

UNIVERSIDADE SÃO PAULO (USP)  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS (IAG)  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

GEORGIA CASTRO DE SOUZA

**Aplicação dos métodos eletromagnético indutivo,  
eletrorresistividade e IP domínio do tempo em caracterização  
Geoambiental**

São Paulo  
2007

GEORGIA CASTRO DE SOUZA

**Aplicação dos métodos eletromagnético indutivo, eletrorresistividade e IP domínio do tempo  
em caracterização Geoambiental**

Dissertação apresentada ao Instituto de  
Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada  
Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

São Paulo  
2007

Souza, Georgia Castro

Aplicação dos métodos eletromagnético indutivo, eletrorresistividade e IP domínio do tempo em caracterização Geoambiental / Georgia Castro de Souza; orientador: Vagner Roberto Elis.

São Paulo, 2007

103 f. ; 66 fig.

Tese (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Área de Concentração: Geofísica Aplicada) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

1. Geofísica. 2. meio ambiente. 3. contaminação

Dissertação apresenta ao Instituto de Astronomia,  
Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título de Mestre.  
Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Aprovado em:

Banca Examinadora

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

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

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus.

Há algum tempo percebi que nada acontece por acaso e que o tempo é a solução para tudo. Em muitos momentos me vi triste, não entendendo certas coisas e então questionando a mim, aos outros, as coisas ou até mesmo Deus, mas este me mostrou que isto tudo foi em vão, pois algo de muito melhor e surpreendente sempre me aguardava.

No entanto sei, também, que essas conquistas nunca seriam obtidas sem a ajuda, o apoio, o carinho, a força e o amor de inúmeras pessoas que apareceram em minha vida. Assim, o mínimo que posso fazer é agradecer em algumas palavras alguns desse anjos que cruzaram os meus caminhos.

Agradeço aos meus pais, principalmente minha mãe que sempre foi um exemplo de mulher cheio de força, sabedoria e amor proporcionando a mim e a meu irmão chance de sermos pessoas cada vez melhores e principalmente felizes.

Agradeço ao homem que espero ter junto de mim toda minha vida, o Gustavo, por todo amor, carinho, compreensão, apoio, força, motivação, orientação, alegria, que sempre me deu.

Agradeço do fundo do meu coração, com todo carinho, o Prof. Dr. Vagner Roberto Elis que foi mais que um professor e sim um amigo. Com seu jeito calmo e sereno sempre me ajudou, me apoiou, me orientou e permitiu que mais uma etapa da minha vida fosse concluída.

Agradeço ao meu irmão, Arthur, por todo carinho, ajuda e companheirismo.

Agradeço a toda minha família, minha tia Jandira, meu tio Guilherme, minha avó, minha prima Camilla, e todos outros, pela ajuda, apoio, amor e carinho de sempre.

Agradeço, também, a toda família do Gustavo; a Maria Helena, ao Francisco, a Gabi, a Maria Elisa, enfim, a todos por todo apoio e carinho.

Agradeço aos meus amigos que inúmeras vezes estiveram junto de mim me ajudando, me auxiliando e me alegrando.

Agradeço as empresas que estive trabalhando durante este período do curso de mestrado, por toda a compreensão, apoio, ajuda e ensinamentos que me proporcionaram e assim contribuíram para que eu pudesse alcançar mais este objetivo em minha vida.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Geofísica por transmitir todo conhecimento e também por toda atenção e auxílio.

Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram e contribuíram de forma direta ou indireta para a produção deste trabalho. Seria injusto citar nomes, pois com certeza não conseguiria colocar a todos, no entanto, estes estão guardados em meus pensamentos e meu coração já que fizeram grande diferença e me auxiliaram e muito.

## SUMÁRIO

<b>INDICE</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>05</b>
<b>Capítulo 3 – METODOLOGIA</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 4 – ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>37</b>
<b>Capítulo 5 – ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 6 – CONCLUSÕES</b>	<b>77</b>
<b>Capítulo 7 – REFERÊNCIAS</b>	<b>80</b>

**ÍNDICE**

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>10</b>
<b>3.1.</b>	<b>Método da Eletrorresistividade</b>	<b>10</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>Bases teóricas</b>	<b>11</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>Sondagem Elétrica Vertical (SEV)</b>	<b>16</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>Caminhamento Elétrico (CE)</b>	<b>18</b>
<b>3.1.4.</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>22</b>
<b>3.2.</b>	<b>Método da Polarização Induzida (IP)</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Método da Polarização Induzida Espectral – Parâmetro Cole Cole</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Equipamentos e técnicas de ensaios</b>	<b>29</b>
<b>3.3.</b>	<b>Método Eletromagnético Indutivo</b>	<b>31</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Bases teóricas</b>	<b>32</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>33</b>
<b>4.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>37</b>
<b>4.1.</b>	<b>Geologia e hidrogeologia local</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>5.1.</b>	<b>Dados de investigações diretas</b>	<b>44</b>
<b>5.2.</b>	<b>Dados elétricos</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1.</b>	<b>Sondagens elétricas verticais</b>	<b>50</b>
<b>5.2.2.</b>	<b>Perfis geológicos interpretados</b>	<b>56</b>
<b>5.2.3.</b>	<b>Caminhamentos elétricos</b>	<b>58</b>
<b>5.3.</b>	<b>Dados eletromagnéticos</b>	<b>66</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>77</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>80</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Um eletrodo na origem O de um sistema de coordenadas.	11
S é a superfície de uma esfera de raio r	11
<b>Figura 2</b> - Eletrodo C em um ponto do semi-espaço e o fluxo radial de corrente	12
<b>Figura 3</b> - Distribuição das linhas corrente e potencial para dois eletrodos de corrente na superfície de um semi-espaço homogêneo	13
<b>Figura 4</b> - Esquema de campo para determinação da resistividade	14
<b>Figura 5</b> - Arranjo Schlumberger	17
<b>Figura 6</b> - Disposição inicial no campo do arranjo <i>dipolo-dipolo</i> – CE	19
<b>Figura 7</b> - Plotagem dos dados do arranjo de campo dipolo-dipolo – CE	20
<b>Figura 8</b> - Equipamento para ensaios de resistividade <i>Iris Syscal R2</i>	22
<b>Figura 9</b> - Variação de $\Delta V$ com o tempo. A linha pontilhada vertical indica o momento em que se corta a corrente e começa a descarga (Braga, 1997)	24
<b>Figura 10</b> - Efeito de polarização eletrônica. Adaptado de Orellana (1974)	25
<b>Figura 11</b> - Efeito de polarização de membrana. Adaptado de Sumner (1976)	26
<b>Figura 12</b> - Conjunto transmissor TSQ-3 (transmissor + gerador) de 3KW de potência e receptor IPR-12 digital da Scintrex	30
<b>Figura 13</b> - Equipamento <i>EM-34</i>	33
<b>Figura 14</b> - Princípio de indução eletromagnética	35
<b>Figura 15</b> - Mapa de localização da região de Ribeirão Preto	37
<b>Figura 16</b> - Posição das cavas na área do Lixão	38
<b>Figura 17</b> - Área de estudo - antigo Lixão de Serrana, setembro / 2005	39
<b>Figura 18</b> - Mapa geológico da região de Ribeirão Preto – SP (Elis, 1999)	42

<b>Figura 19</b> - Perfil dos Poços de monitoramento de água	45
<b>Figura 20</b> - Perfil dos Poços de coleta de chorume	46
<b>Figura 21</b> - Perfil das sondagens a trado	48
<b>Figura 22</b> - Perfil do ensaio de CPT	48
<b>Figura 23</b> - Mapa da área – levantamento de eletrorresistividade e pontos de investigação direta	49
<b>Figura 24</b> - SEV-02	50
<b>Figura 25</b> - SEV-05	51
<b>Figura 26</b> - SEV-04	52
<b>Figura 27</b> - SEV-01	53
<b>Figura 28</b> - SEV-03	53
<b>Figura 29</b> - SEV-07	54
<b>Figura 30</b> - SEV-06	55
<b>Figura 31</b> - SEV-08	55
<b>Figura 32</b> - Perfil longitudinal norte AA'	56
<b>Figura 33</b> - Perfil longitudinal norte BB'	57
<b>Figura 34</b> - Perfil longitudinal norte CC'	57
<b>Figura 35</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 01 (dados brutos)	59
<b>Figura 36</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 01 (dados brutos)	59
<b>Figura 37</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 01 (dados invertidos)	60

<b>Figura 38</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 01 (dados invertidos)	60
<b>Figura 39</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 02 (dados brutos)	61
<b>Figura 40</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 02 (dados brutos)	61
<b>Figura 41</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 02 (dados invertidos)	62
<b>Figura 42</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 02 (dados invertidos)	62
<b>Figura 43</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados brutos)	63
<b>Figura 44</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados brutos)	63
<b>Figura 45</b> - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados invertidos)	64
<b>Figura 46</b> - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados invertidos)	64
<b>Figura 47</b> - Perfil de constante de tempo da linha de caminhamento CE-01	65
<b>Figura 48</b> - Perfil de constante de tempo da linha de caminhamento CE-02	65
<b>Figura 49</b> - Perfil de constante de tempo da linha de caminhamento CE-03	65
<b>Figura 50</b> - Mapa de localização da área e posição das linhas de EM	67
<b>Figura 51</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 11	67

<b>Figura 52</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento eletromagnético 12	68
<b>Figura 53</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 13	68
<b>Figura 54</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 05	69
<b>Figura 55</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 08	69
<b>Figura 56</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 09	69
<b>Figura 57</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 10	70
<b>Figura 58</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 06	70
<b>Figura 59</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 01	70
<b>Figura 60</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 07	71
<b>Figura 61</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 02	71
<b>Figura 62</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 03	71
<b>Figura 63</b> - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 04	72
<b>Figura 64</b> - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 7,5 m	73
<b>Figura 65</b> - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 15 m	74
<b>Figura 66</b> - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 30 m	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas	34
<b>Tabela 2</b> - Resultados das análises dos poços de monitoramento de água	46
<b>Tabela 3</b> - Resultados das análises dos poços de coleta de chorume	47

## RESUMO

Este projeto visa caracterizar o problema ambiental gerado na região do Lixão de Serrana, que se localiza na cidade de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo. Neste local, devido à existência de uma grande cavidade no solo, originada da extração de areia para a construção civil, em meados da década de 1970 iniciou-se a disposição de resíduos domésticos, industriais e hospitalares. Hoje em dia, o lixão já se encontra saturado e sem atividade. No entanto, os danos causados pela disposição inadequada dos resíduos ainda estão presentes e a pluma de contaminação gerada ainda se desenvolve.

A metodologia utilizada neste trabalho consiste na integração de técnicas geofísicas, as quais vêm se mostrando eficientes na avaliação e caracterização de problemas ambientais. O projeto tem como foco desenvolver a aplicação dos seguintes métodos de prospecção geofísica: eletrorresistividade, polarização induzida no domínio do tempo e eletromagnético indutivo, nos estudos de geotecnia e meio ambiente. O projeto baseou-se na compilação e reinterpretação de uma grande quantidade de dados geofísicos pré-existentes e alguns dados coletados durante o desenvolvimento do trabalho, associados a dados de geologia de superfície e de poços. Dessa forma, com a integração de informações, procurou-se estudar parâmetros para a avaliação dos problemas associados à contaminação de solos tropicais e águas subterrâneas por depósito de resíduos urbanos.

A presente trabalho procurou atingir dois objetivos principais. O primeiro deles foi à aplicação e interpretação de ensaios geoeletricos para uma melhor caracterização geológica da área. Os dados geofísicos foram vinculados às

informações geológicas de poços existentes para uma melhor interpretação e definição da geologia local.

O segundo foi a caracterização do problema ambiental, utilizando os métodos geofísicos e algumas análises químicas de água, disponibilizadas pela Prefeitura de Ribeirão Preto. Dentro de tal contexto, procurou-se estudar, também o comportamento dos parâmetros geofísicos como cargabilidade e constante de tempo na delimitação das cavas preenchidas com resíduos, a zona saturada em chorume próxima a esses e da pluma de contaminação dentro da zona saturada (zona profunda), uma vez que as respostas aos dois parâmetros acima mencionados, o que não ocorre com a resistividade (e condutividade) cujas respostas vem sendo mais estudadas.

A utilização dos resultados obtidos por sondagens elétricas interpretadas com base em informações de poços de monitoramento de água e de coleta de chorume, poços tubulares profundos, sondagens a trado e de geologia de superfície possibilitou um melhor conhecimento da geologia da área do depósito, que apresenta relações de contato complexas entre as 3 (três) unidades geológicas diferentes (colúvio, basalto e arenito) e 2 (dois) tipos de aquíferos.

A partir do estabelecimento do modelo geológico, pôde-se utilizar os resultados de caminhamentos elétricos (resistividade e polarização induzida) para entender as relações entre os resíduos e o meio natural nos limites do lixão. Os resultados dos perfis eletromagnéticos possibilitaram uma visualização do impacto ambiental na área do depósito e seu entorno imediato, bem como o estabelecimento de hipóteses sobre o formato e o caminho da pluma de contaminação, cuja existência na área fora constatada pelos dados de análises químicas das águas subterrâneas.

## ABSTRACT

This project aims characterizing environmental problem generated in Serrana Landfill region, contained in Ribeirão Preto city (SP). In there, due to a huge soil cavity originated from sand extraction used in building site, the disposal of domestic, industrial and hospital residues started in mid 1970s. Nowadays, this landfill is saturated and without activity. However, damages caused by the inadequate residue disposition are still present, and the generated contamination plume still remains.

The methodology used in this work consists in the integration of geophysical techniques efficient in the evaluation and characterization of environmental problems. The focus in here is to apply geophysical prospecting methods, such as resistivity, induced polarization related to time domains as well as electromagnetic inductive method, in geotechny and environment studies. The project was based on a compilation and reinterpretation of a large amount of pre-existent geophysical data as well as those collected during work conduction associated to surface geology and well data. In such way, with integrated information it attempted to study parameters to evaluate problems associated to tropical soil and groundwater contamination for urban residue landfill.

This project accomplishment intends to achieve two main objectives. First of all it was application and interpretation of geoelectrical assays to a better geological characterization from the area. Geophysical data were linked to geological information from existent wells for a better local geology interpretation and definition.

The second objective was the environmental problem characterization by using geophysical method and some water chemical analysis available by Ribeirão Preto

City hall. In this context, it was also studied a geophysical parameter behavior of chargeability and time constant in digging delimitation filled out with residues from leachate shallow area and contamination plume inside of saturated area (deep area), once two mentioned parameter answers are not well known. This unknowing answers never happens with resistivity (and conductivity) case.

The use of results obtained from electrical sounding has interpreted base on information about water monitoring wells and leachate collection, deep tubular wells, auger sounding, and surface geology made possible a better knowledge about landfill geology, which presents complex contact among three different geological units, and two types of aquifer.

Since geological model establishment, results of electric profiling (resistivity and induced polarization) can be used in order to understand the association between residues and environment in landfill limits. Results of electromagnetic profile make possible a visualization of environmental impact in landfill zone and its surrounding as well as the establishment of hypothesis about format and way of contamination plume whose existence in the zone is verified by data from groundwater chemical analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pela intervenção do homem ao meio ambiente consistem atualmente uma das grandes preocupações mundiais. A crescente concentração populacional em áreas urbanas e o conseqüente aumento da produção de resíduos domésticos e industriais vêm gerando muitos problemas relacionados a forma de disposição desses resíduos e conseqüentemente a relação a contaminação de solos e águas subterrâneas.

Em todo o mundo, com algumas poucas exceções, os aterros sanitários representam a principal destinação final dos resíduos sólidos. No Brasil, somente 10 % dos resíduos sólidos são dispostos de forma adequada; porém, nas regiões sudeste e sul do País já existe um número significativo de aterros sanitários.

Os aterros sanitários são os locais especialmente concebidos para receber lixo e projetados de forma a que se reduza o perigo para a saúde pública e para a segurança; portanto, são a forma de disposição final adequada dos resíduos sólidos urbanos ao solo, através de confinamento em camadas com material inerte. Distinguem-se assim os aterros sanitários de outras formas de disposição de resíduos sólidos urbanos, como aterros controlados e lixões.

O aterro controlado é caracterizado por causar apenas poluição localizada, com limites geográficos previstos. Os resíduos são cobertos como solo e eventualmente compactados. Esse tipo de disposição normalmente não dispõe de impermeabilização da base, sistemas de drenagem e tratamento de chorume e sistemas de dispersão de gases.

A forma mais danosa de disposição de resíduos são os lixões, estes são uma forma totalmente inadequada de disposição de resíduos sólidos, onde esses resíduos

são dispostos diretamente sobre o solo, sem qualquer estudo prévio e cuidados de proteção ao meio ambiente, gerando assim inúmeros problemas.

Os problemas relacionados às áreas de disposição inadequada de resíduos são considerados a nível global, como uma das principais fontes potenciais de contaminação de água subterrânea. Os resíduos sólidos urbanos apresentam em sua composição quantidades variáveis de materiais potencialmente perigosos, representantes de quase todos os principais grupos de poluentes. Os materiais potencialmente perigosos e que oferecem risco de contaminação de águas subterrâneas são os resíduos orgânicos, lixo hospitalar, tintas, solventes, pesticidas, repelentes, óleos lubrificantes, baterias, pilhas, frascos de aerossóis e lâmpadas fluorescentes.

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 atingem o nível d'água. O líquido derivado desse processo de percolação através dos resíduos é denominado chorume. O chorume contém normalmente elevadas concentrações de amônia, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico, cloreto, ferro, além de concentrações menores de um grande número de outros contaminantes inorgânicos e orgânicos (Mirecki & Parks).

A degradação das águas superficiais e subterrâneas por problemas de contaminação e poluição vem gerando dificuldades para o aproveitamento desses recursos hídricos e intensificando sua escassez. A poluição das águas subterrâneas é muito mais preocupante do que das águas superficiais, visto que estas rapidamente se renovam e se recuperam após cessar o lançamento de efluentes.

Atualmente é preocupante o problema da poluição de solos e águas subterrâneas. Por isso, profissionais ligados às Ciências da Terra estão estimulados a pesquisar novos caminhos para estudar, avaliar e procurar novas soluções que possam minimizar os efeitos danosos causados pela disposição de resíduos em interação direta com o meio físico. Dentre esses caminhos pode ser enquadrado o uso de métodos geofísicos.

A natureza não evasiva dos métodos geofísicos, aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-se uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. De uma forma geral a utilização da geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada e informações sobre a profundidade da zona ocupada por tais substâncias, da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo, profundidade do substrato rochoso alterado e inalterado, dentre outras.

Dentro deste contexto este projeto teve como foco estudar a área do Lixão de Serrana, que se localiza na cidade de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, na qual, devido a existência de uma enorme cavidade no solo originada da extração de areia para a construção civil, iniciou-se em meados da década de 1970 a disposição de resíduos domésticos, industriais e hospitalares. Hoje em dia, o lixão já se encontra saturado e sem atividade, porém os danos causados no ambiente ainda estão presentes e a pluma de contaminação gerada ainda mantém um desenvolvimento.

Os objetivos principais deste projeto visaram conhecer melhor a geologia local, mapear a região dos resíduos e a pluma de contaminação gerada por estes, para assim, avaliar o impacto ambiental gerado no local.

A metodologia utilizada neste trabalho consiste na aplicação integrada de métodos geofísicos que vêm se mostrando eficientes na avaliação e caracterização de problemas ambientais. O projeto visou desenvolver a aplicação integrada dos métodos eletromagnético indutivo, resistividade e polarização induzida (IP) no domínio do tempo, em estudos de geotecnia e meio ambiente, mais especificamente em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos. Dados geelétricos coletados em outros projetos foram reinterpretados e complementados de dados de novas sondagens elétricas e perfis eletromagnéticos executados em locais estratégicos. O conjunto de dados geofísicos foram associados a dados de geologia de superfície e de poços para possibilitar o estabelecimento de um modelo geológico adequado para depois possibilitar a análise do problema ambiental.

A escolha dos métodos geofísicos justifica-se pelas possibilidades de utilização registradas na literatura. Os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético indutivo têm mostrado bons resultados na caracterização de áreas contaminadas, fornecendo informações sobre fluxo subterrâneo, localização dos resíduos e extensão da pluma de contaminação. A compilação e reinterpretação desses dados forneceu a base de informações que auxiliou na caracterização geológico-geoambiental da área bem como permitiu o estudo dos parâmetros IP.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

O crescimento urbano e industrial gera um aumento dos problemas ambientais. No entanto, por essa razão há uma conseqüente busca de novos métodos de análise do comportamento e possibilidades de preservação do meio ambiente. Isso resulta no aprimoramento das técnicas existentes e a utilização de novas ferramentas de investigação, que possibilitam análises rápidas e eficientes. Dentro deste contexto, os métodos geofísicos têm sido extensamente aplicados, pois possibilitam a investigação de uma série de características do meio físico e seu comportamento frente ao processo de contaminação de uma maneira rápida e a baixos custos.

Alguns métodos geofísicos vêm sendo utilizados para detectar e monitorar a contaminação gerada por líquidos percolados dos depósitos de resíduos industriais e urbanos. Devido às características químicas desses líquidos, que normalmente refletem em um aumento do parâmetro físico condutividade elétrica no local onde estão dispostos, contrastando com o meio natural, os métodos elétricos e eletromagnéticos são dos mais utilizados.

Uma informação de fundamental importância para a avaliação de problemas ambientais é a definição do formato e extensão da área comprometida pela contaminação. Exemplos de aplicação de geofísica no estudo da contaminação gerada por resíduos urbanos podem ser encontrados na literatura desde o final da década de 60 e início dos anos 70, sendo o método da eletrorresistividade amplamente utilizado (Kelly, 1976). O método eletromagnético indutivo passou a ser extensamente aplicado em estudos de detecção e monitoramento da poluição gerada por resíduos, a partir da década de 80 (Benson et al, 1982). Urish (1983)

discutiu as limitações da aplicação de sondagens elétricas verticais e caminhamento elétrico relacionadas ao estudo da contaminação do meio ambiente. Essas limitações, na época, eram: potência e precisão dos equipamentos, obstruções físicas para aplicação dos ensaios de campo, interferências elétricas, variações topográficas consideráveis e variações nas condições hidrogeológicas locais. Apesar das limitações existentes, o autor mostrou que o método da eletrorresistividade estava sendo usado com sucesso no mapeamento de pluma de contaminação por água salgada, resíduos líquidos de reprocessamento de urânio e chumbo.

Durante a década de 80, no Brasil, a aplicação da geofísica nesse campo de estudo foi difundida com mais frequência, devido a chegada do professor John P. Greenhouse, da Universidade de Waterloo, Ontário-Canadá. Com isso, vários trabalhos no Brasil foram realizados com a aplicação de métodos geofísicos, podendo-se citar o de Ellert et al. (1990). Estes autores aplicaram os métodos eletromagnético indutivo e eletrorresistividade no lixão da cidade de São Carlos – SP, com a finalidade de determinar a presença e extensão de qualquer pluma poluente, oriunda da deposição de lixo urbano. Concluíram que os métodos geofísicos se revelaram de grande aplicabilidade na identificação da presença e definição da extensão de plumas poluentes na subsuperfície.

Malagutti Filho et al. (1997), conseguiram bons resultados com a aplicação integrada de métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida, sísmica de refração e eletromagnético indutivo) em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Eles concluíram que dentro de suas limitações os métodos utilizados apresentaram um bom desempenho e o seu uso em conjunto propicia uma segurança maior na análise dos resultados.

Elis & Zuquette (1998) e Elis (1999) mostraram bons resultados na aplicação do método da eletrorresistividade com o uso de sondagens elétricas e caminhamento elétrico dipolo-dipolo no estudo de algumas áreas utilizadas para disposição de resíduos urbanos.

Braga et al. (1999) e Luiz et al. (1999) aplicaram o método da eletrorresistividade em áreas de disposição de resíduos industriais na cidade de Iracemápolis - SP e resíduos sólidos urbanos na cidade de Ananindeua – PA, respectivamente. Segundo Braga et al. o método geofísico utilizado neste tipo de estudo apresentou bons resultados a custos e prazos reduzidos. Para Luiz et al. a contaminação por churume é evidenciada pela redução drástica da resistividade.

