.: Ponto em cima do lixão</b>		
Interno	15	Pequena profundidade amostrada devido ao encontro de lixo		
<b>MEDIDAS DO ENSAIO</b>				
<b>Medida</b>	<b>Hora</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura (Régua do balde)</b>	<b>Variação de altura</b>
1	14:00	0	0	0
2	14:01	1	0,008	0,0080
3	14:02	2	0,012	0,0040
4	14:03	3	0,015	0,0030
5	14:04	4	0,017	0,0020
6	14:05	5	0,019	0,0020
7	14:06	6	0,021	0,0020
8	14:07	7	0,022	0,0010
9	14:08	8	0,023	0,0010
10	14:09	9	0,024	0,0010
11	14:10	10	0,025	0,0010
12	14:15	15	0,029	0,0040
13	14:20	20	0,033	0,0040
14	14:25	25	0,036	0,0030
15	14:3	30	0,040	0,0040
16	14:35	35	0,043	0,0030
17	14:40	40	0,046	0,0030
18	14:50	50	0,053	0,0070
19	13:00	60	0,058	0,0050
20	13:10	70	0,063	0,0050
21	13:20	80	0,068	0,0050
22	13:30	90	0,073	0,0050

<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - DUPLO ANEL - V</b>				
<b>Data:</b> 11 out 2005		<b>Localização:</b> Lixão desativado de São Carlos		
<b>Horário de início:</b> 15:50		<b>Coordenadas UTM:</b> 209.960		
<b>Horário final:</b> 17:20		7.555.121		
<b>Horário das Coletas:</b> 13:30/15:30/19:00		<b>Profundidade da amostragem deformada:</b> 0,20m		
<b>DADOS CONSTANTES</b>				
<b>Anel</b>	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura de Lâmina de Água:</b> 15 cm		
Externo	30	<b>Obs.:</b> Ponto em cima do lixão Pequena profundidade amostrada devido ao encontro de lixo		
Interno	15			
<b>MEDIDAS DO ENSAIO</b>				
<b>Medida</b>	<b>Hora</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura (Régua do balde)</b>	<b>Varição de altura</b>
1	15:50	0	0	0
2	15:51	1	0,008	0,0080
3	15:52	2	0,011	0,0030
4	15:53	3	0,015	0,0040
5	15:54	4	0,019	0,0040
6	15:55	5	0,022	0,0030
7	15:56	6	0,026	0,0040
8	15:57	7	0,028	0,0020
9	15:58	8	0,031	0,0030
10	15:59	9	0,034	0,0030
11	16:00	10	0,038	0,0040
12	16:05	15	0,048	0,0100
13	16:10	20	0,058	0,0100
14	16:15	25	0,064	0,0060
15	16:20	30	0,071	0,0070
16	16:25	35	0,078	0,0070
17	16:30	40	0,087	0,0090
18	16:40	50	0,099	0,0120
19	16:50	60	0,111	0,0120
20	17:00	70	0,122	0,0110
21	17:10	80	0,133	0,0110
22	17:20	90	0,144	0,0110

