

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS  
NO ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO DE  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO  
LIXÃO DE CUIABÁ-MT**

**FERNANDA MARCIELLI SANTOS**

**ORIENTADOR: PROF. DR. SHOZO SHIRAIWA**

Cuiabá-MT, março de 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS  
NO ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO DE  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO  
LIXÃO DE CUIABÁ-MT**

**FERNANDA MARCIELLI SANTOS**

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física e Meio Ambiente. Área de Concentração: Geohidro.*

**ORIENTADOR: PROF. DR. SHOZO SHIRAIWA**

Cuiabá, MT, março de 2005.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus queridos pais Antônio, Cleusa e Solange pela dedicação e estímulo, ao meu esposo André Nunes de Moraes pelo carinho e compreensão, à filha que esperamos: Juliana Santos Moraes, a todos os familiares e amigos, com muito amor e gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS pela força e coragem para continuar.

Ao CNPq pela Bolsa de Formação de Pesquisador de Mestrado concedida (processo n° 133239/2003-9).

Ao Profº. Dr. Shozo Shiraiwa pela orientação e incentivo na minha formação de mestra. Por ter contribuído com seus conhecimentos e sugestões para melhorar e corrigir o necessário, enriquecendo este trabalho.

Ao Profº. Ms. Alteredo Oliveira Cutrim pela orientação e valorosa colaboração.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente (UFMT) e à secretária Soilce pelo apoio dado no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Profº. Dr. Nicolau Priante Filho, ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira e à Profª. Dra. Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira pelo carinho, amizade e transmissão de conhecimentos ao longo do curso.

Aos amigos mestrandos Mário José Pereira e Luiz Fernando Jorge da Cunha pela ajuda nas coletas de campo, troca de conhecimentos e no levantamento bibliográfico e aos demais colegas de curso.

Aos alunos do curso de Geologia da UFMT pelas contribuições nos trabalhos de campo e coleta de dados, principalmente ao Sérgio Júnior Silva Fachin, ao Félix Huber, à Tânia Helena Marcelino e à Karen Crystina de Oliveira.

Ao técnico Alexandrino Leite do Nascimento pela experiência e auxílio nos trabalhos de campo.

Aos meus pais pelo exemplo de amor, paciência, esforço, otimismo e fé. Obrigada pelo carinho e por me incentivar a prosseguir.

Ao meu marido pelo amor, carinho e paciência que sempre teve, ajudando-me e estando presente em todos os momentos importantes da minha vida.

À Juliana, nossa filha querida que faz parte de nossas vidas, para que ela cresça com muito amor.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	xii
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. TRABALHOS EM ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS .....	7
2.2. TRABALHOS REALIZADOS NO LIXÃO DE CUIABÁ – MT .....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	19
3.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
3.1.1. Localização da Área .....	20
3.1.2. Aspectos Geológicos .....	21
3.1.3. Planejamento de Campo .....	23
3.2. MÉTODOS DE ELETRORESSISTIVIDADE .....	25
3.2.1. Sondagem Elétrica Vertical (SEV) .....	29
3.2.1.1. Interpretação das SEVs .....	30
3.2.2. Caminhamento Elétrico (CE) .....	31
3.3. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS .....	31
3.3.1. Método Eletromagnético Indutivo (EM-34) .....	36
3.4. CONSTRUÇÃO DOS MAPAS DE RESISTIVIDADE APARENTE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA .....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	40
4.1. SONDAÇÃO ELÉTRICA VERTICAL .....	41

4.2.	CAMINHAMENTO ELÉTRICO .....	55
4.3.	CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO .....	59
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Profundidade teórica de investigação segundo alguns autores .....	29
TABELA 02 – Profundidades do nível d'água e da camada de menor resistividade com suas respectivas cotas e altitudes das SEVs .....	47

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Localização do antigo depósito de resíduos urbanos de Cuiabá (FARIA, 2001) .....	22
FIGURA 02 – Localização dos ensaios geofísicos no depósito de resíduos de Cuiabá (SHIRAIWA et al, 2001).....	25
FIGURA 03 – Bloco homogêneo de definição da resistividade (REYNOLDS, 1997) .....	27
FIGURA 04 – Circuito elétrico equivalente ao cubo (REYNOLDS, 1997) .....	27
FIGURA 05 – Representação bidimensional da semi-esfera equipotencial (adaptado de BRAGA, 2002) .....	28
FIGURA 06 – Distribuição das linhas de fluxo de corrente e das linhas equipotenciais utilizando o arranjo Schlumberger (BORGES, 2002) .....	29
FIGURA 07 – Propagação da onda eletromagnética (adaptado de REYNOLDS, 1997) .....	32
FIGURA 08 – Movimentação de cargas associada à corrente de condução (adaptado de ANNAN, 1992) .....	34
FIGURA 09 – Movimentação de cargas associada à corrente de deslocamento (adaptado de ANNAN, 1992) .....	35
FIGURA 10 – Indução eletromagnética (adaptado de TELFORD et al, 1990) .....	37
FIGURA 11 – Profundidades de investigação do EMI. (a) Cabo de 10 metros e dipolo horizontal; (b) Cabo de 10 metros e dipolo vertical; (c) Cabo de 20 metros e dipolo horizontal; (d) Cabo de 20 metros e dipolo vertical (BORGES, 2005) .....	38
FIGURA 12 – Semivariograma Usado na Krigagem Ordinária (LANDIM & STURARO, 2002) .....	40

FIGURA 13 – Localização dos ensaios geofísicos no depósito de resíduos de Cuiabá (SHIRAIWA et al, 2001) .....	40
FIGURA 14 – Modelo geoeétrico das SEVs 01 e 12 .....	42
FIGURA 15 – Modelo geoeétrico das SEVs 02 e 03 .....	43
FIGURA 16 - Modelo geoeétrico das SEVs 04, 09 e 10 .....	44
FIGURA 17 – Modelo geoeétrico das SEVs 13 e 14 .....	46
FIGURA 18 – Modelo geoeétrico da SEV 15 .....	46
FIGURA 19 – Mapa Potenciométrico do antigo depósito de resíduos .....	48
FIGURA 20 – Seções de resistividade do modelo geoeétrico das SEVs com os níveis para elaboração dos mapas de resistividade .....	49
FIGURA 21 – Mapa de Resistividade Aparente para a Cota 285 metros .....	50
FIGURA 22 – Mapa de Resistividade Aparente para a Cota 282 metros .....	51
FIGURA 23 – Mapa de Resistividade Aparente para a Cota 280 metros .....	52
FIGURA 24 – Mapa de Resistividade Aparente para a Cota 275 metros .....	53
FIGURA 25 – Mapa de Resistividade Aparente para a Cota 270 metros .....	54
FIGURA 26 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 2 .....	55
FIGURA 27 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 3 .....	56
FIGURA 28 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 5 .....	57
FIGURA 29 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 9 .....	58
FIGURA 30 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 1 em (a) condutividade em função da distância e em (b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	60
FIGURA 31 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 2 em (a) condutividade em função da distância e em (b) isovalores da condutividade com a profundidade e em (c) isovalores da condutividade (SHIRAIWA et al, 2001) .....	62

FIGURA 32 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 3 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	63
FIGURA 33 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 4 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	64
FIGURA 34 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 5 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade e em	
(c) isovalores da condutividade (SHIRAIWA et al, 2001) .....	66
FIGURA 35 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 8 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	67
FIGURA 36 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 9 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	68
FIGURA 37 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 10 em	
(a) condutividade em função da distância e em	
(b) isovalores da condutividade com a profundidade .....	69
FIGURA 38 – Mapa de topografia da área e pseudo-seções de condutividade elétrica nas profundidades de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros .....	70
FIGURA 39 – (a) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 7,5 metros, em (b) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 15 metros e em (c) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 30 metros .....	71
FIGURA 40 – Mapa de resistividade aparente (ELIS & MATOS, 1995) .....	72
FIGURA 41 – Localização dos pontos de coleta das amostras (FARIA, 2001) .....	73

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

RSU	resíduo sólido urbano
COT	carbono orgânico total
DBO <sub>5</sub>	demanda bioquímica de oxigênio
DQO	demanda química de oxigênio
pH	potencial hidrogeniônico
CO	monóxido de carbono (gás)
CH <sub>4</sub>	gás metano
H <sub>2</sub> S	gás sulfídrico
SEV	sondagem elétrica vertical
CE	caminhamento elétrico
O <sub>2</sub>	gás oxigênio
m	metros
GPR	radar de penetração no solo
IP	polarização induzida
EMI	caminhamento eletromagnético indutivo
Km <sup>2</sup>	kilômetros quadrados
°C	graus Celsius
ha	hectare
cm	centímetros
GPS	global positioning system
$\rho$	resistividade elétrica
$\sigma$	condutividade elétrica
$\epsilon$	permissividade dielétrica
$\mu$	permeabilidade magnética
mS/m	miliSiemens por metro
$\Omega$ .m	Ohm vezes metro
F/m	Faraday por metro

## RESUMO

SANTOS, F.M. *Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação da águas subterrâneas no Lixão da Cuiabá-MT*. Cuiabá, 2005. 88p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso.

A Geofísica Aplicada engloba um conjunto de métodos de investigação indireta que servem para avaliar o substrato rochoso e determinar suas propriedades físicas, sua estrutura e nível do lençol freático. No caso específico de depósitos de lixo desativados, a investigação do subsolo pela geofísica fornece informações capazes de auxiliar na identificação e mapeamento da pluma de contaminação em águas subterrâneas. A área do antigo depósito de resíduos urbanos de Cuiabá – MT mostrou-se inadequada para tal atividade, pois já em 1994 foi constatada a contaminação do lençol subterrâneo usando a técnica de sondagem elétrica vertical. A proposta deste trabalho é determinar a extensão e evolução temporal da pluma de contaminação provocada pelo chorume produzido pela degradação dos resíduos sólidos da área. Os métodos geofísicos utilizados para investigação foram eletroressistividade com arranjo Schlumberger aplicando as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico e caminhamento eletromagnético indutivo. A combinação destes métodos associados com a interpretação geológica do local contribuem para acompanhar a evolução da pluma e seu monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: geofísica, depósito de resíduos, Cuiabá.

## ABSTRACT

SANTOS, F.M. *Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação da águas subterrâneas no Lixão da Cuiabá-MT*. Cuiabá, 2005. 88p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso.

The Applied Geophysics includes a group of indirect investigation methods, that are used to assess the rocky substratum and determine its physical properties, its structure and the level of the groundwater. In the specific case of inactive waste dump, the underground investigation by geophysics gets information able to help in the identification and mapping of groundwater contamination plume. The old waste dump site of Cuiabá – MT, showed the inadequacy of the area to this activity, verifying the groundwater contamination, using the technique of vertical electric sounding. The purpose of this work is to determine the extension and evolution in time of the contamination plume, caused by leachate, that is produced due to solid residues degradation in that area. The geophysics methods used in the investigation were electric resistivity with Schlumberger array, applying the techniques of vertical electric sounding and electric spread and electromagnetic spread. The combination of these methods associated to the geologic interpretation of the area help to follow the evolution and monitoring of the plume.

**KEYWORDS:** geophysics, waste dump, Cuiabá.

## 1. INTRODUÇÃO

A investigação de áreas de depósito de resíduos sólidos, especificamente, no estudo da hidrogeologia e do mapeamento da pluma de contaminantes em áreas de deposição de resíduos sólidos tem utilizado os conhecimentos de geofísica aplicada para estudar os problemas de contaminação provocados pelo chorume.

De 1982 a 1997, a disposição de resíduos sólidos na cidade de Cuiabá-MT foi realizada, de forma descuidada e sem impermeabilização da base, no antigo depósito de resíduos urbanos, localizado no Km 6 da Rodovia Emanuel Pinheiro (MT-251).

Estudos realizados anteriormente por MATOS (1994), SHIRAIWA et al (2001) e FARIA (2001) mostram que a contaminação, provocada por uma alta carga poluidora originada de metais e contaminantes, atinge o nível d'água podendo comprometer a saúde da população que utilizar desta água gerando problemas de contaminação ambiental.

Deste modo, a qualidade da água fica comprometida pela contaminação provocada pela inadequada disposição de resíduos sólidos na área, gerando impactos negativos sobre a saúde e preservação ambientais. Estes problemas podem afetar a Bacia do rio Cuiabá que recebe contribuição do córrego que está sendo contaminado.

Para estudar a área foram realizadas três campanhas de campo, no período de março a junho de 2004, utilizando os métodos geofísicos de eletrorresistividade, incluindo as técnicas de sondagem elétrica vertical e de caminhamento elétrico, e o método de caminhamento eletromagnético indutivo.

Estes métodos permitiram a obtenção de informações sobre as condições geológicas e hidrogeológicas da subsuperfície através de técnicas não-invasivas. A interpretação conjunta desses métodos, desde que adequadamente escolhidos e dimensionados, forneceu importantes informações a respeito da localização e

espessura da camada de resíduos, da profundidade do lençol freático e sentido do fluxo subterrâneo e das características litológicas e geológicas do perfil.

Os levantamentos geofísicos buscaram identificar a correlação das propriedades físicas de resistividade e condutividade com a pluma de contaminação proveniente do depósito de resíduos e determinar as direções preferenciais de fluxos d'água, poluídas pelo chorume, com o intuito de avaliar a evolução temporal da contaminação provocada por este depósito.

O objetivo principal desta pesquisa, realizada com o auxílio da geofísica, foi o de caracterizar o meio físico ocupado pelos resíduos sólidos, delimitar a zona de influência da contaminação e avaliar a evolução temporal da pluma de contaminação comparada com os estudos anteriormente realizados por MATOS (1994) e SHIRAIWA et al (2001).

Os resultados mostraram presença de contaminação na área estuda e serviram para caracterizar a área de depósito confirmando o objetivo esperado.

Esta dissertação é composta basicamente por seis capítulos.

A introdução mostra o conteúdo da dissertação e seus objetivos.

A revisão bibliográfica apresenta uma explanação sobre os depósitos de resíduos sólidos urbanos no Brasil, os problemas de contaminação gerados pela produção de chorume, quais os métodos geofísicos empregados para avaliação da pluma de contaminação e comentários sobre alguns trabalhos realizados em áreas de disposição de resíduos sólidos.

O capítulo de material e métodos exhibe as características da área estudada, o planejamento de campo realizado e os fundamentos teóricos do método de eletroressistividade, utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, e do método eletromagnético indutivo.

Os resultados e discussões obtidos com os diferentes métodos utilizados buscaram apresentar o perfil vertical do terreno, a direção do fluxo da pluma de contaminação, a profundidade do lençol freático e a espessura das camadas de resíduos.

Finalmente são apresentados o capítulo de conclusões e considerações referentes aos resultados encontrados e o capítulo das referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo exhibe informações sobre os problemas causados pela produção de chorume e pela incorreta disposição dos resíduos sólidos no meio ambiente, contribuindo para a contaminação dos recursos hídricos e gerando problemas de saúde e de poluição do ar e do solo. São abordados, ainda, os métodos geofísicos mais adequados para investigar a contaminação do subsolo, fundamentados na literatura e em trabalhos em áreas de disposição de resíduos urbanos, inclusive alguns realizados na mesma área do antigo depósito estudado.

O problema da contaminação surgiu com o desenvolvimento industrial e tecnológico fruto da Revolução Industrial. A população começou a produzir quantidades de resíduos sólidos cada vez maiores, sem se preocupar com a forma de disposição e os impactos ambientais provocados. Além disso, após a II Guerra Mundial, o rápido crescimento populacional e a urbanização acelerada resultaram na inadequada utilização dos recursos naturais e na degradação do meio ambiente.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10004 (1987), os resíduos sólidos que resultam de atividades da população são os resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, incluindo ainda, determinados líquidos e lodos de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. TEIXEIRA (1991) considera paradoxal uma norma de resíduos sólidos incluir sólidos, semi-sólidos, lodos e alguns líquidos.

Considerando a crítica de TEIXEIRA (1991) o resíduo sólido é composto por materiais sólidos e semi-sólidos provenientes de descartes de atividades urbanas, agrícolas, entre outras. O resíduo sólido resultante da limpeza urbana nas cidades recebe a denominação de resíduo sólido urbano (RSU).

De acordo com PEÑIDO MONTEIRO (2000), no Brasil se coleta cerca de 228.413 toneladas de resíduos sólidos diariamente, sendo 125.258 toneladas

referentes aos resíduos domiciliares. Dessa forma, a média nacional de produção de resíduos por habitante é cerca de 600g/hab.dia.

O desperdício devido ao incorreto manuseio dos alimentos nos supermercados, na preparação dos mesmos e nos procedimentos inadequados em toda a cadeia produtiva que compreende: industrialização, armazenagem, transporte e distribuição, poderiam alimentar muitas pessoas diariamente. Com isso, haveria uma redução de matéria orgânica diariamente descartada, diminuindo, assim, o volume de resíduo sólido urbano disposto no Brasil.

Analisando os resultados de PEÑIDO MONTEIRO (2000) quanto às unidades de disposição final de resíduos utilizados pelos municípios, verifica-se a predominância da prática de disposição a céu aberto, vulgarmente conhecida como lixões, representando 59% das unidades identificadas, seguida do aterramento controlado 16,9%. Os aterros sanitários representam 11,6% e os aterros de resíduos especiais 3%. As usinas de reciclagem totalizam 2,8%, as usinas de compostagem 3,9% e as de incineração 1,8% das unidades de destinação final de resíduos utilizados pelos municípios no País.

Este trabalho contempla os depósitos de resíduos urbanos a céu aberto, que são caracterizados pela simples descarga de lixo em um terreno, sem qualquer tratamento da base, sem captação e drenagem das águas superficiais e subterrâneas, sem a cobertura das células de lixo e sem tratamento dos gases gerados. Esta forma de disposição acarreta conseqüências graves para todo o ser vivo que direta ou indiretamente entre em contato com esta fonte de contaminação.

O líquido, conhecido por chorume, resultante da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos apresenta em sua fase ácida elevada concentração de carbono orgânico total (COT), de metais pesados, de nutrientes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>) e demanda química de oxigênio (DQO). Já em sua fase metanogênica, em que o pH varia de 6,5 a 7,5, estas concentrações decrescem.

HAMADA (1997) estudou o balanço de água em um aterro sanitário e o processo de estabilização do material orgânico disposto no aterro para estimar qualitativamente o volume de chorume presente na massa de lixo e projetar um sistema de tratamento para o mesmo.

A qualidade e o volume de chorume em um depósito de resíduos sólidos dependem da natureza dos resíduos aterrados e do grau de compactação, da composição do material de cobertura, das condições climáticas, da geologia e da permeabilidade da área (CASTILHO JUNIOR, 1991).

As bactérias e fungos realizam a degradação da matéria orgânica em duas fases distintas: aeróbica e anaeróbica. Na primeira fase, a produção de chorume é insignificante aumentando consideravelmente na segunda fase (PEREIRA NETO & STENTIFORD 1991). Nesta segunda fase as altas concentrações de ácidos carboxílicos e substâncias inorgânicas solúveis contribuem para elevar os valores de condutividade elétrica. Com o pH próximo da neutralidade, poucos materiais inorgânicos são solubilizados e conseqüentemente, a condutividade diminui. A seguir o pH aumenta para a faixa alcalina, os metais se precipitam e a carga orgânica do chorume diminui (SISINO, 1995).

Vários problemas ambientais podem ser gerados devido à incorreta disposição de resíduos como a propagação de vetores de doenças, a contaminação do ar, do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Do ponto de vista epidemiológico, referindo-se a possíveis agravos à saúde, os resíduos sólidos apresentam risco potencial de patogenicidade e de contaminação. O acúmulo de lixo provoca a proliferação de vários animais, como por exemplo, ratos, baratas, moscas, cobras, escorpiões, etc. A ação destes vetores transmissores de doenças aumenta o risco de propagação de diarreias, infecções respiratórias, peste bubônica, bicheiras, alergias, leptospirose, cólera, febre tifóide, esquistossomose, hepatite infecciosa, entre outras. Uma medida preventiva para afastar estes animais é cobrir as células de lixo com uma camada de material inerte para evitar esse perigo.

Dispostos inadequadamente, a produção dos gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) provenientes das reações químicas, que acontecem pela decomposição dos resíduos sólidos, causa contaminação do ar e produz odores desagradáveis podendo acontecer a explosão do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e aumento dos índices de problemas respiratórios.

No solo, o chorume também pode ser muito nocivo, pois altera suas características físicas, químicas e biológicas, inutilizando-o para agricultura.

A contaminação dos recursos hídricos e do solo pode ocorrer de duas formas:

- a) quando as águas pluviais que caem sobre o terreno escoam pela superfície do solo carreando poluentes até os mananciais;
- b) pela infiltração das águas de chuva que percolam através da massa de resíduo, transportando o chorume até atingir o lençol freático.

O chorume contamina a água com substâncias tóxicas, matando peixes e outros animais, e podendo impedir o uso da água potável para o abastecimento e consumo humano.

O lixo quando jogado nas vias públicas, entope os bueiros, canais e galerias, causando ou agravando enchentes. As chuvas também carregam o lixo para os córregos, rios, estuários e manguezais, provocando contaminação e assoreamento do leito dos rios. O risco de desabamentos e erosão aumenta com o lixo acumulado nas encostas, ameaçando os recursos naturais e a vida de pessoas e animais.

Além dos problemas ambientais e de saúde, existe o grave problema social dos catadores de materiais recicláveis – homens, mulheres e crianças – que atuam nas ruas e nos lixões sobrevivendo do lixo.

Para solucionar estes problemas ambientais, econômicos e sociais é importante:

- a) a educação ambiental da comunidade;
- b) fazer a separação do material reciclável na usina de triagem inserindo os catadores no mercado de trabalho;
- c) transformar a matéria orgânica que representa, no caso do Brasil, mais de 50% da produção de lixo, em composto orgânico para ser usado na agricultura;
- d) e o que sobrar, que não for reaproveitável, dispor corretamente em aterros sanitários, para reduzir a quantidade de lixo a ser aterrado.

Com isso, os custos do processo produtivo para geração de materiais de consumo, que envolvem gastos com água e energia, serão diminuídos e os recursos naturais preservados.

A geofísica, utilizada neste trabalho, comparada aos métodos tradicionais de investigação direta do subsolo, é uma ferramenta que possibilita encontrar, de forma indireta e rápida, subsídios sobre as condições geológicas e hidrológicas do terreno.

Os métodos geofísicos podem ser usados na procura de feições geológicas da subsuperfície – mineralogia, grau de alteração, teor de umidade, fraturamento, porosidade e outros fatores – que variam em função dos parâmetros físicos de resistividade e condutividade elétrica.

Valores elevados de condutividade elétrica estão relacionados às altas concentrações de ácidos carboxílicos e substâncias inorgânicas solúveis presentes no chorume (SISINO, 1995). Conseqüentemente, os métodos elétricos são eficientes na localização e caracterização da pluma de contaminação do lixão.

A prospecção geofísica, utilizando o método de eletroressistividade e o método eletromagnético indutivo, utiliza respostas condutivas e magnéticas para caracterizar as interferências da subsuperfície e de contaminação do meio.

A escolha destes métodos na caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos justifica-se pelas possibilidades de utilização registradas na literatura.

A interpretação conjunta desses métodos, desde que adequadamente escolhidos e dimensionados, podem fornecer importantes informações a respeito da camada de resíduos, das características litológicas e geológicas do perfil, da posição da zona saturada e da direção do fluxo da pluma de contaminação.

## **2.1. TRABALHOS EM ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EMPREGANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

A utilização da metodologia geofísica para investigação de contaminantes em águas subterrâneas têm sido aplicada devido a sua versatilidade, rapidez na obtenção de resultados e custo relativamente baixo comparado aos métodos convencionais de prospecção.

Nos últimos anos, essa área da geociência teve um rápido desenvolvimento devido ao grande interesse em estudos ambientais. Na América do Norte, há cerca de 4 décadas, começaram a ser aplicadas as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE) para definir a profundidade e a extensão de corpos de água subterrânea contaminados.

Na década de 70 a metodologia geofísica, apesar de suas limitações, já era aplicada nos estudos dos problemas de contaminação do solo e da água pelo chorume. No entanto, ainda eram escassas as informações a respeito do nível mínimo de contaminação capazes de serem registrados através dos métodos de eletroressistividade. KLEFSTAD et al (1975) sugeriram que estes valores deveriam ser definidos previamente para que os resultados fossem aplicados com segurança.

Conforme KELLY (1976) a aplicação de sondagens elétricas mostrou um bom grau de correlação com a análise de amostras de água em poços de monitoramento para caracterização de áreas contaminadas. Os valores de condutividade nos dois casos foram semelhantes. Desta forma, o uso da geofísica foi comprovado no estudo da pluma de contaminação em áreas de depósito de resíduos e na verificação da qualidade das águas.

BENSON & YUHR (1982) apresentaram um trabalho descrevendo o uso de seis técnicas geofísicas, entre elas: a resistividade, o método eletromagnético indutivo e do radar de penetração no solo. Suas aplicações foram comprovadas na detecção de resíduos enterrados e na migração desses resíduos ou na pluma de contaminantes gerados.

Muitas limitações eram, ainda, encontradas tais como: topografia, precisão nas leituras dos equipamentos, ruídos externos, entre outras, que deveriam ser sanadas. Mesmo assim, URISH (1983) estudando a pluma de contaminação gerada por chorume em áreas de depósitos de resíduos sólidos, por resíduos líquidos de reprocessamento de urânio e por contaminação de água doce por água salgada em áreas litorâneas, mostrou que o método da eletroressistividade fornecia resultados satisfatórios.

Segundo GREENHOUSE & SLAINE (1983) a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações.

Nos aterros sanitários de Taubaté, São José dos Campos e Novo Horizonte – SP; em áreas de infiltração de vinhaça em Novo Horizonte e Ribeirão Preto – SP; nos aquíferos costeiros de São Paulo contaminados por intrusões salinas; e em áreas industriais com problemas de poluição e contaminação, MENDES (1987) usou os métodos de eletroressistividade e eletromagnético indutivo sugerindo a aplicação

conjunta dos métodos para garantir um grau de confiança maior nos resultados obtidos.

COLLINS & JOHNSONS (1988) mostraram alguns métodos de campo usados na determinação da contaminação de águas subterrâneas.

Exemplos de aplicação de métodos elétricos e eletromagnéticos na detecção da contaminação de águas subterrâneas em áreas de disposição de resíduos sólidos são encontrados em BUSELLI et al (1990). Na Austrália, estes autores aplicaram a técnica de sondagens elétricas e os métodos eletromagnéticos no domínio do tempo e TEM – Transient Electromagnetics – para estabelecer a relação entre locais de disposição de resíduos sólidos e contaminação do subsolo pelo chorume mostrando que a aplicação conjunta destas técnicas foi mais efetiva para caracterizar locais contaminados.