Meju (2000), da Environmental and Industrial Geophysics Research Group – Universidade of Leicester – UK, apresentou um modelo de resistividade conceitual para aterros sanitários antigos com geração de churume e migração dentro do sistema de águas subterrâneas bi substrato granular e imediações. Para o outro o principal principio deste modelo é que o perfil de condutividade vertical atingirá valores máximos na zona de enriquecimento mineral próximo ao nível d'água e no fim deste caminho. O modelo integra conceitos oriundos da geotecnia, geoquímica, geomicrobiologia e hidroquímica, com a finalidade de desenvolver um sistema unificado para estudos em geotecnia e geoambiental empregando os métodos elétricos e eletromagnéticos.

Monteiro & Costa (2001) aplicaram os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético em um lixão na cidade do Rio de Janeiro - RJ. Segundo Monteiro & Costa, os métodos geofísicos utilizados proporcionaram a detecção da região onde

a pluma poluidora é mais proeminente e por conseguinte forneceu subsídios a locação de poços de monitoramento para auxiliar na recuperação desta área.

Bratus & Yabar (2005) caracterizaram três diferentes áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos na Itália, com resultados satisfatórios, através dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida.

Morales & Mendes (2001) realizaram um levantamento geofísico com imageamento elétrico, com a finalidade de delimitar a pluma de contaminação gerada por resíduos sólidos do Lixão de Aurá no Pará. Através da pesquisa geofísica na área de estudo, os autores concluíram que os recursos hídricos subterrâneos estão sendo atingidos pelo deslocamento superficial e subterrâneo do chorume.

No caso de estudos de áreas contaminadas, as pesquisas com o método da polarização induzida são relativamente recentes. Vogelsang (1995) apresenta alguns casos históricos de aplicação de caminhamento IP e resistividade em depósitos de resíduos, e mostra que a polarização induzida deve ser aplicada em casos onde se deseja detalhes sobre os materiais do depósito. Materiais e rochas eletricamente carregáveis, como por exemplo, restos de metais, vidros cerâmicos e papel impresso, podem ser detectados pelo método. Os resultados mostram que os valores anômalos de cargabilidade relativos aos resíduos são geralmente muito altos. Dentro da zona de resíduos, a variação dos valores de cargabilidade fornece mais detalhes que a resistividade. Isto é confirmado por Elis (2000) que diz que a cargabilidade tende a aumentar com o crescimento da concentração de sais, mas a partir de uma determinada concentração o comportamento se inverte, e os valores de cargabilidade tendem a serem muito baixos.

Stevanato et al. (2003) concluem, através de ensaios geofísicos realizados no aterro sanitário de Itajaí - SC, que a aplicação do método do imageamento elétrico conjugado a polarização induzida revelou-se extremamente eficaz no mapeamento de plumas contaminantes, delineando seus limites laterais e verticais, em função da associação de baixas resistividade (teores anômalos de cloreto) e baixas cargrabilidades (argilas e areias saturadas) na área contaminada.

Segundo Palma (2004), a magnitude do efeito de polarização induzida nas rochas depende da quantidade e tipo de argila presente, do índice de saturação da água e da salinidade dessa água. O tipo de argila define a quantidade de cargas presentes nas suas duplas camadas elétricas. O teor de argila aumenta a polarização, mas a partir de uma certa concentração a polarização decresce por causa da redução na densidade de disseminação. O índice de saturação em água também controla as características de disseminação. Uma saturação reduzida implica na desconexão de muitos elementos de circuito de arenito na rocha, diminuindo o efeito de IP.

É possível verificar que a aplicação integrada de métodos geofísicos continua sendo uma ferramenta de extenso uso em estudos relacionados as áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos (Moura, 2002; Dahlin et al., 2004; Porsani et al., 2004, Santos, 2005; Soupios et al., 2006).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Método da Eletrorresistividade**

A resistividade elétrica (e seu inverso, a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de correntes elétricas nos materiais, sendo que a condutividade em solos e rochas pode ser devida a presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, o que é denominado de condutividade eletrônica, ou devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, o que é denominado de condutividade eletrolítica.

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

- composição mineralógica
- porosidade
- teor em água
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imprensa possibilidade da aplicação de métodos em estudos ambientais e hidrogeológicos.

### 3.1.1 Bases teóricas

A aplicação da eletrorresistividade como meio de prospecção geofísica baseia-se na resposta dos materiais terrestres ao fluxo de corrente elétrica alternada a baixas frequências (tipicamente 0,03Hz a 3Hz, de acordo com Ward, 1990).

O método emprega uma corrente artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos, com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

De acordo com Ward (1990), para um eletrodo utilizado como fonte na origem de um sistema de coordenadas (Figura 1), em qualquer superfície esférica S, à distância r da origem, a corrente flui radialmente.

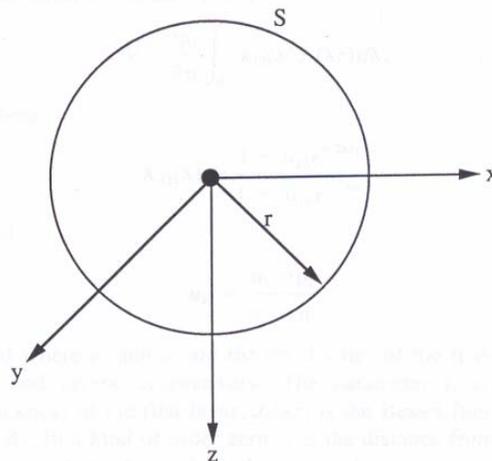


Figura 1 - Um eletrodo na origem O de um sistema de coordenadas. S é a superfície de uma esfera de raio r (Ward, 1990).

Como a área da superfície S é  $4\pi r^2$ , a densidade de corrente à distância r é dada por:

$$J_r = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde I é a intensidade de corrente.

Sendo  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  a resistividade isotrópica e homogênea, a lei de Ohm pode ser escrita na forma:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I \rho}{4\pi r^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

O potencial (ou voltagem)  $V$  a distância  $r$  do eletrodo é dada pela integral de  $E_r$  entre  $r$  e o infinito:

$$V \int_r^\infty E_r d_r = \frac{I \rho}{4\pi r} \quad (\text{Eq. 3})$$

Como os eletrodos estão dispostos na superfície do terreno e considera-se a resistividade do ar como infinita, o fluxo de corrente se dará no meio geológico que é comumente denominado de semi-espço. Um eletrodo  $C$  na superfície do semi-espço dá origem a um fluxo de corrente radial através de um hemisfério de raio  $r$  e área da superfície de  $2\pi r^2$  (Figura 2).

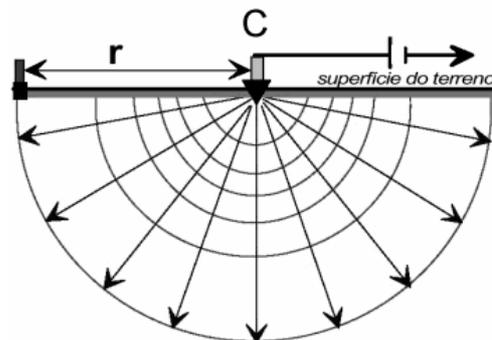


Figura 2 - Eletrodo C em um ponto do semi-espço e o fluxo radial de corrente.

Dessa forma a densidade de corrente para um eletrodo em um semi-espço homogêneo é

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

E o potencial é

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 5})$$

Esta equação fornece as relações fundamentais para a prospecção elétrica na superfície terrestre. No entanto, são necessários dois eletrodos para a transmissão de corrente ao semi-espaço, de forma que a corrente adentra a subsuperfície por um eletrodo e sai por outro, como é apresentado na Figura 3.

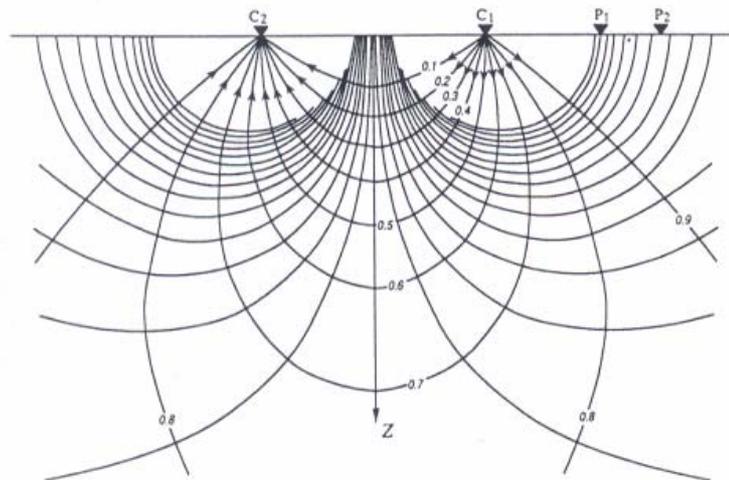


Figura 3 - Distribuição das linhas corrente e potencial para dois eletrodos de corrente na superfície de um semi-espaço homogêneo.

O potencial lido em  $P_1$  devido ao fluxo de corrente gerado por  $C_1$  e  $C_2$  é:

$$V_p = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

onde o sinal negativo no segundo termo da equação denota a mudança do sinal de corrente nos eletrodos  $C_1$  e  $C_2$  e onde  $r_1$  é a distância entre  $P_1$  e  $C_1$  e  $r_2$  é a distância entre  $P_1$  e  $C_2$ .

Na prática, o que se mede é uma diferença de potencial entre dois eletrodos de potencial, de forma que o arranjo é composto de quatro eletrodos. Para esse arranjo a diferença de potencial pode ser escrita como:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

onde  $r_3$  é a distância entre  $P_1$  e  $C_2$  e  $r_2$  é a distância entre  $P_2$  e  $C_2$ .

Para esse dispositivo de quatro eletrodos é convencional denominar os eletrodos de corrente de A e B e os eletrodos de potencial de M e N, sendo as distâncias utilizadas no ensaio de campo identificadas por essas convenções (Figura 4). Dessa forma, pode-se escrever  $AM = r_1$ ,  $BM = r_2$ ,  $AN = r_3$  e  $BN = r_4$ . A equação anterior pode ser escrita usando-se estas convenções:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

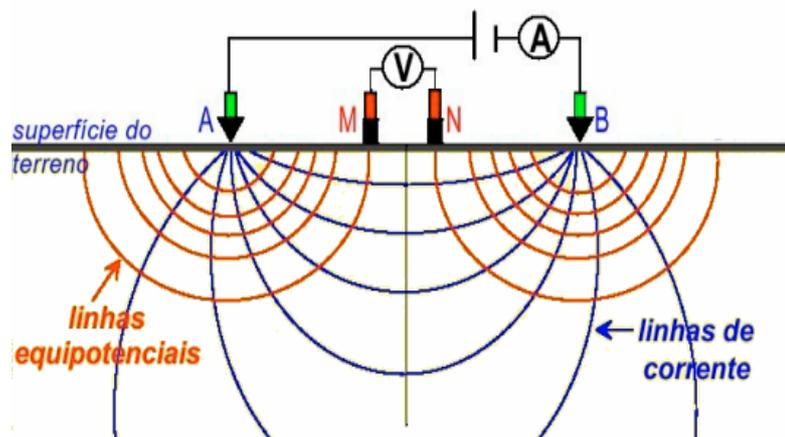


Figura 4 - Esquema de campo para determinação da resistividade.

Trabalhando-se com a equação anterior podemos isolar o termo  $\rho$  para calcular seu valor. Na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo e o valor calculado reflete uma média ponderada de todas as resistividades reais dos corpos e camadas investigados, de forma que o valor obtido é a resistividade aparente  $\rho_a$  para aquela posição dos eletrodos. O cálculo de  $\rho_a$  do meio investigado é então dado por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \text{ ohm.m (Eq. 9)}$$

$\rho_a$  = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico

$\Delta V$  = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

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

sendo K o fator geométrico que depende das posições dos eletrodos dado pela fórmula geral:

$$K = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \text{ (Eq. 10)}$$

O uso do método da eletrorresistividade no campo é baseado na capacidade de um equipamento introduzir uma corrente elétrica no subsolo, a partir de diferentes espaçamentos entre os eletrodos, dispostos na superfície do terreno (diferentes profundidades de investigação), e calcular as resistividades dos materiais geológicos a estas várias profundidades investigadas.

Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aplicação dos ensaios em campo. São divididas basicamente em técnicas de sondagem elétrica (SEV) e caminhamento elétrico (CE), dentro das quais existe uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. Normalmente, os ensaios de sondagem elétrica são aplicados quando é desejada uma informação pontual com observação da variação vertical do parâmetro físico e o caminhamento é aplicado quando o interesse é pelo estudo da variação lateral da resistividade em profundidade teoricamente constante.

A determinação da resistividade nas rochas pode ser feita em laboratório, em ensaios em amostras de rocha ou de testemunhos de sondagem, e “in situ”, ao longo

de furos de sondagem ou através de técnicas de medidas realizadas na superfície. Nesse último caso, deve-se atentar para o fato de que para uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade, a resistividade determinada pelo quadripólo AMNB na superfície será aparente, a medida que os eletrodos de corrente, em razão de um maior espaçamento, amostram mais de uma camada em subsuperfície. O valor encontrado será então influenciado pelas resistividades de todas as camadas investigadas.

Assim, tendo que o subsolo não se comporta como um meio homogêneo, a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) é a que expressa os resultados das medidas no método da eletrorresistividade, e é a que se toma como base para a interpretação. As variações nas medidas de resistividade aparente são interpretadas, então, como desvios em relação a um meio totalmente uniforme, em função da estratificação geológica do meio investigado (Gallas, 2000).

### **3.1.2. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)**

A técnica de sondagem elétrica vertical consiste, basicamente, na análise e interpretação de um parâmetro físico, obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigado, de maneira pontual, sua variação é em profundidade.

O arranjo de campo utilizado para os ensaios de sondagem elétrica vertical, neste trabalho, foi o denominado *Schlumberger* que utiliza quatro eletrodos, sendo 2 (dois) para injetar a corrente (A e B) e 2 para a leitura de diferença de potencial (M e N), todos dispostos no terreno de acordo com um mesmo alinhamento. O ponto de atribuição do ensaio é o centro geométrico do arranjo. A principal característica desse

arranjo é que a distância MN deve ser bastante pequena em relação a AB, procurando sempre satisfazer a relação  $MN \leq AB/5$ . De acordo com Orellana (1972), na prática, quando o sinal  $\Delta V$  medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realiza-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB e assim por diante, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial e mantendo a relação  $MN \leq AB/5$ . Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo. A Figura 5 abaixo ilustra o esquema de campo para o arranjo *Schlumberger*.

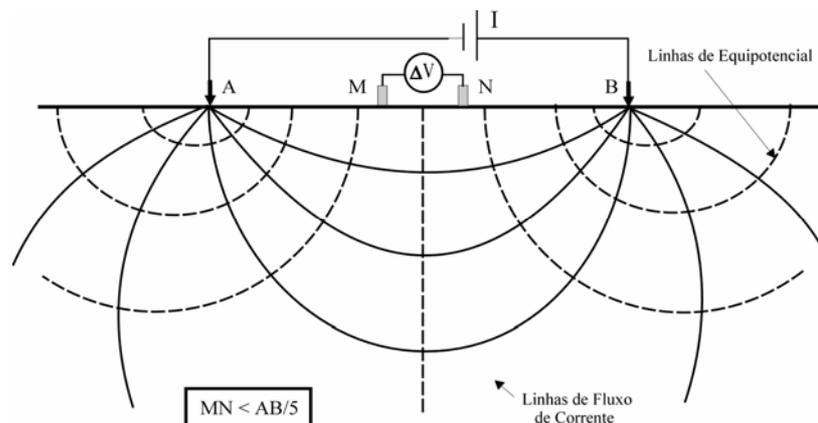


Figura 5 - Arranjo *Schlumberger*.

O valor da resistividade aparente é calculado a partir da expressão 1 e o valor da cargabilidade aparente – domínio do tempo (mV/V) é obtido diretamente no equipamento geofísico, apropriado para o desenvolvimento da metodologia.

Os valores de resistividade aparente obtidos são plotados em relação aos valores da distância  $AB/2$ , fornecendo a curva de resistividade aparente, a qual é passível de interpretação quantitativa por meio do uso de softwares apropriados. O processo consiste em interpretar as sondagens levando em consideração um modelo

geométrico isotrópico e homogêneo, onde a resistividade varia somente com a profundidade. A interpretação pode ser feita usando-se os métodos comparativos, direto e inverso. Na presente pesquisa empregou-se somente o método direto.

Na interpretação direta, admite-se um modelo inicial e calcula-se a curva teórica correspondente com o auxílio do programa computacional, comparando-se com a curva de campo. Nesse trabalho utilizou-se o software IPI (Moscou University, 2004).

Procurando criar um modelo mais confiável, busca-se um ajuste mínimo entre as curvas (curva teórica e curva de campo), modificando os valores dos parâmetros. É importante lembrar que esse modelo deve ser baseado com informações geológicas locais, sendo o ajuste controlado pelo intérprete.

### **3.1.3. Caminhamento Elétrico (CE)**

A técnica de caminhamento elétrico se baseia na análise e interpretação de um parâmetro físico, obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas.

O arranjo de campo utilizado para os ensaios de caminhamento elétrico, neste trabalho, foi o denominado *dipolo-dipolo*. Neste arranjo, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis teóricos obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontal quanto verticalmente.

As principais características do arranjo *dipolo-dipolo* são que o espaçamento entre os eletrodos são sempre iguais, isto é  $AB=MN=x$ , e normalmente utiliza-se um conjunto de dipolos de recepção, sendo a distância entre os dipolos de emissão um múltiplo da distância  $x$ , o que determina o nível teórico investigado.

A Figura 6 ilustra a disposição inicial desse arranjo ao longo de uma linha a ser estudada. Pode-se observar vários dipolos de recepção (MN) instalados na superfície do terreno. Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação. Portanto, quanto mais dipolos de MN instalados, maior será a profundidade de investigação.

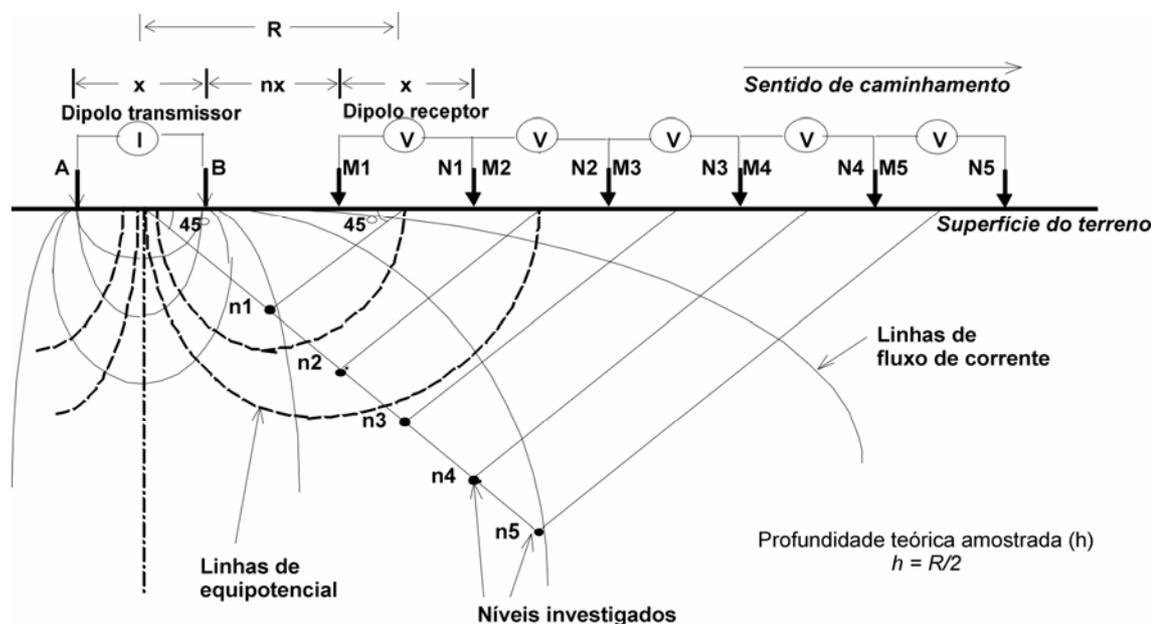


Figura 6 - Disposição inicial no campo do arranjo *dipolo-dipolo* – CE.

Entretanto, deve-se ressaltar que, como nesse tipo de arranjo, o potencial, à medida que nos afastamos do dipolo AB diminui sensivelmente, as leituras mais afastadas se tornarão difíceis de serem obtidas com precisão.

No sistema de plotagem dos dados, tem-se que o ponto de atribuição da leitura é tomado como sendo o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de  $45^\circ$  a partir dos centros desses dipolos. Após a plotagem de todos os parâmetros físicos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geolétrica aparente (resistividade e/ou cargabilidade), conforme ilustrado na Figura 7.

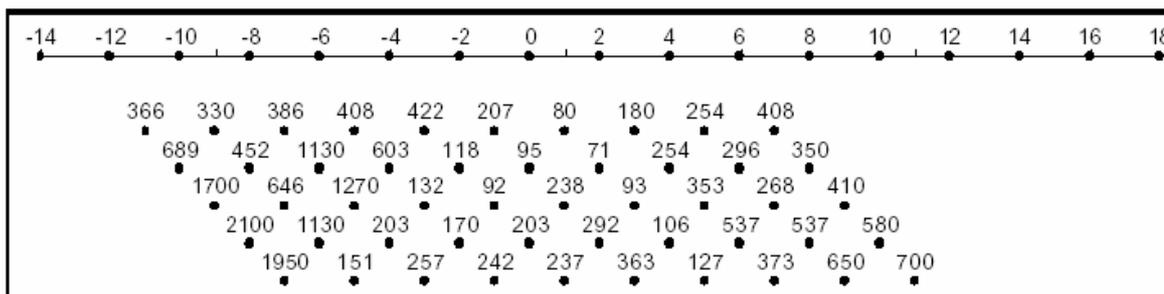


Figura 7 - Plotagem dos dados do arranjo de campo diplo-dipolo - CE

O termo adequado, para este tipo de seção, é a pseudo-seção de resistividade aparente. Na verdade não se tem uma seção real, pois as profundidades plotadas (níveis) correspondem a profundidades teóricas, e a resistividade calculada é aparente.

A interpretação dos dados pode se dar de forma qualitativa e quantitativa.

A interpretação qualitativa de seções de resistividade aparente procura relacionar as variações laterais de resistividade a estruturas. Neste tipo de interpretação, como a resistividade é aparente e sofre influência de todos os elementos vizinhos, é preciso cuidado, principalmente na definição da posição de corpos e estruturas verticais e subverticais. Apesar de a interpretação qualitativa apresentar limitações e requerer cuidados, nota-se, a partir da análise de trabalhos já realizados, que a técnica é viável para a solução de inúmeros problemas. O software utilizado para este tipo de interpretação, neste projeto, é o *Surfer 6.0* (Golden Software, 1996).

A técnica de interpretação quantitativa para pseudo-seções de resistividade obtidas através dos caminhamentos elétricos possibilitaram a criação de modelos 2D que visam determinar a distribuição espacial de camadas, corpos e estruturas com diferentes resistividades existentes no perfil estudado. Para este tipo de interpretação a modelagem utilizada, neste projeto, é a por suavização (*smooth*) as pseudo-seções

modeladas obtidas são apresentadas sob a forma de isolinhas de resistividade, que assumem as formas aproximadas dos corpos investigados. Para este processo, calcula-se a resposta de um semi-espço homogêneo para os dados obtidos em campo. O modelo 2D usado pelo programa divide a subsuperfície em uma série de blocos retangulares. O objeto do programa é determinar as resistividades dos blocos retangulares que irão produzir uma pseudo-seção de resistividade aparente concordante com os dados de campo, utilizando um processo de inversão baseado em uma variação do método dos mínimos quadrados. O modelo é então constituído a partir de uma seção dividida em células retangulares, formando uma rede. Cada célula terá, durante o processo de interpretação, uma única resistividade. De acordo com o os dados de campo, em que também são fornecidas informações sobre o arranjo de eletrodos utilizado, o programa simula a injeção de corrente e os potenciais nos eletrodos, sendo em seguida realizada a inversão dos dados de forma que as isolinhas de resistividade procurem definir com maior precisão e o formato das estruturas causadoras de anomalias. Os dados de campo são comparados com a pseudo-seção sintética resultante da simulação feita pelo programa, e o modelo é considerado satisfatório quanto mais se assemelham as pseudo-seções de campo e sintética. O software utilizado neste tipo de interpretação, para este projeto, é o *RES2Dinv* (Loke, 1999).