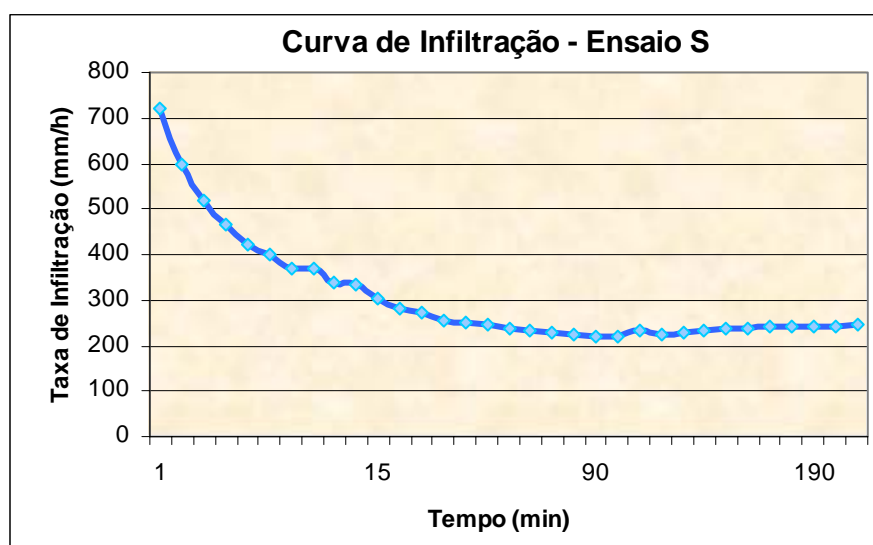
## **Anexo IV**

# **Planilhas de Cálculo e Curvas de Infiltração - Ensaio de Infiltração**

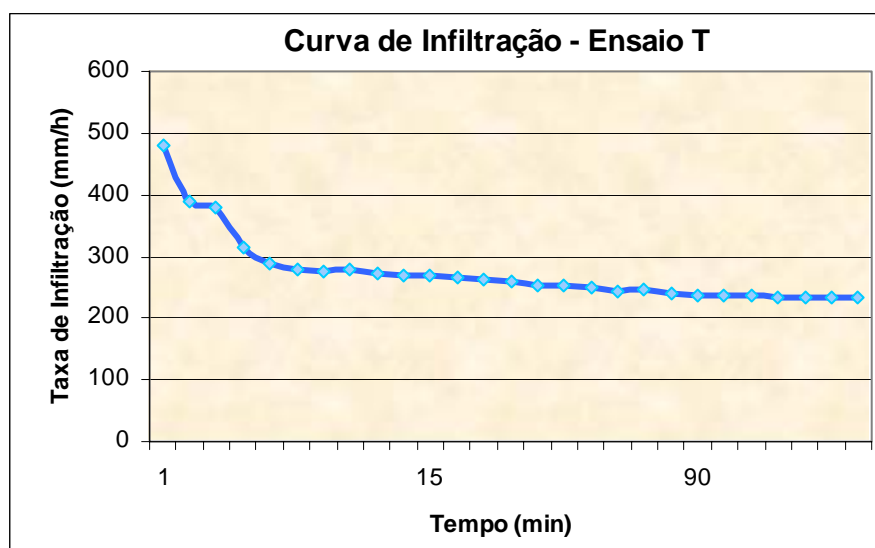
<b>Ensaio de Infiltração - IAD - Ensaio R (solo)</b>											
$\Delta H$ (m)	t (seg)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Zw (m)	A (m <sup>2</sup> )	K (m/s)	t (min)	DH (mm)	t (h)	Taxa I (mm/h)	$\Delta h$ (m)
0,000	0	0,09	0	1,8	0,07065	0,000000000	0	0	0	0	0
0,008	60	0,09	0,00000942	1,8	0,07065	0,000126984	1	8	0,017	480,000	0,0080
0,010	120	0,09	0,00000589	1,8	0,07065	0,000079365	2	10	0,033	300,000	0,0020
0,012	180	0,09	0,00000471	1,8	0,07065	0,000063492	3	12	0,050	240,000	0,0020
0,015	240	0,09	0,00000442	1,8	0,07065	0,000059524	4	15	0,067	225,000	0,0030
0,017	300	0,09	0,00000400	1,8	0,07065	0,000053968	5	17	0,083	204,000	0,0020
0,019	360	0,09	0,00000373	1,8	0,07065	0,000050265	6	19	0,100	190,000	0,0020
0,020	420	0,09	0,00000336	1,8	0,07065	0,000045351	7	20	0,117	171,429	0,0010
0,021	480	0,09	0,00000309	1,8	0,07065	0,000041667	8	21	0,133	157,500	0,0010
0,023	540	0,09	0,00000301	1,8	0,07065	0,000040564	9	23	0,150	153,333	0,0020
0,025	600	0,09	0,00000294	1,8	0,07065	0,000039683	10	25	0,167	150,000	0,0020
0,033	900	0,09	0,00000259	1,8	0,07065	0,000034921	15	33	0,250	132,000	0,0080
0,041	1200	0,09	0,00000241	1,8	0,07065	0,000032540	20	41	0,333	123,000	0,0080
0,050	1500	0,09	0,00000236	1,8	0,07065	0,000031746	25	50	0,417	120,000	0,0090
0,056	1800	0,09	0,00000220	1,8	0,07065	0,000029630	30	56	0,500	112,000	0,0060
0,064	2100	0,09	0,00000215	1,8	0,07065	0,000029025	35	64	0,583	109,714	0,0080
0,071	2400	0,09	0,00000209	1,8	0,07065	0,000028175	40	71	0,667	106,500	0,0070
0,085	3000	0,09	0,00000200	1,8	0,07065	0,000026984	50	85	0,833	102,000	0,0140
0,100	3600	0,09	0,00000196	1,8	0,07065	0,000026455	60	100	1,000	100,000	0,0150
0,114	4200	0,09	0,00000192	1,8	0,07065	0,000025850	70	114	1,167	97,714	0,0140
0,128	4800	0,09	0,00000188	1,8	0,07065	0,000025397	80	128	1,333	96,000	0,0140