ELLERT et al (1990), utilizando o método eletromagnético indutivo no Lixão de São Carlos – SP, detectaram a pluma de contaminação que foi representada por valores muito altos de condutividade elétrica. O chorume, proveniente da decomposição da matéria orgânica nos depósitos de resíduos sólidos, por ser ácido e rico em sais minerais torna o meio mais condutivo.

Com o objetivo de fornecer informações sobre as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas locais, o perfil vertical do aterro, a camada de resíduos, as quantidades de resíduos introduzida no meio e o sentido do fluxo subterrâneo CARPENTER et al (1990) citam os métodos elétricos e eletromagnéticos para caracterizar a estrutura dos depósitos de resíduos e para monitorar e mapear a pluma de contaminantes.

Em um aterro sanitário de Chicago – E.U.A., CARPENTER et al (1991) definiram a pluma de contaminação e o perfil vertical usando Sondagens Elétricas Verticais e Sísmica de Refração. Para comparar com as respostas encontradas foram analisadas amostras obtidas através de poços perfurados indicando boa correlação com os métodos geofísicos. Apesar da grande atenuação sofrida pelas ondas dentro dos resíduos, os autores citam que a correlação dos dados sísmicos com os dados geoeletricos auxilia a determinação de zonas de fraturamento profundo dentro do aterro.

Em sua tese de doutorado MALAGUTTI FILHO (1991) demonstra a importância e a viabilidade da aplicação das técnicas geofísicas de sísmica de refração e de Sondagem Elétrica Vertical na determinação das propriedades geológico-geotécnicas, na determinação das espessuras dos diferentes horizontes da camada inconsolidada acima do topo rochoso e no posicionamento do lençol freático. Um estudo experimental, foi executado em três áreas de teste previamente determinadas e a interpretação integrada dos resultados geofísicos obtidos em cada uma destas áreas, mostrou a complexidade da variação dos parâmetros físicos medidos, em cada uma das litologias abrangidas pelo estudo. O produto final dessa interpretação, sintetizado em seções sísmo-elétricas, permitiu concluir que as técnicas geofísicas empregadas, constituem valiosa ferramenta que deve ser utilizada de forma normalizada na definição da adequabilidade dos terrenos, para diferentes tipos de uso pelo homem, dentro dos estudos integrados de planejamento.

No Estado do Rio Grande do Sul, COSTA & FERLIN (1993) também utilizaram o método eletromagnético indutivo em depósitos de resíduos sólidos e áreas de deposição de lodo de curtume encontrando bons resultados. Em um dos depósitos de lixo estudados, foi feito um acompanhamento da evolução da pluma de contaminantes durante um ano de coletas de dados. Observando-se as diferenças entre os valores de condutividade nesse período foi possível concluir que a pluma está em expansão, devido ao aumento da condutividade com o tempo.

ELIS (1993) em seu trabalho de dissertação apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre o potencial de aplicação da geofísica para obtenção de interesse para a geotecnia, hidrogeologia e geologia ambiental. Considerando os princípios básicos das técnicas de sísmica de refração, sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico e suas possibilidades de aplicação em processos de mapeamento geotécnico, o autor estudou áreas com características geológico-geotécnicas distintas para avaliar a eficiência das técnicas apresentadas na obtenção de atributos do meio físico. A partir dos resultados dos ensaios foram construídos mapas e perfis individualizando os atributos nível d'água, posicionamento do topo da rocha sã e saprolito e características da transição solo-rocha.

BOIAN (1995) objetivando estimar o grau de contaminação de um ambiente hidrogeológico em sedimentos do Grupo Bauru, devido à deposição de lixo urbano

em superfície, selecionou uma área compreendida pelo aterro sanitário do município de São José do Rio Preto (SP), situada nos domínios litológicos da Formação Adamantina desses sedimentos. Assim, para estimar a influência do aterro sanitário na qualidade da água subterrânea local, foram correlacionados dados de métodos diretos e indiretos de investigação. Os dados indiretos foram obtidos através de metodologia geofísica de indução eletromagnética de correntes no terreno e os dados diretos foram obtidos através de análises físico-químicas de amostras integradas de água subterrânea local, de chorume bruto e de chorume tratado por meio de sistema de lagoas de estabilização. Além disso, foram realizados testes de DBO<sub>5</sub>, DQO, toxidade e contagem microbiana.

Um estudo de contaminação de águas superficiais e subterrâneas provocada pelo depósito de resíduos sólidos de Brasília – DF, realizado por FRANCO & PIRES (1995), apresenta informações obtidas utilizando-se técnicas geofísicas e química aquática. As sondagens elétricas verticais realizadas na proximidade do aterro caracterizam bem a estruturação do solo desenvolvido sobre ardósia. Através dos testes químicos de espectrofotometria, pH, alcalinidade, condutividade, O<sub>2</sub> dissolvido e consumido e de sólidos totais dissolvidos pôde-se observar que os níveis de concentração de metais na água foram baixos representando um efeito da dispersão e diluição dos contaminantes da pluma de contaminação do lixão antigo até a nascente do Córrego do Acampamento. Para determinação mais conclusiva da pluma de contaminação concluiu-se que seria necessário um maior adensamento de SEVs.

ELIS & ZUQUETTE (1996) utilizaram o Caminhamento Elétrico dipolo-dipolo na no Lixão desativado de Ribeirão Preto – SP definindo com precisão os limites da base da cava e a posição da camada de resíduos.

No aterro sanitário de Ribeirão Preto – SP, ELIS & ZUQUETTE (1997) utilizaram a interpretação conjunta dos métodos de Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo. Foram obtidas informações importantes, como profundidade da zona saturada, fluxo subterrâneo, posição dos resíduos, formato e extensão da pluma de contaminação e profundidade do topo rochoso.

GÓIS et al (1997) no aterro da Lamenha Pequena fez um mapeamento geoeletrico para determinar o fluxo da pluma de contaminantes.

Na avaliação do impacto ambiental provocado pelo aterro controlado de Rio Claro – SP, MALAGUTTI FILHO et al (1997) aplicaram os métodos de Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo, Polarização Induzida, Sondagens Elétricas, Sísmica de Refração e Eletromagnético Indutivo. Os resultados permitiram caracterizar os materiais geológicos, resíduos, nível d'água e fluxo subterrâneo.

Ensaio geofísicos pelos métodos da eletrorresistividade através da técnica da sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger e Polarização Induzida no domínio do tempo foram executados por BRAGA (1997) em áreas de ocorrência das Formações Rio Claro e Corumbataí, no município da cidade de Rio Claro – SP. Foi possível obter uma caracterização das litologias destas Formações e avaliar o grau de relação entre parâmetros geoeletricos e ensaios geotécnicos Standard Penetration Test – SPT. A interpretação, simultânea, dos parâmetros resistividade e cargabilidade, além de reduzir as ambigüidade nos modelos obtidos, delimitou com boa precisão as diferentes litologias nas áreas estudadas, identificando materiais arenosos, siltosos e argilosos. Na associação com os números de golpes dos SPT, foram calculados ainda, os parâmetros de Dar Zarrouk: resistência transversal e condutância longitudinal. Os parâmetros, resistividade e condutância longitudinal, apresentaram melhor associação com os ensaios de SPT, permitindo elaborar equações que relacionam estes parâmetros com os valores de golpes do SPT.

Utilizando a técnica de Sondagens Elétricas Verticais, BAGANHA (1997) demonstrou que a migração do chorume pode provocar uma pluma de contaminação no solo, desde sua faixa insaturada até atingir o nível freático, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas. Para se detectar e monitorar a contaminação ambiental hidrogeológica, foi escolhida a área do Aterro Sanitário do Parque Santa Bárbara, no município de Campinas – SP. O emprego das SEVs conduziu a um mapeamento e monitoramento da pluma de contaminação. Concomitantemente, foram extraídas amostras de água para análises químicas, objetivando a comparação desses dados com os resultados obtidos através da investigação geofísica.

Vários relatos conforme REYNOLDS (1997) e em outras literaturas apontam os métodos de eletroressistividade e eletromagnético como principais para mapear a pluma de contaminação provocada pela infiltração de chorume nos depósitos de resíduos.

ELIS (1998) em sua tese de doutorado estudou um Lixão desativado em Ribeirão Preto – SP, o aterro sanitário de Ribeirão Preto – SP, o Lixão de Poços de Caldas – MG, uma área de disposição de resíduos ricos em cromo, originados da indústria de couro, em Restinga – SP e o aterro Bandeirantes em São Paulo – SP. Sua proposta foi mostrar as possibilidades e limitações de aplicação dos métodos elétricos no estudo de áreas de disposição de resíduos e da contaminação gerada. A escolha do método mais adequado para cada caso e o planejamento dos ensaios resultaram na obtenção de uma série de informações importantes com respeito a estrutura dos depósitos de resíduos, volume de rejeitos, perfil vertical do terreno, fluxo subterrâneo, e as relações envolvendo a quantidade de resíduos introduzida no meio e as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas. Este estudo é muito útil no estudo de novas áreas de disposição e para recuperação de áreas degradadas e transformação de lixões em aterro sanitários. Foram utilizados os métodos da Eletroressistividade, do Potencial Espontâneo e da Polarização Induzida. Porém, o método de Eletroressistividade mostrou-se como a melhor ferramenta para aplicação nesse campo de estudo. A aplicação conjunta dos ensaios de sondagem e caminhamento possibilitou a definição clara do fluxo subterrâneo.

Investigando áreas de disposição de resíduos em um aterro sanitário em Ribeirão Preto – SP, no aterro Bandeirantes em São Paulo – SP e de resíduos de curtume em Franca – SP, ELIS & ZUQUETTE (1999) utilizaram a técnica de Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo para avaliar como a dimensão da área estudada interfere na qualidade dos dados encontrados. Observou-se que a qualidade da informação obtida decresceu com o aumento do espaçamento entre os eletrodos, que é o recurso utilizado para investigar níveis mais profundos em empreendimentos de maior porte.

BRAGA et al (1999) estudaram o lençol freático no município de Itacemópolis – SP utilizando as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical com arranjo Schlumberger e Caminhamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo em áreas de disposição de resíduos industriais. Evidenciaram que a pluma de contaminação tende a diminuir sua faixa de abrangência em função da profundidade restringindo-se a locais isolados. Determinaram, ainda, as direções preferenciais do fluxo d'água

subterrânea identificando duas direções preferenciais que acompanham, de um modo geral, a topografia do local estudado.

CAVALCANTI et al (1999) estudaram a hidrologia subterrânea da área de um aterro sanitário na região metropolitana de Salvador utilizando as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical com arranjo Schlumberger, de Polarização Induzida e de Potencial Espontâneo. Por ser recente a operação do aterro, o enfoque do trabalho não foi investigar contaminação subterrânea e sim monitorar o lençol freático preservando e fazendo-se melhor uso da área em questão. As informações adquiridas possibilitaram a análise do local com estabelecimento de um padrão referencial físico que permitiu o planejamento e dimensionamento de outros métodos de investigação tal como a instalação de poços de monitoramento da área. Com as medidas de potencial Espontâneo foi construído um mapa ao redor das células de disposição de lixo. Tomando-se os cuidados devidos (escolha do local da estação base, uso de eletrodos não-polarizáveis e coleta em períodos secos), o potencial medido deve estar associado ao fluxo de água subterrânea. Este sistema freático pôde ser definido a partir de informações de Potencial Espontâneo: áreas de recarga (anomalias negativas) e áreas de descarga (anomalias positivas).

Estudos realizados no Lixão de Aurá em Ananindeua – PA em uma área municipal de Belém por LUIZ et al (1999) usando medidas de resistividade aparente mostraram a distribuição e profundidade da pluma de contaminação por chorume. Os locais contaminados apresentaram drástica redução nos valores de resistividade. A maior contaminação estava concentrada entre profundidades de 1 m e 8,5 m podendo alcançar profundidades até 15 m. Os mapas de resistividade sugeriram que a direção do fluxo de chorume era sul e oeste e extrapolavam os limites do Lixão. Usando imageamento elétrico MORALES et al (2001) observaram que a água subterrânea está sendo atingida pelo deslocamento da pluma de contaminação provocada pelo chorume produzido pela degradação dos resíduos sólidos no Lixão de Aurá no município de Ananindeua – PA, confirmando as investigações realizadas por LUIZ et al (1999).

Em 2001, CAVALCANTI et al mostraram que a área do aterro sanitário em Salvador é relativamente heterogênea do ponto de vista elétrico sendo satisfatoriamente caracterizada pelos métodos elétricos. Observaram que em

investigações futuras a localização de variações elétricas não detectadas próximas ao aterro poderá se relacionar com alterações na qualidade da água subterrânea.

SILVA et al (2001) dando continuidade aos estudos de ELIS & ZUQUETTE (1996) detectaram a pluma de contaminação provocada pelo Lixão desativado de Ribeirão Preto – SP. Os ensaios elétricos e eletromagnéticos indicaram que a contaminação está avançando dentro da zona saturada e para fora da área do lixão.

MOURA et al (2001) apresentaram uma modelagem bidimensional para subsidiar a avaliação do impacto ambiental causado no aterro controlado em Rio Claro – SP, já estudado anteriormente por MALAGUTTI FILHO et al (1997), mostrando que a resistividade e a polarizabilidade são sensíveis à presença dos resíduos urbanos. As informações das unidades litológicas e de sondagem à percussão auxiliaram na construção do modelo inicial.

No depósito de lixo de Bangu na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro MONTEIRO & COSTA (2001) determinaram a espessura da camada saturada de chorume por meio de um levantamento geofísico confirmando a contaminação do rio Sarapuí que fica próximo ao depósito de lixo. Desta forma, foi possível sugerir o sentido de migração do chorume usando os métodos elétrico e eletromagnético.

DOURADO et al (2001) utilizando o radar de penetração no solo (GPR) conjuntamente com os métodos elétricos analisaram a espessura das camadas de resíduos, a profundidade do lençol freático e a pluma de contaminantes do aterro sanitário de Jundiaí – SP.

Objetivando aumentar a precisão dos métodos geofísicos AQUINO & BOTELHO (2001) combinaram os resultados dos métodos de eletromagnético indutivo no domínio da frequência e GPR (radar de penetração no solo) detectando a contaminação do solo e da água subterrânea por resíduos industriais no município de Araras – SP.

Em sua tese de doutorado, MOURA (2002) empregou o método da Eleetroressistividade e da Polarização Induzida (IP) nas áreas dos aterros controlados das cidades de Rio Claro-SP e Piracicaba-SP, com o objetivo de avaliar as potencialidades da integração dos métodos na caracterização geoeletrica das áreas. A interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, além de reduzir a ambigüidade dos modelos geoeletricos unidimensionais e bidimensionais

interpretados, permitiu determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e identificar as diferentes Formações identificando materiais arenosos e siltosos. Pôde-se mostrar que a polarizabilidade é sensível à presença de resíduos urbanos, e que o efeito IP é relacionado a materiais polarizáveis dispostos na cava, como latas, papéis, restos eletrônicos e materiais de empréstimo utilizados para a cobertura dos resíduos.

Como forma de demonstrar a limitação das metodologias usualmente empregadas na definição das estratégias de monitoramento HAMADA et al (2002) realizaram investigações geofísicas através de caminhamento elétrico e sondagens com piezocone de resistividade em dois casos no interior do Estado de São Paulo, Brasil, que apresentavam situações críticas quanto à presença de camada de solo altamente permeável sobre dois tipos de arenitos que compõem importantes aquíferos subterrâneos no interior do Estado. As limitações dos sistemas de poços de monitoramento instalados à montante (background) e outros à jusante com o intuito de monitorar o lençol freático com base na superfície potenciométrica foram estudadas observando-se que os poços que atingem o lençol freático superficialmente satisfazem as condições legais, mas podem ser inconsistentes quanto à sua real função. Os resultados mostraram o grande potencial da geofísica, em especial o caminhamento elétrico, na avaliação das áreas de disposição de resíduos quanto às características do meio físico – nível d'água, fluxo subterrâneo, espessura da cobertura inconsolidada, presença de fraturas – e quanto às relações entre os resíduos e local de disposição. Assim, os resultados permitirão orientar ensaios intrusivos necessários para a adequada caracterização geoambiental da área assim como localizar novos poços de monitoramento.

Dados de cargabilidade e resistividade foram usados por STEVANATO et al (2003) na detecção da pluma de contaminação no Aterro Sanitário de Itajaí – SC. As análises de água em poços de monitoramento indicaram contaminação na área atual do depósito de resíduos. Os limites vertical e lateral da pluma de contaminação foram claramente caracterizados através da análise conjunta dos resultados hidroquímicos e da associação dos resultados de cargabilidade e resistividade.

O mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos geoeletricos no Lixão do Alvarenga em São Bernardo do Campo – SP realizado por GALLAS et al

(2003) contribuíram para definir os limites da pluma, a determinação da permeabilidade dos solos locais e fornecer orientações gerais para recuperação ambiental da área. Os resultados obtidos mostraram que os métodos do potencial espontâneo, eletroressistividade e polarização induzida são uma excelente ferramenta em casos ambientais que envolvam áreas contaminadas, permitindo uma precisa delimitação da área atingida pelos poluentes, bem como os fluxos presentes.

LAGO et al (2003) realizaram ensaios de eletrorresistividade e Polarização Induzida, com as técnicas de Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo e Sondagem Elétrica Vertical com arranjo Schlumberger no estudo das relações espaciais entre uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos e o meio físico, em área de ocorrência de arenitos do Grupo Bauru, na cidade de Bauru-SP. Os resultados de Caminhamento Elétrico apresentados mostram variações laterais de resistividade e cargabilidade que estão relacionadas com os resíduos e com o ambiente natural. A cava preenchida com resíduos na área de estudo apresentou valores de resistividade baixos associados com altos valores de cargabilidade. Portanto, a cargabilidade é sensível à presença de resíduos, e que o efeito IP é relacionado à presença de materiais polarizáveis dispostos na cava. Os materiais naturais apresentaram valores de resistividade altos associados com baixos valores de cargabilidade. As zonas anômalas com valores muito baixos de resistividade e cargabilidade caracterizam provavelmente contaminação dentro da zona saturada. As SEVs possibilitaram a confecção do mapa de fluxo subterrâneo, mostrando o sentido do fluxo preferencialmente para noroeste, além de permitirem um melhor entendimento dos materiais que constituem as camadas em subsuperfície.

## **2.2. ESTUDOS REALIZADOS NO LIXÃO DE CUIABÁ – MT**

Na época em que o antigo depósito de resíduos de Cuiabá ainda estava ativado MATOS (1994) observou que o problema de se dispor inadequadamente os resíduos sólidos sobre o solo poderia causar a contaminação de águas subterrâneas pelo chorume. Com o auxílio da técnica geofísica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) pôde-se avaliar o nível de poluição e o sentido do fluxo das águas contaminadas. Os resultados mostraram baixa resistividade em cima do depósito de

lixo enquanto que na área fora do lixo a resistividade foi maior. O lençol freático pouco profundo comprovou a inadequabilidade do local para depósito de lixo. A baixa resistividade aliada às informações de direção do fluxo da água subterrânea possibilitou localizar a pluma de contaminação que coincide com a direção de fluxo do córrego.

Dentro de uma proposta de aplicação integrada dos métodos geofísicos e da geologia local para localização e monitoramento da contaminação das águas subterrâneas pelo chorume no antigo depósito de resíduos de Cuiabá SHIRAIWA et al (2001) realizaram investigações geofísicas com os métodos de sondagem elétrica vertical (SEV), caminhamento eletromagnético indutivo (EMI) e perfis de radar de penetração no solo (GPR – “Ground Penetrating Radar”). De acordo com os resultados, a pluma de contaminação resultante do chorume originado atinge a zona saturada. Da interpretação das SEVs, foi possível caracterizar a zona de transição solo-rocha, definir a profundidade do topo rochoso, a profundidade do nível d’água que varia de 5 a 10 metros de profundidade e a espessura do pacote de lixo. A análise conjunta desses métodos comprovou que no local de nível freático pouco profundo e nas proximidades do córrego Camundongo ocorre contaminação das águas subterrâneas e superficiais pelo transporte de chorume comprovado pelo mapa de resistividade. Esta observação mostrou que a pluma de contaminação avança em direção do córrego.

A poluição ambiental decorrente da disposição inadequada de resíduos no solo foi estudada por FARIA (2001) na área do antigo depósito de Cuiabá utilizando análises físico-químicas, bacteriológicas das águas superficiais do córrego Camundongo, Ribeirão do Lipa e seu afluente, bem como das águas de um poço tubular e um poço cacimba e determinação das concentrações de alguns elementos metálicos (Cu, Zn, Fe, Cr, Ni, Pb, Cd, Mn, Hg) no solo e na água. As variáveis pesquisadas – pH, temperatura, cor, turbidez, alcalinidade, condutividade, sólidos totais, fixos e voláteis, DQO, Nitrogênio, fósforo total e coliformes – e as análises do perfil do solo observando as características de cor, textura, estrutura, porosidade e consistência do solo complementaram o estudo. Os resultados encontrados de valores elevados nas amostras analisadas mostraram que embora área estivesse desativada desde 1997 o processo de degradação continua ativo.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A geofísica utiliza técnicas não-invasivas que permitem obter informações sobre as condições geológicas e hidrológicas da subsuperfície, de forma indireta e rápida comparada aos métodos tradicionais de investigação direta.

Vários relatos apresentados em REYNOLDS (1997) e em outras literaturas apontam os métodos de eletroressistividade e eletromagnético como principais para mapear a pluma de contaminação provocada pela infiltração de chorume nos depósitos de resíduos. A interpretação integrada entre os métodos geofísicos diminui as ambigüidades inerentes à interpretação dos dados.

#### **3.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO**

A cidade de Cuiabá encontra-se localizada na província geomorfológica da Baixada Cuiabana. A altitude varia de 146 a 250 metros na área urbana e seu entorno. A população é de cerca de 500 mil habitantes, a área do município de 3.224,68 Km<sup>2</sup> e as coordenadas geográficas de latitude e longitude são respectivamente: 15°35'56''S e 56°06'01''W. O clima é Tropical de Savana (AW) – quente e semi-úmido. A temperatura média anual é de 26 °C, com temperatura mínima próxima a 15 °C em julho e máxima superiores a 32 °C em outubro. O índice pluviométrico varia de 1.256 a 1.500 mm durante o ano e a precipitação é mais intensa no verão (FERREIRA, 1997).

A Figura 01, mostra o córrego Camundongo que é uma nascente localizada às margens do antigo depósito de resíduos de Cuiabá-MT. Este córrego deságua no Ribeirão do Lipa que é uma sub-bacia do rio Cuiabá.

Segundo SAFFORD (2001) a Bacia do rio Cuiabá abrange uma extensa área de cerca de 100 mil Km<sup>2</sup> até chegar no rio Paraguai, formando o Pantanal Matogrossense, área de proteção e preservação ambientais.

A qualidade da água em todos os trechos da Bacia é altamente preocupante, pois toda a carga orgânica e inorgânica que a Bacia recebe poderá comprometer a saúde das populações que consumirem desta água, além de alterar a biodiversidade ecológica do rio.

Desta forma, torna-se preocupante a contaminação que está ocorrendo no córrego Camundongo em função do chorume produzido no depósito de resíduos urbanos. Esta preocupação é fundamentada, pois existe um ponto de captação de água para abastecimento público, de Cuiabá e de Várzea Grande, nas proximidades do Ribeirão do Lipa.

Com estas considerações, o manejo da Bacia Hidrográfica do rio Cuiabá deve ter como um dos principais indicadores da saúde ambiental da sua área de drenagem o monitoramento da qualidade da água para atender a todas as gerações.

### **3.1.1. Localização da Área**

Cuiabá está localizada na região Centro Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso. A disposição dos resíduos sólidos, no período de 1982 a 1997, foi feita no antigo depósito de resíduos, Figura 01, localizado no Km 6 da Rodovia Emanuel Pinheiro (MT- 251). A área estimada usando-se o AutoCAD 2000 foi de 27,2 ha. Conforme FARIA (2001), esta área recebeu cerca de 700 mil toneladas de lixo.

Em 1982 os resíduos coletados pela Prefeitura de Cuiabá eram depositados na área do antigo depósito de resíduos urbanos, sem impermeabilização de base para o seu funcionamento. O lixo era disposto em camadas sobre o terreno, compactado e, esporadicamente, recebia uma cobertura de material inerte. Somente a partir de 1993 a prefeitura passou, através da instalação de uma balança de pesagem, a ter controle dos resíduos coletado pelo município e despejado na referida área. Neste período, também foi construída uma guarita para o controle de entrada e saída de pessoas e veículos, FARIA (2001). Em 1997 o local de destinação final no depósito de resíduos sólidos teve sua capacidade volumétrica esgotada após 15 anos de uso.

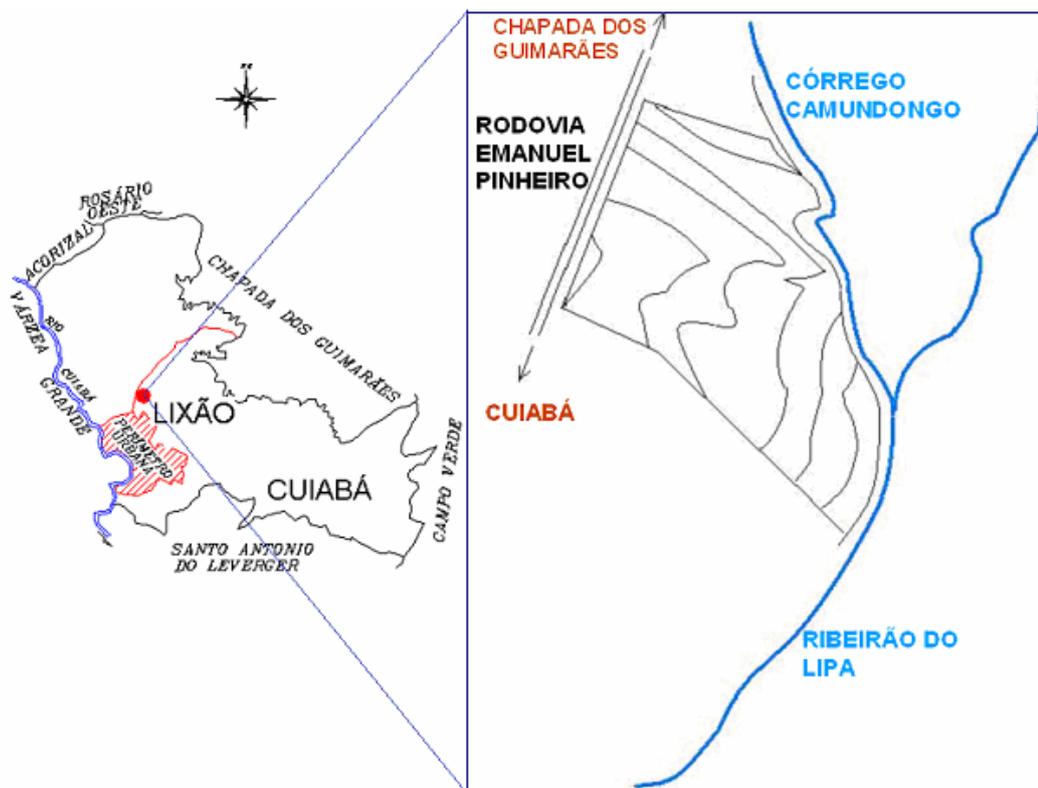


FIGURA 01 – Localização do antigo depósito de resíduos urbanos de Cuiabá (FARIA, 2001).