### 3.1.4. Equipamentos

Os equipamentos utilizados no método da eletrorresistividade consistem basicamente de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores para a corrente e a diferença de potencial geradas. A potência da fonte pode variar de centenas de watts até alguns kilowatts. O circuito emissor pode medir valores entre 5 e 500 mA, e o potencial normalmente lido no circuito receptor varia entre 10 mV a 20 V. Esses equipamentos podem trabalhar com corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência, preferivelmente menor que 60 Hz.

A Figura 8 mostra um dos equipamentos utilizados neste trabalho, o resistivímetro francês de marca *Iris*, modelo *Syscal R2*, que consiste de um conversor de voltagem e um sistema de emissão e recepção montados em uma única unidade.



Figura 8 - Equipamento para ensaios de resistividade *Iris Syscal R2*.

### 3.2. Método da Polarização Induzida (IP) no domínio do tempo

Este método baseia-se na medição das variações de voltagem em função do tempo. Ao se aplicar uma corrente elétrica no solo, cria-se uma diferença de potencial  $\Delta V$  primária; conseqüentemente, é provocada uma polarização do mesmo. A diferença de potencial primária ( $\Delta V_P$ ) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos, varia com o tempo na forma de uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ .

Esta curva liga a assíntota  $\Delta V_P$  em regime estacionário com assíntota zero após o corte da corrente. A amplitude de um valor  $\Delta V_{IP}(t)$  está diretamente ligada à maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo-se no efeito IP dos materiais da terra.

Analogamente, pode-se descrever o fenômeno da polarização induzida, como se o solo contivesse pequenos condensadores, carregados durante a emissão de corrente, descarregando-se após o corte. A curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ , que se carregariam durante o fluxo de corrente, poderia ser chamada então de curva de descarga IP (Figura 9).

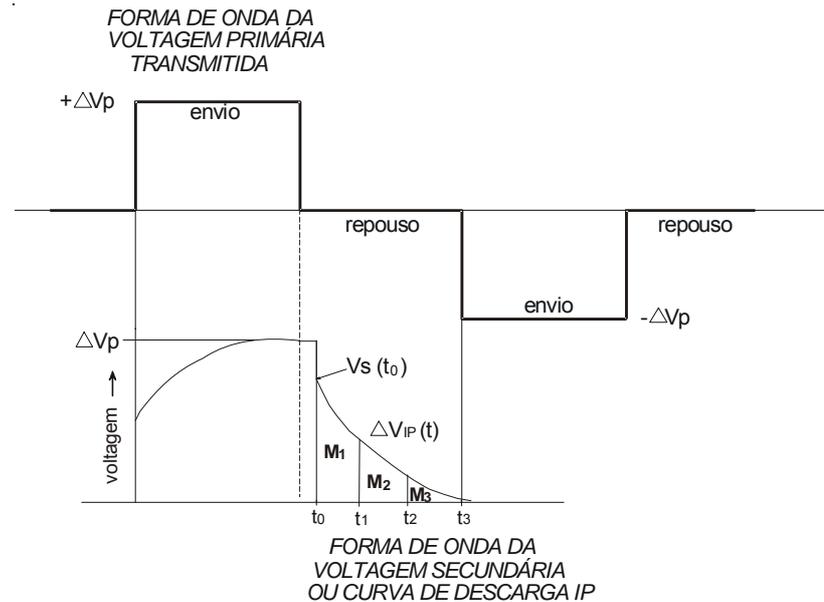


Figura 9 - Variação de  $\Delta V$  com o tempo. A linha pontilhada vertical indica o momento em que se corta a corrente e começa a descarga (Braga, 1997).

Conforme Orellana (1972), a explicação do fenômeno IP é comumente atribuída a dois fatores: polarização eletrônica e polarização de membrana.

A polarização eletrônica ocorre quando, na superfície de um corpo ou partícula metálica emersa em um eletrólito e submetida a uma corrente elétrica, tem-se a passagem da condução iônica para a condução eletrônica e vice-versa. O corpo ou partícula metálica se polariza e atrai os íons dispersos. Quando cortada a corrente, os íons tendem a voltar ao estágio inicial, gerando uma diferença de potencial secundária ou residual (Figura 10). Esse fenômeno é mais comumente usado na prospecção de minerais metálicos condutores.

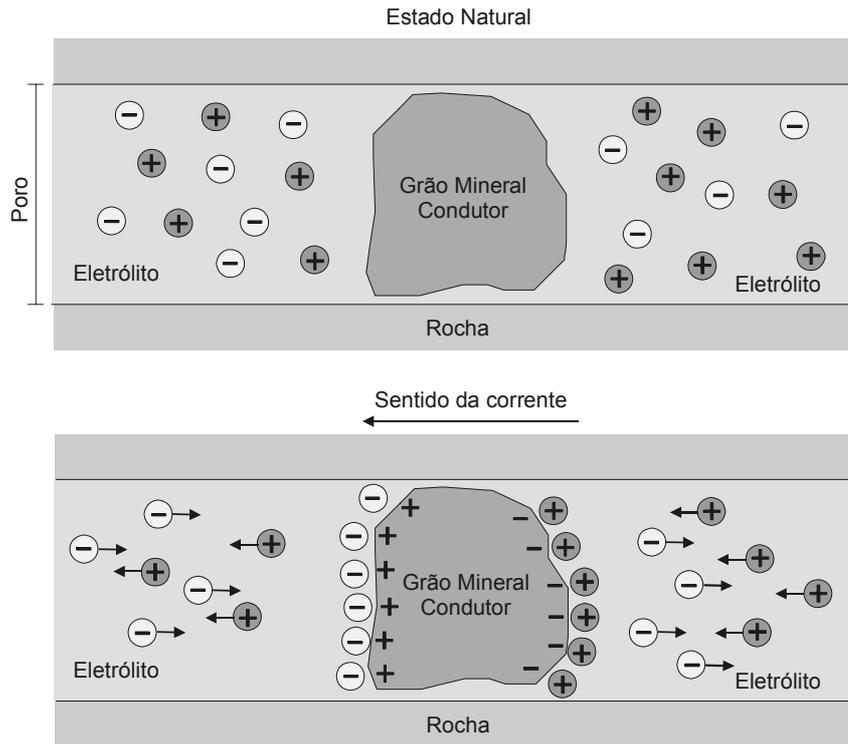


Figura 10 - Efeito de polarização eletrônica. Adaptado de Orellana (1974).

A polarização de membrana ocorre em rochas pobres em substâncias metálicas, em que a presença de minerais de argila promove uma mobilidade dos íons dispersos no eletrólito. Os minerais de argila são naturalmente carregados com cargas negativas que vão atrair e formar uma “nuvem catiônica” próxima a eles. Quando introduzido um campo elétrico os íons tendem a se mobilizar. Essa nuvem catiônica funciona como uma espécie de membrana semipermeável, impedindo a passagem e causando a concentração de ânions próxima a elas.

Ao cessar o campo elétrico, estas cargas tendem a restabelecer o equilíbrio inicial, gerando uma sobretensão residual que leva um tempo para desaparecer (Figura 11).

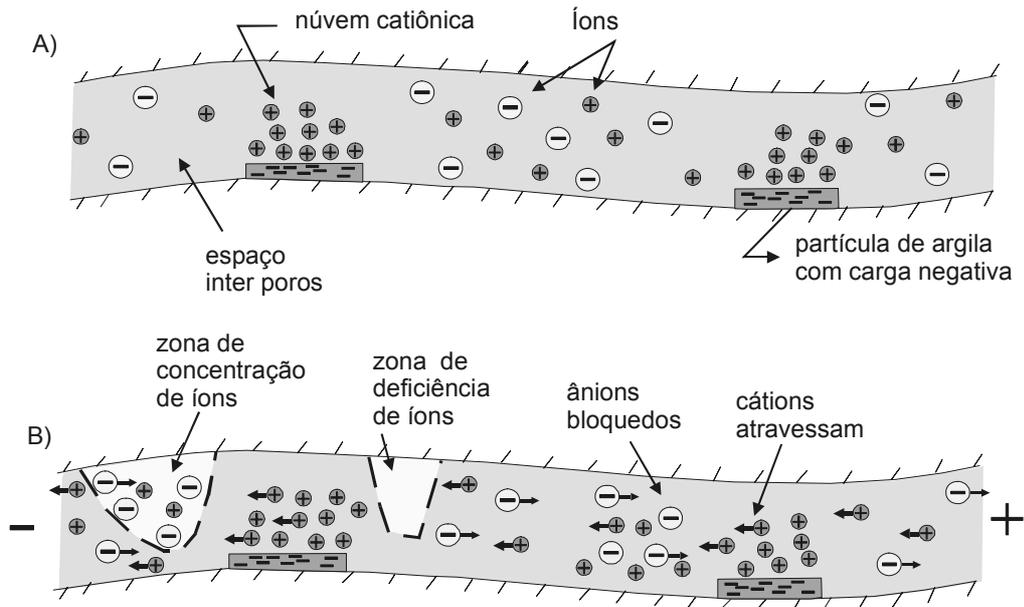


Figura 11 - Efeito de polarização de membrana. Adaptado de Sumner (1976).

O parâmetro medido no IP domínio do tempo é a cargabilidade ( $M$ ), que é definida pela integração da curva de descarga durante um intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ , dada por:

$$M = \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP}(t) dt \quad (\text{Eq. 11})$$

onde  $M$  é medida em mV/V (milivolt por Volt) (Sumner, 1976).

### 3.2.1. Polarização Induzida Espectral – Parâmetros Cole-Cole

O método da polarização induzida espectral (SIP) envolve uma série de técnicas vistas como complementares às da resistividade e cargabilidade dos tradicionais levantamentos de IP. Tal método pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da frequência ou do tempo.

O efeito IP tem sido aceito no meio científico e estudado através do modelo de impedância Cole-Cole, apresentado no trabalho pioneiro de Pelton (Pelton et al.,

1978). Este modelo tem sido extensivamente testado e reconhecido como confiável. Pelton sugere que a impedância complexa para uma simples fonte de polarização induzida pode ser expressa como:

$$Z(\omega) = R_0 \{ 1 - M [ 1 - 1 / 1 + (i \omega \tau)^c ] \} \text{ (Eq. 12)}$$

Onde:

$Z(\omega)$  - impedância complexa ( $\Omega.m$ )

$R_0$  - resistividade aparente ( $\Omega.m$ )

$M$  - cargabilidade (volts/volt)

$\tau$  - constante de tempo (s)

$\Omega$  - frequência angular ( $s^{-1}$ )

$c$  - o expoente (adimensional)

$$i = \sqrt{-1}$$

A impedância complexa depende da resistividade  $R_0$ ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira  $M$ ); da constante de tempo  $\tau$ , e do expoente  $c$ , os quais descrevem as formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da frequência.

A cargabilidade ( $M$ ) é a voltagem residual a qual pode ser vista imediatamente após o cancelamento de um pulso transmitido (Siegel, 1959), esta possui uma escala de interesse de 0 a 1V/V (ou 1000 mV/V). Na prática esta raramente excede 500 mV/V.

A constante de tempo ( $\tau$ ) e o expoente ( $c$ ) são propriedades físicas mensuráveis as quais descrevem o modelo de decaimento no domínio de tempo ou no domínio da frequência. A escala de interesse da constante de tempo se dá no intervalo de  $10^{-3}$  s

a  $10^4$  s. No entanto, para obter o IP convencional, a constante de tempo tem sido mostrada numa escala de aproximadamente 0,01 até 100 s. Para alvos convencionais de IP, a constante de tempo ( $\tau$ ) está relacionada com a granulometria dos minerais polarizáveis.

O expoente ( $c$ ) tem mostrado uma escala de interesse de 0,1 a 0,5, sendo o valor mais utilizado e que é normalmente fixado o de 0,25. Este relaciona-se a uniformidade de grãos do alvo (Pelton et al., 1978).

Os parâmetros Cole-Cole espectral podem ser obtidos a partir de ensaios no domínio do tempo, nos quais suas medidas de IP são feitas através de aproximações indiretas (Johnson, 1984). Os valores de  $c$  e  $\tau$  são comparados a um conjunto de curvas modelos de decaimento, e após realizados os melhores ajustes, é determinada a curva preferencial de decaimento e são estimados valores que possibilitam o cálculo da cargabilidade.

O SIP é primeiramente utilizado para definir a textura da mineralização; do solo, em subsuperfície, relacionando-se a constante de tempo do efeito IP medido, com a granulometria. Assim,  $\tau$  é pequeno em granulação fina e mais elevado em granulação grossa. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstram também que a discriminação espectral entre solos mais compactados a menos compactados, não dependem da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do solo. Após a remoção das distorções espectrais provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinado-se os quatro parâmetros espectrais ( $R_0$ ,  $M$ ,  $\tau$  e  $c$ ), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajusta aos dados de SIP, além dos erros médios quadráticos da cargabilidade verdadeira.

### 3.2.2. Equipamentos e técnicas de ensaio

As medidas de IP normalmente são realizadas de forma muito semelhante as de resistividade aparente, podendo analisar as diferenças de polarizabilidade do meio no sentido vertical (Sondagem IP), como também no sentido horizontal profundidades constantes (Caminhamento IP). Os equipamentos utilizados para os ensaios de IP normalmente fazem simultaneamente medidas de resistividade, pois os dados utilizados para medir o efeito IP são os mesmos usados para calcular a resistividade.

Tanto no caso de sondagem como no caminhamento IP, os dispositivos eletrônicos são os mesmos aplicados em ensaios de eletrorresistividade, já descritos anteriormente. Os ensaios de caminhamento IP são mais utilizados que as sondagens, e os dispositivos mais aplicados são o dipolo-dipolo e o polo-dipolo. Para as sondagens de IP são principalmente utilizados os arranjos Schlumberger e Wenner.

O equipamento utilizado para realização de medidas de IP domínio do tempo compreende uma unidade de emissão de corrente elétrica acoplado a um gerador (necessário para a emissão de correntes suficientemente altas para que seja possível a análise da curva de descarga) e uma unidade receptora que executa os trabalhos de captação das tensões geradas, compensação do potencial espontâneo (pois como os parâmetros de interesse são tensões residuais da curvas de descarga, o potencial espontâneo é um fator indesejável) e a sincronização automática, através dos

eletrodos, ao conjunto de emissão. No presente trabalho, o procedimento foi a aplicação de caminhamento dipolo-dipolo com medidas no domínio do tempo, sendo utilizado um conjunto transmissor TSQ-3 de 3KW de potência e um receptor IPR-

12 digital, todos da Scintrex canadense. Esse conjunto de equipamentos é apresentado na Figura 12.



Figura 12 - Conjunto transmissor TSQ-3 (transmissor + gerador) de 3KW de potência e receptor IPR-12 digital da Scintrex.

Os dados de cargabilidade são normalmente interpretados juntamente com os dados de resistividade, utilizando os mesmos softwares. A interpretação conjunta IP/resistividade busca refinar a resposta geofísica frente ao problema geológico, diminuindo a ambigüidade. Em áreas com problemas de contaminação pode-se identificar zonas de diferentes texturas (Braga, 1997) e também de maior concentração de contaminantes, onde pode ocorrer a infiltração de líquidos percolados nas camadas de solo (Rosqvist et al., 2003).

Para a estimativa dos parâmetros Cole-Cole, o receptor IPR-12 utilizou o procedimento de melhores ajustes da curva de decaimento, segundo o método de Johnson (1984). Porém o valor de parâmetro dependente da frequência  $c$  é fixado em  $c=0,25$  (que responde bem a maioria dos casos de distribuição de

tamanho do grão mineral) e a constante de tempo é medida em valores binários (potência de 2) no intervalo de  $2^{-14}$  a  $2^{11}$  para o período de tempo de 2s. Dessa forma, a variação da constante medida responde para textura fina com menores valores e o inverso para textura mineral mais grosseira (Scintrex, 1995).

Neste projeto os dados de IP foram coletados com empilhamento (stacking) mínimo de 5 leituras e eletrodos de potencial não polarizáveis. Para a interpretação dos dados de IP, que objetiva avaliar o potencial de utilização dos parâmetros cargabilidade e constante de tempo em estudos de depósitos de resíduos urbanos, serão estabelecidas algumas diretrizes para se trabalhar somente com dados confiáveis. Serão considerados confiáveis dados nos quais a resistência de contato nos eletrodos de potencial for menor que 5 Kohm e potencial primário superior a 2 mV. Embora pareça muito baixo esse valor, para áreas de resíduos, com valores de resistividade entre 1 e 5 ohm.m, mesmo com altos valores de corrente não se obtém valores maiores de voltagem primária para os dipolos mais distantes. De acordo com Sumner (1976) esses cuidados visam garantir dados de boa qualidade.

### **3.3. Método Eletromagnético Indutivo**

O método eletromagnético indutivo caracteriza-se pelo uso de equipamentos de operação muito simples e rápida e de baixo custo, o que tem levado a uma extensa aplicação do método em estudos ambientais como mapeamento de intrusões salinas, plumas de contaminação, cavidades em rochas carbonáticas, exploração arqueológica, entre outros. O equipamento mede diretamente a condutividade dos materiais geológicos com base nos princípios da indução eletromagnética.

### 3.3.1. Base teórica

Os campos eletromagnéticos têm dois componentes diretamente mensuráveis: os campos elétrico e magnético que, no espaço livre podem ser descritos em termos de vetores de intensidade de campo E e H, ou de vetores de densidade de fluxo D e indução magnética B. Esses campos são funções da posição (r, x, y, z) e do tempo t (segundos), ou da frequência f (Hz).

O campo EM é considerado como uma manifestação da distribuição e comportamento de cargas elétricas. Essa distribuição é dada pela lei de Coulomb, descrita na forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{\epsilon}_0 \vec{E} = \rho \quad (\text{Eq. 14})$$

O fluxo de corrente é descrito pelo vetor densidade de corrente elétrica J. Ele gera um campo magnético ao seu redor, conforme a lei de Ampère. A densidade de corrente J depende linearmente da intensidade do campo elétrico, conforme a lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 15})$$

Sendo  $\sigma$  a condutividade elétrica.

O acoplamento dos campos E e H são descritos pelas leis de Ampère e Faraday. A Lei de Ampère descreve que o campo magnético é produzido por correntes elétricas.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{Eq. 16})$$

onde  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  é a corrente de deslocamento e J é a densidade de corrente.

Na Lei de Faraday o campo elétrico (E) é produzido pela variação da indução magnética (B) em relação ao tempo.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 17})$$

Para prospecção EM em baixas frequências, o campo magnético gerado pelo termo da corrente de deslocamento é usualmente desprezível. No método EM indutivo, faz-se circular uma corrente alternada em uma bobina, que por sua vez cria um campo magnético que induz correntes em superfície. Essas correntes, interagindo com o meio geológico terão como resposta um segundo campo magnético que traz informações sobre o terreno.

### 3.3.2. Equipamentos

O equipamento utilizado neste trabalho é o *EM-34*, da Geonics. É composto por duas bobinas: uma transmissora Tx e outra receptora Rx. Acoplada a bobina transmissora existe um módulo de controle e emissão de corrente elétrica MC, alimentado por uma bateria. À bobina receptora está acoplado um módulo de leitura ML. Os módulos são ligados por um cabo de referência CR. Na Figura 13 pode-se observar o equipamento *EM-34*.



Figura 13 - Equipamento *EM-34*.

A disposição das bobinas é possível de duas maneiras, o que influi na profundidade teórica de investigação. Com as duas bobinas dispostas na horizontal e

a corrente elétrica circulando dentro destas, o campo magnético é posicionado na vertical – essa disposição é denominada de dipolo vertical (vertical dipole, VD). Quando as bobinas estão na disposição vertical o dipolo magnético está na horizontal (horizontal dipole, HD).

As frequências de operação do *EM-34*, bem como as profundidades de investigação, variam de acordo com a disposição e o espaçamento entre as bobinas, o que resulta nas relações apresentadas na Tabela 1, abaixo.

<b>Espaçamento entre as bobinas</b>	<b>Frequências de Operação</b>	<b>Profundidade de exploração para Dipolo Horizontal</b>	<b>Profundidade de exploração para Dipolo Vertical</b>
10 m	6,4 kHz	7,5 m	15 m
20 m	1,6 kHz	15 m	30 m
40 m	0,4 kHz	30 m	60 m

Tabela 1 - Espaçamento entre bobinas, frequência de operação e profundidade de investigação de acordo com a disposição das bobinas.

O princípio de operação do método, baseado na descrição de Sheriff (1989), está esboçado na Figura 14. Uma corrente alternada é circulada na bobina transmissora, que vai gerar um campo magnético primário  $H_p$ , ortogonal a disposição da bobina. Esse campo magnético primário vai induzir correntes elétricas no subsolo. Passando por um condutor, essas correntes vão dar origem a um campo magnético secundário  $H_s$ , que será lido pela bobina receptora, juntamente com o campo magnético primário.

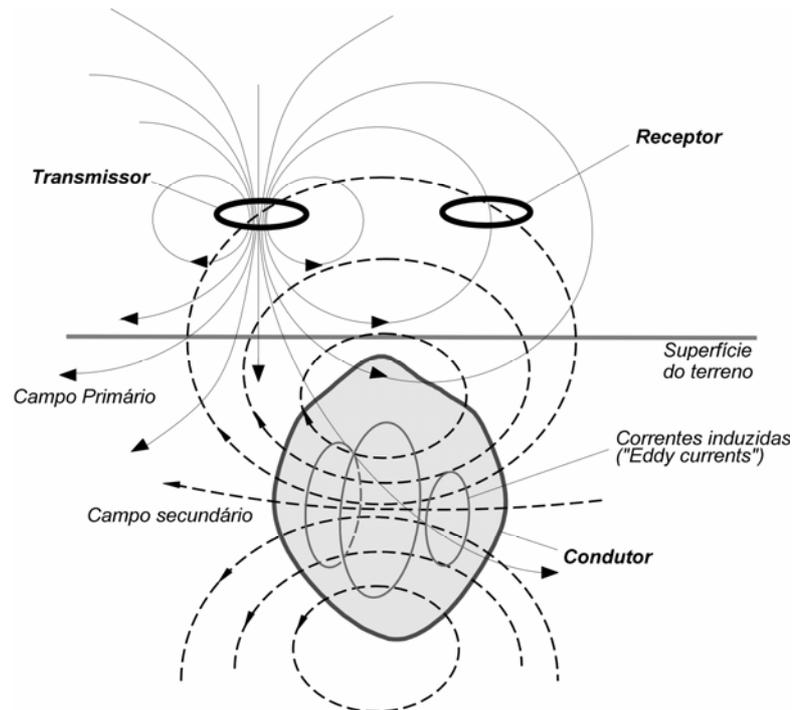


Figura 14 - Princípio de indução eletromagnética (modificado de Sheriff, 1989).

A razão do espaçamento entre as bobinas ( $s$ ) dividido pelo skin depth ( $\delta$ ) é conhecido como o “número de indução” ( $B$ ). Quando o número de indução é muito menor do que 1, então a razão entre  $H_s$  e  $H_p$  no receptor é diretamente proporcional à condutividade aparente ( $\sigma_a$ ). Nestas condições, conhecidas como *operação a baixo número de indução* (McNeil, 1980), o valor de condutividade elétrica aparente do terreno pode ser calculado pela equação:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \text{ (Eq. 18)}$$

onde:

$\sigma_a$  = a condutividade aparente ( mSm / m)

$\omega$  =  $2\pi f$ , sendo  $f$  (Hz)

$\mu_0$  = permeabilidade magnética no vácuo

$s$  = espaçamento entre as bobinas (m)

Os ensaios de campo são realizados geralmente em perfis, que, devido a praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são conduzidos com muita rapidez. Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, os equipamentos são bastante limitados para a execução de sondagens.

Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas. A interpretação desses dados é qualitativa, porém existem, em desenvolvimento, softwares para quantificação desses dados.