0,143	5400	0,09	0,00000187	1,8	0,07065	0,000025220	90	143	1,500	95,333	0,0150
0,157	6000	0,09	0,00000185	1,8	0,07065	0,000024921	100	157	1,667	94,200	0,0140
0,170	6600	0,09	0,00000182	1,8	0,07065	0,000024531	110	170	1,833	92,727	0,0130
0,185	7200	0,09	0,00000182	1,8	0,07065	0,000024471	120	185	2,000	92,500	0,0150
0,200	7800	0,09	0,00000181	1,8	0,07065	0,000024420	130	200	2,167	92,308	0,0150
0,213	8400	0,09	0,00000179	1,8	0,07065	0,000024150	140	213	2,333	91,286	0,0130
0,228	9000	0,09	0,00000179	1,8	0,07065	0,000024127	150	228	2,500	91,200	0,0150
0,239	9600	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023710	160	239	2,667	89,625	0,0110
0,255	10200	0,09	0,00000177	1,8	0,07065	0,000023810	170	255	2,833	90,000	0,0160
0,270	10800	0,09	0,00000177	1,8	0,07065	0,000023810	180	270	3,000	90,000	0,0150
0,285	11400	0,09	0,00000177	1,8	0,07065	0,000023810	190	285	3,167	90,000	0,0150
0,301	12000	0,09	0,00000177	1,8	0,07065	0,000023889	200	301	3,333	90,300	0,0160
0,315	12600	0,09	0,00000177	1,8	0,07065	0,000023810	210	315	3,500	90,000	0,0140
0,328	13200	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023665	220	328	3,667	89,455	0,0130
0,342	13800	0,09	0,00000175	1,8	0,07065	0,000023602	230	342	3,833	89,217	0,0140
0,358	14400	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023677	240	358	4,000	89,500	0,0160
0,373	15000	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023683	250	373	4,167	89,520	0,0150
0,389	15600	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023748	260	389	4,333	89,769	0,0160
0,403	16200	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023692	270	403	4,500	89,556	0,0140
0,418	16800	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023696	280	418	4,667	89,571	0,0150
0,433	17400	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023700	290	433	4,833	89,586	0,0150
0,448	18000	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023704	300	448	5,000	89,600	0,0150
0,463	18600	0,09	0,00000176	1,8	0,07065	0,000023707	310	463	5,167	89,613	0,0150