### 3.1.2. Aspectos Geológicos

A área de estudo está inserida no Grupo Cuiabá formado por rochas metamórficas de Idade Pré-Cambriana. MIGLIORINI et al (1998) individualizam duas formações geológicas que constituem o Grupo Cuiabá na área estudada: a Formação Miguel Sutil e a Formação Rio Coxipó, sendo que o depósito de resíduos urbanos estudado está inserido na Formação Miguel Sutil.

Com base nas estruturas sedimentares e na constituição litológica dominante, podem-se individualizar dois conjuntos faciológicos na Formação Miguel Sutil:

- a) LITOFÁCIES PELÍTICA COM LAMINAÇÃO PLANO-PARALELA: corresponde a filitos sericíticos. São freqüentes as laminações plano-paralelas centimétricas a milimétricas, que indicam mudança na granulometria ou na composição dos sedimentos. São comuns as intercalações de camadas tabulares de arenitos finos a médios, principalmente quartzosos, em contato com os pelitos laminados ou maciços. A espessura máxima destes pacotes

arenosos é de 20 cm. A forma tabular, contínua e as estratificações plano-paralelas sugerem uma mudança na intensidade do fluxo d'água em uma ampla área de abrangência.

b) LITOFÁCIES ARGILO-ARENO-CONGLOMERÁTICA: Este conjunto faciológico, formado por lentes métricas a quilométricas, faz contato do tipo abrupto e irregular com a litofácie pelítica, sendo comum aparecerem fragmentos de filitos desta litofácie com constituintes de seus níveis conglomeráticos basais. Cada conjunto exposto desta litofácie constitui-se por seqüências cíclicas granodecrescentes de metaconglomerados oligomíticos quartzosos, com seixos e grânulos dominados por quartzos em uma matriz de areia grossa a microconglomerática, também quartzosa. Bandas finas e irregulares, de um material caulínítico, definem uma foliação principal nestas rochas, e sugerem a atuação de dissolução por pressão seguida pela neocrystalização dos feldspatos ao longo dos planos de foliação. Na porção intermediária de cada ciclo, dominam os arenitos quartzosos, feldspáticos, que evoluem de areias grossas a médias até as porções de areia fina ou silte arenoso. Cada ciclo granodecrescente (conglomerado-arenito-argilito) apresenta sua seção basal definida por uma superfície irregular que sugere o processo de escavação e preenchimento, comum às seqüências depositadas em ambientes subaquosos. As estratificações plano-paralelas associadas à gradação normal decrescente são comuns. Em contato abrupto com a porção psamítica intermediária, completam o ciclo de ritmitos, os filitos sericíticos, laminados ou maciços.

Nos metassedimentos da Formação Miguel Sutil nota-se uma diferença marcante na instalação de fraturas e veios de quartzo na litofácie pelítica com laminação plano-paralela e na litofácie argilo-areno-conglomerática. Enquanto a primeira litofácie apresenta uma baixa intensidade de fraturas e veios de quartzo, a segunda litofácie mostra-se extremamente diaclasada, com diferentes famílias de juntas e ricos veios de quartzo de várias gerações. Esta representação é resultado da diferença de comportamento mecânico das duas litofácies quando submetidos à ação dos esforços. Por um lado, enquanto a litofácie pelítica tende a apresentar um comportamento mais dúctil (foliação e dobras), por outro, a litofácie argilo-areno-

conglomerática sofre rupturas e deslocamentos das falhas. Como resultado, encontramos as melhores condições de armazenamento e circulação de água subterrânea na litofácies argilo-areno-conglomerática. Um outro parâmetro que influencia a condutividade hidráulica refere-se à textura das rochas. A litofácies pelítica é rica em micas orientadas que definem sua foliação. Estas, por sua vez, dificultam a infiltração de água subterrânea. No entanto, a litofácies argilo-areno-conglomerática apresentam uma textura granular que resulta em uma maior porosidade e permeabilidade. A alteração da litofácies argilo-areno-conglomerática forma um solo arenoso muito propício à infiltração de águas pluviométricas sendo uma excelente área de recarga. A alteração da litofácies pelítica forma um solo argiloso, laterizado e de pequena profundidade retendo a infiltração das águas pluviométricas.

Os veios de quartzo desenvolvem-se principalmente nas litologias arenosas e conglomeráticas da Formação Miguel Sutil e auxiliam o processo de infiltração das águas subterrâneas. Por estas razões a principal zona de recarga na região coincide com as áreas de afloramento da litofácies argilo-areno-conglomerática que apresentam as melhores condições de armazenamento e circulação de águas subterrâneas.

Segundo MIGLIORINI (1999) o sistema aquífero na região de Cuiabá é do tipo livre, heterogêneo e anisotrópico, com intensa variação lateral e em profundidade. As rochas do grupo Cuiabá podem apresentar-se fissuradas o que torna o aquífero não confinado mais vulnerável a contaminação por poluentes.

A Profundidade do nível d'água do lençol freático, segundo MATOS (1994), mostrou que este é pouco profundo, apresentado pouco mais de 6 metros.

### **3.1.3. Planejamento de Campo**

As campanhas de campo foram realizadas, no período de março a junho de 2004, na área de estudo representada na Figura 02.

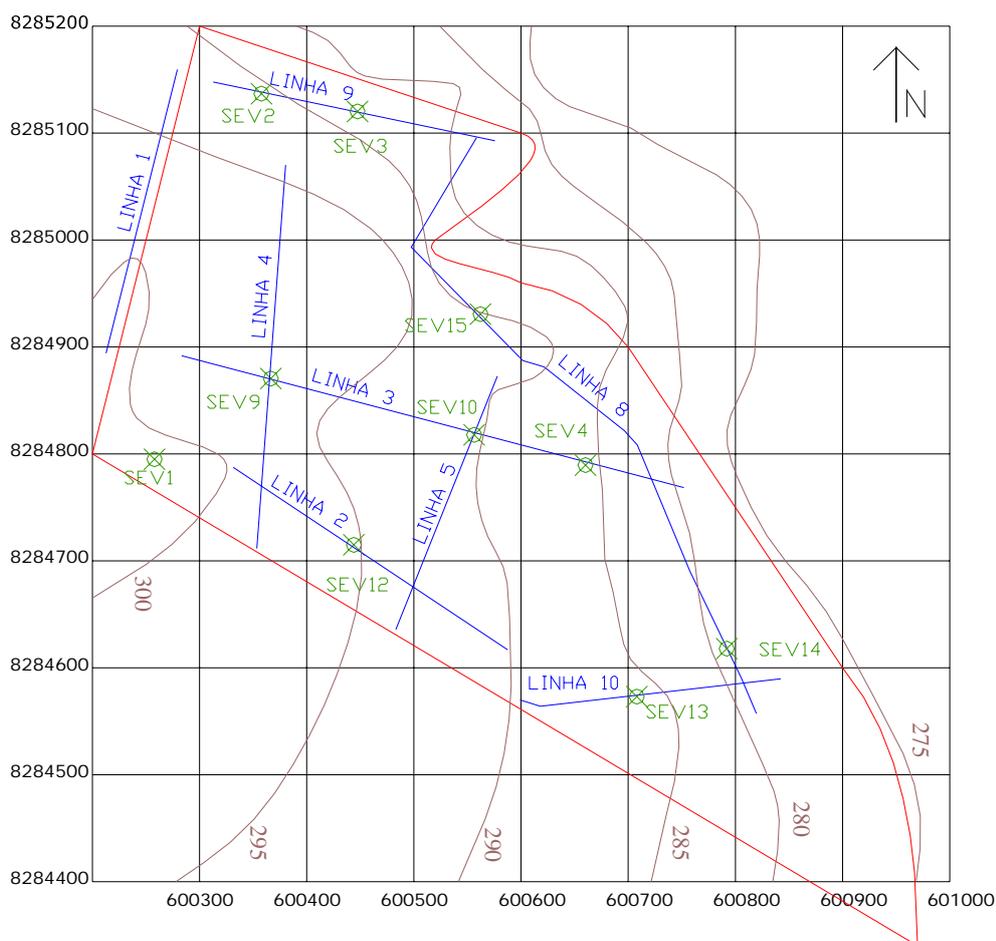


FIGURA 02 – Localização dos ensaios geofísicos no depósito de resíduos de Cuiabá (SHIRAIWA et al, 2001).

Os ensaios de campo procuraram abranger toda a área de depósito de lixo, representada na Figura 02 utilizando:

- a) 8 linhas de caminhamento eletromagnético indutivo. Equipamento: EM-34;
- b) 4 linhas de caminhamento elétrico usando o arranjo Schlumberger com abertura (AB) de 60 metros, MN de 2 metros e comprimento máximo de 320 metros na linha 3. Equipamento: Syscal R2;
- c) 10 sondagens elétricas vertical usando o arranjo Schlumberger com espaçamento variando de 42 a 97 metros. Equipamento: Syscal R2.

Para a localização geográfica dos pontos em que foram feitas as SEVs e as linhas para caminhamento foi usado um GPS (Global Positioning System)

Geoexplorer II da marca Trimble® e usado o programa Panthfinder Office para transferência dos dados para o computador. As curvas de nível foram realizadas por SHIRAIWA et al (2001).

### 3.2. MÉTODOS DE ELETRORESSISTIVIDADE

O estudo da investigação da subsuperfície através do comportamento do campo elétrico foi feito em 1920 por Schlumberger injetando-se uma corrente contínua no solo. A análise das informações sobre a natureza e estrutura do subsolo foi observada utilizando-se o valor da resistividade obtida em campo para uma determinada camada da subsuperfície.

O parâmetro físico de condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é o inverso da resistividade elétrica ( $\rho$ ). A resistividade mede a dificuldade de um material em conduzir corrente elétrica e depende da natureza e do estado físico do material.

Os mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais relacionam-se com o tipo de condutividade que pode ser:

- a) eletrolítica: depende do tipo de íon, da sua concentração e deslocamento na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas;
- b) eletrônica: presença de condutores na matriz da rocha, sejam eles minerais metálicos ou grafita.

Geralmente a condutividade é eletrolítica, pois os minerais condutores raramente ocorrem em quantidades suficientes para aumentar a condutividade global.

A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é influenciada principalmente pelos seguintes fatores: resistividade dos minerais constituintes do solo e da rocha; resistividade dos líquidos e gases que preenchem os poros do solo; teor em água; quantidade e teor dos sais dissolvidos.

O conhecimento destes fatores é importante, pois em áreas de depósito de resíduos sólidos contaminadas pelo choroume o teor de umidade e a quantidade de sais dissolvidos no subsolo são muito significantes. Quando estas concentrações aumentam ocorre uma diminuição dos valores de resistividade caracterizando a possível contaminação da área.

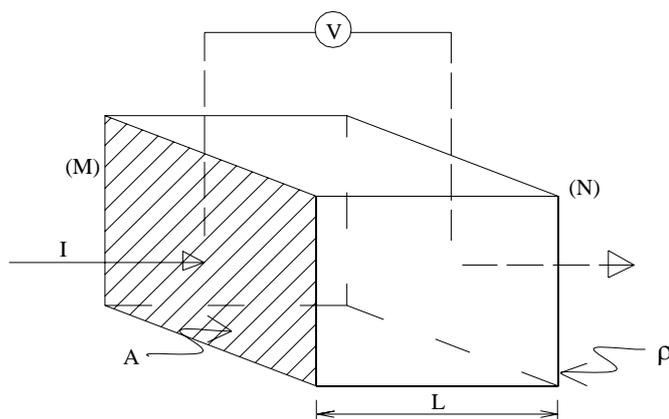


FIGURA 03 – Bloco homogêneo de definição da resistividade (REYNOLDS, 1997).

Utilizando-se um bloco homogêneo de largura ( $L$ ), Figura 03, pelo qual passa uma corrente ( $I$ ) e é submetido a uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre as faces opostas ( $M$  e  $N$ ) pode-se definir a resistividade do bloco.

A resistência ( $R$ ) é proporcional à largura ( $L$ ) e inversamente proporcional à área transversal do cubo ( $A$ ) e expressa a resistência do material para a passagem da corrente. A constante de proporcionalidade é a resistividade elétrica ( $\rho$ ).

$$R = \rho \cdot L / A \quad (1)$$

O circuito elétrico da Figura 04 equivale ao bloco homogêneo da Figura anterior. A este circuito se aplica a Lei de Ohm de acordo com a expressão:

$$R = \Delta V / I \quad (2)$$

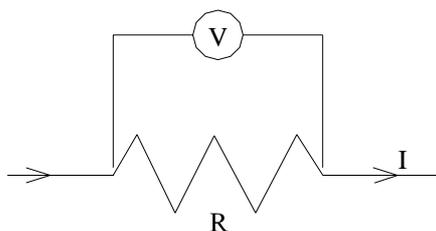


FIGURA 04 – Circuito elétrico equivalente ao cubo (REYNOLDS, 1997).

A definição operacional de resistividade pode ser obtida combinando-se as expressões 1 e 2. Obtém-se, assim, a expressão que indica o valor da resistividade elétrica real do material em Ohm vezes metro ( $\Omega \cdot m$ ):

$$\rho = (\Delta V / I) \cdot (A / L) \quad (3)$$

As condições ideais para se aplicar o método considera que o meio seja isotrópico, homogêneo e plano. A isotropia indica que as propriedades elétricas variam igualmente em todas as direções; a homogeneidade indica que as características geológicas são semelhantes; a superfície em que se aplica a corrente deve ser plana. Outro critério de fundamental importância é que os eletrodos estejam alinhados no terreno.

Nestas condições ideais a resistividade é assumida como constante.

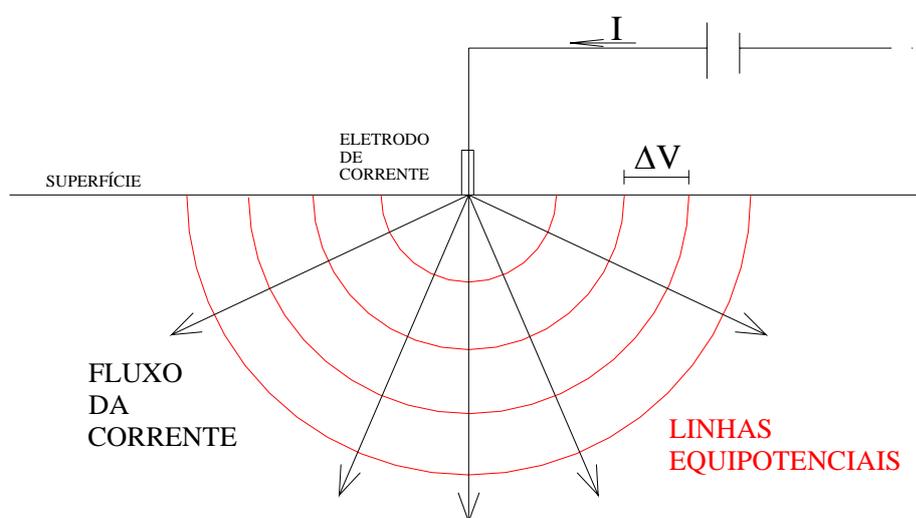


FIGURA 05 – Representação bidimensional da semi-esfera equipotencial (adaptado de BRAGA, 2002).

O meio homogêneo comporta-se como uma superfície equipotencial, como mostra a Figura 05. Observa-se que o fluxo da corrente é radial, ou seja, as linhas de fluxo de corrente partem do ponto de aplicação em todas as direções de forma radial.

Como o subsolo não se comporta como um meio homogêneo, a resistividade considerada não é a real e sim aparente ( $\rho_a$ ). Através das medidas de campo de diferença de potencial ( $\Delta V$ ) e de corrente ( $I$ ), e do fator geométrico ( $K$ ) obtido de acordo com o tipo de arranjo e considerado como sendo ( $A / L$ ), tem-se os resultados da resistividade aparente conforme expressão abaixo:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I \quad (4)$$

Neste trabalho foi utilizado o arranjo Schlumberger. Este arranjo é menos susceptível às variações laterais de resistividade e ruídos e é mais utilizado devido à qualidade das curvas de campo e à alta resolução vertical.

O fator geométrico (K) para o arranjo Schlumberger é definido como sendo:

$$K = [ (1/AM) - (1/AN) + (1/BM) - (1/BN) ] \quad (5)$$

Observa-se na Figura 06 as distâncias entre os eletrodos AM, AN, BM e BN.

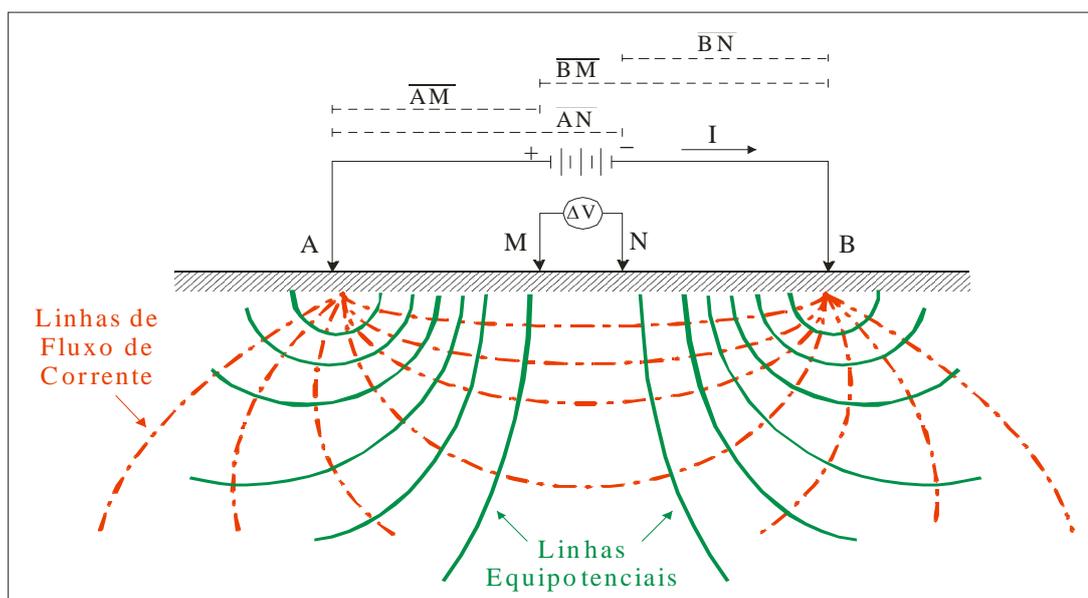


FIGURA 06 – Distribuição das linhas de fluxo de corrente e das linhas equipotenciais utilizando o arranjo Schlumberger (BORGES, 2002).

Introduzindo uma corrente artificial na superfície do terreno através dos eletrodos metálicos de injeção de corrente (A e B) mede-se a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) gerada nos eletrodos de potencial (M e N), conforme Figura 06. As linhas equipotenciais e de corrente são produzidas no subsolo pela injeção de corrente e são perpendiculares entre si.

Com o registro dos valores da corrente (I) e da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) determina-se a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) da subsuperfície.

Deve-se tomar o cuidado de dispor os eletrodos A e M sempre do mesmo lado e estar atento para que a distância MN seja menor que a distância AB/2 (TELFORD *et al.*, 1990):

$$MN \leq AB/5 \quad (6)$$

A profundidade teórica de investigação (h) para o arranjo Schlumberger pode ser identificada por alguns autores através de experimentos em laboratório e campo, conforme tabela:

TABELA 01 – Profundidade teórica de investigação segundo alguns autores.

ROY & APPARAO (1971)	$h = AB/8 = 0,125 AB$
TELFORD <i>et al.</i> (1990)	$h = AB/6 = 0,167 AB$

Porém a profundidade teórica de investigação (h) depende de vários fatores como perdas por absorção e dispersão de corrente e por isso seus valores variam bastante, podendo também ser considerada como:

$$h = AB/4 = 0,25 AB \quad (7)$$

Os dados deste método podem ser avaliados quantitativamente e qualitativamente.

As técnicas de ensaio utilizadas são a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE), apresentados a seguir.

### 3.2.1. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Esta técnica consiste na investigação das variações da resistividade aparente ( $\rho_a$ ), da equação 4, efetuadas sob um ponto fixo na superfície do terreno a profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos de corrente A e B, conforme Figura 06.

Os quatro eletrodos de metal são cravados em linha reta, simétricos em relação ao centro do arranjo. Pelos dois eletrodos externos de corrente A e B faz-se passar uma corrente (I) e mede-se simultaneamente a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) estabelecida entre os dois eletrodos centrais de potencial M e N. Os eletrodos A e B são afastados em sentidos contrários mantendo a mesma distância em relação ao centro do arranjo.

Neste procedimento o centro do arranjo permanece fixo enquanto varia-se a posição dos eletrodos. Para cada nova posição dos eletrodos é feita uma determinação da resistividade aparente ( $\rho_a$ ). À medida que se aumenta o afastamento entre os eletrodos de corrente a profundidade de investigação também aumenta.

A aplicação da SEV auxilia na delimitação da zona saturada, no estudo da geologia do terreno, na determinação do topo da rocha sã, na determinação da espessura e geometria das camadas de resíduos sólidos e no mapeamento da pluma de contaminação.

A técnica de sondagem elétrica vertical não se aplica a meio cristalino, tendo validade apenas em meio sedimentar.

### ***3.2.1.1. Interpretação das SEVs***

Os dados de campo são plotados em um gráfico em escala bi-logarítmica em que a abscissa corresponde aos valores de  $AB/2$  (m) e a ordenada corresponde aos valores da resistividade aparente ( $\Omega.m$ ) constituindo as curvas de sondagem elétrica vertical.

Inicialmente a curva elétrica fornece informações qualitativas sobre as camadas de maior e menor resistividade. Considerando um modelo de camadas isotrópicas é possível uma interpretação quantitativa para definir a espessura de cada camada e a resistividade média deste pacote, conhecida por resistividade aparente ( $\rho_a$ ).

A análise quantitativa é feita pelo software IPI2Win versão 2.0 (BOBACHEV et al, 1990-2001) através de ajustes entre os dados de campo e a resposta obtida por inversão de modelos. Um modelo geoeletrico de cada sondagem elétrica vertical fornece a resistividade aparente, a espessura, a profundidade de cada camada, a altitude de cada camada considerando-se a cota topográfica da primeira camada e o erro percentual, ou desvio de ajuste.

Ao tentar aproximar a curva ajustada da curva de campo ocorre um desvio de ajuste sendo este valor considerado como erro percentual de ajuste.

Deve-se tomar o cuidado na hora da interpretação, pois o software não conhece a geologia. Várias interpretações são possíveis, porém devem-se considerar os limites de espessura que cada camada pode alcançar, com base na Tabela 01. Também é importante observar se a resistividade de uma camada é maior ou menor do que a da camada seguinte, dependendo do tipo da curva e se este valor tem significado geológico compatível com o local.

### 3.2.2. Caminhamento Elétrico (CE)

Pela técnica do caminhamento elétrico verifica-se a variação lateral da resistividade elétrica aparente da subsuperfície, em profundidades aproximadamente constantes, fixando-se um espaçamento de eletrodos (AB e MN) e caminhando-se com os mesmos ao longo de uma linha.

Esta técnica se aplica no estudo das mudanças laterais de estruturas, como falhas e fraturas, na prospecção de aquíferos em meio fissurado e na avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras.

Traça-se a curva da resistividade ao longo da linha analisada obtendo-se, assim, a interpretação das seções geológicas.

### 3.3. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Foi usado o método eletromagnético indutivo (EMI) para detectar zonas condutivas no subsolo por meio de ondas eletromagnéticas.

A Figura 07 mostra a propagação das ondas eletromagnéticas com suas duas principais componentes: elétrica (E) e magnética (H). Os planos x e y e a direção de propagação e de perturbação da onda eletromagnética são perpendiculares entre si.

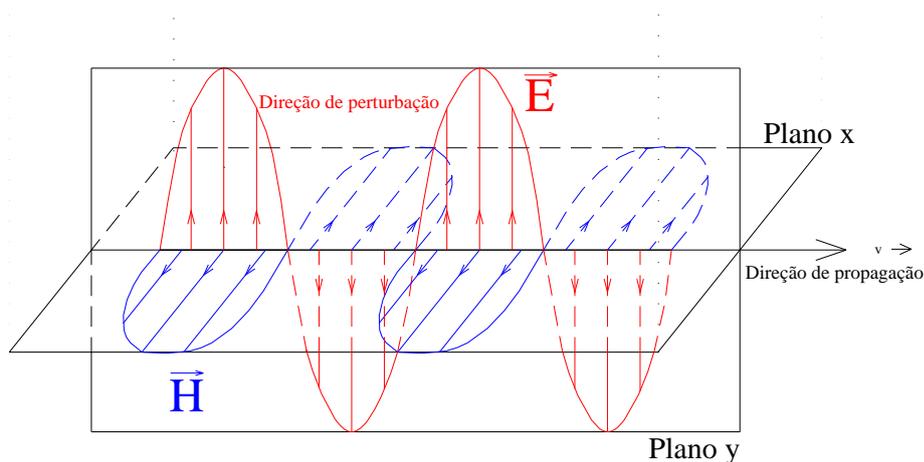


FIGURA 07 – Propagação da onda eletromagnética  
(adaptado de REYNOLDS, 1997).

A interação entre os campos elétricos (E) e magnéticos (H) resulta no campo eletromagnético que varia no tempo. Este campo é descrito pela equação da onda e é resultado da manipulação algébrica das equações de Maxwell e das três relações constitutivas do meio expressas pela Lei de Ohm, vistas a diante.

A teoria EM é fundamentada nas equações de Maxwell. Sua primeira equação é conhecida como Lei de Ampère e sua segunda equação é conhecida como Lei de Faraday.

Na expressão abaixo, a corrente de deslocamento ( $\partial D/\partial t$ ) e a densidade de corrente de condução (J), utilizadas em altas frequências do radar, são descritas pela Lei de Ampère e produzem o campo magnético (H):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (8)$$

A Lei de Faraday descreve o campo elétrico (E) produzido pela variação do campo indução magnética (B) em relação ao tempo:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad (9)$$

Apesar de descreverem o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio, as equações de Maxwell não contêm informações sobre as propriedades elétricas dos materiais em que este campo atua. Daí torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos materiais geológicos investigados.