A partir da década de 80 o método eletromagnético indutivo passou a ser extensamente aplicado em estudos de detecção da poluição gerada por resíduos industriais e urbanos. Os equipamentos EM-31 e EM-34, que são os mais conhecidos e utilizados dentro do método eletromagnético indutivo, medem diretamente a condutividade do terreno em profundidades teóricas pré-estabelecidas. Dessa forma, como na maioria dos casos a presença de poluentes causa um aumento na condutividade elétrica, esses podem ser rapidamente detectados e mapeados. De acordo com McNeil (1990), uma adição de 25 ppm de material na água subterrânea causa um aumento da condutividade em aproximadamente 1 mS/m. Convém lembrar que em casos de poluição por compostos orgânicos essa regra não vale, pois estes não causam aumento de condutividade no local. Em contaminação gerada a partir de aterros sanitários o método eletromagnético indutivo mostra-se como uma ferramenta rápida e de baixo custo que possibilita um mapeamento da área de influência dos poluentes.

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Ribeirão Preto (SP) está posicionada na longitude aproximada de  $47^{\circ} 50'W$  e latitude  $21^{\circ} 10'S$  (Figura 15). Topograficamente se localiza em uma depressão onde as altitudes variam de 500 a 650m. O relevo está condicionado ao entalhamento realizado por três cursos d'água principais, Rio Pardo, Ribeirão da Onça e Mogi-Guaçu, para os quais correm, quase perpendicularmente, seus afluentes.

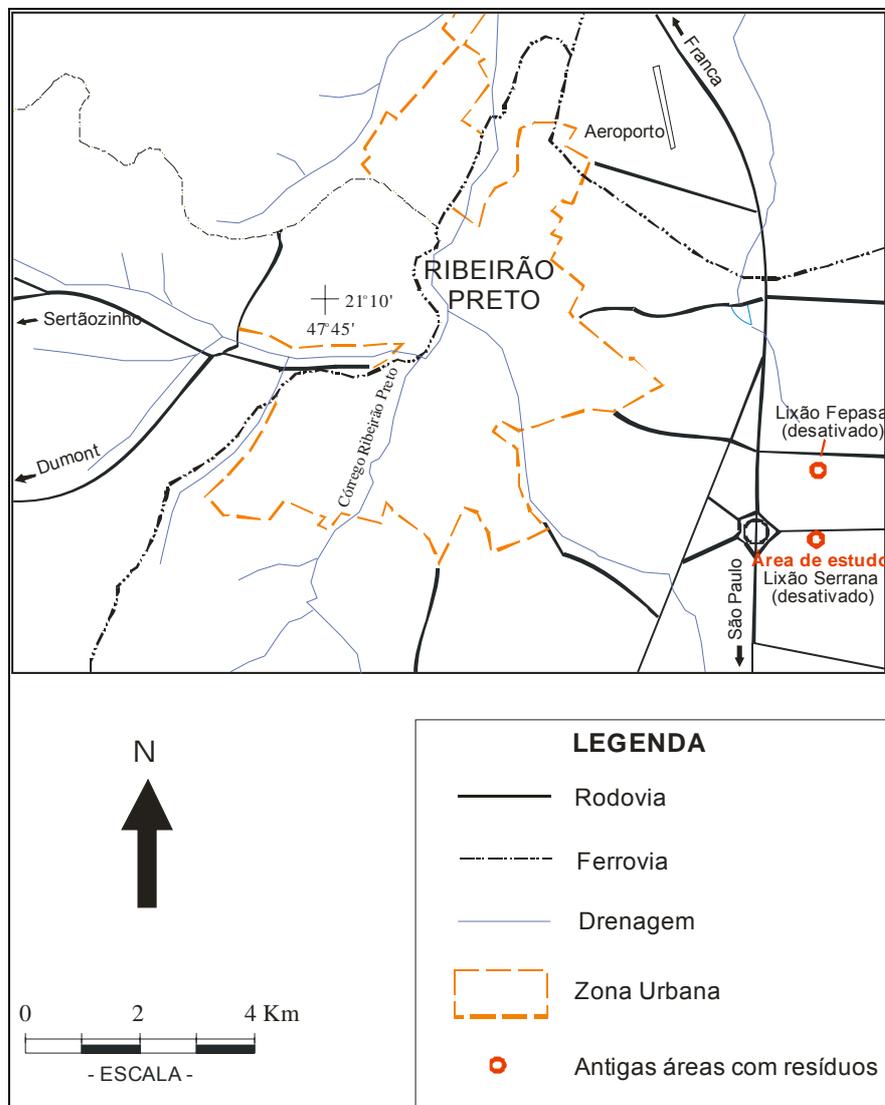


Figura 15 – Mapa de localização da região de Ribeirão Preto.

No local de estudo deste projeto, o Lixão de Serrana foram dispostos inadequadamente resíduos sólidos domésticos e hospitalares entre 1975 e 1988, totalizando um volume de cerca de 600.000 m<sup>3</sup>, em duas cavas alongadas de cerca de 300 m de comprimento por 40 a 60 m de largura (Figuras 16 e 17). O lixão encontra-se na área de afloramento de arenitos e diabásios, isto é, na área de recarga do aquífero Botucatu/Pirambóia. A profundidade da zona saturada no local é de cerca de 20 m. Resultados de trabalhos anteriores no local sugerem dois sentidos de fluxo de águas subterrâneas, para NE e WNW (Elis, 1999). Esse comportamento bidimensional do fluxo deve-se ao fato da área ser um divisor topográfico.

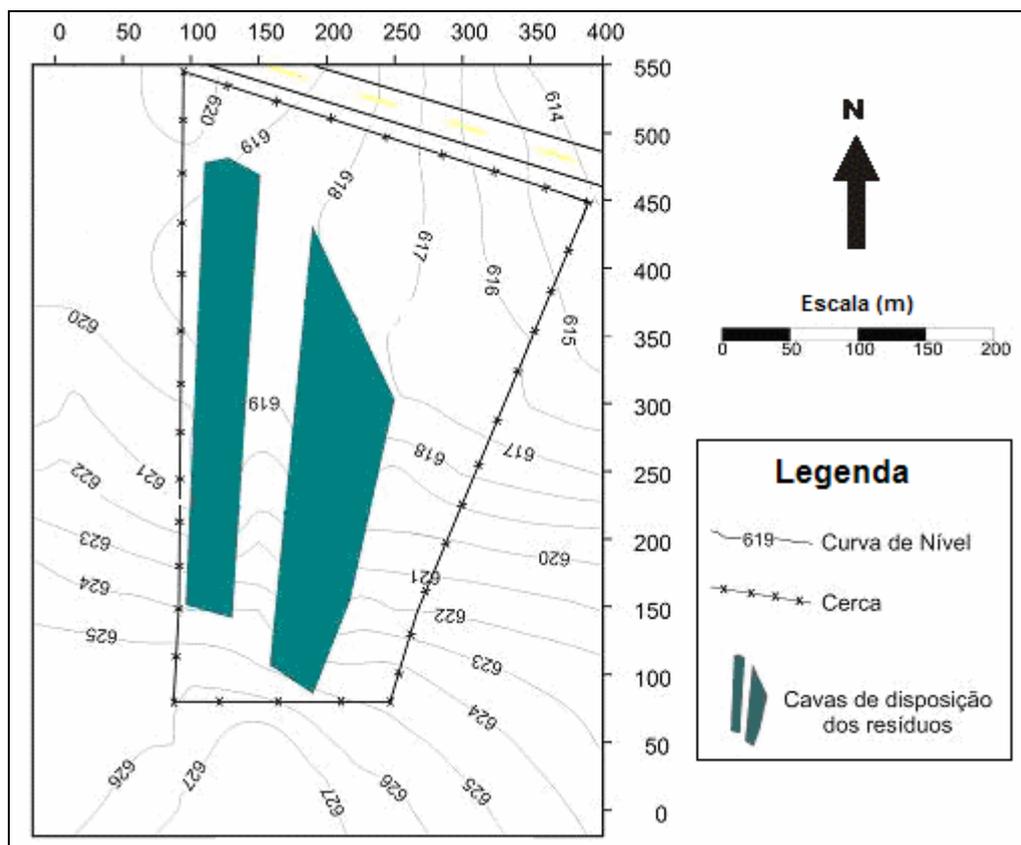


Figura 16 - Posição das cavas na área do Lixão.

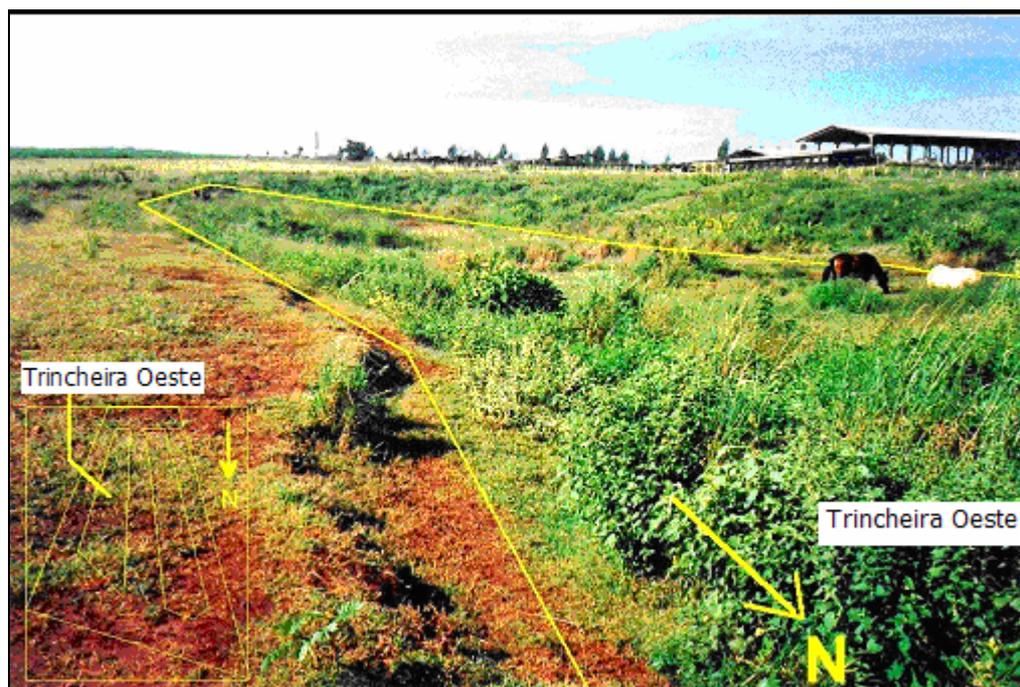


Figura 17 – Área de estudo - antigo Lixão de Serrana, setembro / 2005.

#### 4.1. Geologia e Hidrogeologia local

O município de Ribeirão Preto encontra-se está localizado na região N-NE da Bacia intracratônica do Paraná. No município afloram apenas sedimentos do Grupo São Bento e depósitos cenozóicos.

De acordo com o estudo desenvolvido neste projeto, serão descritas de forma resumida as unidades estratigráficas do Grupo São Bento, baseado nos trabalhos de Davino (1990), Costa & Ferreira (1997) e no mapa geológico do estado de São Paulo, IPT (1981).

O Grupo São Bento, constituído pelas formações Pirambóia (TRJp), Botucatu (Jkb) e Serra Geral (Jksg) apresentam os melhores aquíferos da Bacia do Paraná.

Da base para o topo, de forma resumida, as formações aflorantes são as seguintes:

Fm. Pirambóia - essa formação, de origem fluvial, é constituída por arenitos avermelhados de granulação fina e média e grãos hialinos, sendo observados na sua

parte basal a ocorrência de arenitos conglomeráticos. O teor de silte e argila é da ordem de 20%. A espessura máxima é próxima de 160 m. Em toda a área de afloramento do aquífero desta formação, como a Fm. Botucatu, ocorrem intrusões de diabásios.

A estratificação é predominantemente plano-paralela, com alternância de lâminas arenosas e siltícos-argilosas. A espessura total desta formação é da ordem de 160 m.

As características litológicas indicam a formação em um ambiente úmido, oxidante, predominantemente fluvial, com canais meandantes e planícies de inundações. Em termos de idade, a Formação Pirambóia é reportada por alguns autores como pertencente ao Mesozóico / Jurássico Superior a Triássico Superior.

Fm. Botucatu – sua gênese está relacionada a ambiente desértico, sendo suas rochas constituídas por arenitos avermelhados de granulação fina a média, podendo, em menor quantidade, possuir frações finas a grossas, com grãos foscos bem selecionados, apresentando alta esfericidade. Arenitos médios a conglomeráticos ocorrem sob a forma de lentes na base da formação.

O teor de silte e argila gira em torno de 5%. Essa formação aflora a leste de Ribeirão Preto, a oeste mergulha subjacente aos basaltos, sugerindo aí as condições de aquífero confinante.

Predomina na Formação Botucatu a estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte. A espessura da formação varia entre 60 a 150 m.

A Formação Botucatu repousa sobre a Formação Pirambóia através de um contato gradual ou localmente brusco. O contato com os derrames basálticos sobrepostos da Formação Serra Geral é por discordância ou interdigitação.

Essa formação foi depositada no período compreendido entre o Jurássico Médio / Superior e o Cretáceo Inferior.

Fm. Serra Geral – essa formação, de composição basáltica, tem origem em atividades magmáticas fissurais como também em processos magmáticos subterrâneos, que deram origem a sills, diques de diabásio e lacólitos.

Os basaltos são de cor cinza escura a negra, textura afanítica e estrutura maciça. Intercalados nessas rochas, ou mesmo recobrimdo-as, pode ocorrer camadas sedimentares da Fm. Botucatu. São caracterizadas por intenso faturamento. O armazenamento de água subterrânea neste caso está relacionado às fissuras. A sua espessura cresce para oeste, mas seu comportamento não é homogêneo devido às intrusivas.

O vulcanismo ocorreu entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior.

Sedimentos Cenozóicos – Estão representados no município de Ribeirão por sedimentos aluvionares, nos quais predominam areias incosolidadas de granulometria variável, argilas e cascalhos fluviais; e por sedimentos coluvionares, arenosos e argilosos, associados a encostas.

A Figura 18 caracteriza a geologia regional da região de Ribeirão Preto.

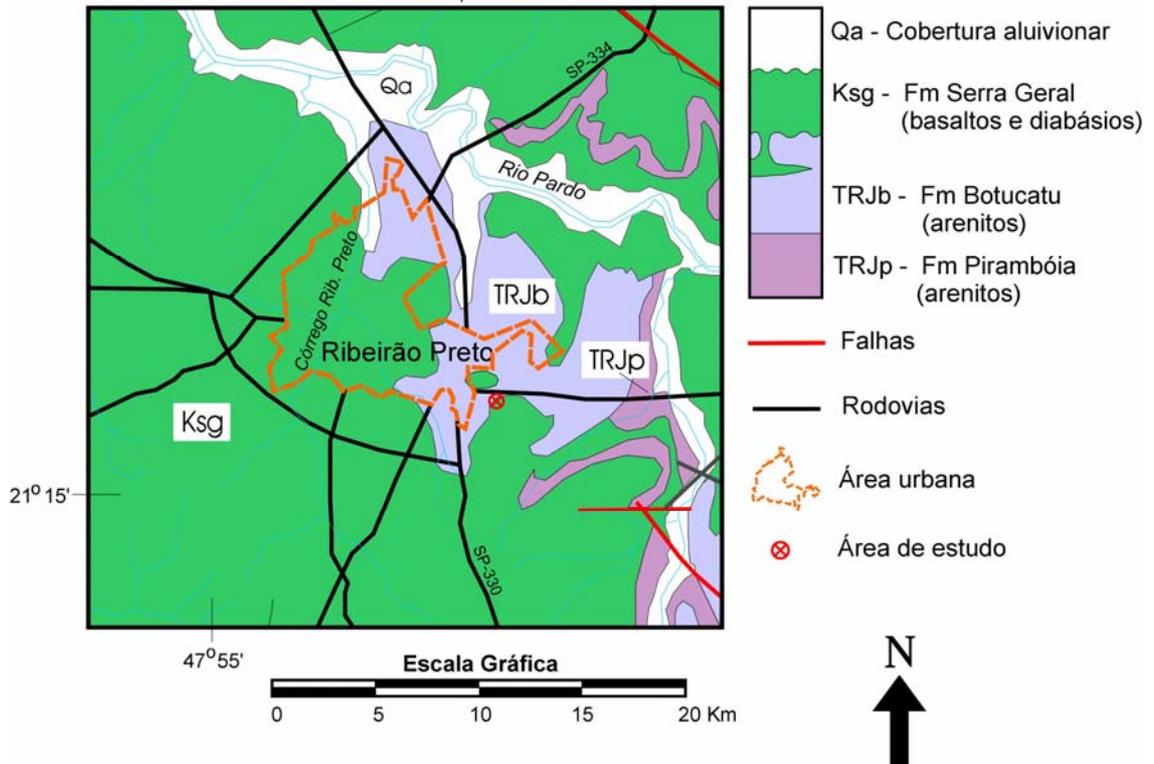


Figura 18 - Mapa geológico da região de Ribeirão Preto – SP (Elis, 1999).

Como modelo hidrogeológico esse sistema de aquíferos é considerado muito complexo, pois existe um fluxo vertical entre aluviões, Fm. Serra Geral, Fm. Botucatu e Fm. Pirambóia e, os fluxos horizontais dominantes são perturbados pela grande quantidade de estruturas intrusivas (diabásios que cortam as Formações Botucatu e Pirambóia). Essa situação ocorre na área de estudo, sendo também objetivo desse trabalho integrar as informações dos poços existentes e da geofísica para uma melhor interpretação do contexto geológico local. Cabe destacar que a cidade de Ribeirão Preto é totalmente abastecida por águas subterrâneas através de vários poços instalados, principalmente, nos aquíferos Botucatu / Pirambóia e Serra Geral.

## 5. ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho teve como foco caracterizar melhor a geologia local e assim possibilitar uma análise mais acurada do problema geoambiental na área do Lixão de Serrana. Para isso, foi necessária a utilização de um grande volume de informações e dados geofísicos de diferentes métodos.

Foram analisados dados elétricos: 8 (oito) sondagens elétricas verticais (SEV) e 3 (três) caminhamentos elétricos (resistividade e IP); e eletromagnéticos: 13 (treze) caminhamentos eletromagnéticos.

A partir dos dados das sondagens elétricas verticais (SEV) associadas as informações dos poços de investigação direta instalados no local foram montados perfis geoelétricos pontuais e perfis longitudinais e transversais a área. Desta forma, pôde-se obter a caracterização geral da área quanto à geologia e também verificar a diferenciação e posição das cavas.

A partir dos dados dos caminhamentos elétricos (ER) caminhamentos elétricos (resistividade e polarização induzida) foram obtidas seções 2D para entender as relações entre os resíduos e meio natural nos limites do lixão.

Com os dados de caminhamentos eletromagnéticos (EM) foram confeccionadas pseudo-seções e mapas de caracterização geral, em diferentes profundidades, utilizando os dados de todas as linhas, podendo assim obter informações do comportamento da pluma de contaminação da área como um todo.

Para a interpretação da geologia as informações geofísicas foram integradas a informações de poços existentes na área e proximidades dentre outras.

### **5.1. Dados de investigações diretas**

Dados de informações direta, como poços de monitoramento de água, poços de coleta de chorume, sondagens a trado e ensaios de CPT (cone penetration test) foram disponibilizados pela Prefeitura de Ribeirão Preto. As informações deste conjunto de dados foram utilizadas para a interpretação dos dados elétricos e eletromagnéticos, auxiliando, dessa forma, na caracterização da área quanto a geologia e o mapeamento da pluma de contaminação.

Abaixo estão descritas as informações dos dados de investigações diretas.

#### Poços de Monitoramento de água

Na área existem 8 (oito) poços de monitoramento de água, no entanto foram recuperadas informações apenas de 6 (seis) destes. A descrição de 4 (quatro) poços, os P3, P6, P17 e P19 e o nível d'água (NA) de 2 (dois) o P2 e P4. Os poços estão dispostos tanto ao Norte da área (P2, P3 e P17) quanto mais ao Sul da área, nas regiões próximas as cavas (P6 e P17).

Estes poços apresentam um perfil geológico equivalente em todos os diferentes pontos investigados ao logo da área, sendo compostos por uma camada superficial de colúvio argilo-arenoso, uma segunda camada de basalto, seguida do arenito (Costa e Ferreira, 1997). Os perfis apresentam variações, apenas quanto as profundidades das camadas, a investigação máxima atingida para todos os poços é de 60,0 m (Figura 19). O P4 é um poço raso (cerca de 20 m) gêmeo do P3.

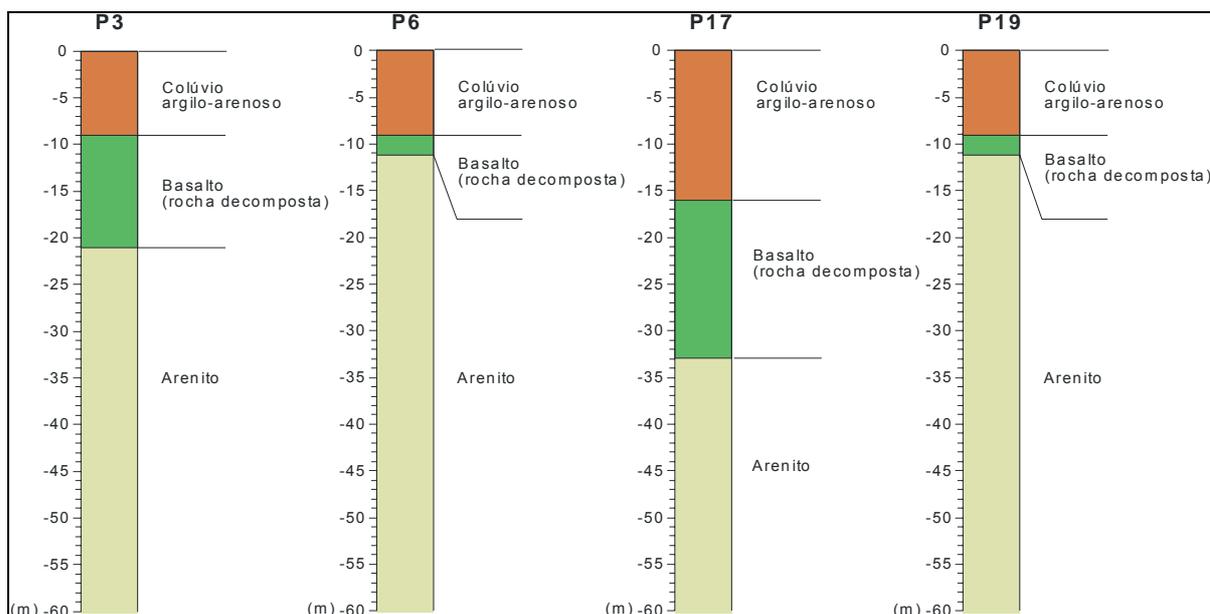


Figura 19 – Perfil dos Poços de monitoramento de água.

As informações do nível estático (denominação aqui utilizada para o nível d'água medido nos poços), indicam a existência de dois aquíferos: um suspenso, identificado no P4 a 16,5 metros e também em um poço tipo cisterna localizado em uma propriedade particular a sudeste, localizado cerca de 250 metros do início da cava leste. Neste o nível medido foi de 14 m. Os demais poços são profundos e amostram água do aquífero Botucatu. As profundidades medidas foram de 43 m (P3 e P6), 47 m (P17) e 49,5 m (P19).

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises de alguns poços de monitoramento de água, ilustrando alguns parâmetros importantes para o estudo da contaminação. A maioria das análises é de 1997, época de realização da maioria dos ensaios geofísicos, como será descrito adiante. Dados de análises de 2004 são apresentados para mostrar que o problema ainda existe e parece ter agravado, como sugere o poço P3. Esses dados mostram que em alguns poços os parâmetros são bastante alterados, com valores de pH, TDS e sulfatos muito acima dos valores

máximos permitidos. Estes poços se localizam principalmente na região próxima as cavas.