<b>Ensaio de Infiltração - IAD - Ensaio S (solo)</b>											
$\Delta H$ (m)	t (seg)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Zw (m)	A (m <sup>2</sup> )	K (m/s)	t (min)	DH (mm)	t (h)	Taxa I (mm/h)	$\Delta h$ (m)
0,0	0	0,10	0,0	1,0	0,07065	0,0	0	0	0,0	0,0	0
0,012	60	0,10	0,00001413	1,0	0,07065	0,000181818	1	12	0,017	720,000	0,0120
0,020	120	0,10	0,00001178	1,0	0,07065	0,000151515	2	20	0,033	600,000	0,0080
0,026	180	0,10	0,00001021	1,0	0,07065	0,000131313	3	26	0,050	520,000	0,0060
0,031	240	0,10	0,00000913	1,0	0,07065	0,000117424	4	31	0,067	465,000	0,0050
0,035	300	0,10	0,00000824	1,0	0,07065	0,000106061	5	35	0,083	420,000	0,0040
0,040	360	0,10	0,00000785	1,0	0,07065	0,000101010	6	40	0,100	400,000	0,0050
0,043	420	0,10	0,00000723	1,0	0,07065	0,000093074	7	43	0,117	368,571	0,0030
0,049	480	0,10	0,00000721	1,0	0,07065	0,000092803	8	49	0,133	367,500	0,0060
0,051	540	0,10	0,00000667	1,0	0,07065	0,000085859	9	51	0,150	340,000	0,0020
0,056	600	0,10	0,00000659	1,0	0,07065	0,000084848	10	56	0,167	336,000	0,0050
0,076	900	0,10	0,00000597	1,0	0,07065	0,000076768	15	76	0,250	304,000	0,0200
0,094	1200	0,10	0,00000553	1,0	0,07065	0,000071212	20	94	0,333	282,000	0,0180
0,113	1500	0,10	0,00000532	1,0	0,07065	0,000068485	25	113	0,417	271,200	0,0190
0,128	1800	0,10	0,00000502	1,0	0,07065	0,000064646	30	128	0,500	256,000	0,0150
0,147	2100	0,10	0,00000495	1,0	0,07065	0,000063636	35	147	0,583	252,000	0,0190
0,163	2400	0,10	0,00000480	1,0	0,07065	0,000061742	40	163	0,667	244,500	0,0160
0,199	3000	0,10	0,00000469	1,0	0,07065	0,000060303	50	199	0,833	238,800	0,0360
0,232	3600	0,10	0,00000455	1,0	0,07065	0,000058586	60	232	1,000	232,000	0,0330
0,266	4200	0,10	0,00000447	1,0	0,07065	0,000057576	70	266	1,167	228,000	0,0340
0,299	4800	0,10	0,00000440	1,0	0,07065	0,000056629	80	299	1,333	224,250	0,0330
0,328	5400	0,10	0,00000429	1,0	0,07065	0,000055219	90	328	1,500	218,667	0,0290
0,369	6000	0,10	0,00000434	1,0	0,07065	0,000055909	100	369	1,667	221,400	0,0410
0,428	6600	0,10	0,00000458	1,0	0,07065	0,000058953	110	428	1,833	233,455	0,0590
0,452	7200	0,10	0,00000444	1,0	0,07065	0,000057071	120	452	2,000	226,000	0,0240
0,500	7800	0,10	0,00000453	1,0	0,07065	0,000058275	130	500	2,167	230,769	0,0480
0,544	8400	0,10	0,00000458	1,0	0,07065	0,000058874	140	544	2,333	233,143	0,0440
0,590	9000	0,10	0,00000463	1,0	0,07065	0,000059596	150	590	2,500	236,000	0,0460
0,630	9600	0,10	0,00000464	1,0	0,07065	0,000059659	160	630	2,667	236,250	0,0400
0,680	10200	0,10	0,00000471	1,0	0,07065	0,000060606	170	680	2,833	240,000	0,0500
0,723	10800	0,10	0,00000473	1,0	0,07065	0,000060859	180	723	3,000	241,000	0,0430
0,768	11400	0,10	0,00000476	1,0	0,07065	0,000061244	190	768	3,167	242,526	0,0450
0,813	12000	0,10	0,00000479	1,0	0,07065	0,000061591	200	813	3,333	243,900	0,0450
0,858	12600	0,10	0,00000481	1,0	0,07065	0,000061905	210	858	3,500	245,143	0,0450