Para uma melhor compreensão do campo eletromagnético aplicado aos estudos na subsuperfície é necessário conhecer as propriedades elétricas e magnéticas da terra.

O meio estudado pode ser representados por materiais semicondutores ou, ainda, dielétricos (isolantes). Estes materiais podem ser caracterizados por três propriedades elétricas:

- a) condutividade elétrica ( $\sigma$ );
- b) permissividade dielétrica ( $\epsilon$ );
- c) permeabilidade magnética ( $\mu$ ).

Como mostra a Lei de Ohm, a condutividade relaciona a densidade de corrente de condução (J) ao campo elétrico (E) e representa a primeira relação constitutiva do meio:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (10)$$

Geralmente a movimentação de íons por meio de solução aquosa constitui o principal mecanismo de corrente de condução. A Figura 08 descreve este fenômeno. Este tipo de corrente surge quando um campo elétrico é aplicado e as cargas elétricas livres são induzidas a se movem até atingirem instantaneamente uma velocidade final constante. Depois de removido o campo elétrico as cargas elétricas param de se mover.

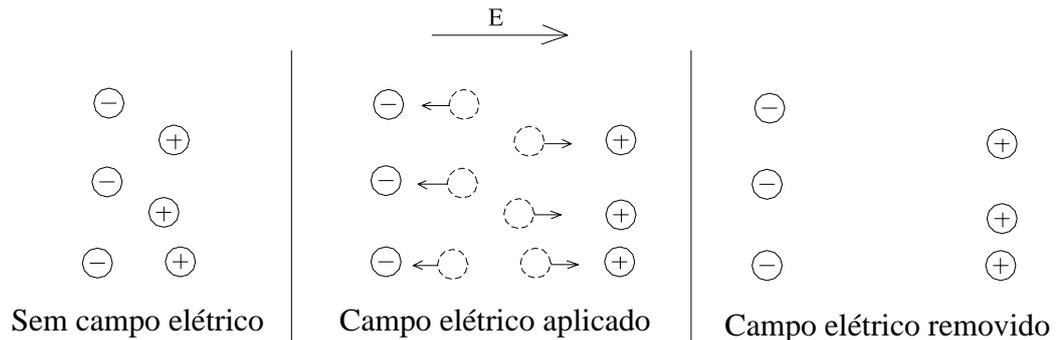


FIGURA 08 – Movimentação de cargas associada à corrente de condução  
(adaptado de ANNAN, 1992).

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ), expressa em Siemens por metro (S/m), é o inverso da resistividade elétrica ( $\rho$ ) que é expressa em Ohm vezes metro ( $\Omega \cdot m$ ).

Geralmente, os materiais terrestres com  $\rho < 10^{-5} \Omega \cdot m$  são considerados condutores, enquanto que os materiais com  $\rho > 10^7 \Omega \cdot m$  são considerados isolantes.

A condutividade mede a habilidade de um material em conduzir corrente elétrica e pode variar dependendo:

- da quantidade de água e ar presentes nos poros dos constituintes do solo;
- da salinidade, uma vez que o aumento da concentração de sais na água aumenta a condutividade proporcionalmente;
- do conteúdo de argila e minerais condutivos existentes no meio.

A permissividade dielétrica dos materiais geológicos ( $\epsilon$ ), expressa pela equação em Faraday por metro (F/m), representa a segunda relação constitutiva do meio e relaciona a densidade de corrente de deslocamento (D) ao campo elétrico (E):

$$D = \epsilon E \quad (11)$$

O deslocamento das cargas é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição de equilíbrio neutro para outra polarizada devido à influência de um campo elétrico externo. A Figura 09 mostra este deslocamento. A corrente de deslocamento é representada pela variação da densidade de momentos de dipolo de meio. Após esta mudança de posição das cargas ocorre uma mudança na quantidade de energia armazenada no material provocada pela transferência de energia do campo elétrico para o meio. Cessado o campo elétrico, as cargas se movem na tentativa de voltar à posição de equilíbrio original liberando energia na forma de calor.

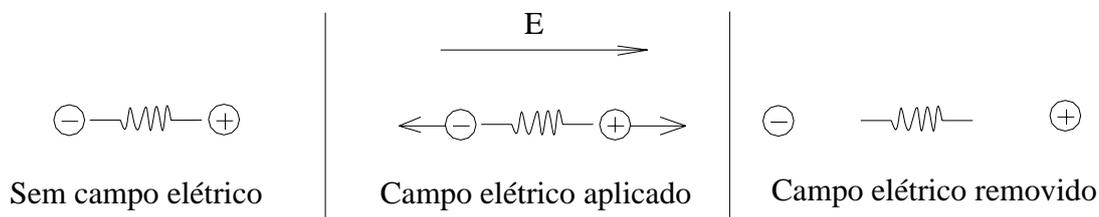


FIGURA 09 – Movimentação de cargas associada à corrente de deslocamento (adaptado de ANNAN, 1992).

Em geral, a condutividade é dominante para ondas EM de baixa frequência e a permissividade é dominante para altas frequências.

A permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) é definida como sendo a razão entre a permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ) e a permissividade dielétrica do espaço livre ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m) e está apresentada na equação:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (12)$$

A terceira relação constitutiva do meio é representada pela permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e relaciona o campo de indução magnética (B) com o campo magnético (H):

$$B = \mu H \quad (13)$$

Supõe-se que na propagação de ondas na frequência do radar a permeabilidade independe da frequência e não varia muito em relação à permissividade dielétrica do espaço livre. Embora o efeito da variação na

permeabilidade magnética na maioria dos casos não seja considerado, ela não deve ser ignorada quando os seus efeitos tornam-se significativamente fortes.

Deve-se considerar para estudar as ondas eletromagnéticas que a terra é um meio isotrópico, horizontalmente estratificado, com extensão lateral infinita e que a permissividade e a permeabilidade são constantes e independentes do meio.

Conforme OLHOEFT (1984), a profundidade é altamente dependente das propriedades elétricas dos materiais, que por sua vez influenciam a atenuação ( $\alpha$ ) da onda eletromagnética.

A profundidade de penetração da onda nos materiais pode sofrer perdas por atenuação de quatro maneiras diferentes (DUKE, 1990):

- a) por condução elétrica: acontecem mais nos materiais condutivos, como por exemplo a argila, com baixas frequências sendo proporcionais à condutividade elétrica do meio;
- b) por polarização: geralmente acontecem para as altas frequências, cerca de 20 GHz, denominada de frequência de polarização ou de relaxação. A molécula de água sofre o efeito de rotação por não conseguir mais se polarizar na presença de um campo elétrico aplicado, este processo é conhecido por relaxação dielétrica da água. Quando isso ocorre o sinal eletromagnético é dissipado na forma de calor;
- c) por espalhamento geométrico: a frente de onda se espalha esfericamente e a amplitude do sinal é atenuada;
- d) por difusão: são causadas por heterogeneidades significativas do meio, ou seja, quando estas têm tamanhos comparáveis ao comprimento de onda. Geralmente são representadas por buracos de insetos, porosidades, contatos litológicos, entre outras anomalias.

As interfaces, que separam as camadas do solo com diferentes características elétricas, podem sofrer forte impedância elétrica conforme as variações das propriedades de condutividade elétrica ( $\sigma$ ), permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ). A quantidade do sinal que deverá ser refletido dependerá desta variação e é expresso pelo coeficiente de reflexão. Dependendo das características do meio o sinal também poderá ser refratado por essas interfaces.

### 3.3.1. Método Eletromagnético Indutivo (EMI)

Este método é usado com objetivo de avaliar a condutividade aparente, determinando as zonas de contaminação e delimitando a área do depósito de resíduos sólidos.

Os métodos eletromagnéticos indutivos utilizam as baixas frequências (1 – 1000 Hz) quando predominam as correntes de condução, uma vez que a corrente de deslocamento tem pouca intensidade. Assim a propagação depende quase que exclusivamente da condutividade do meio.

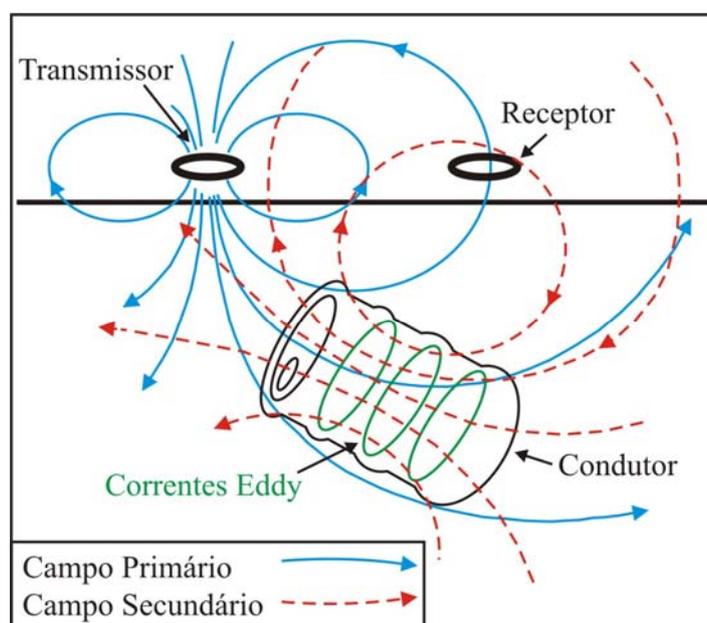


FIGURA 10 – Indução eletromagnética (adaptado de TELFORD et al, 1990).

A bobina transmissora é usada para produzir o campo eletromagnético primário. Este campo ao encontrar um condutor na subsuperfície induz, no mesmo, as correntes Eddy. Estas por sua vez geram o campo eletromagnético secundário. Representados na Figura 10 estão os campos eletromagnético primário e secundário. A resultante da combinação destes campos é captada pela bobina receptora fornecendo importantes informações sobre a geometria, espessura e propriedades elétricas do condutor na subsuperfície (REYNOLDS, 1997).

Os ensaios de campo realizados com o EMI possibilitam a medição das variações da condutividade elétrica nas profundidades teóricas de 7,5 metros, de 15

metros e de 30 metros usando-se cabos de 10 e 20 metros de comprimento, de acordo com a Figura 11.

Com as bobinas separadas de 10 metros e o dipolo magnético na horizontal consegue-se investigar até 7,5 metros de profundidade, Figura 11 (a). Com a mesma separação e o dipolo magnético na vertical a profundidade teórica alcançada ( $z$ ) passa a ser de 15 metros, Figura 11 (b).

Aumentando-se a separação das bobinas a profundidade de investigação passa a ser maior. Com as bobinas separadas de 20 metros pode-se investigar até 15 metros de profundidade estando o dipolo magnético na horizontal, Figura 11 (c) e até 30 metros de profundidade com dipolo magnético na vertical, Figura 11 (d).

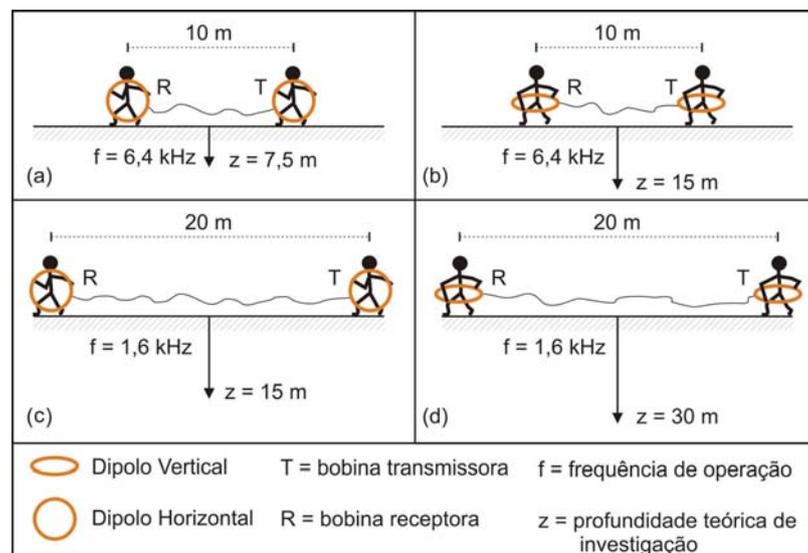


FIGURA 11 – Profundidades de investigação do EMI. (a) Cabo de 10 metros e dipolo horizontal; (b) Cabo de 10 metros e dipolo vertical; (c) Cabo de 20 metros e dipolo horizontal; (d) Cabo de 20 metros e dipolo vertical (BORGES, 2005).

O campo eletromagnético passa a alcançar maior profundidade quando a bobina está posicionada na horizontal, ou seja, o dipolo magnético está na vertical. Com o dipolo magnético na horizontal, isto é, bobina posicionada na vertical, o campo eletromagnético tem uma maior abrangência lateral.

### 3.4. CONSTRUÇÃO DOS MAPAS DE RESISTIVIDADE APARENTE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os mapas de resistividade e condutividade elétrica, apresentados no capítulo 4, foram feitos usando o programa SURFER versão 5.01 (1993-1994) da Golden Software Inc.

A sondagem elétrica vertical e o caminhamento elétrico forneceram os mapas de resistividade.

O método eletromagnético indutivo forneceu os mapas de condutividade elétrica a diferentes profundidades de 7,5 m, 15 m e 30 m.

A estimativa básica utilizada para a interpolação foi a krigagem ordinária que considera a média móvel por toda a área e serve para estimar um valor desconhecido.

Trata-se de um processo de interpolação das amostras existentes por médias móveis em que os pesos atribuídos a estas amostras são determinados a partir de uma análise de dependência no espaço determinada pelo variograma amostral usando valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes. Por meio de uma série de técnicas de análise de regressão procura-se minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio (LANDIM & STURARO, 2002).

Se uma variável regionalizada  $v(i)$ , no caso a condutividade ou a resistividade, for coletada em diversos pontos  $i$ , o valor de cada ponto terá uma influência maior dos pontos situados a uma certa distância ( $h$ ) conforme a distância entre os pontos seja a menor possível. Esta relação entre os pontos numa certa direção pode ser expresso pela covariância.

Considerando os dados estacionários, a semivariância distribui-se de  $h=0$  até um valor maior aproximadamente igual a variância das observações. Sendo  $v(1)$ ,  $v(2)$ , ...,  $v(i)$ , ...  $v(n)$ , realizações de uma variável regionalizada, a estimativa não tendenciosa da semivariância é dada por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum (v_{i+h} - v_i)^2 \quad (14)$$

Para se originar o semivariograma traça-se um gráfico em que a função  $\gamma(h)$  é colocada na ordenada e  $\Delta h$  na abscissa. O gráfico, representado na Figura 12,

expressa o comportamento espacial da variável regionalizada em relação à distância.

Alguns parâmetros importantes desta relação devem ser observados:

- a) amplitude ( $a$ ), distância a partir da qual as amostras não possuem mais correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória. Se a amostra for menor ou igual à amplitude têm-se informações sobre o ponto.
- b) patamar ( $C + C_0$ ), valor segundo o qual a função estabiliza-se no campo aleatório. Mostra a variância dos dados e covariância nula.
- c) continuidade, pela forma do variograma, em que para  $h=0$ ,  $\gamma(h)$  já apresenta algum valor. Esta situação é conhecida como efeito pepita e é representada por  $C_0$ . O efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos, para mostrar o comportamento espacial de um fenômeno numa escala maior.
- d) a anisotropia, variações para diferentes direções de amostragem dos semivariogramas.

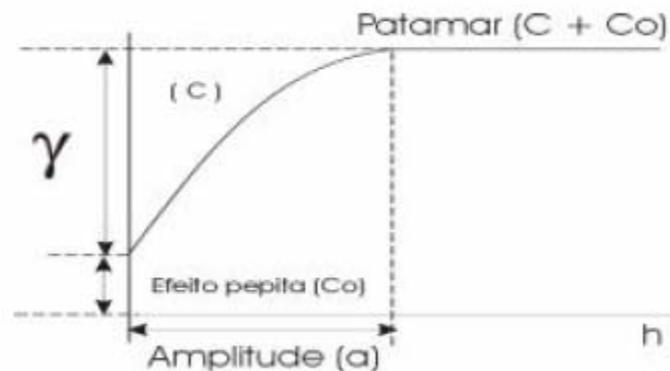


FIGURA 12 – Semivariograma Usado na Krigagem Ordinária  
(LANDIM & STURARO, 2002).

No presente trabalho o modelo de variograma utilizado foi do tipo linear, sem flutuação, ou seja, os valores não sofreram dispersão quando dispostos na área analisada, pois os dados interpolados foram bastante próximos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos métodos geofísicos empregados para caracterizar o meio físico ocupado pelos resíduos sólidos, delimitar a zona de influência da contaminação e avaliar a evolução temporal da pluma de contaminação comparada com os estudos anteriormente realizados por MATOS (1994) e SHIRAIWA et al (2001). Os ensaios de campo procuraram abranger toda a área de depósito de lixo, representada na Figura 13.

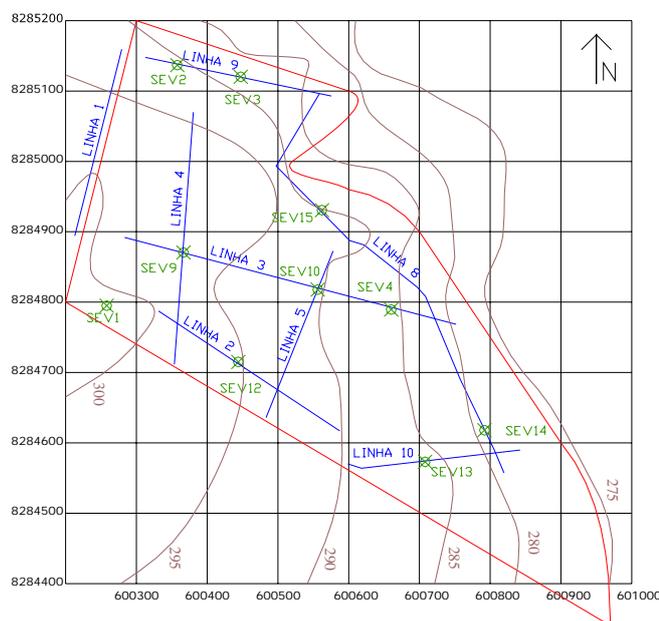


FIGURA 13 – Localização dos ensaios geofísicos no depósito de resíduos de Cuiabá (SHIRAIWA et al, 2001).

As campanhas de campo foram realizadas em três etapas, no período de março a junho de 2004, no antigo depósito de resíduos urbanos de Cuiabá. Do dia 01/03/2004 a 04/03/2004 foram realizados os levantamentos com os métodos de caminhamento elétrico e caminhamento eletromagnético indutivo nas linhas 2, 3, 5 e

9. No período de 10/05/2004 a 14/05/2004 foram feitos os caminhamentos eletromagnéticos indutivo nas linhas 1, 4 e 10 e as SEVs 01, 02, 03, 04, 09, 10, 12 e 13. Finalmente do dia 14/06/2004 a 16/06/2004 foram feitas as SEVs 14 e 15 e o caminhamento eletromagnético indutivo sobre a linha 8.

A numeração das SEVs seguiu a numeração feita no trabalho de SHIRAIWA et al (2001). No entanto, algumas SEVs e algumas linhas de caminhamento eletromagnético indutivo e de caminhamento elétrico, por não estarem na mesma posição, receberam nova numeração.

Esta série de ensaios permitiu a elaboração de seções e mapas de resistividade e pseudo-seções de condutividade elétrica, o mapa potenciométrico da área e o mapa de fluxo do chorume apresentados a seguir.

#### **4.1. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL**

Foram realizadas 10 sondagens elétricas verticais com arranjo Schlumberger com espaçamento variando de 42 a 97 metros, cujos resultados estão contidos nas Figuras 14 a 18.

Mapa potenciométrico do antigo depósito de resíduos está representado na Figura 19.

As Figuras de 21 a 25 apresentam os mapas de resistividade para as cotas de 285 metros, 282 metros, 280 metros, 275 metros e 270 metros, respectivamente.

As SEV 01, 02, 03 e 12 foram realizadas fora da área de resíduos. Já as SEV 04, 09, 10, 13, 14 e 15 foram realizadas dentro da área de resíduos. De acordo com a proximidade e semelhança nas curvas, as SEVs foram agrupadas.

Os modelos geoeletricos das SEVs são gráficos bilogaritmicos da resistividade aparente em função da abertura  $AB/2$ . A linha, com pontos, em preto representa os valores medidos em campo e em vermelho a curva calculada pelo modelo de camadas representado pela linha em azul. À direita encontra-se a tabela com os valores ajustados de resistividade ( $\rho$ ), espessura da camada ( $h$ ), profundidade ( $d$ ) e cota topográfica ( $alt$ ), a partir da superfície.

Na Figura 14 estão os resultados das SEVs 01 e 12. A curva da SEV 01 é típica de um sistema de 4 camadas com  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ . Na modelagem subdividiu-se a primeira camada para um melhor ajuste da curva. A curva da SEV 12 é típica de um sistema de 5 camadas com  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ .

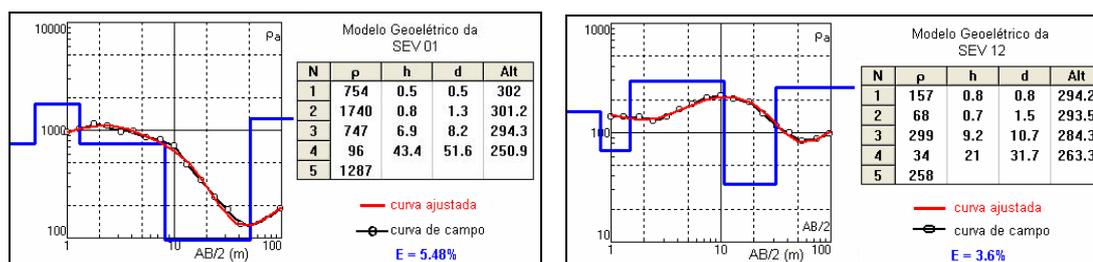


FIGURA 14 – Modelo geoeétrico das SEVs 01 e 12.

A SEV 01 apresenta a primeira camada de solo seco. A segunda camada é composta por rocha alterada seca. A terceira camada, com resistividade semelhante à primeira camada, é constituída de rocha saturada. A quarta camada sugere a presença d'água que infiltra das camadas superiores, sendo considerado uma rocha alterada saturada. A quinta camada é de rocha sã, ou seja, filito.

A SEV 12 intercala camadas não saturadas e saturadas. A primeira camada representa um cascalho não saturado. A segunda camada apresenta-se saturada. A terceira camada provavelmente é constituída de rocha alterada não saturada. A quarta camada, com baixa resistividade, mostra provável nível d'água e rocha saturada. A quinta camada é de rocha não saturada.

O erro percentual no caso da SEV 01 foi de 5,48% e na SEV 12 de 3,6%.

Na área de estudo, FARIA (2001) realizou análises dos solos estabelecendo dois pontos de amostragem que serviram para a interpretação das SEVs. A trincheira 1 foi considerada como referência de solo natural (background), por estar fora da área de influência dos resíduos. Esta trincheira foi aberta em local próximo da SEV 01 e serviu para correlacionar as diferentes camadas com os horizontes analisados.

O solo da trincheira 1 é um plintossolo concrecionário (FARIA, 2001). Os dois primeiros horizontes são compostos por restos de vegetais, cascalho de quartzo com matriz constituída de areia fina pouco argilosa diminuindo a quantidade de areia fina à medida que se aprofunda. Tais horizontes correspondem à primeira camada da

SEV 01 que devido ao valor da resistividade pode ser considerada de solo seco. A água de chuva deve infiltrar com muita facilidade nestes horizontes que apresentam provável baixa retenção de água. Os três horizontes seguintes apresentam poucos seixos de quartzo, areia fina argilosa, porosidade na matriz, concreções de óxido de ferro e textura argilosa a muito argilosa que aumentam com a profundidade tornando-se argilo-siltosa. Nestes horizontes a água de chuva deve encontrar uma certa resistência à infiltração, mesmo assim se infiltra após um certo tempo dado à presença de alta porosidade da matriz constituído por areia fina argilosa. Com o aumento da profundidade a permeabilidade e a porosidade aumentam. Estes horizontes correspondem à segunda camada da SEV 01.

Na Figura 15 estão os resultados das SEVs 02 e 03, situadas próximas uma da outra e fora da área de depósito de resíduos.

As duas curvas são muito próximas e típicas de um sistema de 3 camadas com  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ . Na modelagem subdividiu-se a segunda camada para um melhor ajuste da curva, e o modelo apresenta, então, 4 camadas.

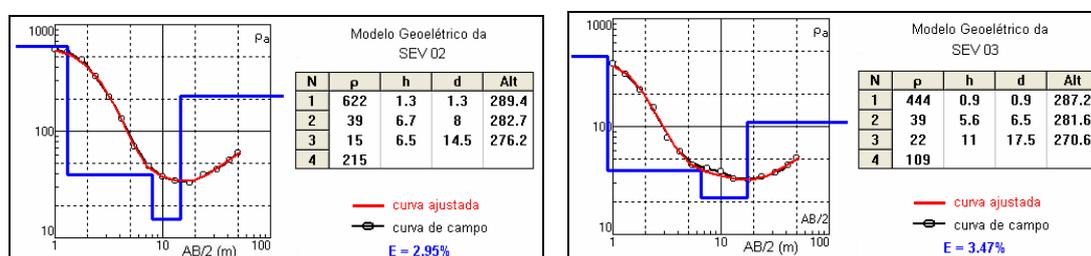


FIGURA 15 – Modelo geoeétrico das SEVs 02 e 03.

A SEV 02 e a SEV 03 são constituídas por solo seco e rocha alterada na primeira camada. Na segunda e na terceira camadas a saturação aumenta com a profundidade, estas camadas são constituídas por rocha alterada. A quarta camada é de rocha sã (filito).

Na campanha de campo de maio o nível d'água medido, em um poço próximo à SEV 02, foi de 56 cm.

O erro percentual no caso da SEV 02 foi de 2,95% e na SEV 03 de 3,47% representando o desvio de ajuste da curva calculada pelo modelo e os dados de campo.

Na Figura 16 estão os resultados das SEVs 04, 09 e 10, realizadas sobre o depósito de resíduos.

A SEV 04 adota um modelo de 4 camadas com  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ . A SEV 09 segue um modelo de 5 camadas com  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$ . Na modelagem subdividiu-se a terceira camada para um melhor ajuste da curva, e o modelo apresenta, então, 6 camadas. A SEV 10 é típica de um sistema de 3 camadas com  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ . Na modelagem subdividiu-se a segunda camada para um melhor ajuste da curva, e o modelo apresenta, então, 4 camadas.