Poço	Fluído amostrado	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	STD (mg/l)	DQO (mg/l)	cloretos (mg/l)	Sulfatos (mg/l)
VMP (água)	-	-	6,5 – 8,5	500,0	250,0	250,0	-
Gnatus	água	26,6* / 70,6**	6,2*/5,8**	12,0*/47,0**	0,88**	1,14*	6,0*
P2	água	740,0 **	7,14**	1828,0**	51,1**	-	-
P3	água	54,0*/91,2**	5,8*/6,4**	26,0*/400,0**	11,0*/10,8*	4,91*	3,8*
P6	água	195,0*/67,8**	6,1*/5,8**	142,0*/170**	26,0*	8,83*	4,8*
P17	água	64,0*	6,9*	99,0*	6,5*	4,91*	5,2*
P19	água	800,0*	10,3*	2505,0*	130,0*	19,0*	924,0*

\* análises de 1997 \*\*análises de 2004

VMP (água) – valores máximos permitidos, em água

STD – Total de sólidos dissolvidos

DQO – Demanda de química oxigênio

Tabela 2 - Resultados das análises dos poços de monitoramento de água.

### Poços de coleta de chorume

Na área existem vários poços de coleta de chorume, no entanto só foram obtidas dos perfis de dois destes, o P9 e P15, ambos posicionados na cava oeste, aproximadamente em suas extremidades, sendo o P9 ao norte e o P15 ao sul.

Estes poços apresentam o mesmo perfil; a camada superficial de resíduos e chorume até 10-11 m de profundidade sobre o arenito. A profundidade máxima investigada foi de aproximadamente 12 m de profundidade (Figura 20).

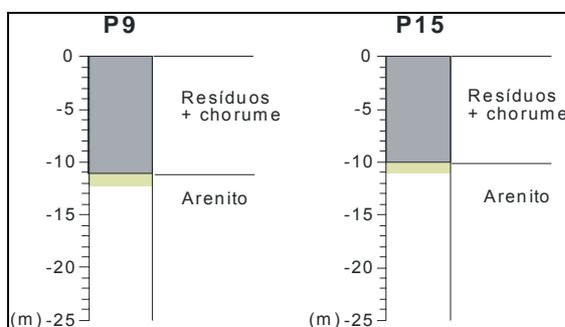


Figura 20 – Perfil dos Poços de coleta de chorume.

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises de alguns parâmetros importantes para o estudo da contaminação. Esses dados mostram que em alguns poços os parâmetros são bastante alterados, com valores de pH, TDS e sulfatos muito acima dos valores máximos permitidos. De acordo com os outros dados geológicos, nessa região as cavas estão em contato direto com o material arenoso permeável, apresentando um grande risco de contaminação ao aquífero Botucatu.

Poço	Fluído amostrado	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	COD (mg/l)	cloretos (mg/l)	Sulfatos (mg/l)
P9	chorume	1290.0	6.65	795.0	119.0	262.0	65.0
P12	chorume	2000.0	7.0	817.0	182.0	322.0	103.0
P15	chorume	15200.0	7.9	9447.0	3640.0	3350.0	145.0

análises de 1997

VMP (água) – valores máximos permitidos, em água

STD – Total de sólidos dissolvidos

DQO – Demanda química de oxigênio

Tabela 3 - Resultados das análises dos poços de coleta de chorume.

### Sondagens a trado

Na área existem 4 (quatro) sondagens a trado, no entanto foram obtidas informações de 3 (três) destas, ST2, ST3 e ST4. Estas posicionam-se nas margens das cavas de resíduos, apresentam variações quanto a geologia, e a profundidade das camadas, sendo caracterizados por uma camada superficial de colúvio argilo-arenoso sobre o arenito. A profundidade máxima atingida foi de aproximadamente 20 m (Figura 21).

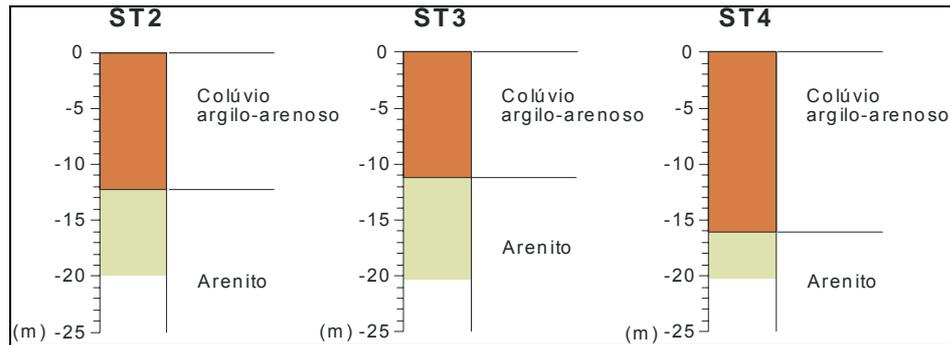


Figura 21 – Perfil das sondagens a trado.

### Ensaio de CPT

O ensaio de CPT realizado posiciona-se ao norte da área na margem das cavas. Este apresentou profundidade máxima de penetração de aproximadamente 11 m. A partir deste foi possível identificar uma camada de colúvio argilo-arenoso até 9 m de profundidade seguida por um solo residual areno-argiloso (basalto) (Figura 22). Este ensaio foi executado em 2004, porém devido a limitação do sistema, não foi possível atingir a zona saturada pelo aquífero superior.

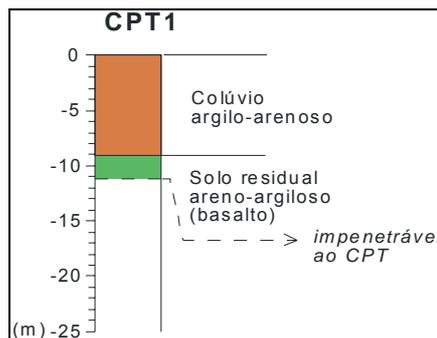


Figura 22 – Perfil do ensaio de CPT.

A localização dos poços e das sondagens serão ilustradas a seguir juntamente com os dados elétricos (Figura 23).

## 5.2. Dados Elétricos

O conjunto de dados elétricos estudado neste projeto é formado por 8 (oito) sondagens elétricas verticais (SEVs) e 3 (três) caminhamentos elétricos com dados de resistividade e cargabilidade aparente. Desses ensaios, 6 (seis) SEVs (1, 2, 3, 4, 6 e 7) e os 3 (três) CEs foram realizados em 1997. As SEVs 5 e 8 foram executadas durante este projeto para auxiliar na interpretação da geologia local. A interpretação destes dados foi associada aos dados de investigação direta de poços e sondagens existentes da área.

Abaixo é apresentada a localização das sondagens elétricas, dos caminhamentos elétricos e dos poços e sondagens de investigação direta (Figura 23):

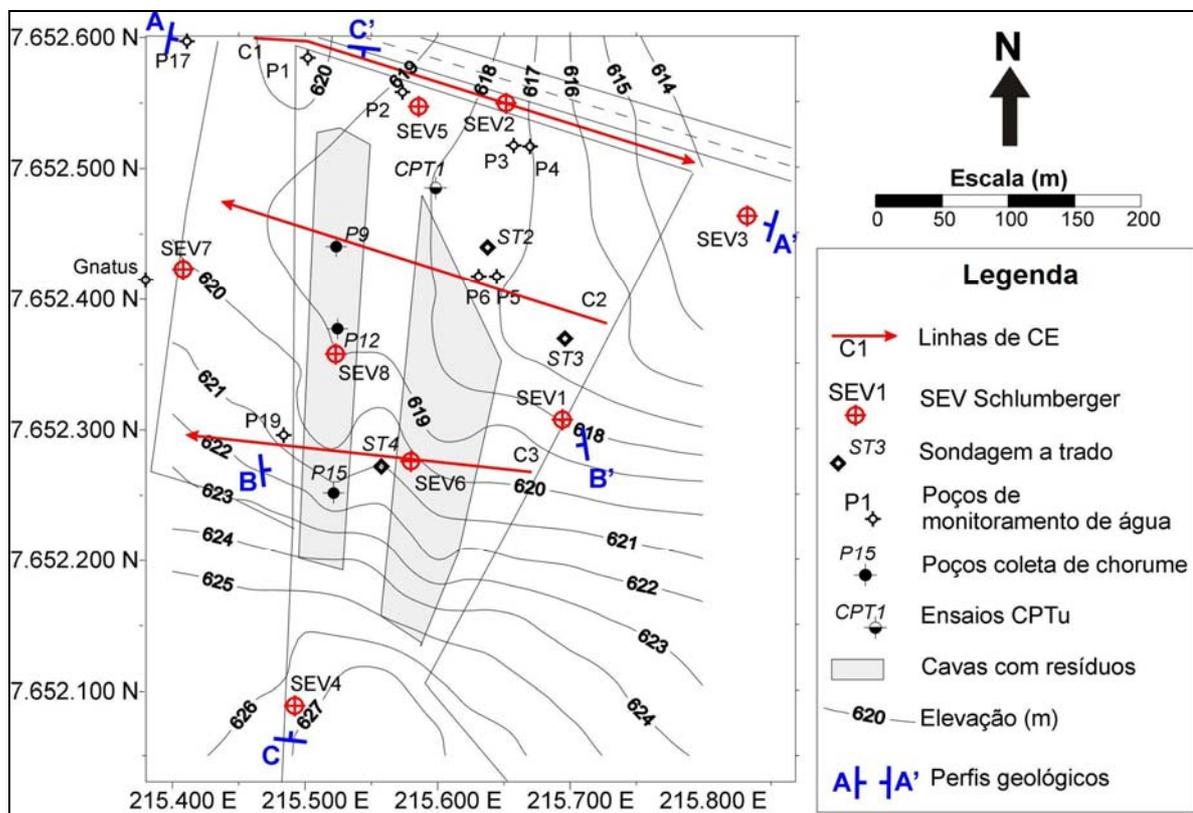


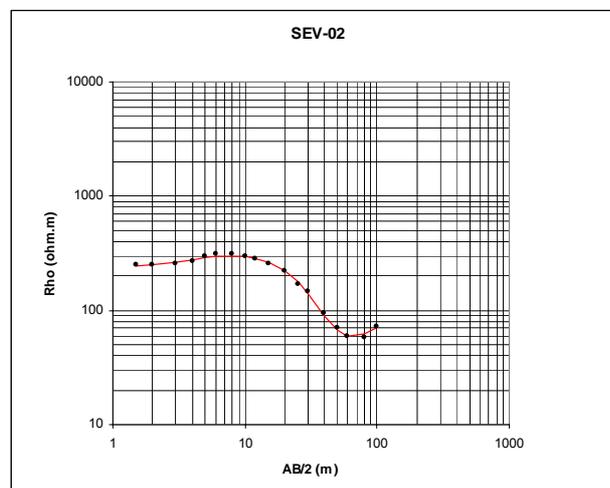
Figura 23 - Mapa da área – levantamento de eletrorresistividade e pontos de investigação direta.

### 5.2.1. Sondagens Elétricas Verticais

A partir dos dados das 8 (oito) sondagens elétricas verticais (SEVs), dispostas transversalmente e longitudinalmente as cavas, associados as informações dos poços de investigação direta instalados na região, foi possível verificar as variações das camadas litológicas e montar um modelo geológico da área.

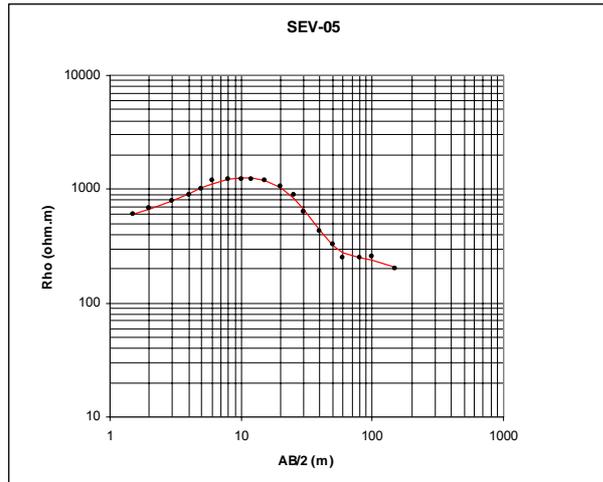
As figuras das curvas de sondagens ilustram os dados brutos obtidos em campo (pontos na cor preta) e os dados sintéticos calculados na interpretação dos dados (curva em vermelho), além do número de camadas de cada perfil, os valores das espessuras e as resistividades aparentes de cada uma destas.

As sondagens elétricas verticais SEV-2 e SEV-5 estão dispostas ao norte (N) da área próxima a rodovia (Figuras 24 e 25).



MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO			
Camada	Espessura	Resistividade	Interpretação
1	1,9 m	241 Ohm.m	Colúvio
2	6,9 m	388 Ohm.m	
3	6,2 m	197 Ohm.m	Residual de basalto
4	14,0 m	17 Ohm.m	Residual de basalto saturado
5		235 Ohm.m	Arenito

Figura 24 - SEV-2.

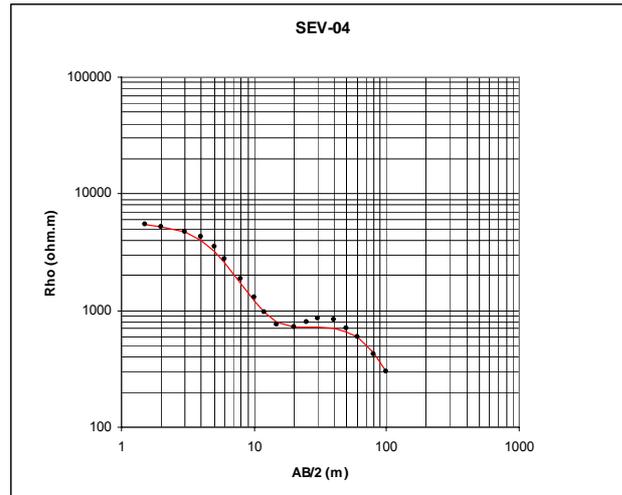


MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO			
Camada	Espessura	Resistividade	Interpretação
1	1,6 m	558 Ohm.m	Colúvio
2	5,3 m	2181 Ohm.m	
3	8,7 m	705 Ohm.m	Residual de basalto
4	13,6 m	86 Ohm.m	Residual de basalto saturado
5	10,5	1399 Ohm.m	Arenito
6		69 Ohm.m	Arenito sat.

Figura 25 - SEV-5.

Para estas SEVs foi possível estabelecer um modelo geológico com três unidades (colúvio, material residual de basalto/basalto intemperizado e arenito), devido a sua proximidade com o poço P3 e a sondagem CPT. Valores de resistividade mais baixos para todos os estratos geoeletricos da SEV-2 podem indicar influência de contaminantes.

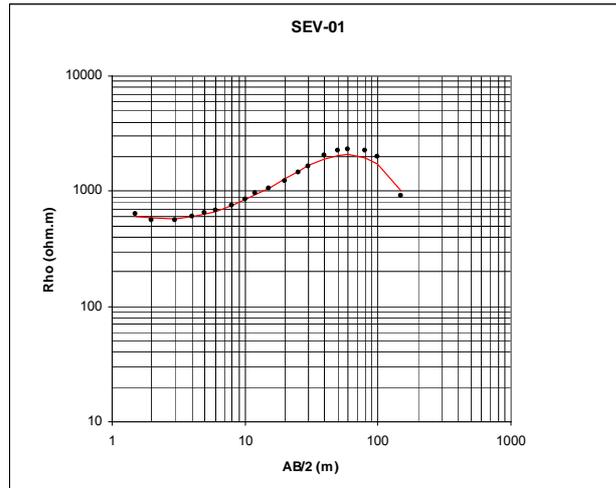
A sondagem elétrica vertical SEV-4 posiciona-se ao sul (S) da área (Figura 26). Essa SEV, baseado na morfologia da curva e na informação de ocorrência de rocha básica no poço da indústria vizinha situada a sudoeste da área (SPEL), também foi interpretada como modelo geológico com as três unidades.



<b>MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura</b>	<b>Resistividade</b>	<b>Interpretação</b>
1	2,6 m	5605 Ohm.m	Colúvio
2	6,7 m	763 Ohm.m	Residual de basalto
3	4,4 m	324 Ohm.m	Residual de basalto saturado
4	14,6 m	1763 Ohm.m	Arenito
5	10,5	49 Ohm.m	Arenito sat.

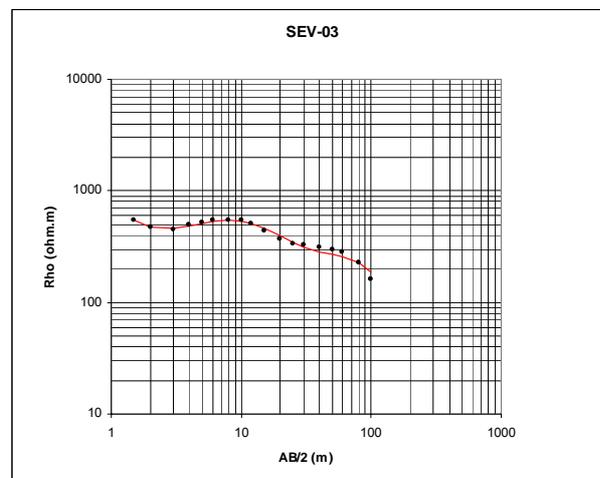
Figura 26 - SEV-4.

As sondagens elétricas verticais SEV-01 e SEV-03 posicionam-se a leste (E) da área (Figuras 27 e 28). Apresentam uma morfologia diferente das curvas anteriores, e baseando-se nas informações das sondagens a trado ST2 e ST3, bem como no afinamento da camada de rocha básica observado no P6, foram interpretadas como modelo geológico com a ocorrência da unidades colúvio diretamente sobre o arenito. A sondagem elétrica vertical SEV-7 posiciona-se a oeste da área (Figura 29), também foi interpretada como o modelo geológico de duas unidades, devido a morfologia da curva e os dados do P19 (afinamento da camada de basalto intemperizado).



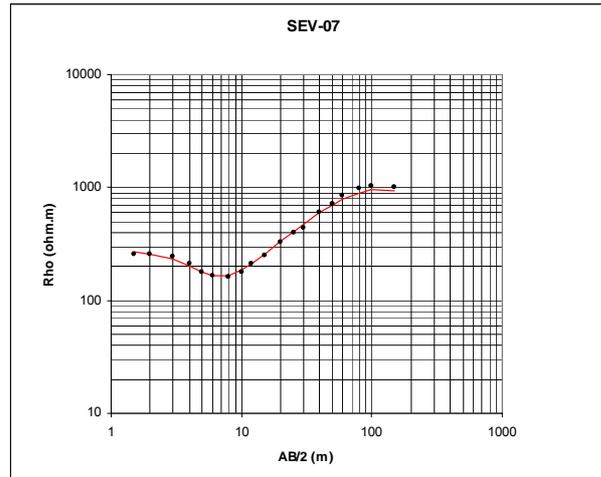
MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO			
Camada	Espessura	Resistividade	Interpretação
1	1,0 m	649 Ohm.m	Colúvio
2	1,6 m	457 Ohm.m	
3	7,5 m	906 Ohm.m	
4	14,6 m	9548 Ohm.m	Residual de arenito
5		46 Ohm.m	Residual de arenito saturado
			Arenito

Figura 27 - SEV-01.



MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO			
Camada	Espessura	Resistividade	Interpretação
1	0,6 m	744 Ohm.m	Colúvio
2	0,9 m	245 Ohm.m	
3	6,2 m	740 Ohm.m	Residual de basalto
4	7,1 m	113 Ohm.m	Residual de basalto saturado
5	17,2 m	637 Ohm.m	Arenito
6		69 Ohm.m	Arenito sat.

Figura 28 - SEV-03.

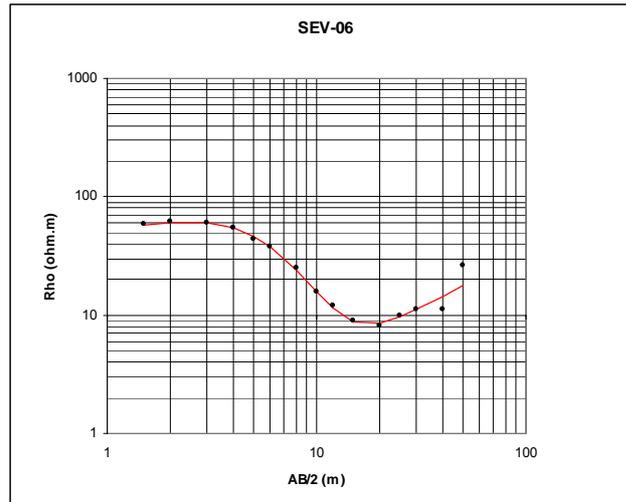


<b>MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura</b>	<b>Resistividade</b>	<b>Interpretação</b>
1	2,1 m	282 Ohm.m	Colúvio
2	3,6 m	80 Ohm.m	
3	3,9 m	1099 Ohm.m	
4	12,6 m	10087 Ohm.m	Residual de arenito
5		35 Ohm.m	Residual de arenito saturado

Figura 29 - SEV-07.

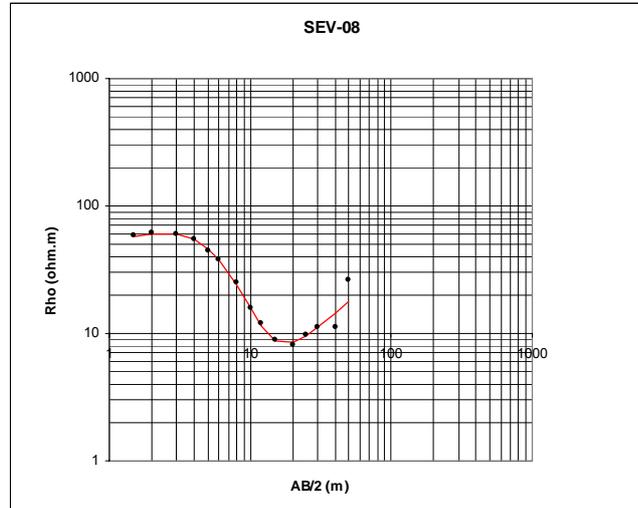
Estes resultados caracterizam a existência de basalto ao Norte e Sul da área, e ocorrência direta do arenito sob o colúvio na parte central. Isto ilustra a complexidade geológica da área, e a importância das informações diretas para embasar a interpretação das SEVs.

As sondagens elétricas verticais SEV-6 e SEV-8 estão dispostas sobre as cavas de resíduos (Figuras 30 e 31), e mostram a ocorrência da camada de resíduos sobre o material de base das cavas.



<b>MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura</b>	<b>Resistividade</b>	<b>Interpretação</b>
1	0,9 m	51 Ohm.m	Cobertura de aterro
2	1,7 m	95 Ohm.m	
3	11,5 m	6 Ohm.m	Resíduos
4		323 Ohm.m	Residual de arenito

Figura 30 - SEV-06.



<b>MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO</b>			
<b>Camada</b>	<b>Espessura</b>	<b>Resistividade</b>	<b>Interpretação</b>
1	1,9 m	64 Ohm.m	Cobertura de aterro
2	1,3 m	83 Ohm.m	
3	6,1 m	3 Ohm.m	Resíduos
4		346 Ohm.m	Residual de arenito

Figura 31 - SEV-08.

### 5.2.2. Perfis geológicos interpretados

Após a interpretação das sondagens elétricas verticais e a análise dos dados de investigação direta foram montados 3 (três) perfis geológicos da área, sendo 2 longitudinais às cavas (AA' e BB') e 1 transversal (CC'), a partir dos quais foi possível a caracterização das diferenças geológicas da área e o posicionamento das camadas.

O Perfil AA' se posiciona longitudinalmente as cavas ao Norte. Este é formado pelas SEVs 2, 3 e 5 e pelos poços de monitoramento de água P2, P3, P4 e P17 (Figura 32).