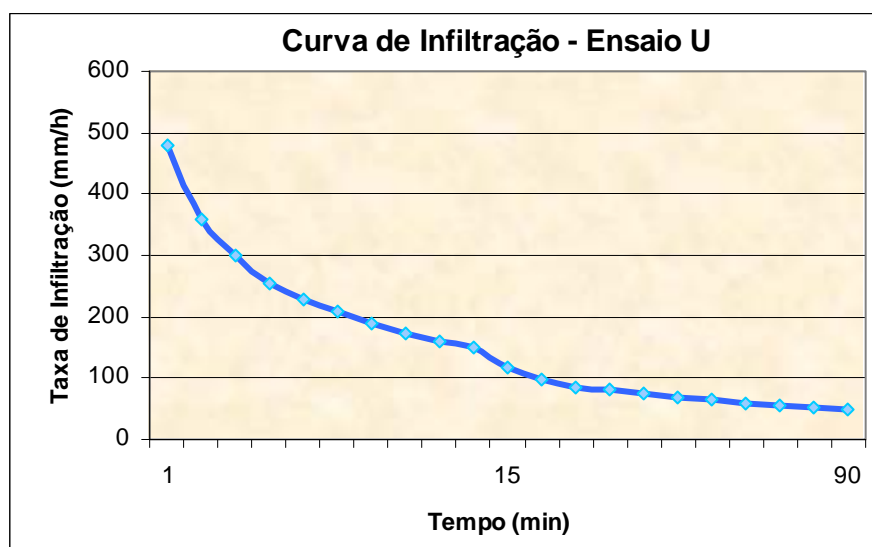


<b>Ensaio de Infiltração - IAD - Ensaio T (solo)</b>											
$\Delta H$ (m)	t (seg)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Zw (m)	A (m <sup>2</sup> )	K (m/s)	t (min)	DH (mm)	t (h)	Taxa I (mm/h)	$\Delta h$ (m)
0	0	0,13	0	3,60	0,07065	0,00000000	0	0	0	0	0
0,008	60	0,13	0,00000942	3,60	0,07065	0,000128686	1	8	0,017	480,000	0,0080
0,013	120	0,13	0,00000765	3,60	0,07065	0,000104558	2	13	0,033	390,000	0,0050
0,019	180	0,13	0,00000746	3,60	0,07065	0,000101877	3	19	0,050	380,000	0,0060
0,021	240	0,13	0,00000618	3,60	0,07065	0,000084450	4	21	0,067	315,000	0,0020
0,024	300	0,13	0,00000565	3,60	0,07065	0,000077212	5	24	0,083	288,000	0,0030
0,028	360	0,13	0,00000550	3,60	0,07065	0,000075067	6	28	0,100	280,000	0,0040
0,032	420	0,13	0,00000538	3,60	0,07065	0,000073535	7	32	0,117	274,286	0,0040
0,037	480	0,13	0,00000545	3,60	0,07065	0,000074397	8	37	0,133	277,500	0,0050
0,041	540	0,13	0,00000536	3,60	0,07065	0,000073280	9	41	0,150	273,333	0,0040
0,045	600	0,13	0,00000530	3,60	0,07065	0,000072386	10	45	0,167	270,000	0,0040
0,067	900	0,13	0,00000526	3,60	0,07065	0,000071850	15	67	0,250	268,000	0,0220
0,089	1200	0,13	0,00000524	3,60	0,07065	0,000071582	20	89	0,333	267,000	0,0220
0,109	1500	0,13	0,00000513	3,60	0,07065	0,000070134	25	109	0,417	261,600	0,0200
0,129	1800	0,13	0,00000506	3,60	0,07065	0,000069169	30	129	0,500	258,000	0,0200
0,148	2100	0,13	0,00000498	3,60	0,07065	0,000068020	35	148	0,583	253,714	0,0190
0,168	2400	0,13	0,00000495	3,60	0,07065	0,000067560	40	168	0,667	252,000	0,0200
0,208	3000	0,13	0,00000490	3,60	0,07065	0,000066917	50	208	0,833	249,600	0,0400
0,244	3600	0,13	0,00000479	3,60	0,07065	0,000065416	60	244	1,000	244,000	0,0360
0,288	4200	0,13	0,00000484	3,60	0,07065	0,000066182	70	288	1,167	246,857	0,0440
0,320	4800	0,13	0,00000471	3,60	0,07065	0,000064343	80	320	1,333	240,000	0,0320
0,356	5400	0,13	0,00000466	3,60	0,07065	0,000063628	90	356	1,500	237,333	0,0360
0,397	6000	0,13	0,00000467	3,60	0,07065	0,000063861	100	397	1,667	238,200	0,0410
0,433	6600	0,13	0,00000464	3,60	0,07065	0,000063320	110	433	1,833	236,182	0,0360
0,469	7200	0,13	0,00000460	3,60	0,07065	0,000062869	120	469	2,000	234,500	0,0360
0,507	7800	0,13	0,00000459	3,60	0,07065	0,000062735	130	507	2,167	234,000	0,0380
0,545	8400	0,13	0,00000458	3,60	0,07065	0,000062620	140	545	2,333	233,571	0,0380
0,583	9000	0,13	0,00000458	3,60	0,07065	0,000062520	150	583	2,500	233,200	0,0380