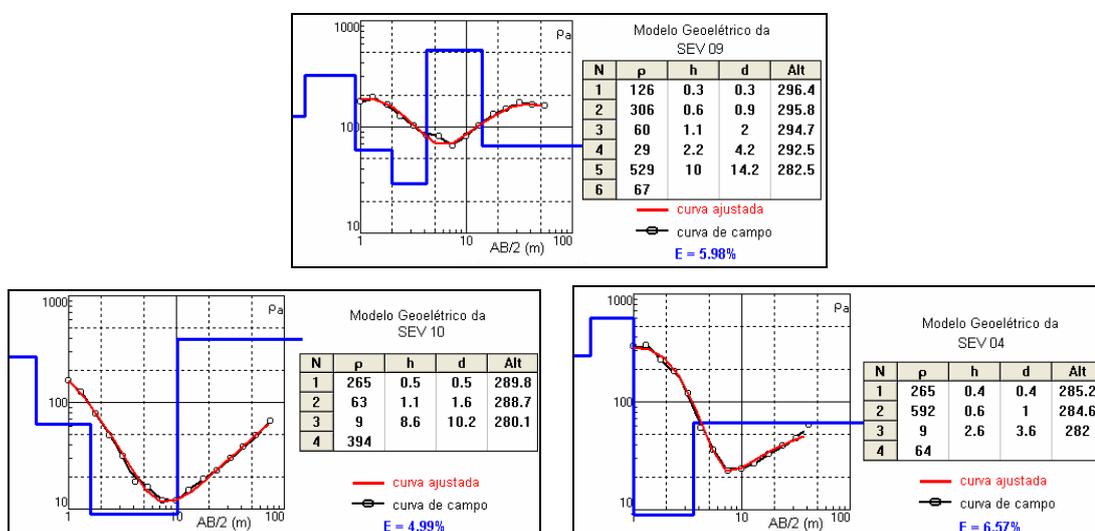


FIGURA 16 - Modelo geolétrico das SEVs 04, 09 e 10.

Na SEV 04 a primeira camada é solo não saturado. A segunda camada é de solo seco. A terceira camada é composta por cascalho, saturado por chorume, que se torna visível no córrego Camundongo. A quarta camada é de rocha sã.

A primeira camada da SEV 09, de pequena espessura, é de solo de cobertura dos resíduos. A segunda, a terceira e a quarta camadas são de resíduos, nestas camadas a saturação e a contaminação por chorume aumentam com a profundidade. A quinta camada é de rocha. A sexta camada é de rocha com provável saturação ou mudança de tipo de rocha.

A primeira camada da SEV 10 é de solo de cobertura dos resíduos. A segunda e a terceira camadas representam o pacote de resíduos e o aumento da contaminação por chorume com a profundidade. A quarta camada é de rocha.

O erro percentual no ajuste da curva calculada pelo modelo e os dados de campo, no caso da SEV 04 foi de 6,57%, na SEV 09 de 5,98% e na SEV 10 foi de 4,99%.

Segundo FARIA (2001), a trincheira 2 foi realizada em sentido oposto à trincheira 1, às margens do córrego Camundongo, e serviu para caracterizar as camadas da SEV 04, próxima a esta trincheira. Esta área é uma planície de inundação, sendo a rocha mãe do solo constituída por sedimentos aluvionares.

O solo da trincheira 2 é um Glei pouco húmico (FARIA, 2001). Os dois primeiros horizontes são compostos por cascalho de quartzo com matriz constituída de areia fina pouco argilosa, textura areno pouco argilosa, restos vegetais e muitos poros fissurais, desenvolvidos por raízes, no interior dos quais encontra-se óxido de ferro. Tais horizontes correspondem à primeira camada da SEV 04 que devido ao valor da resistividade pode ser considerada de solo não saturado. A presença de alta porosidade e textura arenosa em superfície com ligeiro aumento no teor de argila em profundidade possibilitam a infiltração da água da chuva. Os três horizontes seguintes são constituídos por muitos poros milimétricos, a textura é definida em profundidade sendo inicialmente areno pouco argilosa variando a argilo-arenosa, poucas partículas de areia grossa, de concreções de óxido de ferro e de seixos de quartzo e matriz fina constituída por material argiloso. Tais horizontes correspondem à segunda camada que pelos valores de resistividade é de solo seco. A terceira camada, de solo saturado com influência de chorume mostrou, a partir de 1,60 metros de profundidade, a presença de uma camada de cascalho de seixos arredondados de quartzo e concreções redondas milimétricas e centimétricas de óxido de ferro abaixo da qual deve ocorrer o lençol freático.

Na Figura 17 estão os resultados das SEVs 13 e 14. Estas SEV foram realizadas sobre os resíduos e interpretadas adotando um modelo 3 camadas com  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ .

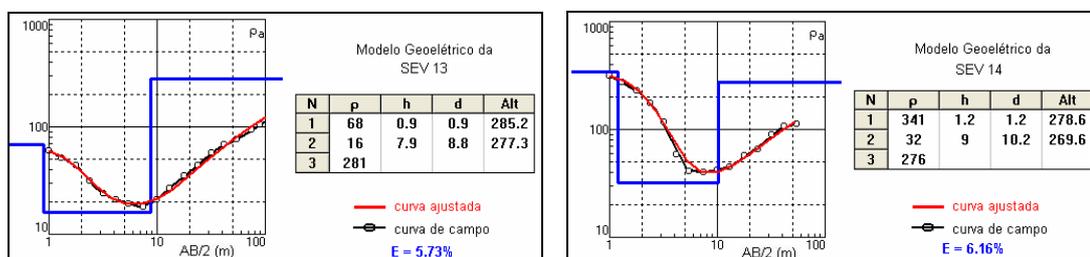


FIGURA 17 – Modelo geoeétrico das SEVs 13 e 14.

A primeira camada da SEV 13 e da SEV 14 apresenta resíduo não saturado. A segunda camada é de resíduos, material orgânico e rocha alterada saturada com choro. A terceira camada é de rocha sã.

O erro percentual no ajuste do modelo, no caso da SEV 13 foi de 5,73% e na SEV 14 de 6,16%.

Na Figura 18 está o resultado da SEV 15. Esta SEV adota um modelo de 4 camadas com  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ .

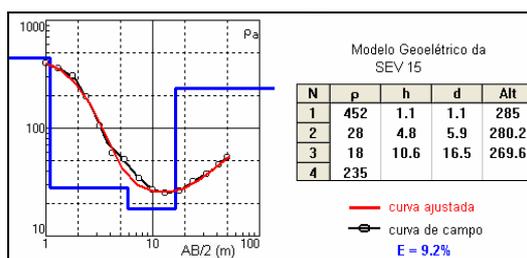


FIGURA 18 – Modelo geoeétrico da SEV 15.

A primeira camada da SEV 15 é de solo seco. A segunda e terceira camadas são de resíduos, cascalho e rocha alterada saturada com choro. A quarta camada é constituída por rocha sã não saturada.

O erro percentual no caso da SEV 15 foi de 9,2%.

Em todas as SEVs o erro percentual, no ajuste da curva calculada pelo modelo e os dados de campo, foi menor que 10%.

Os resultados destas SEVs mostraram grande heterogeneidade das camadas do modelo geoeletrico, demonstrando que a imensa variedade de materiais aterrados no depósito de resíduos interfere na disparidade de valores de resistividade elétrica dentro da área de resíduos. Fora da área de resíduos esta heterogeneidade reflete a diferença de textura dos materiais característica das diferentes litofácies presentes na Formação Miguel Sutil (MIGLIORINI, 1999) e a porosidade e permeabilidade dos solos interferem nos valores de resistividade.

TABELA 02 – Profundidades do nível d’água e da camada de menor resistividade com suas respectivas cotas e altitudes das SEVs.

SEV	Altitude das SEVs	Cota do nível d’água (m)	Profundidade do nível d’água (m)	Cota da camada de menor resistividade (m)	Profundidade da camada de menor resistividade (m)
1	302,5	294,3	8,2	294,3	8,2
2	290,7	289,4	1,3	282,7	8,0
3	288,1	287,2	0,9	281,6	6,5
4	285,6	284,6	1,0	284,6	1,0
9	296,7	295,8	0,9	294,7	2,0
10	290,3	289,8	0,5	288,7	1,6
12	295,0	294,2	0,8	284,3	10,7
13	286,1	285,2	0,9	285,2	0,9
14	279,8	278,6	1,2	278,6	1,2
15	290,0	288,9	1,1	284,1	5,9

Nota-se que na Tabela 02 as profundidades do nível d’água e da camada de menor resistividade coincidem nas SEVs 01, 04, 13 e 14. Porém, com exceção da SEV 01, as demais SEVs confirmam a contaminação do lençol freático pelo churume.

Nas SEVs 02, 03, 09, 10, 12 e 15 a zona saturada está acima da camada de menor resistividade, mas se estende até esta, conforme Tabela 02. À medida que aumenta a profundidade, ocorre aumento de saturação e de contaminação do lençol freático por churume, restrição feita as SEV 02, 03 e 12 que não mostraram sinais aparentes de contaminação.

Conhecidas as cotas de cada SEV e a profundidade do nível d'água, determinou-se a cota do lençol freático em cada ponto. Posteriormente foram traçadas as isolinhas do nível d'água, gerando o mapa potenciométrico da área (Figura 19). A seta vermelha indica a direção do fluxo subterrâneo do lençol freático que é predominantemente de noroeste para sudeste, em conformidade com a diminuição das medidas de resistividade.

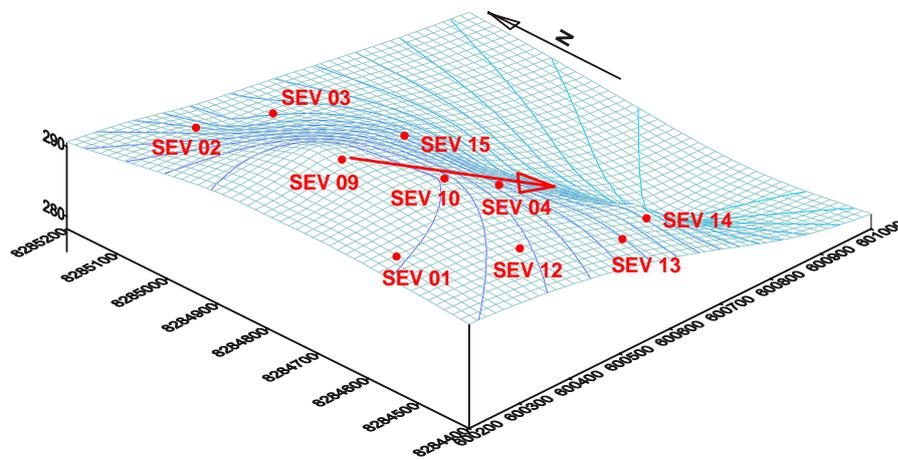


FIGURA 19 – Mapa potenciométrico do antigo depósito de resíduos.

O conjunto de dados das sondagens elétricas verticais foi utilizado para elaboração de seções horizontais de resistividade para análise do comportamento da contaminação em algumas cotas: 285, 282, 280, 275 e 270 metros de profundidade, conforme Figura 20. Nesta Figura, as SEVs foram colocadas lado a lado com as respectivas cotas topográficas: SEV 01 com cota de 302,5 metros; SEV 02 com cota de 290,7 metros; SEV 03 com cota de 288,1 metros; SEV 04 com cota de 285,6 metros; SEV 09 com cota de 296,7 metros; SEV 10 com cota de 290,3 metros; SEV 12 com cota de 295 metros; SEV 13 com cota de 286,1 metros; SEV 14 com cota de 279,8 metros; SEV 15 com cota de 290 metros.

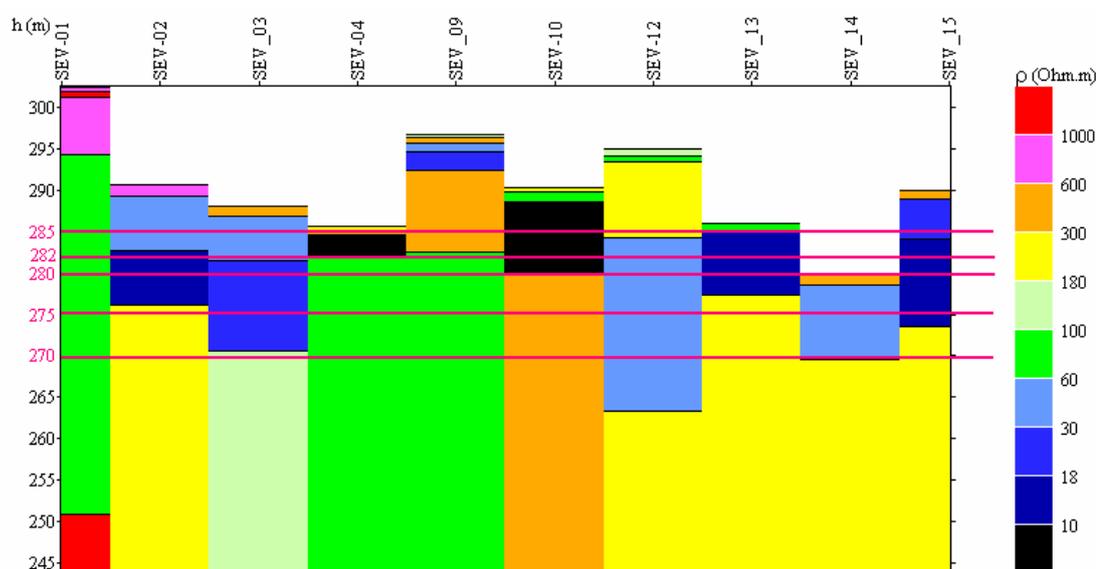


FIGURA 20 – Seções de resistividade do modelo geoeletrico das SEVs com os níveis para elaboração dos mapas de resistividade.

A seção horizontal na cota referente a 285 metros (Figura 21) mostra o formato da zona contaminada. Dentro da área de resíduos, os valores de resistividade inferiores a 80 Ohm.m podem ser considerados como representativos de contaminação. As SEVs 02, 03, 10, 13 e 15 apresentam os menores valores de resistividade indicando possível contaminação nas SEVs que se encontram dentro da área de resíduos. Nota-se dois focos de alta resistividade, nas SEVs 04 e 09, representativo de solo areno-argiloso seco. A zona saturada e contaminada, na SEV 09, está localizada acima desta camada e na SEV 04 abaixo desta camada.

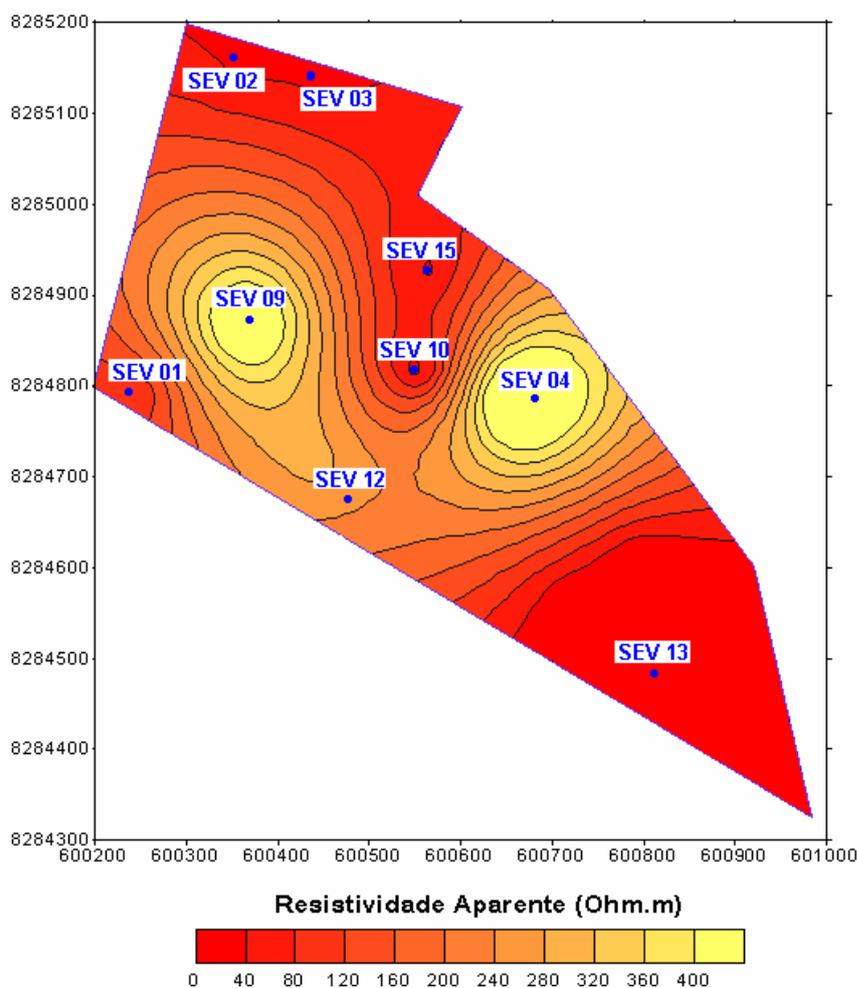


FIGURA 21 – Mapa de resistividade para a cota 285 metros.

Na seção horizontal na cota referente a 282 metros (Figura 22) nota-se que a área, quase toda, apresenta uniformidade de valores. Em relação ao mapa da cota 285 metros, os valores de resistividade para as SEVs 02, 04, 09, 12 e 15 diminuíram, sendo os valores das SEV 04 e 09 consideravelmente menores na cota de 282 metros devido a uma transição de uma camada resistiva de solo seco para uma camada condutiva saturada e contaminada. Os valores das SEVs 01 e 09 indicam uma camada de rocha saturada na parte mais elevada da área.

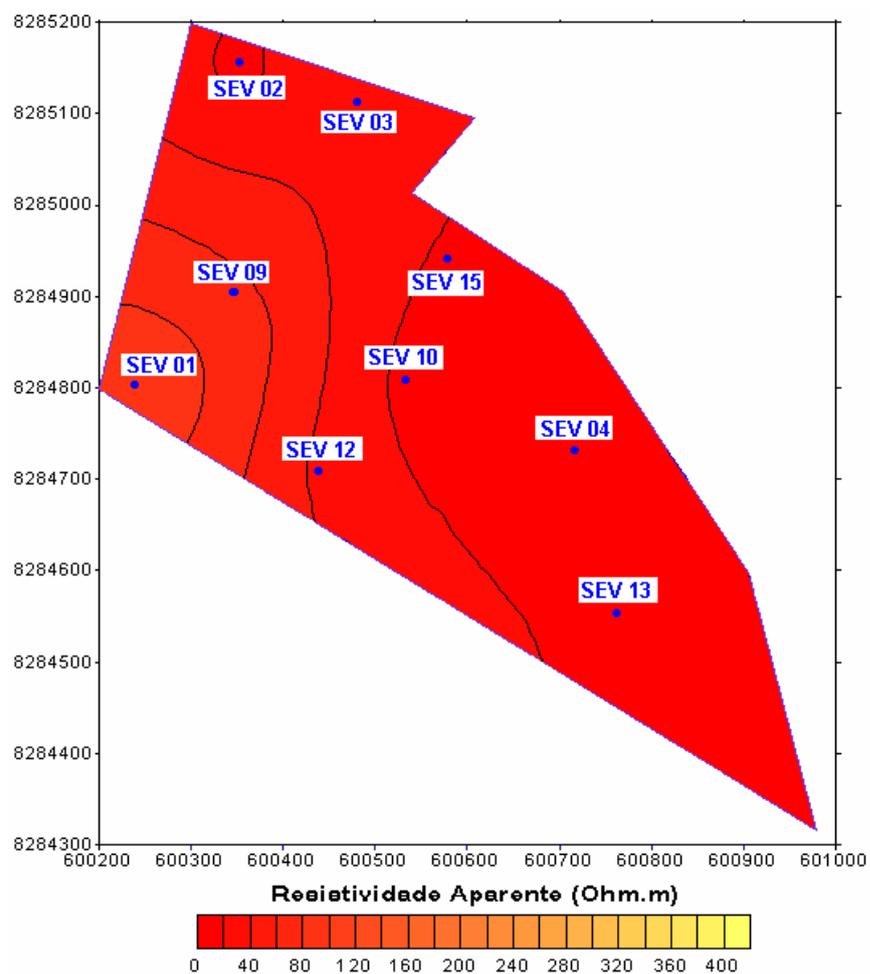


FIGURA 22 – Mapa de resistividade para a cota 282 metros.

A seção horizontal na cota referente a 280 metros (Figura 23) mostra uma diminuição nos valores de resistividade na SEV 03 indicando saturação na rocha alterada. O valor da resistividade na SEV 04 voltou a crescer atingindo 64 Ohm.m e também na SEV 10 atingindo 394 Ohm.m, indicando que provavelmente já atingiu a rocha sã, menos porosa.

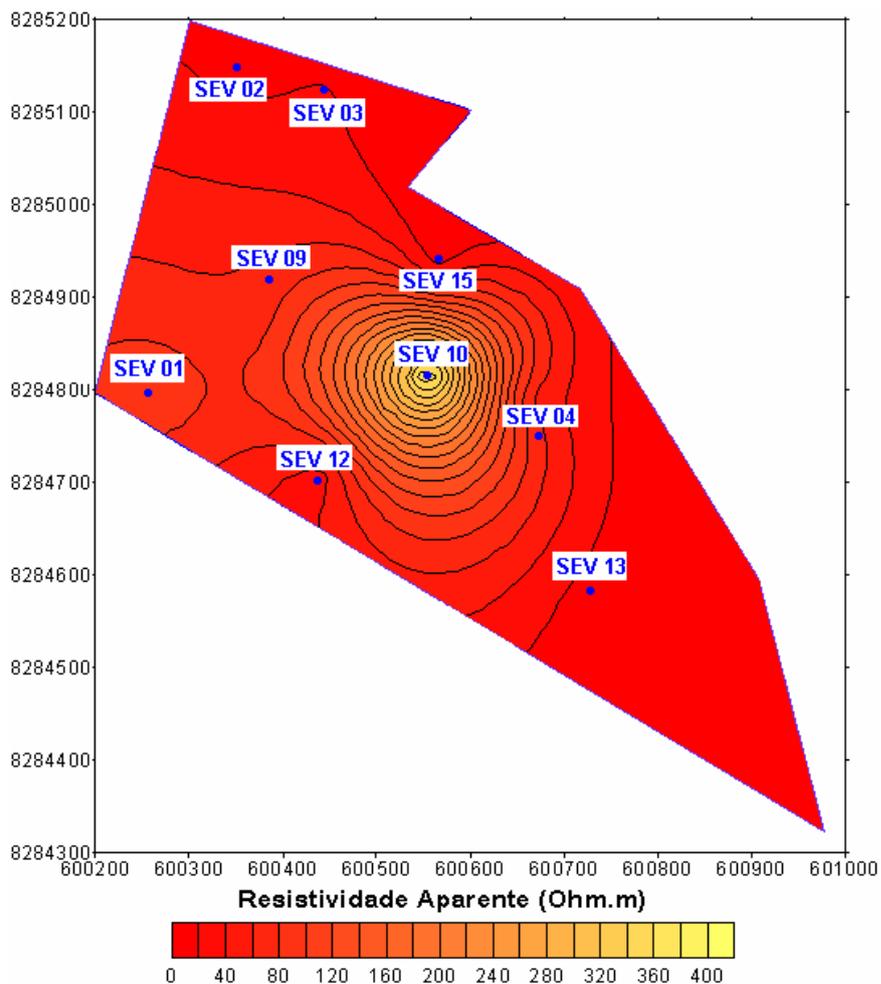


FIGURA 23 – Mapa de resistividade para a cota 280 metros.

A seção horizontal na cota referente a 275 metros (Figura 24) mostrou que as SEVs 01, 03, 04, 09, 10, 12 e 15 continuam com os mesmos valores de resistividade encontrados na cota de 280 metros. Na SEV 02 a resistividade aumenta para 215 Ohm.m e na SEV 13 aumenta para 281 Ohm.m, indicando a rocha sã, menos porosa.

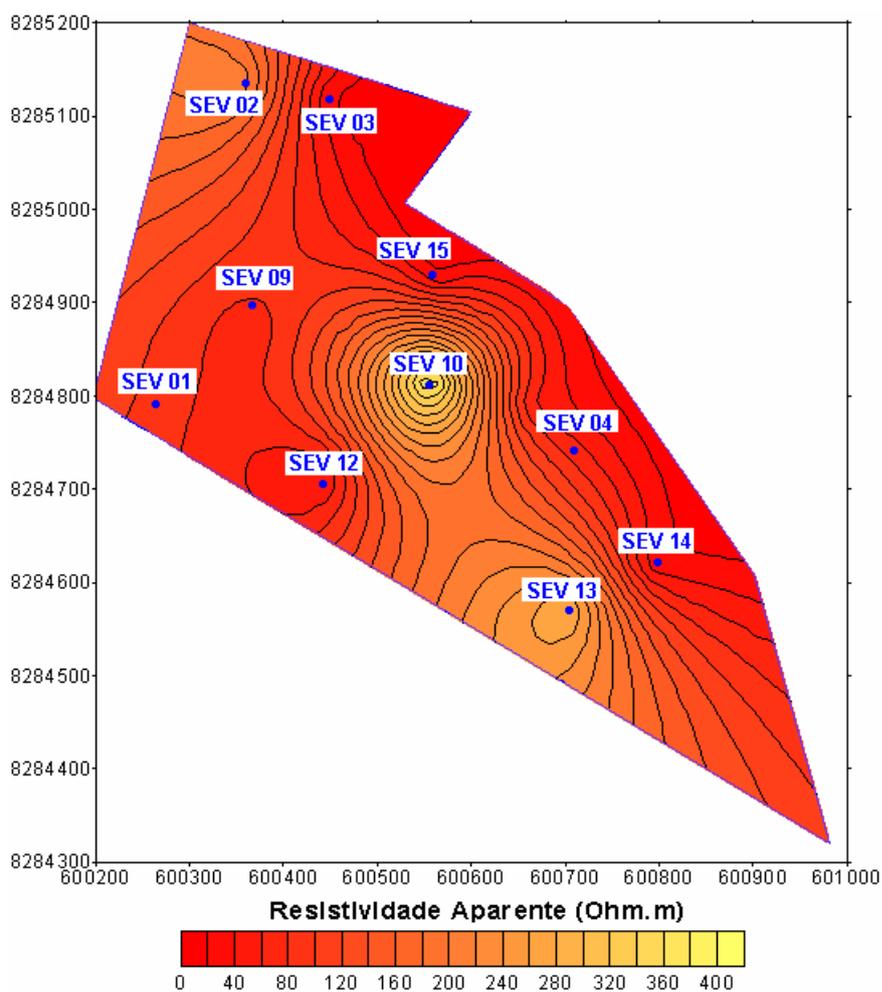


FIGURA 24 – Mapa de resistividade para a cota 275 metros.