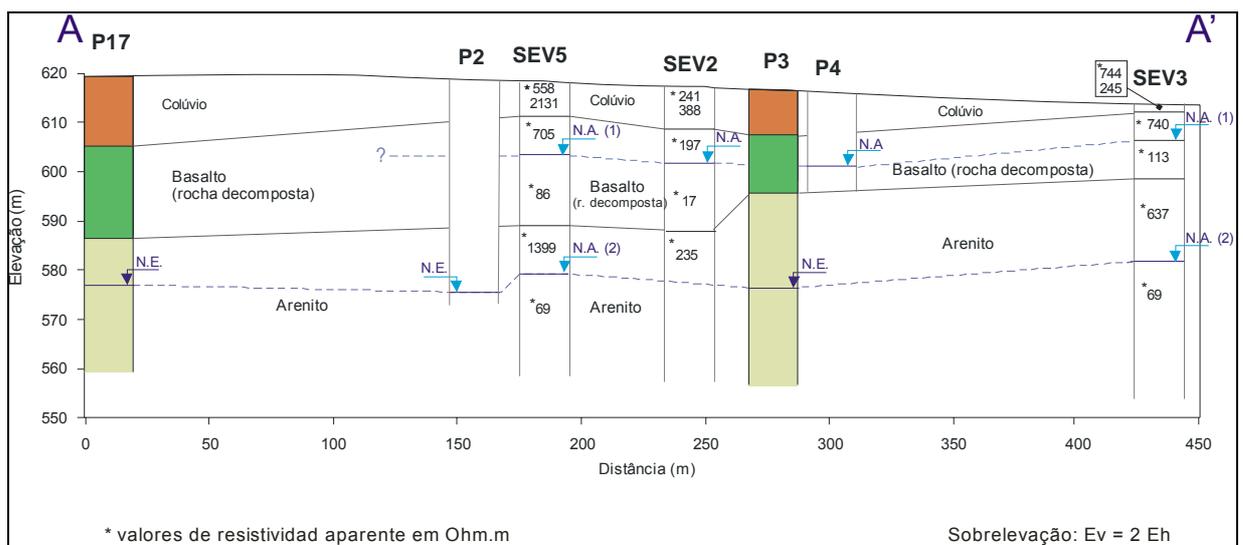


Figura 32 – Perfil longitudinal norte AA'

O Perfil BB' se posiciona longitudinalmente as cavas aproximadamente ao centro. Este é formado pelas SEVs 1 e 6 e pelos poços de monitoramento de água P19, pelo poço de chorume P15 e a sondagem a trado ST4 (Figura 33).

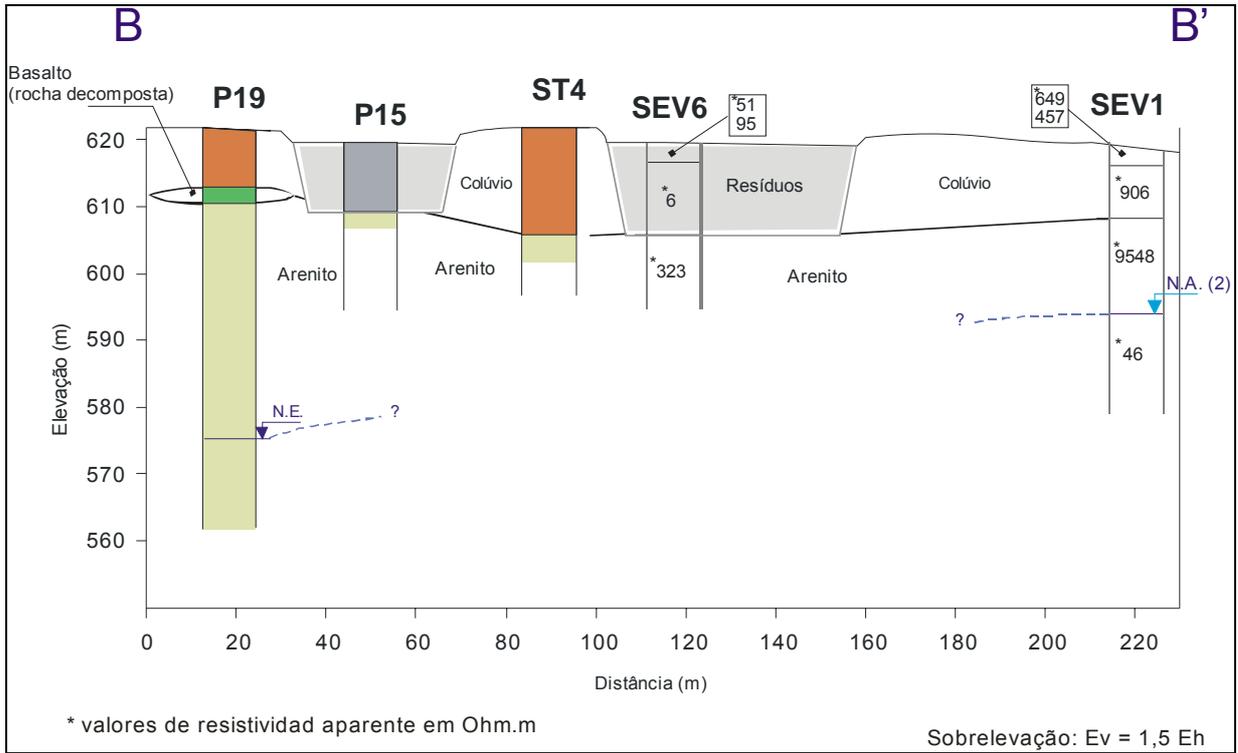


Figura 33 – Perfil longitudinal norte BB'

O Perfil CC' se posiciona transversalmente às cavas. Este é formado pelas SEVs 4, 5 e 8 e pelos poços de chorume P9 e P15 (Figura 34).

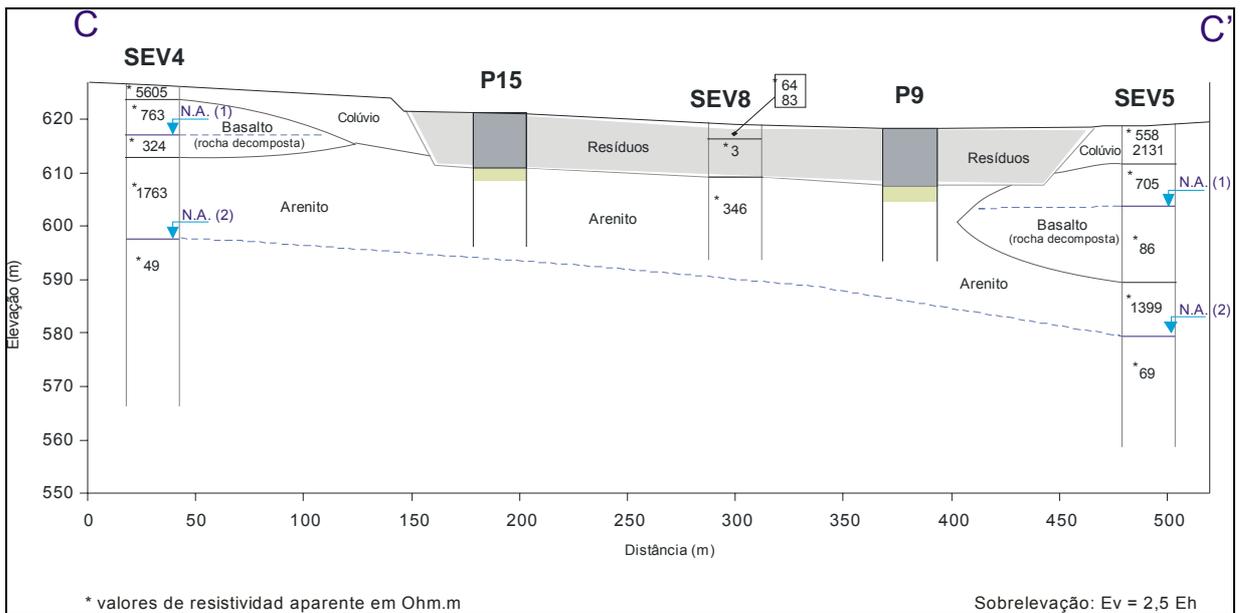


Figura 34 – Perfil transversal CC'

Após a interpretação dos dados, a associação das informações dos poços e a montagem dos perfis geológicos foi possível verificar de forma mais clara as relações entre as unidades (o posicionamento destas) e assim montar um modelo geológico da área.

Assim, é possível concluir que o ambiente geológico onde está situado o Lixão de Serrana é caracterizado por uma camada superficial de colúvio, seguida de basalto intemperizado e sua base, o arenito. No entanto, este perfil sofre variações: nas laterais Norte-Sul, é verificado a camada de basalto intemperizado entre o colúvio e o arenito (Perfil AA'). Ao Norte esta camada de colúvio está em contato com os limites das cavas e ao Sul este contato não ocorre (Perfil CC'), dessa forma, o nível d'água superficial (NA1) que se encontra no basalto intemperizado, é interligado a região dos resíduos apenas ao Norte, podendo nessa região estar ocorrendo migração da pluma de contaminação no aquífero suspenso no sentido norte. Este sentido de deslocamento é sugerido devido ao desnível do terreno.

Na região central das cavas, no sentido Leste-Oeste, local onde encontra-se o perfil BB', o terreno apresenta principalmente as camadas de colúvio e arenito, além da região das cavas de resíduos.

O aquífero profundo encontra-se em profundidades superiores a região dos resíduos, não havendo contato direto com este.

### **5.2.3. Caminhamentos elétricos.**

Após a interpretação das SEVs e a caracterização da geologia da área foram trabalhados os dados dos 3 caminhamentos elétricos, que se posicionam na região das cavas.

Primeiramente foram processados os dados brutos para assim realizar outros tratamentos computacionais e obter resultados da inversão dos dados.

A Linha do caminhamento elétrico CE-01 se localiza mais distante das cavas dos resíduos, ao Norte, próxima a rodovia.

As Figuras 35 e 36 ilustram os dados brutos de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico 01.

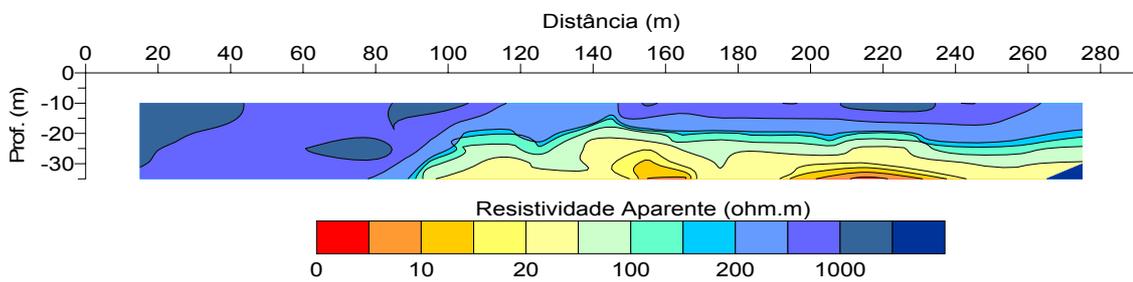


Figura 35 - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento CE 01 (dados brutos).

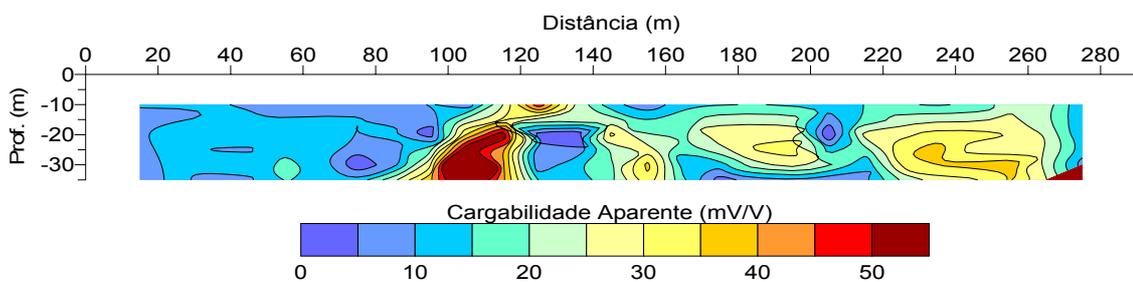
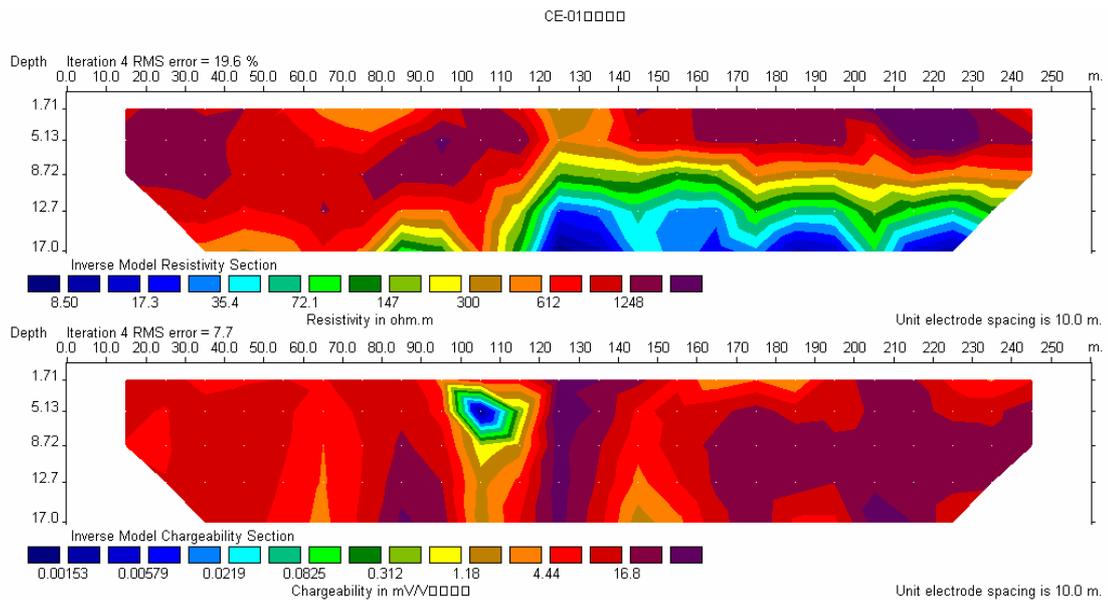


Figura 36 - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento CE 01 (dados brutos).

As Figuras 37 e 38 ilustram os modelos 2D obtidos por inversão dos dados de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico 01.



Figuras 37 e 38 - Perfis de resistividade e cargabilidade aparente da linha de caminhamento CE 01 (dados invertidos).

Os dados de resistividade aparente do caminhamento CE 01 apresentaram valores mais baixos na superfície, e uma elevação da resistividade com o aumento da profundidade, principalmente da porção central para o final do perfil. A seção de cargabilidade não apresentou feições de interesse quanto a possível pluma de contaminação. Foi possível mapear um dos poços de monitoramento situado na área, entre 100 e 120 m do CE, pois estes poços tem seu revestimento feito de materiais metálicos, o que gera este tipo de anomalia.

Estes resultados obtidos através dos dados elétricos são compatíveis com os dados obtidos pelos caminhamentos eletromagnéticos posicionados próximos ao local.

A Linha do caminhamento elétrico CE 02 localiza-se sobre uma das cavas dos resíduos. As Figuras 39 e 40 ilustram os dados brutos de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico CE 02.

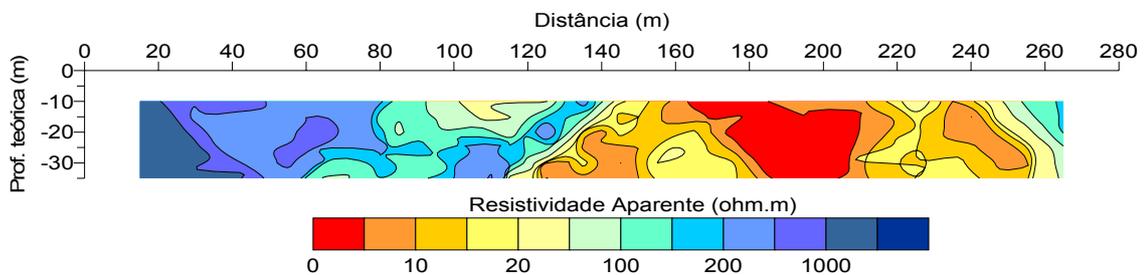


Figura 39 - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento CE 02  
(dados brutos).

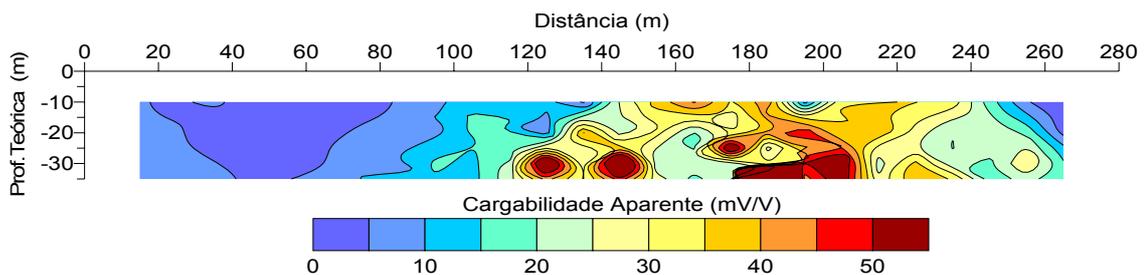
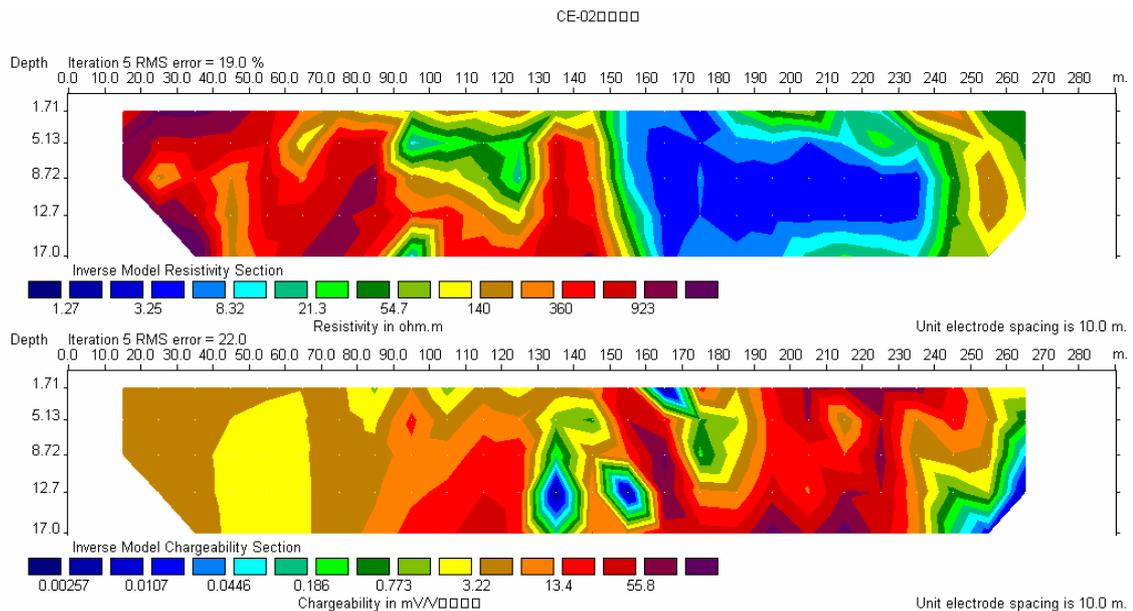


Figura 40 - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento CE 02 (dados brutos).

As Figuras 41 e 42 ilustram os dados invertidos de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico CE 02.



Figuras 41 e 42 - Perfis de resistividade e cargabilidade aparente da linha de caminhada CE 02.

Tanto nos dados brutos quanto nos modelos interpretados de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico 02 foi possível observar uma anomalia na porção final da linha do caminhamento elétrico, o que caracteriza a região de uma das cavas de resíduos. Essa cava é observada principalmente no perfil de resistividade entre as posições 150 e 230 metros. Uma segunda anomalia, menos marcada, ocorre entre 90 e 130 metros e caracteriza a extremidade da cava leste. Os valores de cargabilidade tendem a ser mais elevados dentro das cavas, mas apresentaram variações bastante irregulares.

A Linha do caminhamento elétrico CE 03 está localizada transversalmente às cavas dos resíduos, na porção centro-sul da área.

As Figuras 43 e 44 ilustram os dados brutos de resistividade e cargabilidade aparente do caminhamento elétrico CE 03.

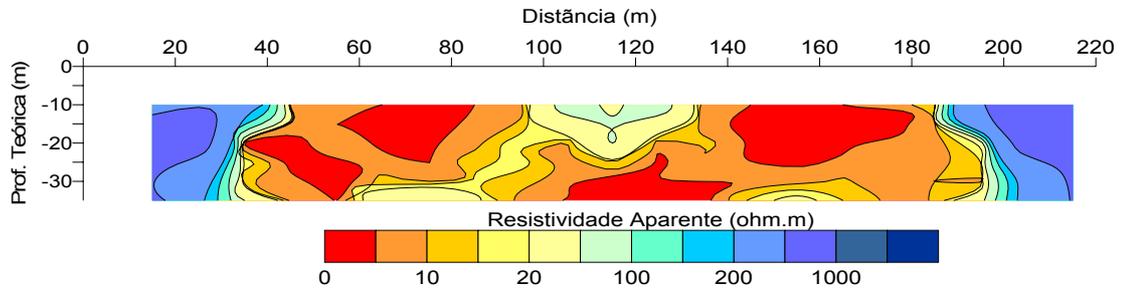


Figura 43 - Perfil de resistividade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados brutos).

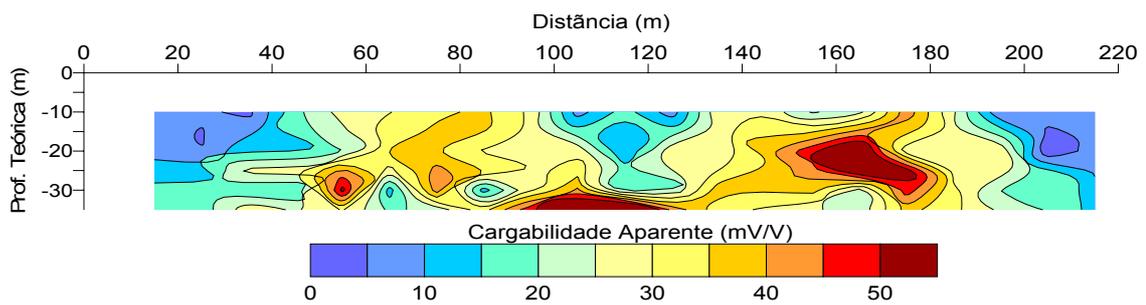
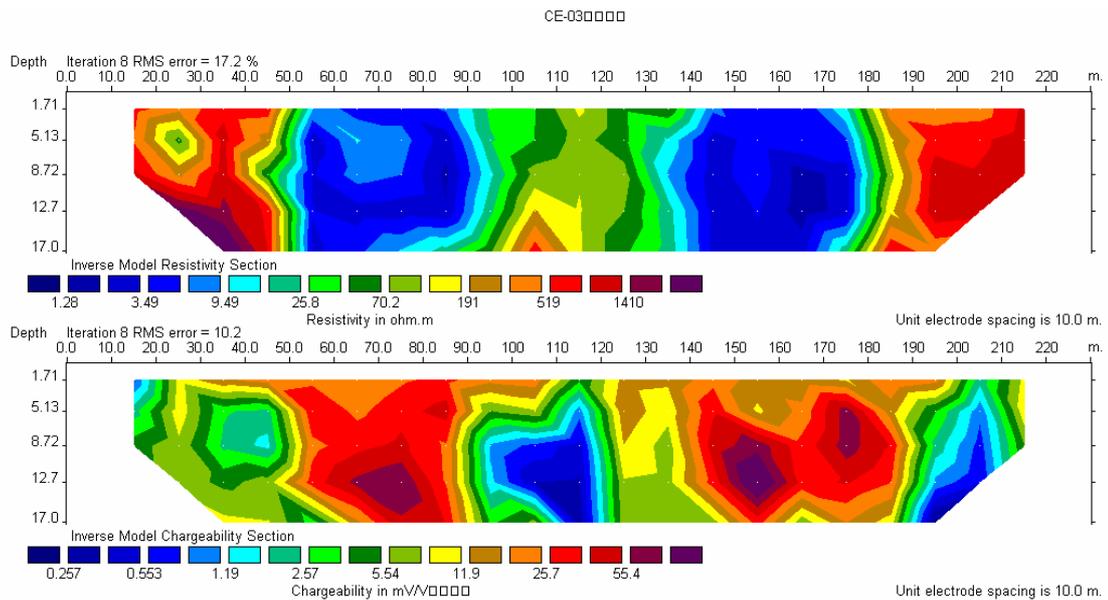


Figura 44 - Perfil de cargabilidade aparente da linha de caminhamento ER 03 (dados brutos).