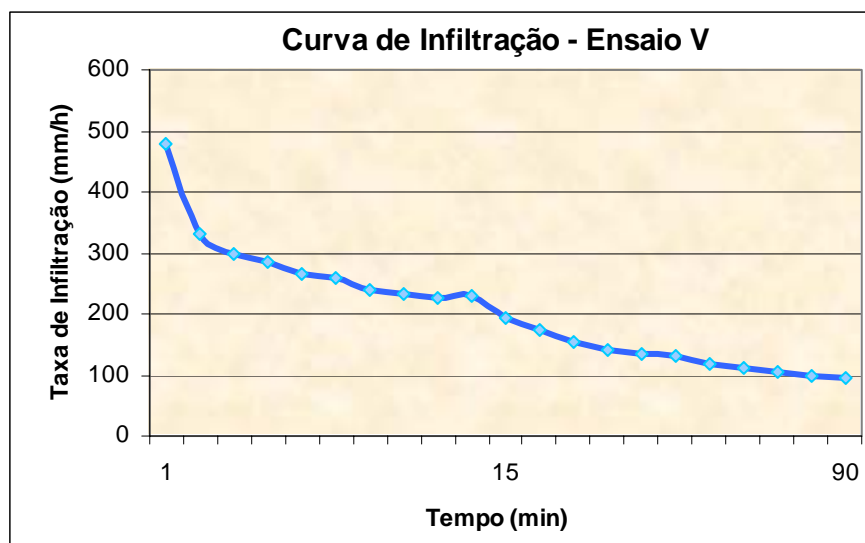




<b>Ensaio de Infiltração - IAD - Ensaio U (lixo)</b>											
$\Delta H$ (m)	t (seg)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Zw (m)	A (m <sup>2</sup> )	K (m/s)	t (min)	DH (mm)	t (h)	Taxa I (mm/h)	$\Delta h$ (m)
0	0	0,15	0	0,2	0,07065	0,000000000	0	0	0	0	0
0,008	60	0,15	0,00000942	0,2	0,07065	0,000076190	1	8	0,017	480,000	0,0080
0,012	120	0,15	0,00000707	0,2	0,07065	0,000057143	2	12	0,033	360,000	0,0040
0,015	180	0,15	0,00000589	0,2	0,07065	0,000047619	3	15	0,050	300,000	0,0030
0,017	240	0,15	0,00000500	0,2	0,07065	0,000040476	4	17	0,067	255,000	0,0020
0,019	300	0,15	0,00000447	0,2	0,07065	0,000036190	5	19	0,083	228,000	0,0020
0,021	360	0,15	0,00000412	0,2	0,07065	0,000033333	6	21	0,100	210,000	0,0020
0,022	420	0,15	0,00000370	0,2	0,07065	0,000029932	7	22	0,117	188,571	0,0010
0,023	480	0,15	0,00000339	0,2	0,07065	0,000027381	8	23	0,133	172,500	0,0010
0,024	540	0,15	0,00000314	0,2	0,07065	0,000025397	9	24	0,150	160,000	0,0010
0,025	600	0,15	0,00000294	0,2	0,07065	0,000023810	10	25	0,167	150,000	0,0010
0,029	900	0,15	0,00000228	0,2	0,07065	0,000018413	15	29	0,250	116,000	0,0040
0,033	1200	0,15	0,00000194	0,2	0,07065	0,000015714	20	33	0,333	99,000	0,0040
0,036	1500	0,15	0,00000170	0,2	0,07065	0,000013714	25	36	0,417	86,400	0,0030
0,040	1800	0,15	0,00000157	0,2	0,07065	0,000012698	30	40	0,500	80,000	0,0040
0,043	2100	0,15	0,00000145	0,2	0,07065	0,000011701	35	43	0,583	73,714	0,0030
0,046	2400	0,15	0,00000135	0,2	0,07065	0,000010952	40	46	0,667	69,000	0,0030
0,053	3000	0,15	0,00000125	0,2	0,07065	0,000010095	50	53	0,833	63,600	0,0070
0,058	3600	0,15	0,00000114	0,2	0,07065	0,000009206	60	58	1,000	58,000	0,0050
0,063	4200	0,15	0,00000106	0,2	0,07065	0,000008571	70	63	1,167	54,000	0,0050
0,068	4800	0,15	0,00000100	0,2	0,07065	0,000008095	80	68	1,333	51,000	0,0050
0,073	5400	0,15	0,00000096	0,2	0,07065	0,000007725	90	73	1,500	48,667	0,0050