Na seção horizontal na cota referente a 270 metros (Figura 25) as SEVs 01, 02, 04, 09, 10, 12, 13 e 14 permanecem com os mesmos valores observados na cota de 275 metros. O valor da resistividade na SEV 03 aumentou atingindo 109 Ohm.m e na SEV 15 aumentou para 235 Ohm.m, indicando presença de rocha sã, menos porosa.

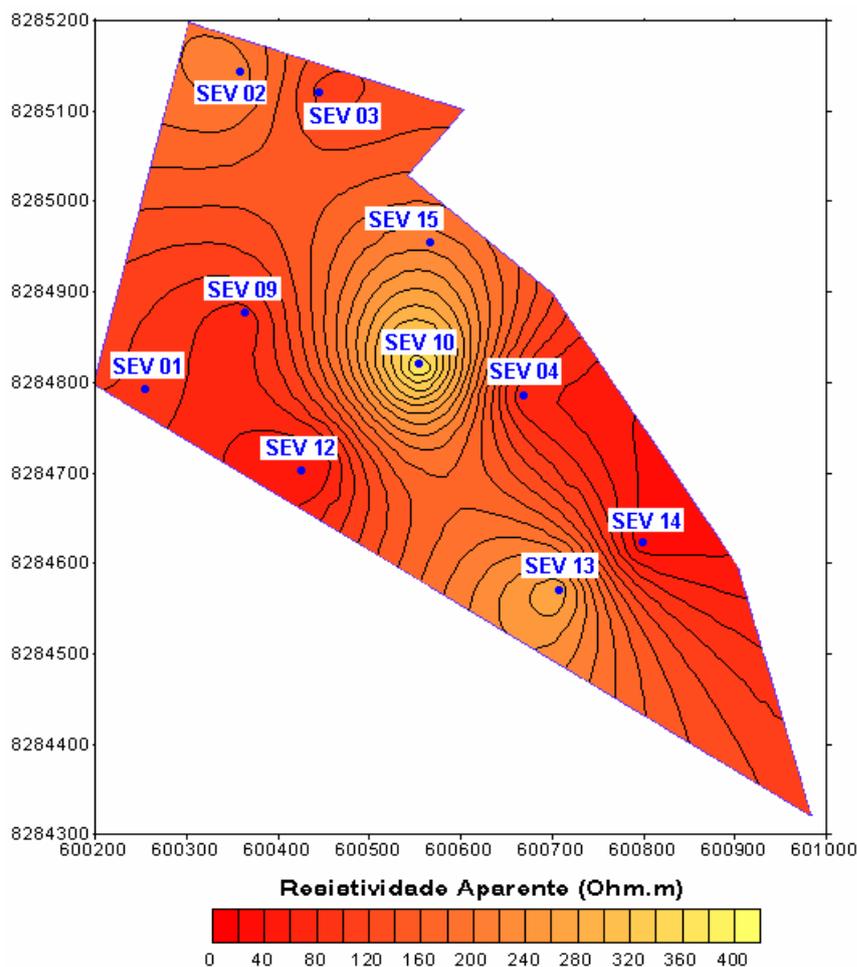


FIGURA 25 – Mapa de resistividade para a cota 270 metros.

Valores semelhantes de resistividade, indicando zonas de contaminação em áreas de depósito de resíduos sólidos, foram encontrados por MATOS (1994), ELIS (1998), BRAGA et al (1999), MALAGUTTI FILHO & MOURA (1999), MOURA & MALAGUTTI FILHO (1999), BRATUS & YABAR (2001), DOURADO et al (2001), MONTEIRO & COSTA (2001), MORALES et al (2001) e SHIRAIWA et al (2001).

## 4.2. CAMINHAMENTO ELÉTRICO

Foram realizados 4 perfis utilizando o método do caminhamento elétrico com arranjo Schlumberger, com AB igual a 60 metros, MN de 2 metros e distância entre os pontos de investigação de 10 metros, cujos resultados estão contidos nas Figuras 26 a 29.

Sendo a abertura (AB) usada no caminhamento elétrico de 60 metros, a profundidade teórica de investigação (h) pode variar de 7,5 metros a 10 metros, conforme Tabela 01, página 29, podendo assumir, também, o valor de 12 metros.

No perfil da Linha 2, Figura 26, a direção de abertura (AB/2) dos eletrodos é noroeste-sudeste. Observa-se que a partir do início do perfil a resistividade decresce atingindo o mínimo de 20  $\Omega.m$  na posição 110 metros a partir da qual volta a crescer até o final do perfil. Porém, entre as posições 30 a 280 metros estão os menores valores de resistividade variando entre 20 a 45  $\Omega.m$ . Esta faixa de menor resistividade deve ser ocasionada pela presença de água. Neste perfil observam-se, ainda, pequenas anomalias que podem ser devidas à heterogeneidade dos resíduos.

Abaixo de 10,7 metros de profundidade a SEV 12 apresentou resistividade de 34 Ohm.m, valor próximo do encontrado no caminhamento elétrico (30 Ohm.m).

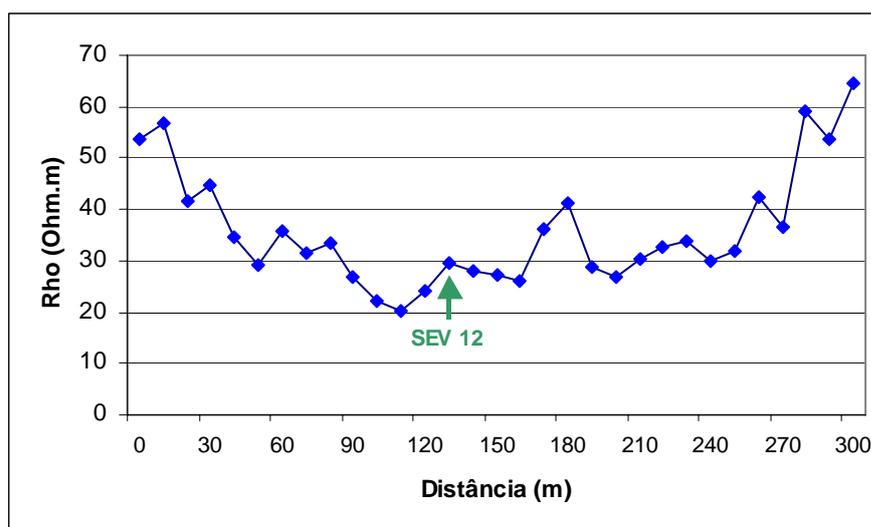


FIGURA 26 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 2.

O perfil da Linha 3, Figura 27, iniciou-se a 40 metros do córrego Camundongo em direção subindo a vertente. A direção de abertura (AB/2) dos eletrodos é noroeste-sudeste. Observa-se que a resistividade decresce à medida que afasta do córrego e caminha em direção à área de resíduos, atingindo o mínimo de  $46,7 \Omega.m$  na posição 290 metros devendo ser ocasionada pela presença de água em conjunto com o chorume.

A faixa de variação de resistividade oscilou entre 46 a  $165 \Omega.m$  nas posições de 20 até 300 metros. Algumas anomalias ao longo do perfil podem indicar a variação de composição dos resíduos sólidos dentro do pacote de lixo.

Abaixo de 3,6 metros de profundidade a SEV 04 apresentou resistividade de 64 Ohm.m. Considerando a abertura (AB) de 60 metros para o caminhamento elétrico e as profundidades teóricas, variando de 7,5 a 12 metros, o valor da resistividade para estas profundidades foi de 100 Ohm.m, sendo considerado valores próximos.

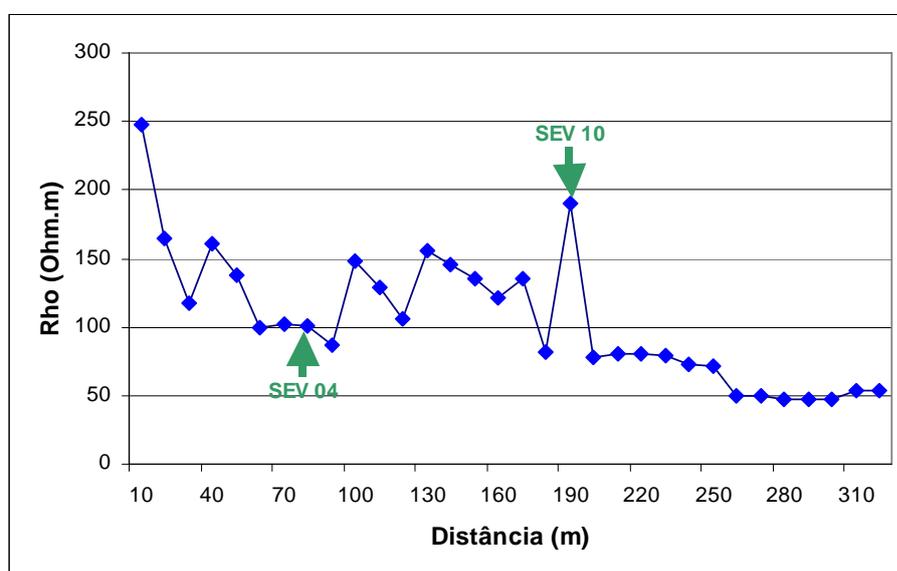


FIGURA 27 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 3.

Nota-se que, no perfil da Linha 3 (Figura 27), a SEV 10 apresenta alto valor de resistividade (190 Ohm.m) comparado com a baixa resistividade (22 Ohm.m) desta SEV no perfil da linha 5 (Figura 28). Esta diferença pode ser explicada pela por problemas no contato do eletrodo com o solo, ou pela diferença na direção de abertura (AB/2) dos eletrodos, que no caso da Linha 5 é sudoeste-nordeste e no caso da Linha 3 é noroeste-sudeste, indicando que o meio é anisotrópico. Esta diferença também pode ser devida ao fato de que a 10,2 metros de profundidade ocorre uma transição de uma camada de menor resistividade (9 Ohm.m) para uma de maior resistividade (394 Ohm.m), Figura 16, página 44.

No perfil da Linha 5, Figura 28, a direção de abertura (AB/2) dos eletrodos é sudoeste-nordeste. Observa-se que entre as posições 130 até 280 metros a resistividade varia muito pouco de 20 a 60  $\Omega$ .m devendo ser ocasionada pela presença de água em conjunto com o chorume, dentro da área de resíduos.

Da posição inicial até 130 m a resistividade oscilou bastante entre 40 a 180  $\Omega$ .m apresentando algumas anomalias que podem indicar a heterogeneidade de textura dos solos da Formação Miguel Sutil fora da área da área de resíduos.

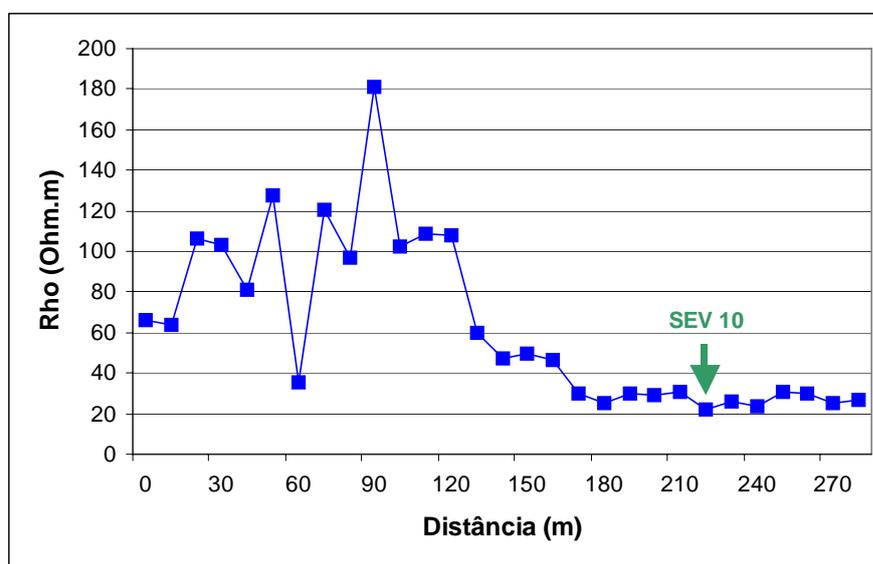


FIGURA 28 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 5.

No perfil da Linha 9, Figura 29, realizado fora da área de resíduos a direção de abertura (AB/2) dos eletrodos é noroeste-sudeste. Observa-se que da posição inicial até 160 metros a resistividade varia pouco de 40 a 60  $\Omega$ .m, indicando a presença de rocha alterada saturada. A partir desta posição até o final as anomalias podem estar relacionadas com solo arenoso seco e cascalho que aumentam a resistividade.

Considerando a profundidade teórica entre 7,5 e 12 metros, a SEV 02 apresenta valor de resistividade de 15 Ohm.m e no caminhamento elétrico 55 Ohm.m. Para a SEV 03 o valor de resistividade foi de 22 Ohm.m e no caminhamento elétrico foi de 63 Ohm.m. As duas SEVs foram realizadas fora da área de resíduos e os valores de resistividade indicam que a rocha alterada está saturada.

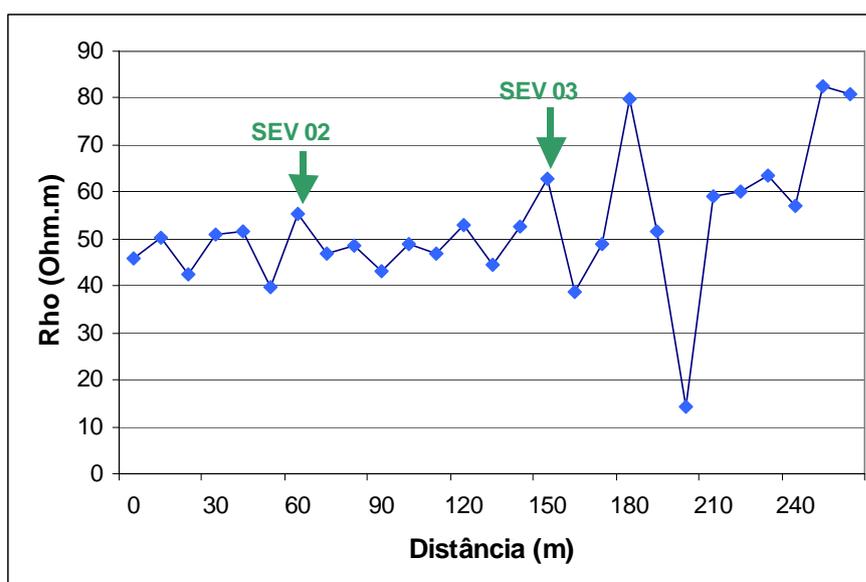


FIGURA 29 – Gráfico da resistividade aparente em função da distância obtido com caminhamento elétrico na Linha 9.

### **4.3. CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO**

Com o método do caminhamento eletromagnético indutivo (EMI) foram realizados 8 perfis com profundidades de investigação de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros, cujos resultados estão apresentados nas figuras 30 a 37.

As Figuras 38 e 39 mostram o mapa da topografia da área e das curvas de nível e as pseudo-seções de condutividade elétrica para as profundidades de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros.

A Figura 40 apresenta o mapa de resistividade aparente realizado por ELIS & MATOS (1995). Esta Figura serve para acompanhar a evolução da pluma de contaminação ao se comparar estes valores de resistividade aparente com os de condutividade elétrica realizados neste trabalho.

A Figura 41 mostra a localização dos pontos de coleta das amostras realizadas por FARIA, (2001).

O perfil de EMI da Linha 1, Figura 30, mostra que a condutividade cresce lentamente com a distância para todas as profundidades, embora se mantenha muito baixa, o que indica ausência de contaminação nesta área.

Nota-se que superficialmente até 7,5 m a condutividade é baixa, em torno de 7 mS/m, aumentando com a profundidade. A 15 m de profundidade a condutividade varia, basicamente, entre 10 e 15 mS/m. Em 30 m de profundidade a condutividade varia de 15 a 20 mS/m.

Estas baixas variações indicam um perfil linear e horizontal de condutividade, mostrando no final do perfil uma maior condutividade que se estende em profundidade acompanhando o declive do terreno.

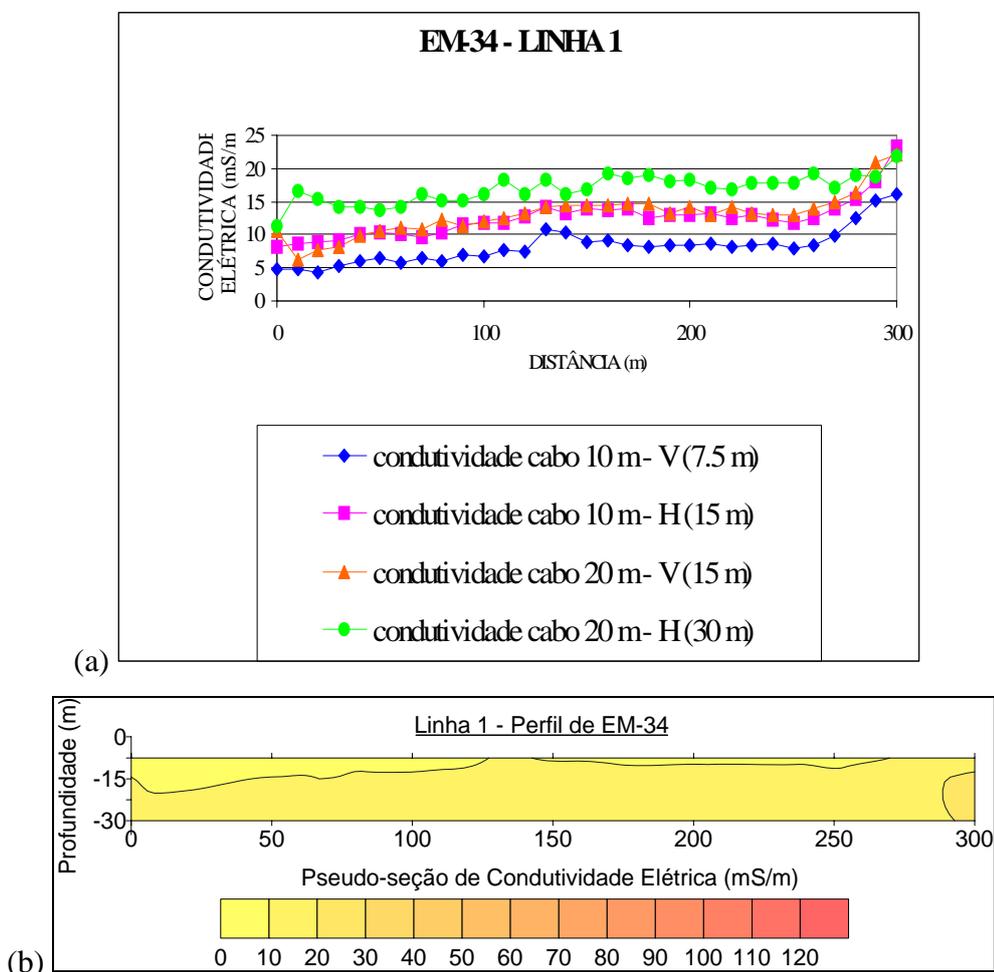


FIGURA 30 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 1 em

- (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade.

Da posição inicial até 250 metros e na posição de 310 metros, o perfil de EMI da Linha 2 da Figura 31, sofre pouca variação de condutividade de 5 a 15 mS/m, para todas as profundidades, sendo um pouco menor a 7,5 metros de profundidade mostrando que a superfície é menos condutiva.

Entre as posições 250 a 300 metros a resistividade é maior a 7,5 metros de profundidade atingindo o valor máximo em 20,5 mS/m. Nesta mesma faixa observa-se que a condutividade a 30 metros de profundidade é menor (3,9 mS/m). Isto significa que superficialmente o meio é mais condutivo provavelmente devido à presença de solo areno-argiloso que retém água. Esta textura de solo volta a ocorrer a partir da posição 310 metros em toda a profundidade.

Apesar de existir diferença de condutividade, a variação é muito pequena e indica ausência de contaminação nesta linha, pois a quantidade de resíduos é pequena. Esta Linha está situada sobre a passagem de caminhões, estando coberta de cascalho e bem compactada, o que explica a baixa condutividade. Da posição 230 metros até o final do perfil ocorre empoçamento de água.

A Figura 31 (b) mostra a pseudo-seção de condutividade elétrica realizada neste trabalho e a Figura 31 (c) mostra a pseudo-seção de condutividade elétrica realizada por SHIRAIWA et al (2001). Nota-se que na a escala de cores é diferente, porém a ordem de grandeza se mantém. Observa-se, ainda, que houve pouca variação nos valores de condutividade apresentados há 3 anos por SHIRAIWA et al (2001).

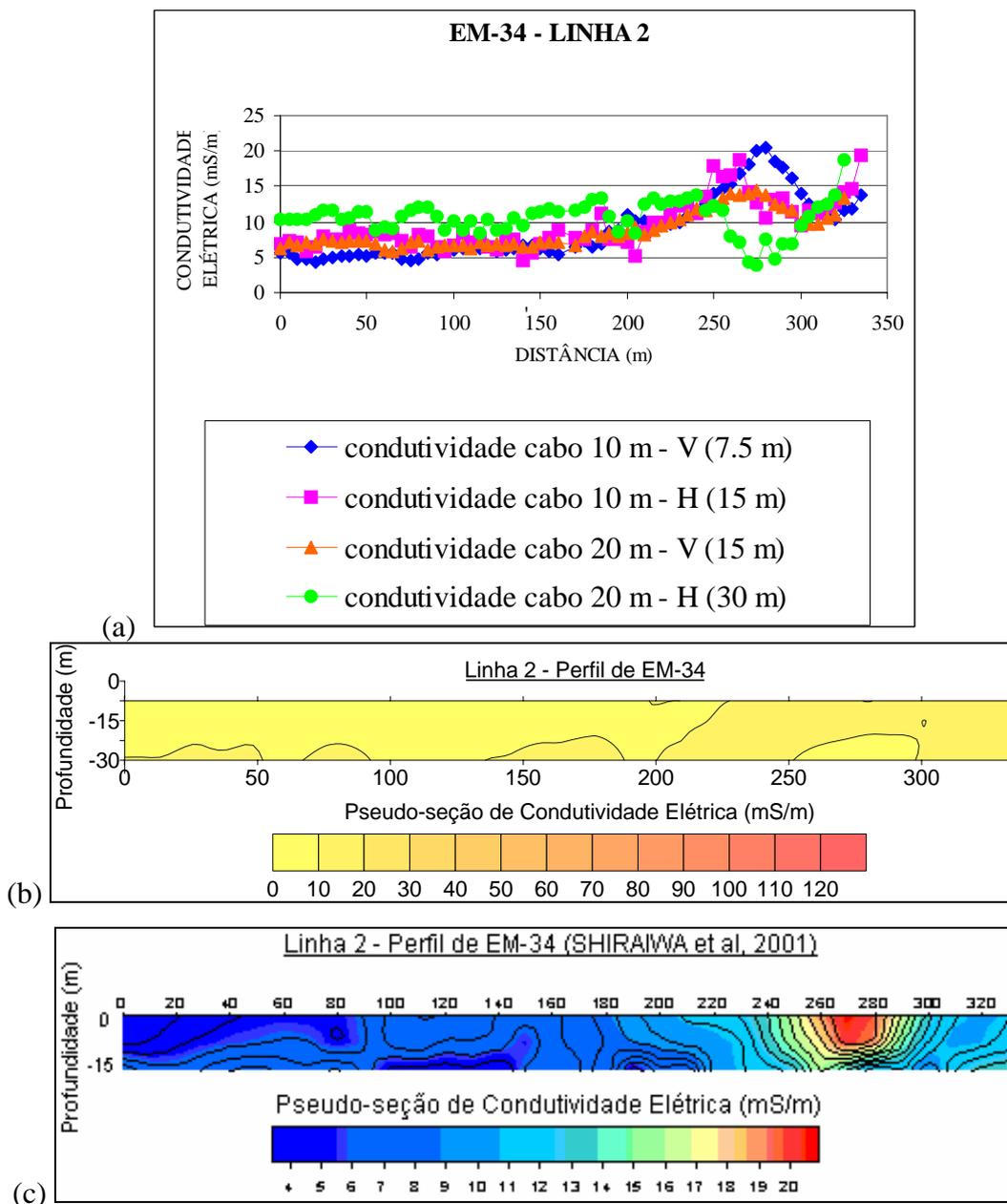


FIGURA 31 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 2 em  
 (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade e em  
 (c) isovalores da condutividade (SHIRAIWA et al, 2001).

A Linha 3 da Figura 32, apresenta duas zonas condutoras entre as posições 120 a 190 metros e 210 a 300 metros de cerca 110 mS/m sobre os resíduos. Esta zona estende-se em até 15 metros de profundidade indicando a presença de contaminação até esta profundidade. A 30 metros de profundidade a condutividade varia pouco entre 1 e 20 mS/m com máxima condutividade de 56,8 mS/m na posição 205 metros. Entre a posição inicial até 130 metros e na posição de 200 metros ocorre pouca variação de condutividade, para todas as profundidades, sendo que a 7,5 metros de profundidade a condutividade é maior em todos os pontos, pois os resíduos estão mais próximos da superfície. Estes valores elevados de condutividade indicam a presença de contaminação sobre a área de resíduos diminuindo em profundidade.