As Figuras 45 e 46 ilustram os dados de resistividade e cargabilidade, tratados em software de inversão, do caminhamento elétrico CE 03.



Figuras 45 e 46 - Perfis 2D de resistividade e cargabilidade da linha de caminhada CE 03.

Foi possível verificar que tanto nos dados de resistividade quanto nos de cargabilidade aparente a região dos resíduos foi mapeada. No entanto, nos dados tratados pelo processo de inversão as cavas foram fortemente delimitadas. Apresentam baixos valores de resistividade (abaixo de 10 ohm.m) e altos valores de cargabilidade (acima de 25 mV/V). Os baixos valores de resistividade refletem as altas concentrações de contaminantes dentro das cavas, como foi mostrado na Tabela 3. Os altos valores de cargabilidade refletem, possivelmente, materiais polarizáveis dentro dos resíduos, como metais, por exemplo.

Após a análise dos dados de resistividade e cargabilidade aparente dos CE-01, CE-02 e CE-03 foram plotados os dados da constante de tempo. As Figuras 47, 48 e

49 ilustram as pseudo-seções dos caminhamentos CE-01, CE-02 e CE-03 da constante de tempo, respectivamente.

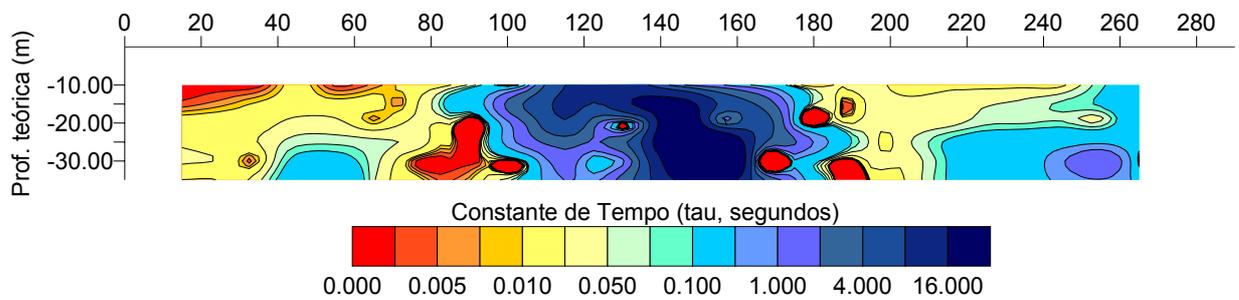


Figura 47 - Perfil de constante de tempo da linha de caminhada CE-01.

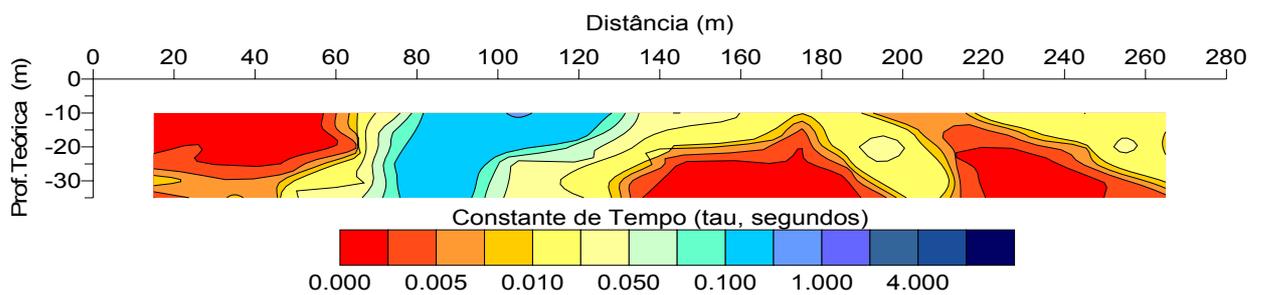


Figura 48 - Perfil de constante de tempo da linha de caminhada CE-02.

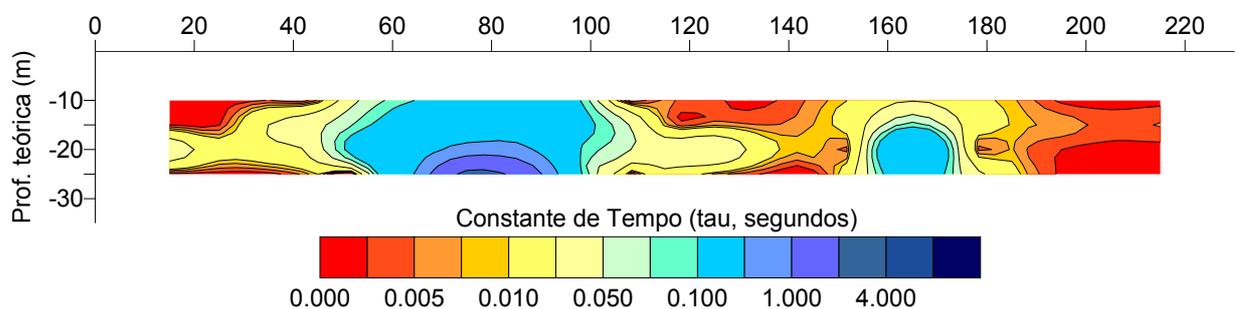


Figura 49 - Perfil de constante de tempo da linha de caminhada CE-03.

A partir dos dados de constante de tempo foi possível visualizar somente as posições das cavas e a anomalia gerada pelo revestimento metálico do poço de

monitoramento. Estas não mostraram resultados que pudessem ser relacionados de forma clara a variações texturais dos materiais geológicos, e os resultados de obtidos com resistividade e cargabilidade fornecem informações mais concretas.

### **5.3. Dados Eletromagnéticos**

Foram analisados dados de 13 (treze) caminhamentos eletromagnéticos (EM) localizados tanto nas regiões sobre as cavas como também em suas margens. Destes ensaios, dados de 10 linhas (EM1 a EM10) foram coletados em projetos anteriores. As linhas EM11, EM12 e EM13 foram coletadas neste projeto. Para verificar se não houve mudança significativa em termos de condutividade aparente na área foi realizado um perfil sobre o mesmo local do levantamento anterior, e constatou que a variação média foi inferior a 10 %. Dessa forma, entendeu-se que os todos os dados podem ser analisados em conjunto sem prejuízo para a interpretação.

Os dados foram coletados com o equipamento EM-34 com os cabos de 10 e 20 m, investigando os níveis teóricos de 7,5, 15 e 30 m. Para uma melhor visualização dos perfis, estes foram plotados em pseudo-seções de condutividade aparente.

A Figura 50 mostra o mapa da área e a posição das linhas.

Os caminhamentos eletromagnéticos 11, 12 e 13 encontram-se na região das cavas. Estes apresentam anomalias de alta condutividade posicionadas exatamente sobre estas, que delimitam a posição dos resíduos e a pluma de contaminação gerada. Isto pode ser evidenciado pelas informações dos poços de monitoramento de água P2 e P19 e pelos poços de coleta de chorume P9, P12 e P15, posicionados na região das cavas, que apresentam os mais altos valores de condutividade elétrica e sulfatos.

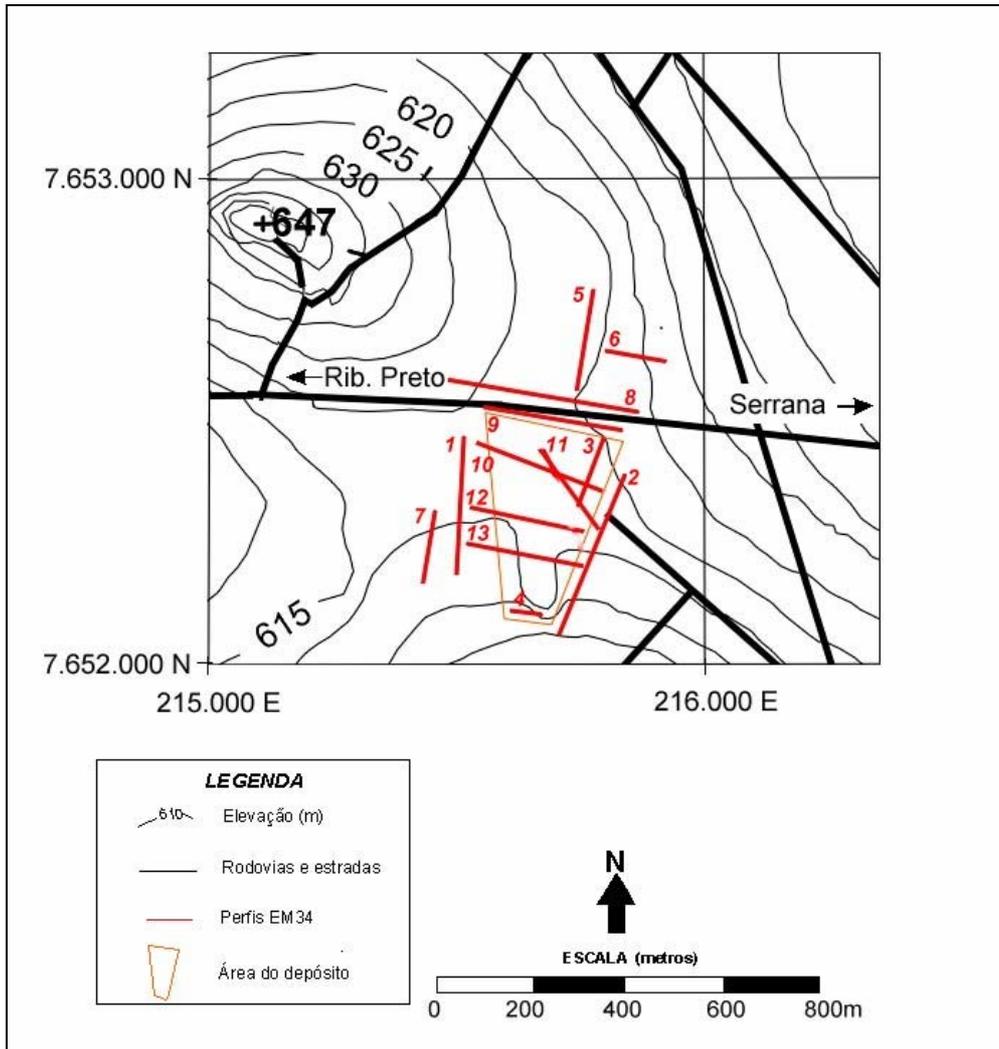


Figura 50 - Mapa de localização da área e posição das linhas de EM.

A Pseudo-seção da Linha do caminhamento eletromagnético 11 está localizada sobre uma das cavas, esta é ilustrada pela Figura 51, abaixo.

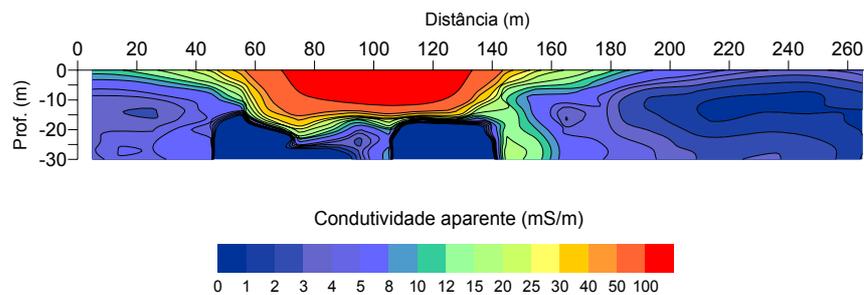


Figura 51 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 11.

As Pseudo-seções dos caminhamentos eletromagnéticos 12 e 13, ilustradas pelas Figuras 52 e 53, estão localizadas transversalmente sobre as duas cavas. Estas delimitam de forma bem clara a posição dos resíduos.

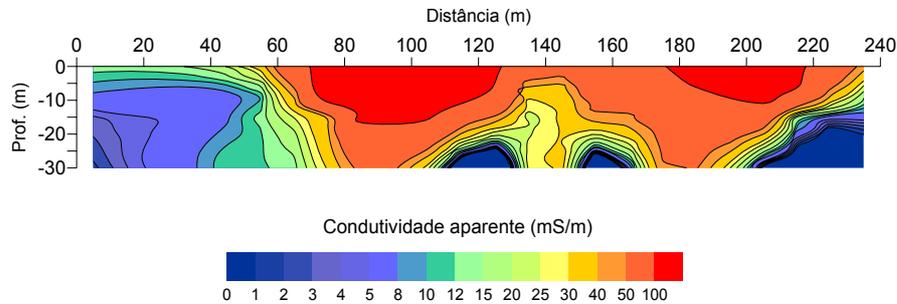


Figura 52 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada eletromagnético 12.

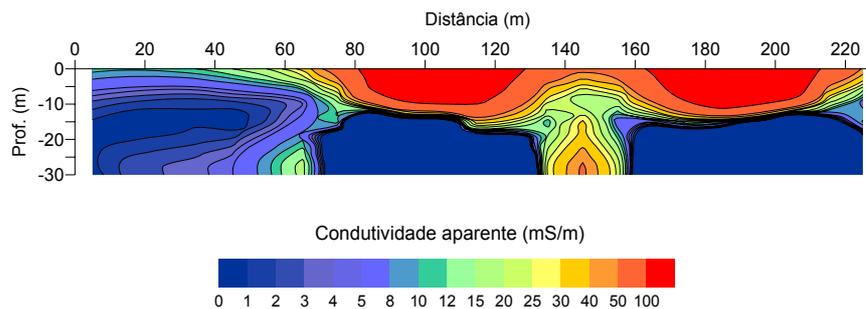


Figura 53 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 13.

Os caminhamentos eletromagnéticos 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 e 10 encontram-se localizados às margens das cavas. Estes apresentam valores mais baixos de condutividade aparente, o que mostra o comportamento do deslocamento/limites da pluma de contaminação gerada pela disposição dos resíduos.

As Pseudo-seções das Linhas dos caminhamentos eletromagnéticos 05, 08, 09 e 10, ilustradas pelas Figuras 54, 55, 56 e 57, estão posicionadas à norte (N) da área. Estas apresentam baixos valores de condutividade aparente na porção mais

superficial do terreno, e valores intermediários de condutividade aparente em maiores profundidades e principalmente à leste.

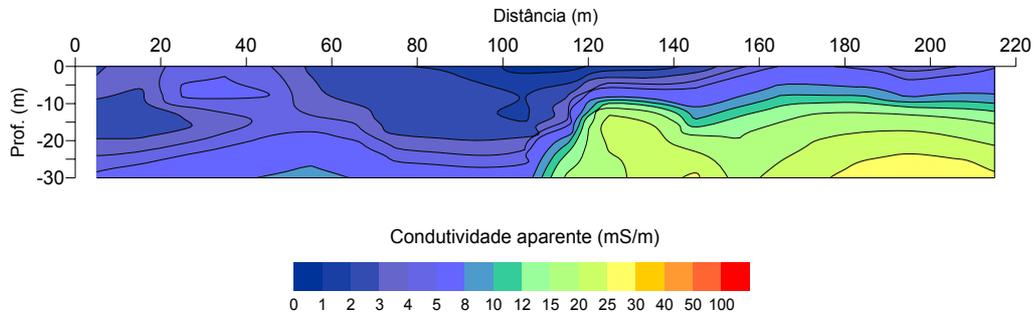


Figura 54 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 05.

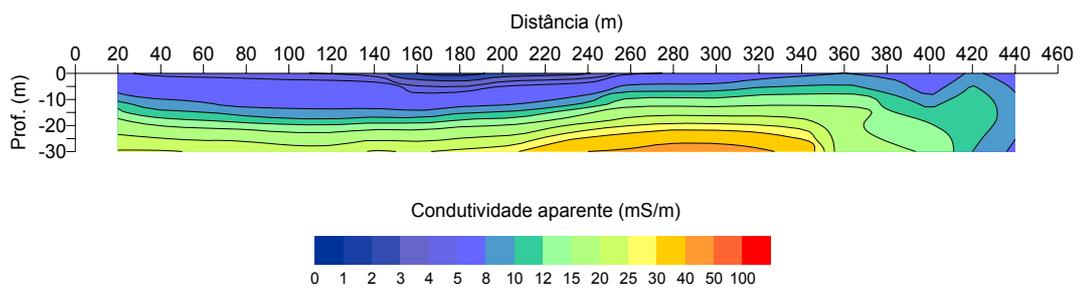


Figura 55 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 08.

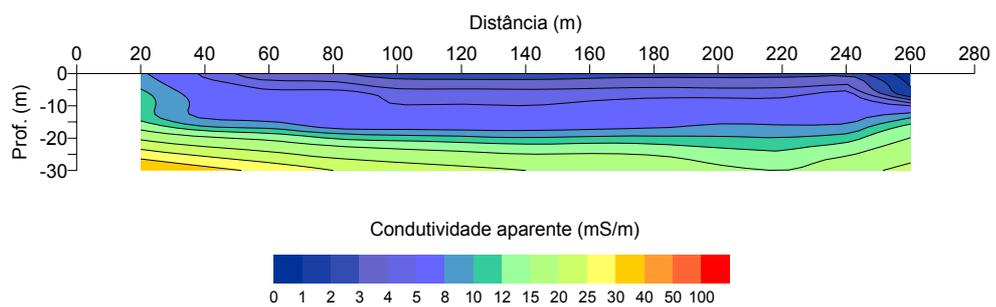


Figura 56 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 09.

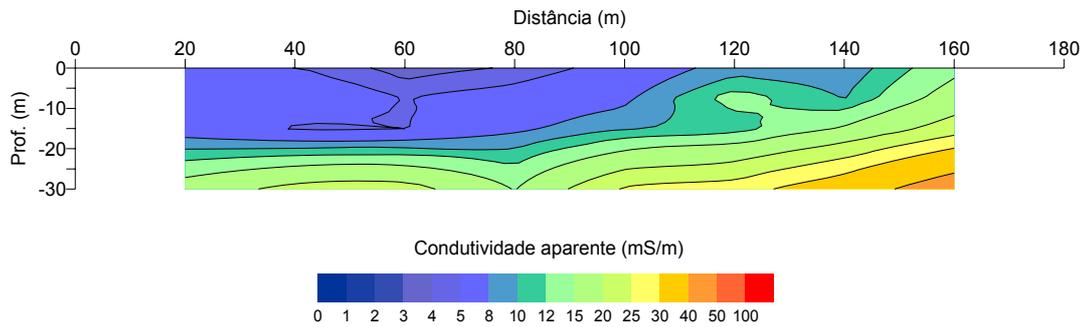


Figura 57 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 10.

A Pseudo-seção da Linha do caminhamento eletromagnético 06, ilustrada pela Figura 58, está localizada bem próxima às cavas a nordeste (NE).

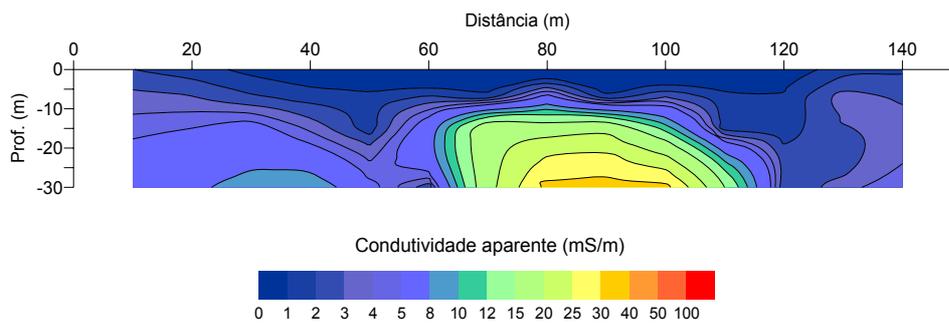


Figura 58 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 06.

As Pseudo-seções dos caminhamentos eletromagnéticos 01 e 07, ilustradas pelas Figuras 59 e 60, estão posicionadas à oeste (W) da área. Estas apresentam baixos valores de condutividade.

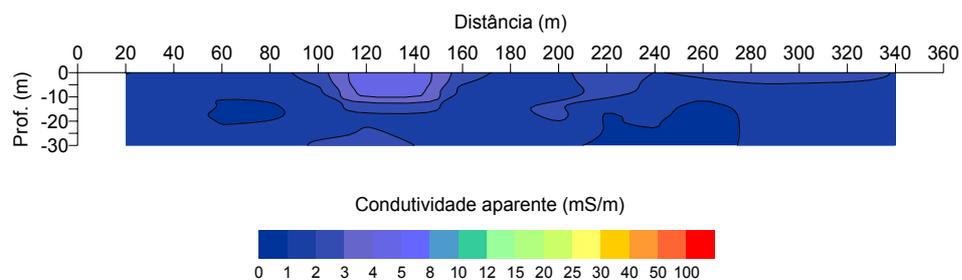


Figura 59 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 01.

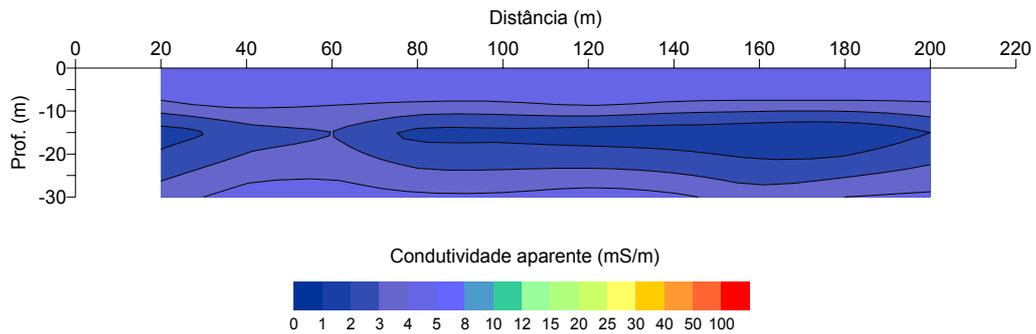


Figura 60 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 07.

As Pseudo-seções das Linhas dos caminhamentos eletromagnéticos 02 e 03, ilustradas pelas Figuras 61 e 62, estão posicionadas à leste (E) da área. Estas também apresentam baixos valores de condutividade.

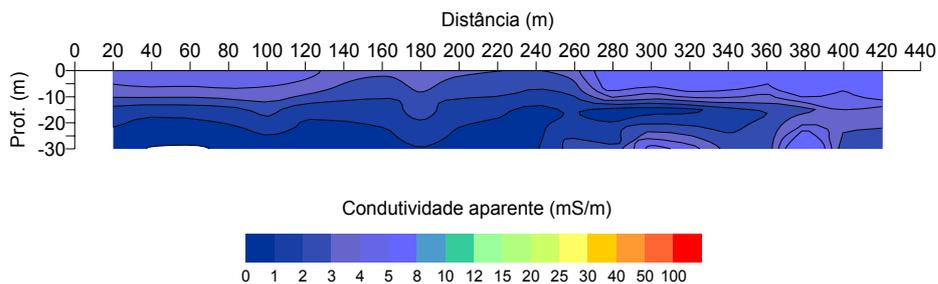


Figura 61 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 02.

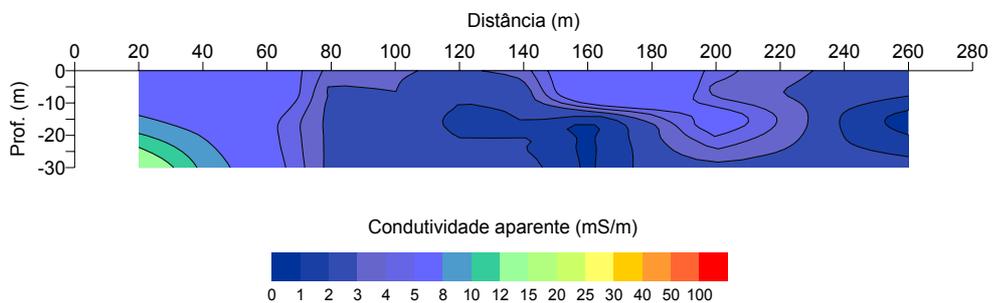


Figura 62 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhada EM 03.