<b>Ensaio de Infiltração - IAD - Ensaio V (lixo)</b>											
$\Delta H$ (m)	t (seg)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Zw (m)	A (m <sup>2</sup> )	K (m/s)	t (min)	DH (mm)	t (h)	Taxa I (mm/h)	$\Delta h$ (m)
0	0	0,2	0	0,15	0,07065	0,000000000	0	0	0	0	0
0,008	60	0,2	0,00000942	0,15	0,07065	0,000066667	1	8	0,017	480,000	0,0080
0,011	120	0,2	0,00000648	0,15	0,07065	0,000045833	2	11	0,033	330,000	0,0030
0,015	180	0,2	0,00000589	0,15	0,07065	0,000041667	3	15	0,050	300,000	0,0040
0,019	240	0,2	0,00000559	0,15	0,07065	0,000039583	4	19	0,067	285,000	0,0040
0,022	300	0,2	0,00000518	0,15	0,07065	0,000036667	5	22	0,083	264,000	0,0030
0,026	360	0,2	0,00000510	0,15	0,07065	0,000036111	6	26	0,100	260,000	0,0040
0,028	420	0,2	0,00000471	0,15	0,07065	0,000033333	7	28	0,117	240,000	0,0020
0,031	480	0,2	0,00000456	0,15	0,07065	0,000032292	8	31	0,133	232,500	0,0030
0,034	540	0,2	0,00000445	0,15	0,07065	0,000031481	9	34	0,150	226,667	0,0030
0,038	600	0,2	0,00000447	0,15	0,07065	0,000031667	10	38	0,167	228,000	0,0040
0,048	900	0,2	0,00000377	0,15	0,07065	0,000026667	15	48	0,250	192,000	0,0100
0,058	1200	0,2	0,00000341	0,15	0,07065	0,000024167	20	58	0,333	174,000	0,0100
0,064	1500	0,2	0,00000301	0,15	0,07065	0,000021333	25	64	0,417	153,600	0,0060
0,071	1800	0,2	0,00000279	0,15	0,07065	0,000019722	30	71	0,500	142,000	0,0070
0,078	2100	0,2	0,00000262	0,15	0,07065	0,000018571	35	78	0,583	133,714	0,0070
0,087	2400	0,2	0,00000256	0,15	0,07065	0,000018125	40	87	0,667	130,500	0,0090
0,099	3000	0,2	0,00000233	0,15	0,07065	0,000016500	50	99	0,833	118,800	0,0120
0,111	3600	0,2	0,00000218	0,15	0,07065	0,000015417	60	111	1,000	111,000	0,0120
0,122	4200	0,2	0,00000205	0,15	0,07065	0,000014524	70	122	1,167	104,571	0,0110
0,133	4800	0,2	0,00000196	0,15	0,07065	0,000013854	80	133	1,333	99,750	0,0110
0,144	5400	0,2	0,00000188	0,15	0,07065	0,000013333	90	144	1,500	96,000	0,0110



# **Anexo V**

## **Curvas Granulométricas**

### **Ensaio de Granulometria Conjunta**