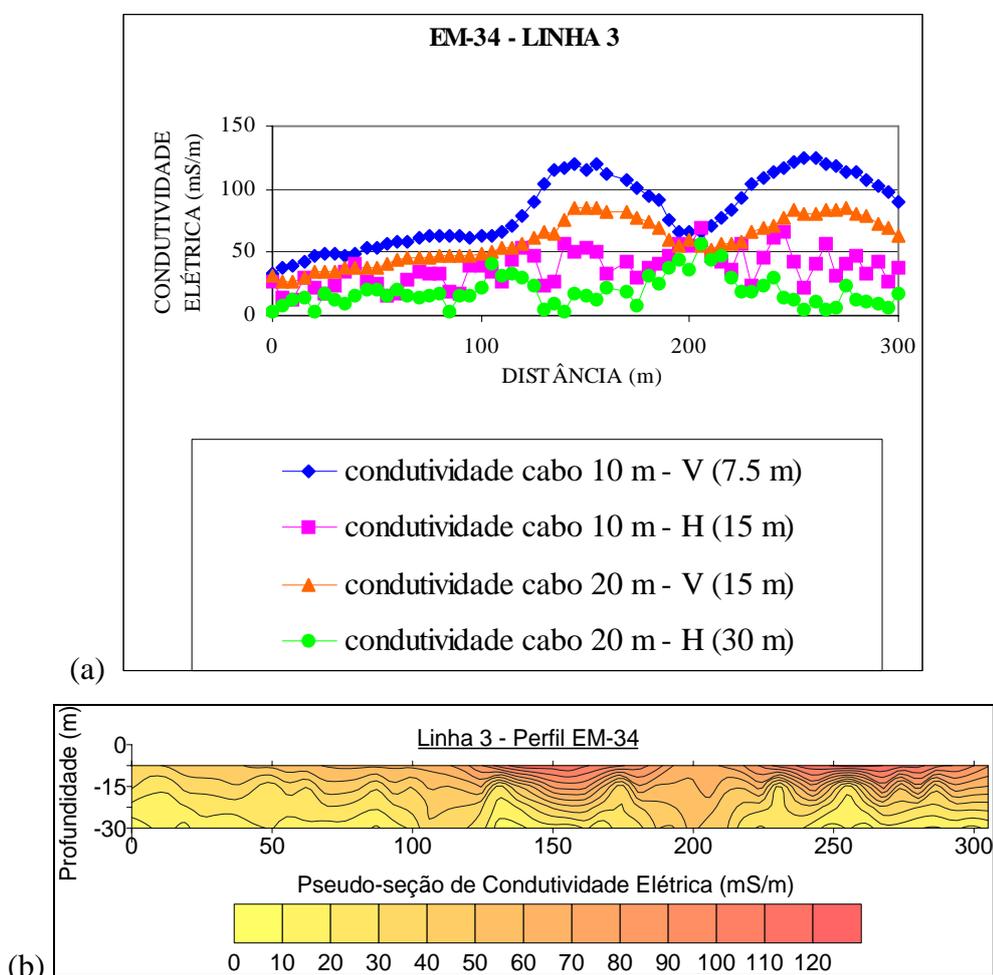


FIGURA 32 – Perfil de caminhada eletromagnética da Linha 3 em  
 (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade.

O perfil de EMI da Linha 4, Figura 33, mostra que entre as posições 60 a 200 metros a condutividade superficial chega a 75 mS/m decrescendo com a profundidade. Possivelmente estes valores altos de condutividade indicam a presença de maior quantidade de resíduos com concentração de chorume.

Da posição inicial até 60 metros e a partir da posição 200 metros nota-se que em toda a profundidade a condutividade mantém-se praticamente constante cerca de 20 mS/m.

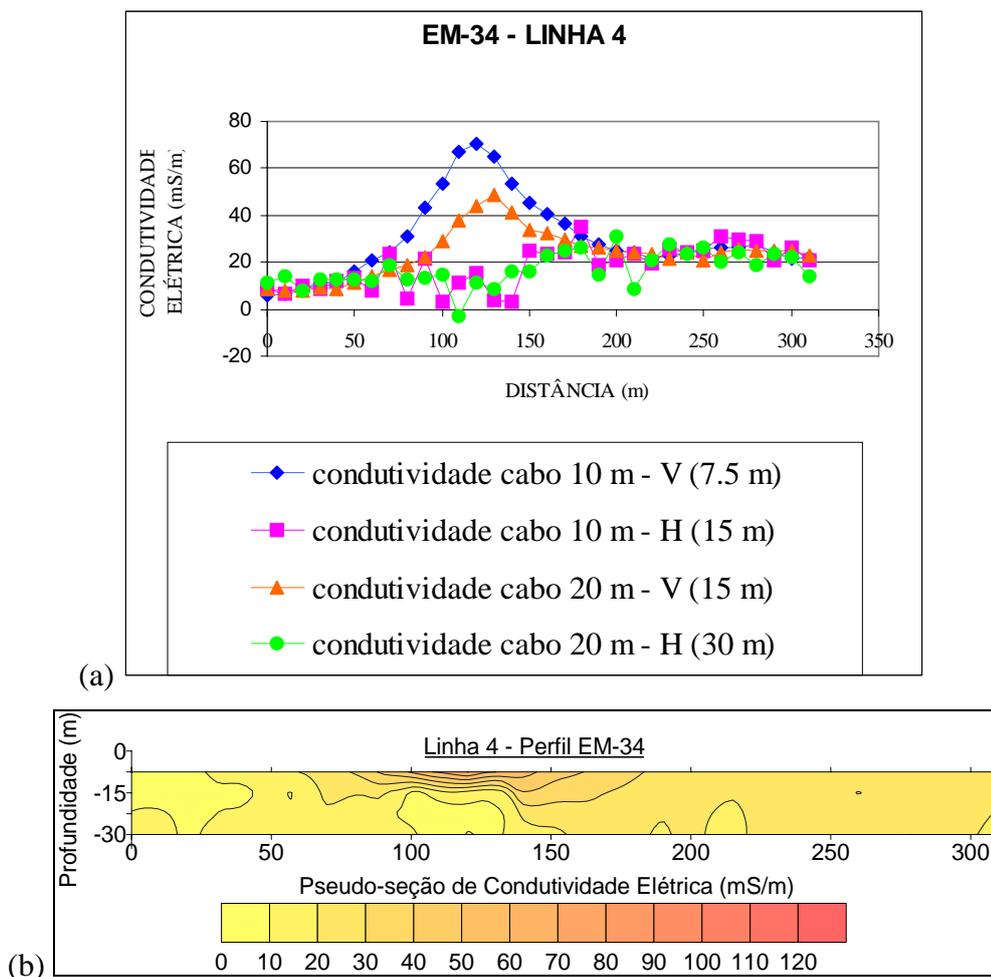


FIGURA 33 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 4 em

(a) condutividade em função da distância e em

(b) isovalores da condutividade com a profundidade.

Na Figura 34, observa-se entre as posições 110 a 260 metros uma faixa muito condutiva (125 mS/m), até a profundidade de 15 metros, caracterizando o pacote de lixo e presença de contaminação estendendo-se em profundidade.

Da posição inicial até 100 metros a variação da condutividade é pequena, cerca de 20 mS/m, mostrando que praticamente não ocorre contaminação.

A Figura 34 (b) mostra a pseudo-seção de condutividade elétrica realizada neste trabalho e a Figura 34 (c) mostra a pseudo-seção de condutividade elétrica realizada por SHIRAIWA et al (2001). Nota-se que na a escala de cores e a distância investigada são diferentes, porém a ordem de grandeza se mantém. Observa-se, ainda, que houve pouca variação nos valores de condutividade apresentados há 3 anos por SHIRAIWA et al (2001).

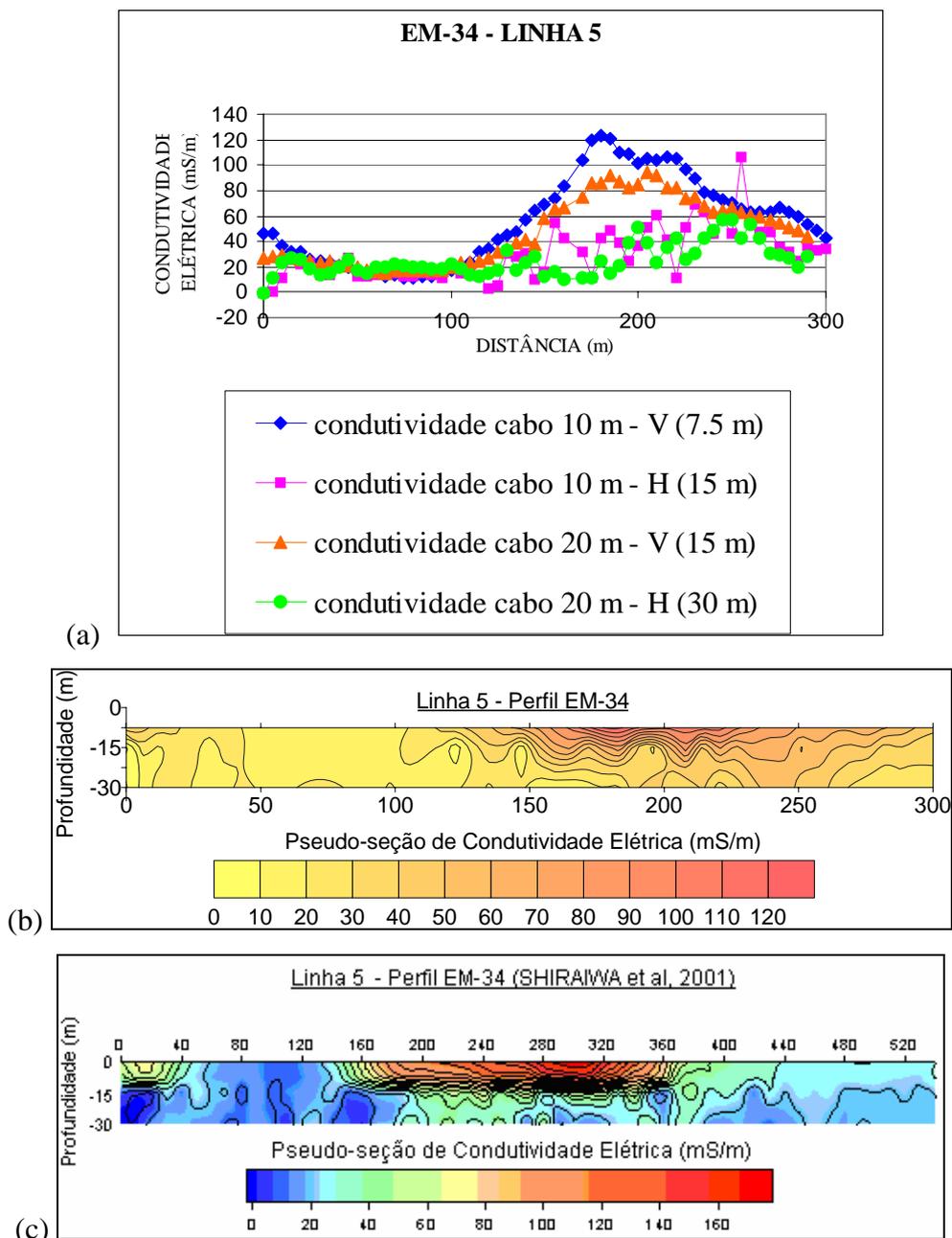


FIGURA 34 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 5 em

- (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade e em  
 (c) isovalores da condutividade (SHIRAIWA et al, 2001).

O perfil de EMI da Linha 8, Figura 35, mostra que a maior condutividade esta da superfície até 7,5 m de profundidade chegando a 70 mS/m na posição 20 metros. Outros dois picos de 55 mS/m acontecem nas posições 380 e 480 metros.

A 30 metros de profundidade a condutividade varia entre 1 a 50 mS/m. Possivelmente a presença de resíduos se estende até 15 metros de profundidade. Abaixo desta profundidade a condutividade é menor, mas ainda é considerável nas posições 380 e 510 metros.

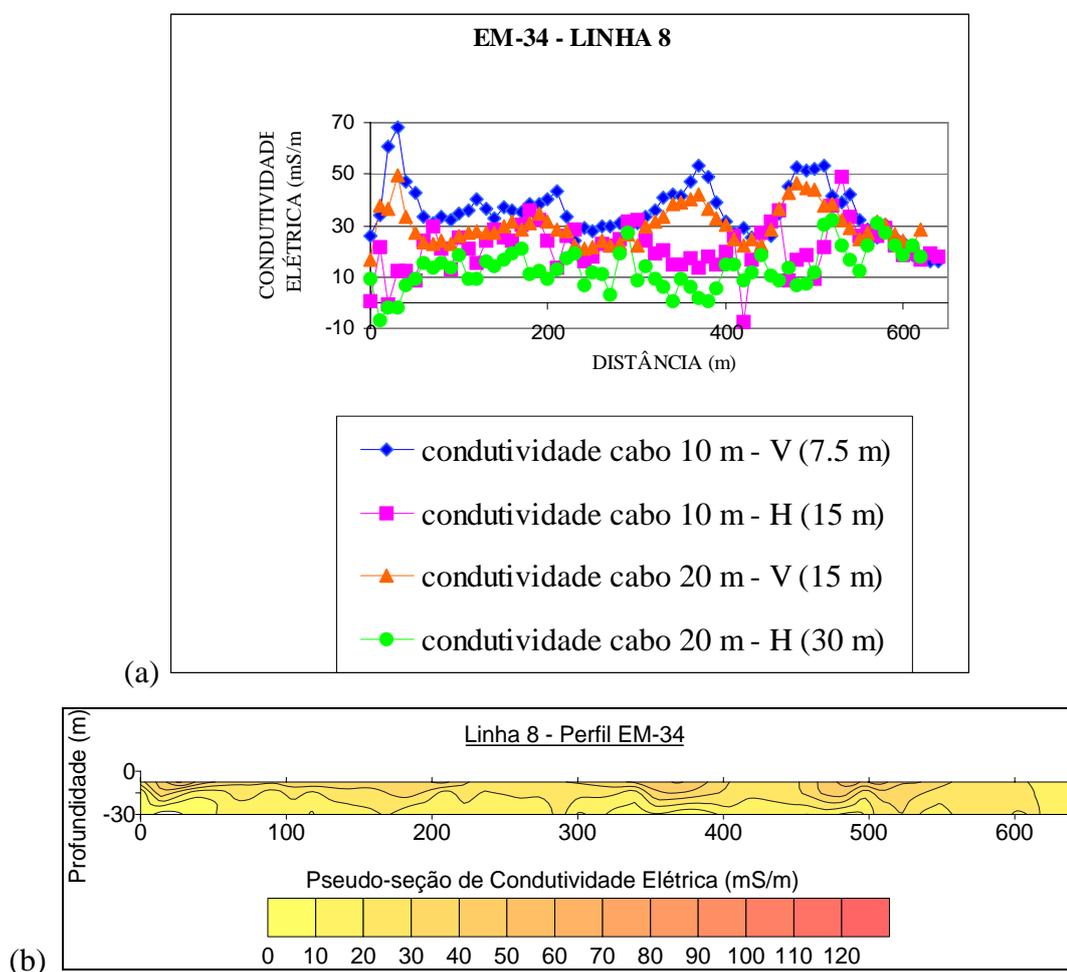


FIGURA 35 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 8 em  
 (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade.

Na Figura 36, a Linha 9 apresenta uma zona condutora de cerca 31,4 mS/m a partir da posição de 250 metros sendo provavelmente água superficial, pois em profundidade a condutividade é menor que 20 mS/m. Outra faixa em que a condutividade superficial também é alta aparece entre as posições 100 e 150 metros com condutividade de 30 mS/m.

Entre a posição inicial até 100 metros e a partir da posição de 160 até 250 metros ocorre pouca variação de condutividade de 10 a 25 mS/m, para todas as profundidades.

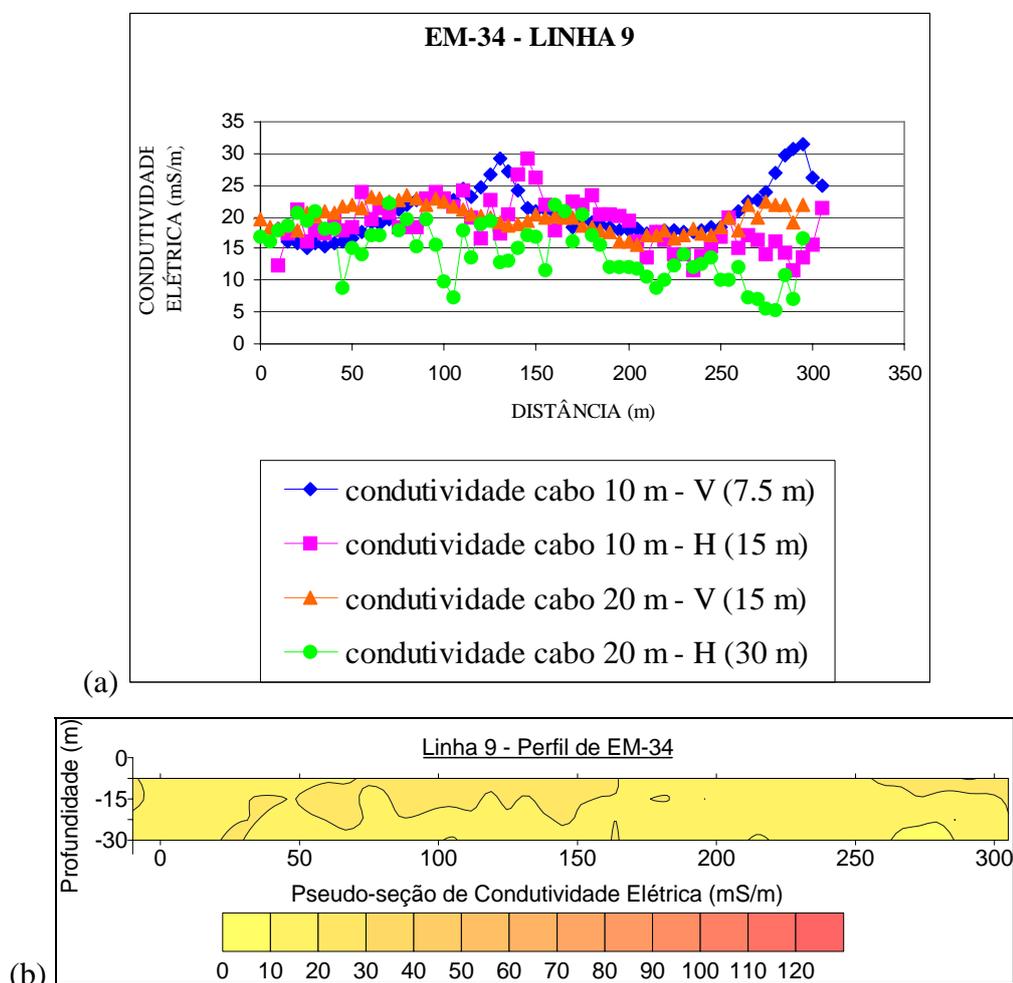


FIGURA 36 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 9 em  
 (a) condutividade em função da distância e em  
 (b) isovalores da condutividade com a profundidade.

Na Figura 37, a maior condutividade (70 mS/m) esta a 7,5 metros de profundidade, sendo praticamente constante a 30 metros de profundidade, em torno de 20 mS/m.

Entre as posições 40 a 110 metros a condutividade varia de 10 a 70 mS/m delineando o pacote condutivo que vai até 15 m de profundidade.

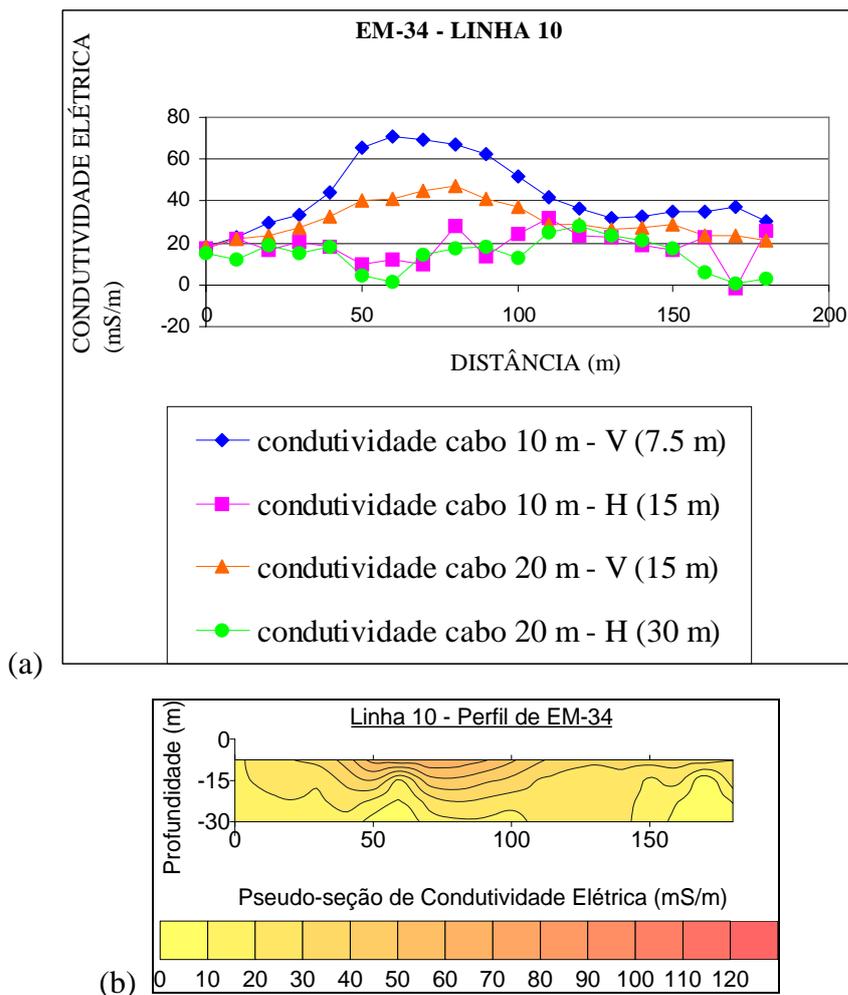


FIGURA 37 – Perfil de caminhamento eletromagnético da Linha 10 em

(a) condutividade em função da distância e em

(b) isovalores da condutividade com a profundidade.

O mapa da Figura 38 mostra que a quantidade de material contaminado concentra-se mais no centro do depósito de resíduos, na área onde a camada de resíduos é mais espessa. A migração vertical de contaminantes estende-se da superfície até 30 metros de profundidade. À medida que aumenta a profundidade a área de materiais contaminados diminui.

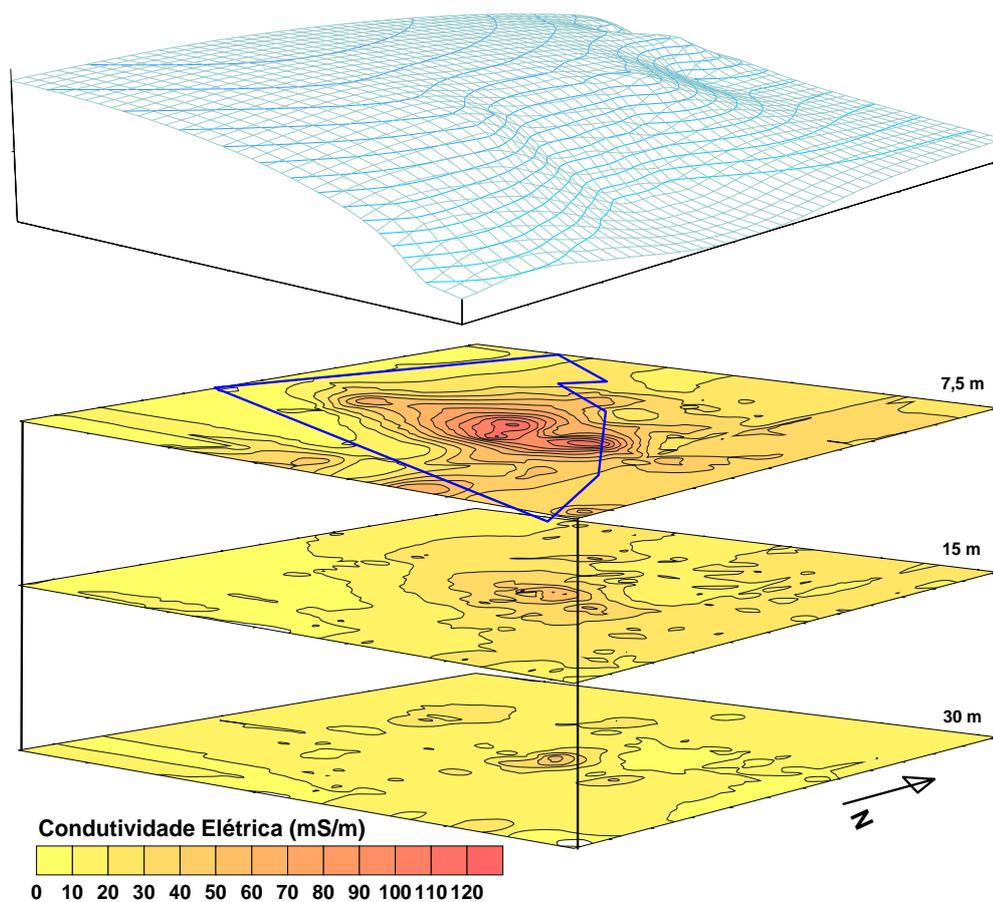


FIGURA 38 – Mapa de topografia da área e pseudo-seções de condutividade elétrica nas profundidades de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros.

A Figura 39 representa, em planta, as pseudo-seções de condutividade elétrica para as profundidades de 7,5 metros, 15 metros e 30 metros. Esta Figura mantém a mesma escala de cores da Figura 40. Nota-se dois focos de contaminação na área e que a direção do fluxo de contaminantes é de noroeste para sudeste, em direção ao córrego Camundongo, seguindo a inclinação natural do terreno.

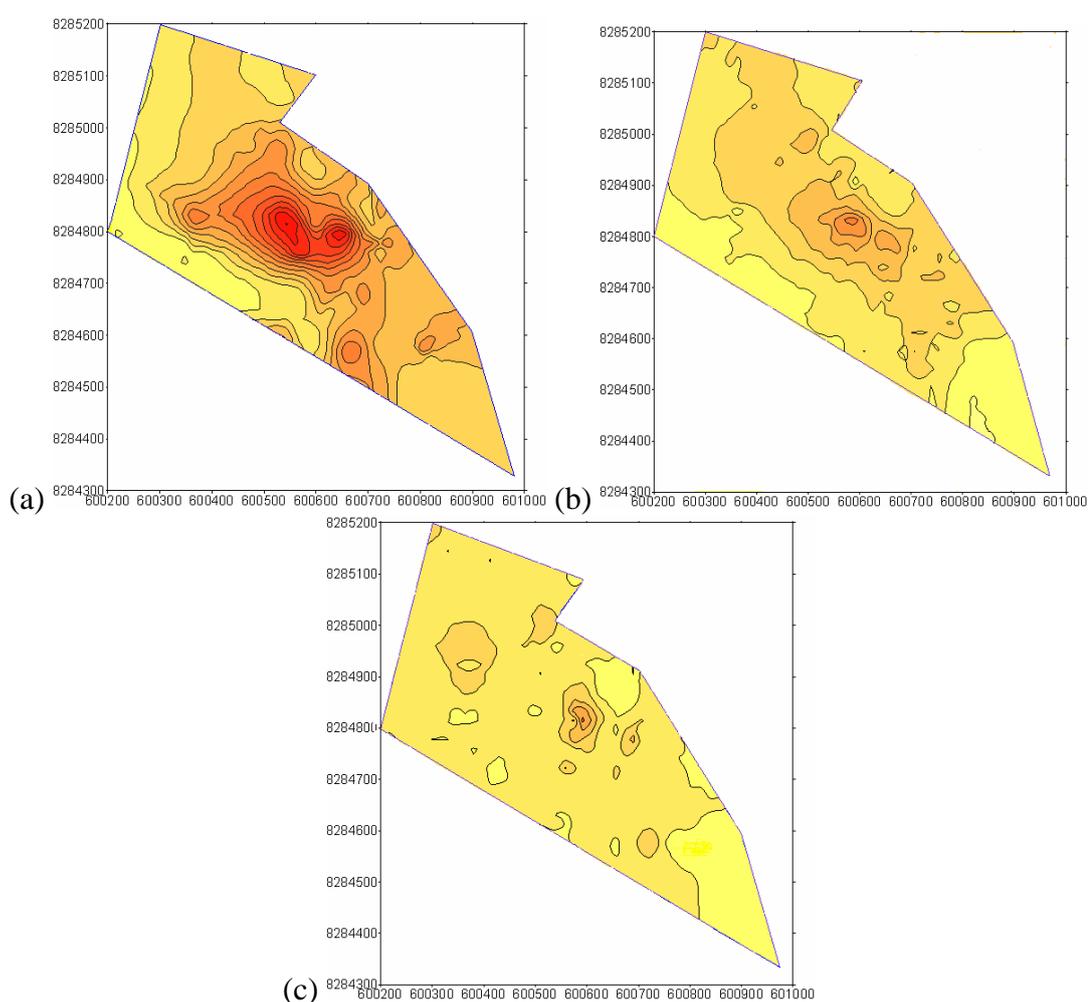


FIGURA 39 – (a) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 7,5 metros, em (b) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 15 metros e em (c) pseudo-seção de condutividade elétrica na profundidade de 30 metros.