A Pseudo-seção do caminhamento eletromagnético 04, ilustrada pela Figura 63, está localizada ao sul (S) das cavas, esta apresenta os menores valores de condutividade aparente, o que mostra que a pluma de contaminação não apresenta características de deslocamento neste sentido.

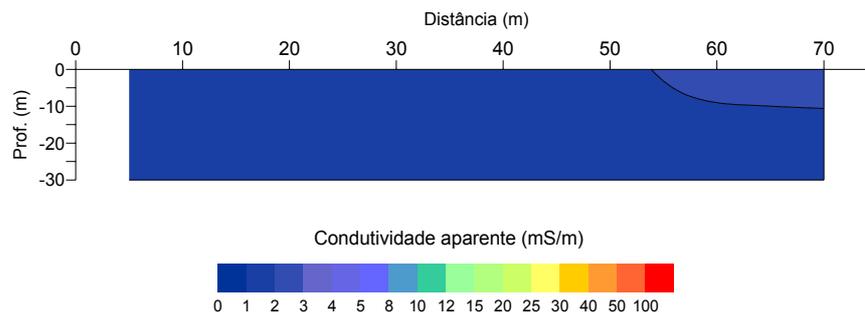


Figura 63 - Perfil de condutividade aparente da linha de caminhamento EM 04.

Após a análise de todas as pseudo-seções foram montados mapas de caracterização geral da área, a partir dos dados de todas as linhas nas diferentes profundidades teóricas (7,5 m, 15 m e 30 m).

O mapa abaixo mostra a caracterização, a partir dos dados EM, da área, na profundidade de 7,5 m (Figura 64).

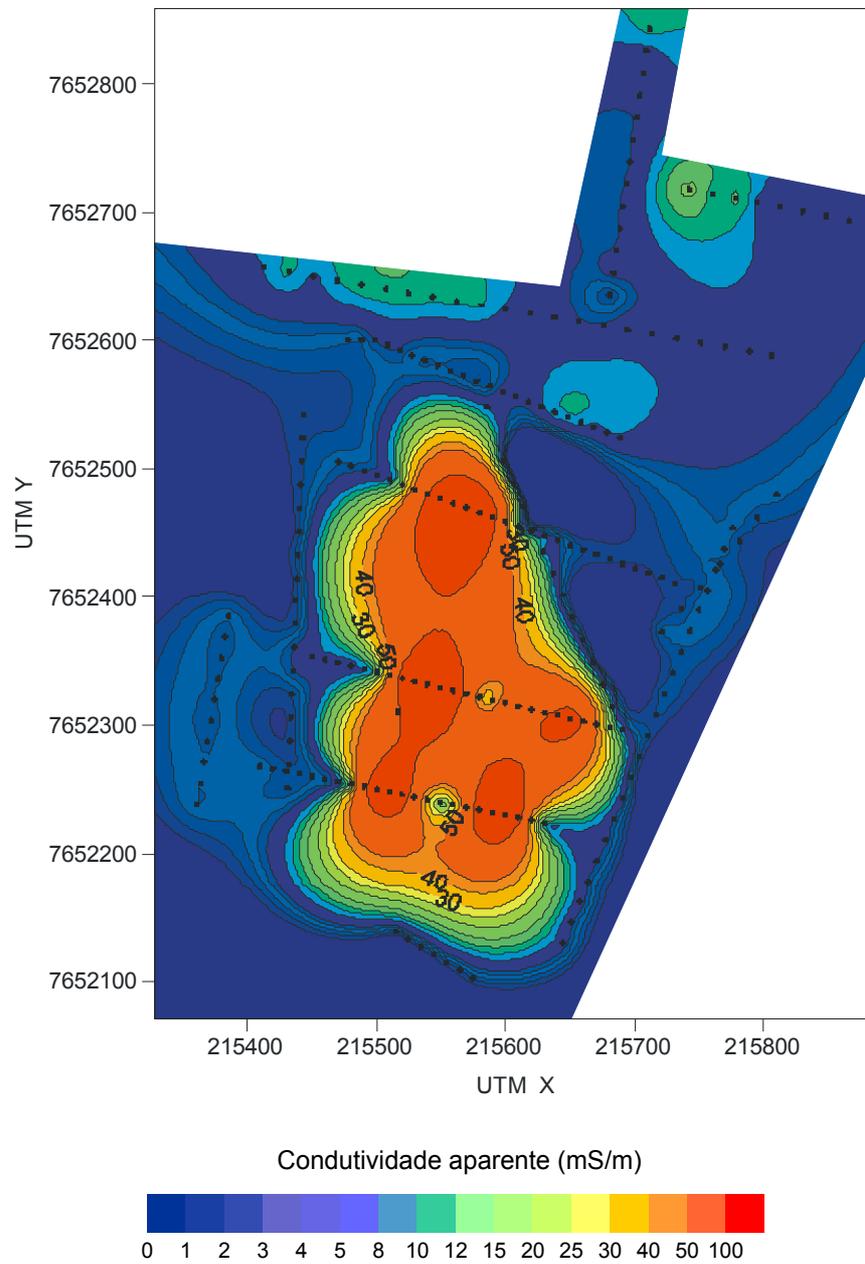


Figura 64 - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 7,5 m.

O mapa da Figura 65 mostra a caracterização, a partir dos dados EM, da área, na profundidade de 15,0 m.

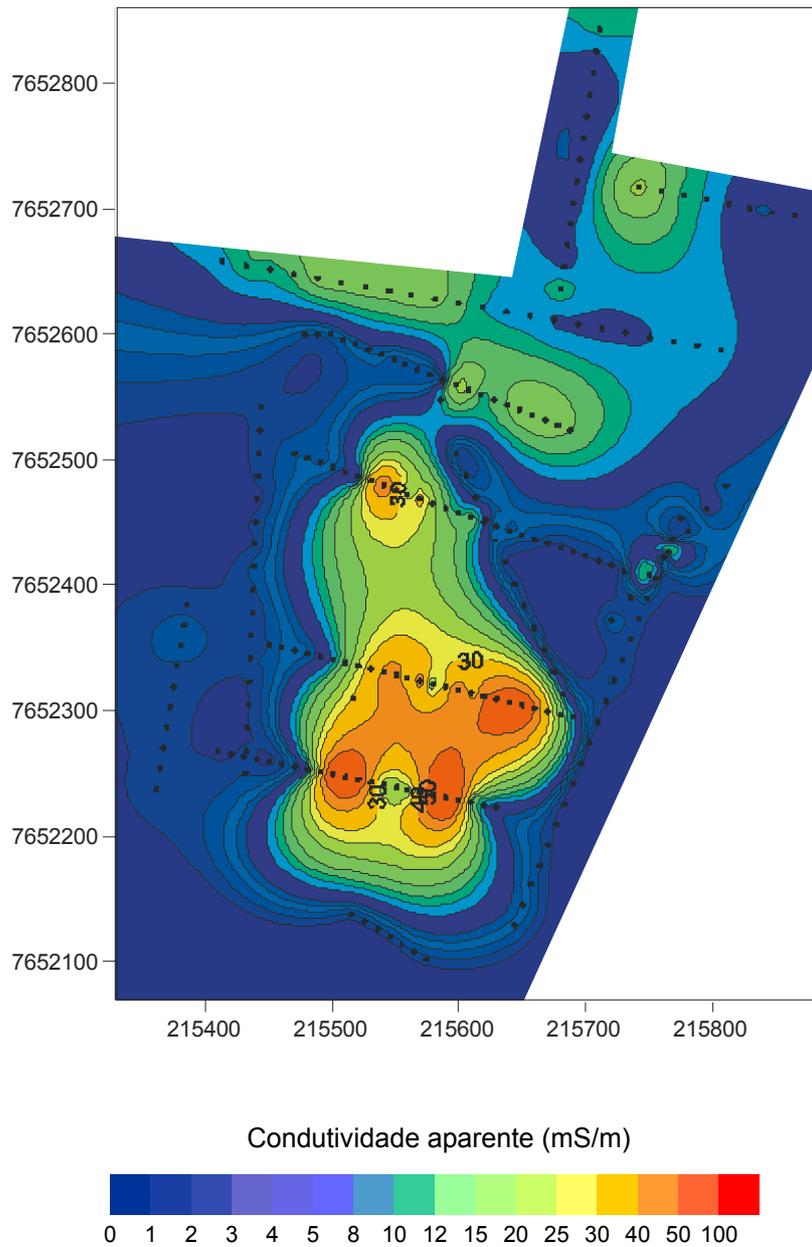


Figura 65 - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 15,0 m.

O mapa da Figura 66 mostra a caracterização, a partir dos dados EM, da área, na profundidade de 30,0 m.

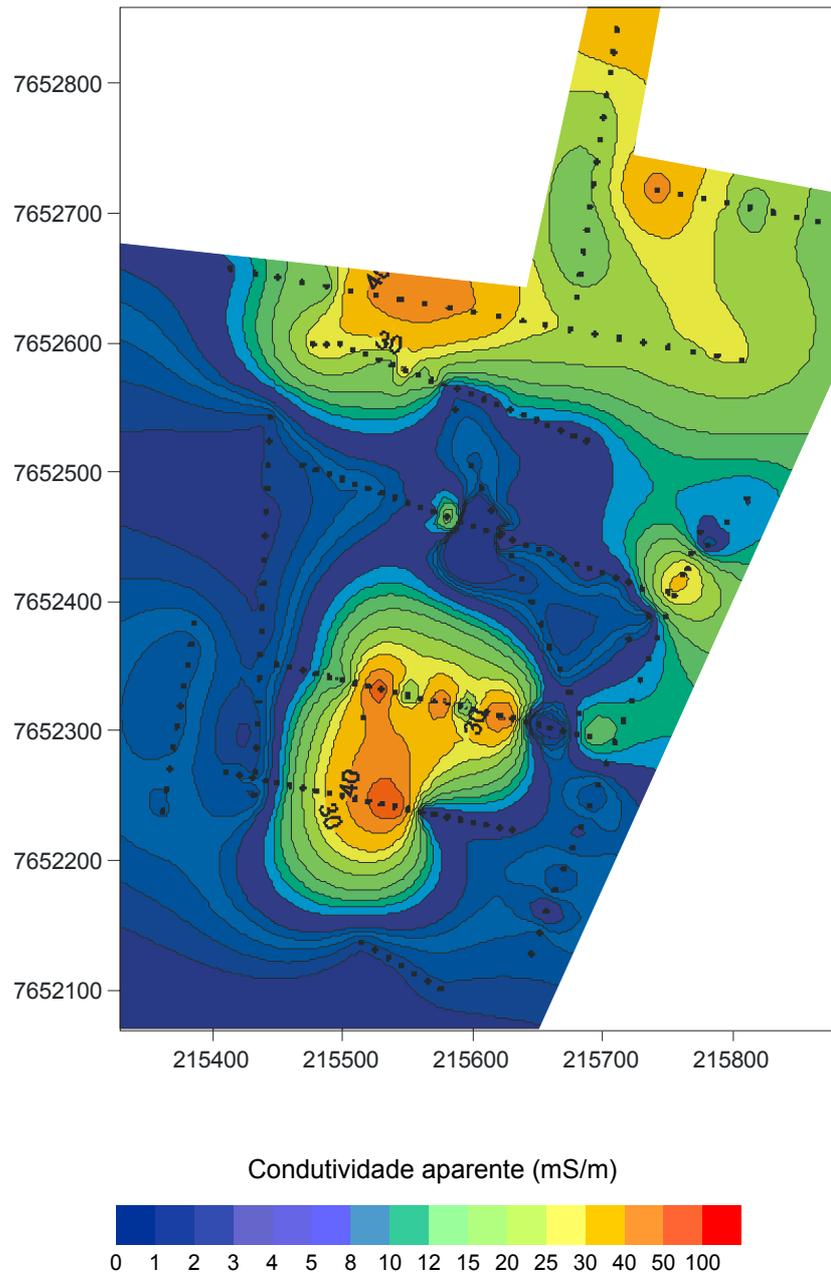


Figura 66 - Mapa de caracterização EM da área na profundidade de 30,0 m.

A partir destes mapas foi possível detalhar de forma mais precisa a posição da área de abrangência da pluma de contaminação gerada pelos resíduos, no Lixão de Serrana.

Verificou-se que nas profundidades mais superiores, até 7,5 m de profundidade, os dados apresentam os maiores valores de condutividade aparente (até 150 mS/m) em uma região fortemente delimitada, na parte central da área, caracterizando, assim, as cavas resíduos. Na profundidade intermediária de 15 m, os valores de condutividade aparente ainda são elevados (até 100 mS/m). No entanto, são inferiores aos valores apresentados mais em superfície, mas abrangem uma região maior que em superfície, principalmente ao norte. Isto ocorre, provavelmente, devido ao deslocamento da pluma de contaminação, já que nestas profundidades, ao norte, há o contato do lençol d'água suspenso (NA1) com a cava de resíduos.

Nas maiores profundidades, 30 m, o mapa apresenta menores valores de condutividade aparente (entre 25 mS/m), na porção central da área, indicando o deslocamento vertical da contaminação. Estes valores de condutividade aparente são verificados, também, no sentido norte da área, sendo indicativos do deslocamento da pluma de contaminação em regiões mais distantes. No entanto, não se sabe ao certo se a pluma de contaminação do Lixão de Serrana atingiria tal deslocamento. Sabe-se que ao norte da área, a aproximadamente 3 km de distância, há um outro lixão desativado, o Lixão Fepasa, o qual poderia provocar uma pluma de contaminação com tais dimensões, interligando as áreas contaminadas.

## 6. CONCLUSÕES

Através da análise do local verifica-se que a área atualmente ainda apresenta altos índices de contaminação, principalmente nos locais das cavas e na porção superficial do terreno. No entanto também há presença de um deslocamento da pluma de contaminação, principalmente na direção norte (N).

A partir dos dados das SEVs, interpretados com vínculos baseados nas informações diretas, foi possível caracterizar a geologia local e delimitar as camadas litológicas e a região das cavas de resíduos. Verificou-se que na área fora dos resíduos são individualizadas três unidades: a primeira unidade, superficial, caracterizada por sedimentos coluvionares. A segunda unidade é representada por basaltos intemperizados e solos de alteração deste tipo de rocha. Na terceira unidade ocorrem arenitos da Formação Botucatu. Como já descrito, esse modelo é corroborado por informações diretas (poços de investigação direta, existentes no local). Ainda de acordo com informações do poço e dados geofísicos, na maior parte da região sob as cavas o colúvio recobre diretamente o arenito Botucatu, sem a existência do basalto. No local onde os resíduos foram dispostos as cavas são construídas no colúvio e em contato direto com os arenitos não saturados.

Os caminhamentos elétricos apresentaram resultados equivalentes aos caminhamentos eletromagnéticos. Foi possível observar uma forte anomalia na região dos resíduos, tanto nos dados de resistividade quanto nos de cargabilidade aparente, caracterizando a região das cavas. Nos dados obtidos pelo processo de inversão as cavas foram mais claramente delimitadas que nos dados brutos.

A partir dos dados de constante de tempo foi possível visualizar a região das cavas e a anomalia gerada pelo revestimento metálico do poço de monitoramento, no

entanto estes não mostraram maiores detalhes das estruturas, não mostraram diferenciação da textura e da granulometria, nem informações adicionais das observadas nos dados de resistividade e cargabilidade aparente. No entanto, como foi uma primeira tentativa de utilização desse parâmetro e não foi o foco principal do trabalho, pode-se sugerir estudos posteriores mais detalhados, inclusive em situação controlada e em laboratório, para de fato avaliar o potencial de sua utilização em estudos ambientais.

A partir dos dados eletromagnéticos foi possível delimitar a área de abrangência da pluma de contaminação gerada pelos resíduos. Os caminhamentos eletromagnéticos localizados na região das cavas mapearam de forma bem clara a posição dos resíduos e os localizados às margens das cavas apresentam valores mais baixos de condutividade aparente.

Isto foi evidenciado nos mapas gerais, que sugerem contaminação bastante acentuada, maiores dimensões e altos valores de condutividade aparente (superiores a 100 mS/m) mais superficialmente (profundidades até 7,5). Já em maiores profundidades, 15 m e 30 m, nas regiões sobre as cavas, a zona anômala apresenta valores de condutividade aparente não tão elevados, em torno de 40 mS/m, e dimensões reduzidas, caracterizando a diminuição da concentração de contaminantes em maiores profundidades.

Foi observado no mapa de 30 m de profundidade (aquífero profundo), uma zona de alta condutividade ao norte (N) da área. Esta apresenta valores de condutividade aparente entre 10 mS/m a 30 mS/m. De acordo com os estudos realizados tem-se duas hipóteses para os elevados valores de condutividade aparente nesta região. Esta anomalia pode ser indicativo da existência de contaminação em regiões mais

distantes que foram atingidas devido ao deslocamento horizontal da pluma. No entanto, sabe-se que nesta direção (N), há outro depósito de resíduos, também desativado. Dessa forma, existe a possibilidade desta alteração ser causada por substâncias provenientes deste local. No entanto, os resultados deste trabalho não permitem uma análise precisa sobre essa questão.

A associação dos dados elétricos e eletromagnéticos possibilitou uma boa caracterização geológico-ambiental da área, fornecendo informações quanto à geologia local, a partir dos dados das sondagens elétricas verticais (SEV's) e quanto ao comportamento da contaminação, a partir dos dados dos caminhamentos eletromagnéticos e elétricos. A contaminação existente é identificada pelos ensaios geofísicos e confirmada pelas análises de águas dos poços existentes no local.

É importante lembrar que a integração dos dados geofísicos aos dados dos poços de investigações diretas existentes no local foram imprescindíveis para ajustar e refinar os modelos geológico-ambientais obtidos.

## 7. REFERÊNCIAS

BENSON, R.C.; GLACCUM, R.A. & NOEL, M.R. - 1982 - Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p.

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

BRAGA, A .C.O. - 1999 - Métodos de Prospecção em Hidrogeologia. Apostila Interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP.

BRATUS A., NIETO YABAR D. - 2005 - Characterisation of three waste disposals using resistivity and IP methods. VII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, Salvador - Ba, 7CISBGf/PS4.

COSTA, J. A. & Ferreira, J. C. - 1997 - Lixão de Serrana: caracterização do problema ambiental e proposição de soluções. Relatório final, contrato Petrobrás, UNAERP, 91 p.

DAHLIN, T.; GARIN, H. & PALM, M. - 2004 - Combined resistivity imaging and RCPT for geotechnical pre-investigation. Procs. Nordic Geotechnical Meeting (NGM). Yastad, Sweden.

DAVINO, A. - 1990 - Os basaltos como meios fissurados, na região de Ribeirão Preto (SP). Principais Métodos de pesquisa, com ênfase na prospecção geofísica. Anais do XXXVI. Congresso Brasileiro de Geologia, Natal – RN, 5, pp. 2484-2496.

DEHAINI, J. - 1991 - Geofísica: um instrumento de estudo da poluição das águas subterrâneas, Trabalho de graduação, Instituto Astronômico e Geofísico, USP - 62 p.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. - 1998 - Caminhamento elétrico dipolo-dipolo - uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Vol I, pp. 39-48.

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

ELIS, V. R. - 2000 - Modelagem 2D de seções de caminhamento elétrico dipolo dipolo em estudos ambientais. Geociências. São Paulo: v.19, p.96 – 105.

ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J.M.B. & MARTIN, E. - 1990 - Mapeamento Geofísico do Lixão de São Carlos. Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Porto Alegre-RS, pp. 82-88.

FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R.; FORLIN M.; FRANKE, N. D. ; VILLANOVA, S. N.; STASIAK L. - 2001 - Ensaio de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Chumbo e Zinco no Alvo Paqueiro, Vale do Ribeira-PR. VII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, Salvador - Ba, pp. 609-612.

GALLAS, J.D.F. - 2000 - Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 174 p.

GOLDEN SOFTWARE, Inc. – 1996 – Surfer<sup>(tm)</sup> for Windows V6. Reference Manual. Golden, Colorado – USA.

JOHNSON, I. M., - 1984 - Spectral induced polarization parameters as determined through time- domain measurements, Geophysics, v. 49, nº 11, pp. 1993-2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT - 1981 - Mapa Geológico do Estado de São Paulo. IPT, São Paulo - SP, 2 volumes.

KELLY, W.E. - 1976 - Geoelectric Sounding for delineating groundwater contamination. *Ground Water* v. 14 (1), pp. 6-10.

LOKE, M. H. – 1999 – Software User’s Manual. Res2dInv version 3.3. for Windows 3.1 and 95 – Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Penang, Malaysia, 35p.

LUIZ, J. G.; MORALES, G. P.; ALVES, J. G. V. & LOPES, E. – 1999 – Apparent resistivity in Complexo do Aurá Landfill, Ananindeua – Pará – Brazil. VI Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, Rio de Janeiro – RJ. SBGF, 1999. v. 1.

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. V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo – SP. v. 1, pp 422-424.

McNEILL, J.D. - 1980 - Eletromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Nota técnica nº 6, Geonics, 15p.

MEJU, M. A. - 2000 - Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 115-150.

MORALES, G. P.; MENDES, R. L. R. - 2001 - Delimitação da pluma de contaminação dos resíduos sólidos do lixão do Aura (Ananindeua – PA) por imageamento elétrico. VII Congresso Internacional Da Sociedade Brasileira De Geofísica, Salvador – Ba, SBGF, p.232-235.

MOSCOW STATE UNIVERSITY – 2004 - IPI 2WIN v. 2.1. user's guide. Moscow, Russia, 25p.

MOURA, H. P. - 2002 -Emprego da Eletroresistividade e da Polarização Induzida na Caracterização Geométrica de Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese (doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP. 231 p.

ORELLANA, E. - 1972 - Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua. Madrid: Paraninfo, 523 p.

ORELLANA, E. - 1974 - Prospeccion Geoelectrica por Campos Variables. Madrid: Paraninfo, 561 p.

PALMA, C. M. - 2004 - Detalhamento elétrico de uma pluma de contaminação no Bloco Aquífero Caraíba usando eletrodos enterrados. Dissertação de Mestrado, UFBA, 48p.

PELTON, W.H.: WARD, S. H.; HALLOF, P. G.; SILLS, W. R.; NELSON, P. H. - 1978 - Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.

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

ROSQVIST, H., DAHLIN, T., FOURIE, A., ROHRS, L., BENGTSSON, A. & LARSSON, M. - 2003 - Mapping of two leachate plumes at two landfill sites in South Africa using geoelectrical imaging techniques. *Proceedings of Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita de Pula (Cagliari), Sardinia, Italy, 10p.

SANTOS, F. M. - 2005 - Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá-MT. *Dissertação (Mestrado)*. Departamento de Física. Instituto de Ciências Exatas e da Terra (ICET). Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). 101 p. Cuiabá-MT.

SCINTREX LTDA. - 1995 - IPR-12 Time Domain Induced Polarization/Resistivity Receiver. *Reference Manual*.

SHERIFF, R.E. - 1989 - *Geophysical Methods*. Prentice Hall, New Jersey, 605p.

SIEGEL, H. O., - 1959 - Mathematical formulation and type curves for induced polarization: *Geophysics*, 24, 547 – 565.

SOUPIOS P, PAPADOPOULOS I, KOULI M, GEORGAKI I, VALLIANATOS F, KOKKINO E - 2006 - Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, *Environmental Geology*.

STEVANATO, R. ; FERREIRA, F. J. F. ; PEGORARO, M. ; TAVARES, F. S. - 2003 - Imageamento elétrico 2-D e polarização induzida na detecção de pluma de contaminação no aterro sanitário de Itajáí-SC. VIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, Rio de Janeiro - RJ. CD-Rom.

SUMNER, J.S. - 1976 - Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227p.

URISH, D.W. - 1983 - The practical applications of surface electrical resistivity to detection of groundwater pollution. *Ground Water* 21 ( 2 ), pp. 144-152.

VOGELSANG, D. - 1995 - Environmental Geophysics. A practical guide. Springer-Verlag, Berlin, 172p.

WARD, S. H. - 1990 - Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics, SEG*, v. 5, p. 147-189.