O mapa de resistividade aparente realizado por ELIS & MATOS (1995), da Figura 40, mostra igualmente dois focos de contaminação e que a direção de escoamento de contaminantes é, também, de noroeste para sudeste.

No centro da área de resíduos, os valores condutividade elétrica, do presente trabalho, da ordem de 120 mS/m (aproximadamente 8 Ohm.m) são próximos dos valores de resistividade aparente, encontrados por ELIS & MATOS (1995), da ordem de 5 Ohm.m, ou seja, 200 mS/m.

Pode-se dizer que os contaminantes estendem-se pela mesma área de influência, observada há 10 anos por ELIS & MATOS (1995), e mantém a direção de escoamento, de noroeste para sudeste, evoluindo em direção ao córrego Camundongo.

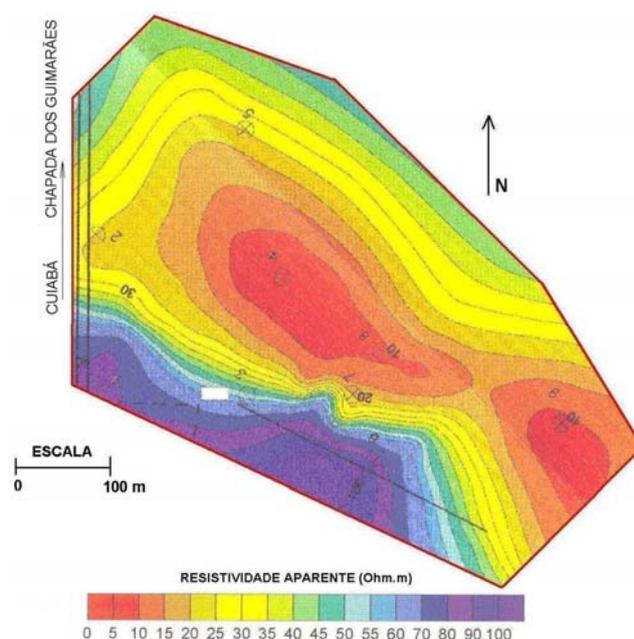


FIGURA 40 – Mapa de resistividade aparente (ELIS & MATOS, 1995).

As interpretações de FARIA (2001) das variáveis físico-químicas, bacteriológicas e os elementos-traço nos pontos mostrados na Figura 43, puderam confirmar a contaminação do córrego Camundongo.

A análise da variável cor, no córrego Camundongo (ponto P4) apresentou 100% de suas amostras acima dos limites da legislação explicada pela acentuada declividade do depósito de resíduos em direção ao córrego, carreando partículas do

solo e de matéria orgânica em decomposição para este. Para os níveis de fósforo, 75% estavam acima dos valores máximos permissíveis. As análises da quantidade de sólidos presentes e da concentração de nitrogênio demonstraram que este córrego apresenta características de esgoto fraco a médio. Os valores de condutividade foram altos, ultrapassando os valores de referência para águas limpas, devido à carga de poluentes orgânicos. O número de coliformes fecais encontrado justifica-se pela presença de animais na área. Os valores dos metais chumbo, cádmio, manganês, ferro e níquel ultrapassaram em 75% os limite estabelecido pela Resolução CONAMA 20/86.

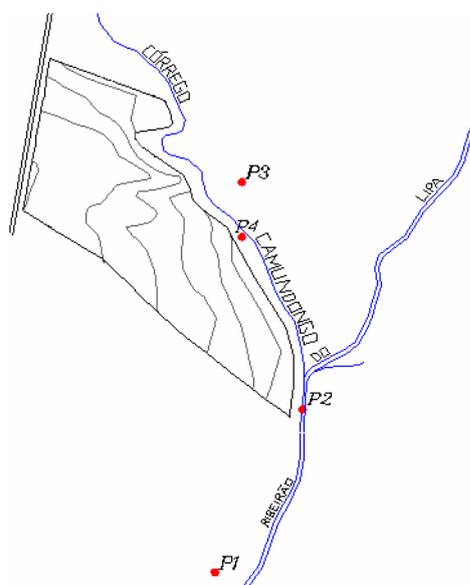


FIGURA 41 – Localização dos pontos de coleta das amostras (FARIA, 2001).

No Ribeirão do Lipa (ponto P2) a variável cor apresentou-se acima do limite da legislação. Os níveis de Fósforo estiveram 50% acima. A concentração de nitrogênio e a quantidade de sólidos presente demonstraram forte contribuição orgânica neste local indicando níveis típicos de esgoto fraco a médio. Os valores da condutividade foram altos devido ao lançamento de esgoto ao longo de todo o seu percurso. O número de coliformes fecais registrados estava acima do limite da legislação. A presença de metais, como cádmio, chumbo, manganês e ferro, nas águas do Ribeirão do Lipa, estavam acima dos limites da Resolução CONAMA 20/86.

No poço tubular P1, os valores de condutividade encontrados foram expressivos, principalmente por tratar-se de água subterrânea. A turbidez também se apresentou elevada, acima dos valores de potabilidade.

No poço caçimba P3 foram encontrados altos valores nas análises de coliformes, que podem explicar os baixos índices de pH encontrados. Os altos valores de turbidez apresentados indicaram transporte de solo juntamente com as águas de chuva para dentro do poço. A cor também estava acima dos limites da Resolução. Os altos valores encontrados para as demais variáveis foram relacionados aos materiais em suspensão presentes na água que se encontrava estagnada.

As características físico-químicas de cor, alcalinidade, condutividade, sólidos (totais, fixos e voláteis), DQO e nitrogênio, apresentadas nos pontos P2 e P4, foram próximas, ou acima, das concentrações dos córregos Barbados, Prainha e do próprio Ribeirão do Lipa na foz com o rio Cuiabá, os quais recebem contribuição orgânica significativa. Comparando estas análises com os limites estabelecidos na Resolução CONAMA 20/86, verifica-se que estas variáveis ultrapassaram os valores estipulados.

Com estas análises foi possível confirmar a contaminação do córrego Camundongo pelo chorume produzido no depósito de resíduos sólidos de Cuiabá estendendo-se em direção ao Ribeirão do Lipa. Os valores encontrados serviram para definir os índices de contaminação nesta área.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A problemática da qualidade da água devido à incorreta disposição de resíduos sólidos provoca impactos ambientais negativos em função do chorume que contamina o lençol freático. Este problema foi observado neste estudo através dos valores de resistividade e de condutividade que são sensíveis à presença dos resíduos.

Com a metodologia utilizada foi possível determinar o nível do lençol freático, delimitar a camada de resíduos e a evolução da contaminação em direção ao córrego Camundongo.

Os baixos valores de resistividade, e conseqüentemente valores altos de condutividade, indicaram a presença de materiais condutores ou chorume, ou ainda, a presença de água ou de outro tipo de material geológico.

Assim sendo, foi possível observar que apesar de auxiliar nas investigações da subsuperfície, os métodos geofísicos apresentaram limitações por se tratar de métodos não-invasivos. Para diminuir estas ambigüidades de interpretação procurou-se usar as informações dos três métodos conjuntamente.

As SEVs forneceram uma importante informação a respeito do perfil vertical do terreno com informações quanto a sua geologia, presença de água e de contaminantes.

As SEV 01, 02, 03 e 12 foram realizadas fora da área de resíduos, enquanto que as SEV 04, 09, 10, 13, 14 e 15 foram realizadas dentro desta área.

Nas SEVs 01, 04, 13 e 14 (Tabela 02) as profundidades do nível d'água e da camada de menor resistividade coincidem. Estas SEVs confirmam a contaminação do lençol freático pelo chorume, exceção feita a SEV 01. Nas SEVs 02, 03, 09, 10, 12 e 15 a zona saturada está acima da camada de menor resistividade, mas se estende até esta. À medida que aumenta a profundidade, ocorre aumento de saturação e de

contaminação do lençol freático por chorume, restrição feita as SEV 02, 03 e 12 que não mostraram sinais aparentes de contaminação.

Os resultados das SEVs mostraram heterogeneidade das camadas do modelo geoeletrico, influenciada pela variedade de materiais aterrados dentro da área de resíduos. Fora da área de resíduos esta heterogeneidade reflete a diferença de textura dos materiais característica da Formação Miguel Sutil (MIGLIORINI, 1999) associados à porosidade e à permeabilidade dos solos.

O mapa potenciométrico da área (Figura 19) mostra que a direção do fluxo subterrâneo do lençol freático é predominantemente de noroeste para sudeste, acompanhando a topografia do terreno em direção ao córrego Camundongo.

Para o caminhamento elétrico a resistividade aparente é baixa no interior da área do depósito aumentando à medida que se caminha para o córrego Camundongo sugerindo possível contaminação em alguns pontos no centro do depósito de resíduos.

O caminhamento eletromagnético indutivo possibilitou determinar as zonas de contaminação e delimitar a área mais afetada pelo escoamento de chorume a partir dos valores de condutividade.

A pseudo-seção de condutividade elétrica (Figura 38) mostra que a quantidade de material contaminado concentra-se mais no centro do depósito de resíduos, sendo maior até 7,5 metros de profundidade. A área de materiais contaminados diminui à medida que aumenta a profundidade. A direção do fluxo de contaminantes é de noroeste para sudeste, em direção ao córrego Camundongo, seguindo a inclinação natural do terreno.

Após 3 anos, os valores de resistividade e de condutividade elétrica apresentados, por SHIRAIWA et al (2001), foram próximos dos encontrados neste trabalho, indicando que o processo de degradação continua ativo.

Comparando-se as pseudo-seções de condutividade elétrica (Figura 38), deste trabalho, com o mapa de resistividade aparente (Figura 40), realizado há 10 anos por ELIS & MATOS (1995), observa-se que a área de influência da contaminação sofre pouca variação e que a direção de escoamento é de noroeste para sudeste, evoluindo em direção ao córrego Camundongo.

Desta forma, este estudo contribui para orientar o manejo da área de depósito de resíduos que futuramente pode ser utilizada para realização de ensaios intrusivos de caracterização geoambiental.

Além disso, com as análises físico-químicas, bacteriológicas e de elementos-traço, realizadas por FARIA (2001), comprovou-se que o chorume está contaminando as águas superficiais (pontos P2 e P4) e subterrâneas (poços P1 e P3), localizadas na área do entorno do depósito de resíduos sólidos de Cuiabá (Figura 41).

Comparando o presente estudo com os levantamentos realizados por MATOS (1994) e SHIRAIWA et al (2001) observa-se que a contaminação evolui do depósito de resíduos sólidos em direção ao córrego Camundongo, de noroeste para sudeste. As interpretações de FARIA (2001), reforçaram esta observação ao confirmar a contaminação do córrego Camundongo pelo chorume, mostrando que esta contaminação se estende em direção ao Ribeirão do Lipa.

Esta situação é preocupante, porquanto existe um ponto de captação de água para abastecimento público, de Cuiabá e de Várzea Grande, nas proximidades do Ribeirão do Lipa.

Com as informações de que a sub-bacia do Ribeirão do Lipa está sendo contaminada, torna-se importante orientar um estudo de qualidade da água em todos os trechos da Bacia Hidrográfica do rio Cuiabá, devido a sua importância na formação da biodiversidade ecológica do Pantanal Mato-grossense e de sua área de drenagem atender ao abastecimento de água da população. Este estudo da qualidade das águas irá servir para monitorar a Bacia e definir indicadores da saúde ambiental.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes**. Mississauga: Sensors & Software, Inc., 1992. 130 p. (Internal Report). Available: <http://www.senssoft.on.ca>.

AQUINO, W.F. & BOTELHO, M.A.B. Método Eletromagnético Indutivo e GPR Aplicados à Detecção de Contaminação do Solo e Água Subterrânea por Resíduos Industriais. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 267-270.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **Resíduos sólidos– Classificação: NBR 10004**. São Paulo, 1987. 63 p.

BAGANHA, C.A. **Detecção e Monitoramento da Contaminação Ambiental Hidrogeológica na Área de Influência do Aterro Sanitário do Parque Santa Bárbara Município de Campinas – SP**. 1997. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo. Rio Claro – SP, 1997.

BENSON, R.C. & YUHR, L. **Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration**. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 1982. 236p.

BOBACHEV, A. A.; MODIN, I. N.; SHEVNIN, V. A., 1990-2001. **IPI2win**. Moscou, Moscou State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. [www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec\\_labe.htm](http://www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec_labe.htm). Acessado em 19/06/2003.

BOIAN, C. **Aplicação Geofísica a Estudos Ambientais em Sedimentos do Grupo Bauru: Aterro Sanitário de São José do Rio Preto (SP)**. 1995. 173 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo. Rio Claro – SP, 1995.

BORGES, W.R. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, Utilizando-se GPR e Eletroressistividade**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geociências) – IAG, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2002.

BORGES, W.R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo Sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2005. Tese de Doutorado (Departamento de Geofísica), IAG/USP, São Paulo, SP, 2005, (no prelo).

BRAGA, A.C.O. **Métodos Geoelétricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro - SP**. 1997. 169 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 1997.

BRAGA, A.C.O. **Métodos Geoelétricos Aplicados: Ilustrações**. Departamento de Geologia Aplicada, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório de Geomatématica, Apresentação no Power Point, 61 slides. 2002. <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/>>. Acesso em 31/05/2004.

BRAGA, A.C.O., MALAGUTTI FILHO, W., DOURADO, J.C. & ELIS, V.R. **Métodos Geoelétricos Aplicados no Estudo do Lençol Freático em Área de Disposição de Resíduos Industriais**. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

BRASIL. Resolução nº 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986. Estabelece uma nova classificação para as águas doces, bem como para as águas salobras e salinas do Território Nacional.

BRATUS, A. & YABAR, D. N. Characterization of Three Different Waste Disposals Using Resistivity and IP Methods. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 216-219.

BUSELLI, G., BARBER, C., DAVIS, G.B. & SALAMA, R.B. Detection of Groundwater Contamination Near Waste Disposal Sites with Transient Electromagnetic and Electrical Methods. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Vol. 2. : Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 27-39.

CARPENTER, P.J., KAUFMANN, R.S. & PRICE, B. **The Use of Resistivity Soundings to Determine Landfill Structure**. Ground Water 28, 1990. p. 569-575.

CARPENTER, P.J., CALKIN, S.F. & KAUFMANN, R.S. **Assessing a Fractured Landfill Cover Using Electrical Resistivity and Seismic Refraction Techniques**. Geophysics, 56 (11), 1991. p. 1896-1904.

CASTILHO JUNIOR, A. B. Estudo da previsão dos volumes de líquidos percolados gerados em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 16.,1991. **Anais**. Goiânia: ABES, 1991. v.3, p. 113-124.

CAVALCANTI, S.S., LIMA, O.A.L. & SATO, H.K. Hidrologia Subterrânea da Área de um Aterro Sanitário Utilizando Geofísica Elétrica. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

CAVALCANTI, S.S., SATO, H.K. & LIMA, O.A.L. Geofísica Elétrica na Caracterização da Hidrologia Subterrânea na Região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v. 19, nº 2, mai/ago 2001. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em 02 ago. 2004.

COLLINS, A.G. & JOHNSONS, A.I. **Ground Water Contamination – Field Methods**. ASTM, Baltimore, 1988. 491 p.

COSTA, A.F.U & FERLIN, C.A. Aplicação Prática de Métodos Elétricos na Detecção e Monitoramento da Contaminação de Águas Subterrâneas. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 3, 1993, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf. p. 1210-1212.

DOURADO, J.C., MALAGUTTI FILHO, W., BRAGA, A.C. de O. & LOURENÇO JÚNIOR, J.C.R. Utilização integrada de métodos elétricos e do GPR na análise ambiental do Aterro Sanitário de Jundiaí – SP. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 285-288.

DUKE, S. **Calibration of Ground Penetrating Radar and Calculation of Attenuation and Dielectric Permittivity Versus Depth**. 1990. 236 p. M. Sc. Thesis – Colorado School of Mines, 1990.

ELIS, V.R. **A Aplicação de Geofísica para Análise do Meio Físico. Importância para Elaboração de Mapeamento Geotécnico**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 1993.

ELIS, V.R. **Avaliação da Aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospecção Geofísica no Estudo de Áreas Utilizadas para Disposição de Resíduos**. 1998.

177f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 1998.

ELIS, V.R. & MATOS, M.R, de, Mapa de resistividade aparente na área de depósito de resíduos sólidos a céu aberto de Cuiabá – MT. 1995 (mapa não publicado, cedido pelo autor).

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Caminhamento Elétrico Dipolo-Dipolo – Uma Técnica Eficiente na Investigação de Depósitos de Resíduos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, 1996, Rio de Janeiro – RJ. **Anais.** Rio de Janeiro: CBGE. p. 39-48.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto – SP através de métodos elétricos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 5, 1997, São Paulo – SP – Brasil. **Anais.** São Paulo: SBGf. p. 417-420.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Utilização de Caminhamento Elétrico em Áreas de Disposição de Resíduos – Relações entre Dimensões do Empreendimento e Qualidade dos Resultados. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais.** Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

ELLERT, N., ROSS, S., MENDES, J.M.B. & MARTIN, E. Mapeamento Geofísico do Lixão de São Carlos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, 1990, Porto Alegre – RS. **Anais.** Porto Alegre: CBAS. p. 82-88.

FARIA, A.F.B. de, **Poluição Ambiental Decorrente Da Disposição Inadequada De Resíduos Sólidos Urbanos No Solo - Estudo De Caso: Lixão De Cuiabá.** 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) – Instituto de Saúde Coletiva, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2001.

FERREIRA, J.C.V. **Mato Grosso e seus municípios**. Cuiabá: Secretária de Estado de Cultura, 1997.

FRANCO, H.A. & PIRES, A.C.B. Estudo Geofísico e Geoquímico da Contaminação de Água por Aterro Sanitário. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 4, 1995, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 1995. p. 925-928.

GALLAS, J.D.F., MALAGUTTI FILHO, W., PRADO, R.L. & TAIOLI, F. Lixão do Alvarenga – Mapeamento da Pluma de Contaminação pelos Métodos Geoelétricos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003.

GÓIS, J.R., PINHEIRO JÚNIOR, V. & RIGOTTI, A. Mapeamento Geoelétrico do Aterro da Lamenha Pequena. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 5, 1997, São Paulo – SP – Brasil. **Anais**. São Paulo: SBGf. p. 1216-1219.

GOLDEN SOFTWARE, INC. **SURFER version 5.01**. Surface Mapping System Copyright ©, Colorado. 1993-1994.

GRANT, F.S. & WEST, G.F. **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. New York: McGraw-Hill, 1965.

GREENHOUSE, J. & SLAINE, D.D. **The Use of Reconnaissance Electromagnetic Methods to Map Contaminant Migration**. Ground Water Monitoring Review, 3(2), 1983. p. 47-59.

HAMADA, J. Estimativa de Geração e Caracterização do Chorume em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Brasil – Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: ABES, 1997, 9 p.

HAMADA, J., GIACHETI, H.L., ELIS, V.R. & IWAI, C.K. Análise Crítica dos Sistemas de Monitoramento de Efluentes Líquidos de Aterros para Resíduos Sólidos. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28, 2002, Cancún – México. **Resumo**. Cancún: AIDIS, 2002. 6 p.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Anuários Estatísticos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1991-1992.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal**: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. São Paulo, 2000. 2.ed. 181 p.

KELLY, W.E. **Geoelectric Sounding for Delineating Groundwater Contamination**. 1976. Ground Water 14 (1), p. 6-10.

KLEFSTAD, G., SANDLEIN, L.V.A. & PALMQUIST, R.C. **Limitation of the Electric Resistivity Methods in Landfill Investigations**. Ground Water 13 (5), 1975. p. 418-427.

LAGO, A.L., SILVA, E.M.A., ELIS, V.R. & GIACHETI, H.L. Aplicação de Eletrorresistividade e Polarização Induzida em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Resumo**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 6 p.

LANDIM, P.M.B. & STURARO, J.R. Krigagem Indicativa Aplicada à Elaboração de Mapas Probabilísticos de Riscos. Departamento de Geologia Aplicada, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório de Geomatématica, Texto Didático 06, 20 p. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em 02/12/2004.

LUIZ, J.G., MORALES, G.P., ALVES, J.G. das V. & LOPES, E. Apparent Resistivity Measurements in Complexo do Aurá Landfill, Ananindeua – Pará –

Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Resumo**. Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

MALAGUTTI FILHO, W. **Utilização de Técnicas Geofísicas na Caracterização de Solos e Rochas com Aplicações na Geologia de Planejamento Urbano**. 1991. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 1991.

MALAGUTTI FILHO, W., JOSÉ, C., BRAGA, A.C.O., ELIS, V.R., TANDEL, R.Y. & PORSANI, J.L. Aplicação Integrada de Técnicas Geofísicas no Aterro Sanitário de Rio Claro – SP – Resultados Preliminares. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 5, 1997, São Paulo – SP – Brasil. **Anais**. São Paulo: SBGf. p. 422-424.

MALAGUTTI FILHO, W. & MOURA, H.P. Emprego de Métodos Geofísicos na Caracterização Geoambiental do Aterro Controlado de Piracicaba/SP. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

MATOS, M.R. de, **Estudos da Contaminação de Água Subterrânea pelos Resíduos do Lixão de Cuiabá – MT**. 1994. 38 f. Monografia (Especialização em Geofísica) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT, 1994.

MENDES, J.M.B. **Técnicas Geofísicas Aplicadas no Mapeamento e Monitoramento de Poluição e Contaminação de Águas Subterrâneas**. 1987. 195 f. Tese (Doutorado em Geociências – Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1987.

MIGLIORINI, R.B., RUIZ, A.S. & SANTOS, A.A. Caracterização dos Sistemas de Diáclases e dos Veios de Quartzo no Grupo Cuiabá. Regiões de Cuiabá e Várzea Grande - MT. In: Encontro de Iniciação Científica, 6, 1998, Cuiabá – MT. **Anais**. Cuiabá: UFMT, 1998. p. 77.

MIGLIORINI, R.B. **Hidrogeologia em Meio Urbano. Região de Cuiabá e Várzea Grande – MT**. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1999.

MONTEIRO, A.C. & COSTA, R.G. da S. Levantamento Geofísico no Depósito de Lixo de Bangu na Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 263-266.

MORALES, G.P., LUIZ, J.G., MENDES, R.L.R. & BARRADAS, J.A. Delimitação da Pluma de Contaminação dos Resíduos Sólidos do Lixão do Aurá (Ananindeua – PA) por Imageamento Elétrico. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 232-235.

MOSCOW STATE UNIVERSITY. **IPI2Win version 2.3.b**. Resistivity Sounding Interpretation, M.S.U./Rússia. 1990-2001.

MOURA, H.P. & MALAGUTTI FILHO, W. Aplicação Integrada de Métodos Geométricos no Aterro Controlado de Rio Claro/SP. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6, 1999, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

MOURA, H.P., MALAGUTTI FILHO, W. & BRAGA, A.C. de O. Modelagem de Pseudo-Seções de Resistividade e Polarizabilidade Aparentes – Estudo em uma Área de Disposição de Resíduos Urbanos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE

BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais.** Salvador: SBGf, 2001. p. 271-273.

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

OLHOEFT, G.R. Application and Limitations of Ground Penetrating Radar. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING AND EXPOSITION OF SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 54, 1984, Atlanta – EUA. **Expanded Abstracts.** Atlanta: SEG, 1984. p. 147-148.

PEREIRA NETO, J. T. & STENTIFORD, E. I. Aspectos epidemiológicos na compostagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 16.,1991. **Anais.** Goiânia: ABES, 1991. v.3, p. 38-53.

PEÑIDO MONTEIRO, J.H. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: Comentários sobre os resultados apresentados no tema de Limpeza Urbana.** PNSB – 2000. J. H. Peñido Monteiro, abril, 2000.

REYNOLDS, J.M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** 1.ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1997. 795 p.

ROY, A. & APPARAO, A. **Depth of investigation in direct current methods.** *Geophysics*, vol.36(5), 1971. p. 943-959.

SAFFORD, T. G. **Projeto Marca D'água – A Bacia do Rio Cuiabá-MT.** 2001. Disponível em: <http://www.marcadagua.com.br/baciacuiaba.htm>. Acesso em 07 mar. 2005.

SHIRAIWA, S., LISOVSKY, S.P., ELIS, V.R., PORSANI, J.L. & BORGES, W.R. Estudos Geofísicos Integrados no Lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 244-247.

SILVA, J.E., LOUREIRO, E.M.L., ELIS, V.R., HODO, F.Y. & PORSANI, J.L. Aplicação de Ensaio Elétricos e Eletromagnéticos em Problema de Poluição Ambiental. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7, 2001, Salvador – BA – Brasil. **Anais**. Salvador: SBGf, 2001. p. 208-210.

SISINO, C. L. S. **Estudo preliminar da contaminação ambiental em área de influência do aterro controlado do Morro do céu**. 1995. Dissertação (Mestrado) – Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1995.

STEVANATO, R., FERREIRA, F.J.F., PEGORARO, M. & TAVARES, F.S. Imageamento Elétrico 2-D e Polarização Induzida na Detecção de Pluma de Contaminação no Aterro Sanitário de Itajaí-SC. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, 2003, Rio de Janeiro – RJ – Brasil. **Anais**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003.

TEIXEIRA, E.N. Análise crítica das normas de resíduos sólidos. **Revista Saneamento Ambiental**, São Paulo, n. 16, p. 28-30, out./nov. 1991.

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

URISH, D.W. **The Practical Applications of Surface Electrical Resistivity to Detection of Groundwater Pollution**. *Ground Water* 21 (2), 1983. p. 144-152.