

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

**ESTUDOS GEOFÍSICOS NO ATERRO SANITÁRIO DE
CUIABÁ, MT**

ANDREZA THIESEN LAUREANO

ORIENTADOR: PROF. DR. SHOZO SHIRAIWA

Cuiabá-MT, março de 2007.

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

**ESTUDOS GEOFÍSICOS NO ATERRO SANITÁRIO DE
CUIABÁ, MT**

ANDREZA THIESEN LAUREANO

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 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

L378e Laureano, Andreza Thiesen
Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá, MT /
Andreza Thiesen Laureano. – 2007.
x, 149p. : il. ; color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra,
2007.

“Orientação Prof. Dr. Shozo Shiraiwa”

CDU – 550.3:628.191:628.4

Índice para Catálogo Sistemático

1. Geofísica
2. Água subterrânea – Contaminação por lixo – Cuiabá
3. Depósito de lixo – Contaminação – Lençol freático – Cuiabá

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Shozo Shiraiwa, pela orientação e apoio durante o curso de mestrado, servindo como exemplo de dedicação às profissões de professor e pesquisador.

Ao meu esposo, Fred, pela motivação e carinho durante toda a jornada. As idas e vindas valeram a pena.

Aos meus pais e irmã, Salésio, Zélia e Anny, pelo apoio recebido mesmo à distância. E, principalmente, pelo incentivo durante toda a vida, sem o qual não sei se teria chegado até aqui.

À minha sogra Adelinde, minha cunhada Camila e tias Leda e Leusa pelo suporte e carinho durante a minha jornada em Cuiabá.

Ao Professor Dr. José Nogueira, mais conhecido como Paraná, pelo apoio e convivência durante o curso.

Ao Professor Dr. Campelo, pela tentativa de transformar os mestrandos em pesquisadores com iniciativa.

Aos colegas de turma, pela convivência e amizade ao longo do curso.

Ao Professor Dr. Alteredo, pela atenção e pelos ensinamentos em campo.

Ao técnico Alexandrino (Big) pela disposição e ajuda na coleta de dados em campo, mesmo debaixo do sol de mais de 40°C.

Aos alunos do 4º ano (2005) do curso de Geologia da UFMT, pela ajuda na coleta de dados em campo.

À FAPEMAT, pelo apoio financeiro ao projeto “ESTUDOS GEOFÍSICOS NO ATERRO SANITÁRIO DE CUIABÁ”.

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida durante mais de um ano.

À Prefeitura Municipal de Cuiabá, por permitir a realização dos estudos na área do aterro.

Ao engenheiro sanitarista Frederico, pelo apoio dado à pesquisa no aterro sanitário.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS	VI
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E MEIO AMBIENTE	4
2.2 FORMAÇÃO DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO	10
2.2.1 O solo e suas interações com os contaminantes.....	11
2.2.2 Mecanismos de transporte e retenção de contaminantes no solo.....	14
2.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPREGADOS NA INVESTIGAÇÃO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO	19
2.4 TRABALHOS NA ÁREA AMBIENTAL EMPREGANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	21
3 ÁREA DE ESTUDO	43
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.1.1 Localização da Área.....	43
3.1.2 Geologia da área.....	46
3.2 CARACTERÍSTICAS DO ATERRO SANITÁRIO	53
3.2.1 Sistema de tratamento	57
4 MATERIAL E MÉTODOS	59
4.1 PLANEJAMENTO DE CAMPO.....	59
4.2 MÉTODOS GEOFÍSICOS	61
4.2.1 Métodos Eletromagnéticos.....	61
4.2.1.1 Método Eletromagnético Indutivo (EMI)	65
4.2.1.2 Radar de penetração no solo (GPR).....	70
4.2.2 Método da Eletrorresistividade	74
4.2.2.1 Caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo	77
4.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS	80
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5.1 CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO.....	83
5.2 ELETORRESISTIVIDADE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO ARRANJO DIPLO-DIPLO	120
5.3 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)	124
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	131
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Proporção de domicílios particulares permanentes, por destino do lixo não coletado, segundo as Grandes Regiões – 2000 (Fonte: IBGE, 2006)	9
FIGURA 2 - Distribuição das águas da chuva sobre a superfície de um resíduo depositado a céu aberto (SOARES et al, 2005)	10
FIGURA 3 – Formação da pluma de contaminação sob depósito de resíduos (adaptado de SOARES et al, 2005).....	11
FIGURA 4 – Ocorrências de águas subterrâneas (SOARES et al, 2005).....	14
FIGURA 5 - Aspectos da dispersão longitudinal (SOARES et al, 2005).....	16
FIGURA 6 - Aspectos da dispersão transversal (SOARES et al, 2005).....	17
FIGURA 7 – Localização do aterro sanitário em relação à cidade de Cuiabá (adaptado de GOOGLE, 2006)	44
FIGURA 8 – Área do aterro sanitário de Cuiabá (adaptado de GOOGLE, 2006).....	45
FIGURA 9 – Perfil geológico transversal do aterro sanitário de Cuiabá (FERNANDES et al, 2006).....	46
FIGURA 10 – Geologia do Garimpo do Mineiro (adaptado de SILVA, 1999)	47
FIGURA 11 – Localização das trincheiras onde o solo foi caracterizado	48
FIGURA 12 – Perfil da Trincheira T1 (VILELA et al, 2006)	49
FIGURA 13 – Perfil da Trincheira T2 (VILELA et al, 2006)	50
FIGURA 14 – Perfil da Trincheira T3 (VILELA et al, 2006)	51
FIGURA 15 – Perfil da Trincheira T4 (VILELA et al, 2006)	52
FIGURA 16 - Fluxo dos resíduos na central de disposição final de resíduos sólidos urbanos da cidade de Cuiabá/MT (CAPOROSSI, 2002).....	54
FIGURA 17 – Fluxograma do sistema de tratamento de chorume.....	57
FIGURA 18 – Localização dos ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá.....	59
FIGURA 19 – Propagação da onda eletromagnética (adaptado de REYNOLDS, 1997)	61
FIGURA 20 – Movimentação de cargas associada à corrente de condução (adaptado de ANNAN, 1992)	63
FIGURA 21 – Movimentação de cargas associada à corrente de deslocamento (adaptado de ANNAN, 1992)	64
FIGURA 22 – Esquema geral do método EM (adaptado de REYNOLDS, 1997)....	67
FIGURA 23 - Configurações convencionais de bobinas utilizadas no método de dupla bobina. (a) Bobinas horizontais, com dipolo magnético vertical. (b) Bobinas verticais, com o dipolo magnético horizontal (BORGES, 2004).....	68
FIGURA 24 - Configuração esquemática do equipamento EM34, nos modos dipolo magnético horizontal e vertical, os respectivos espaçamentos entre as bobinas, frequência de operação e profundidade teórica de investigação (BORGES, 2004) ..	69
FIGURA 25 – Diagrama de um par de antenas bi estática (BORGES, 2002).....	72
FIGURA 26 – Orientação das antenas.....	74
FIGURA 27 - Principais arranjos eletrolíticos e seus fatores geométricos (BORGES, 2004)	76
FIGURA 28 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (BRAGA, 1999)	78
FIGURA 29 - Sistema de plotagem do arranjo dipolo-dipolo no CE, e equação para cálculo da profundidade teórica (Adaptado de BRAGA, 1999)	79

FIGURA 30 - Distribuição de pontos investigados em uma pseudo-seção através do arranjo dipolo-dipolo (BORGES, 2004)	79
FIGURA 31 – Localização dos ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá.....	81
FIGURA 32 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 1 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	84
FIGURA 33 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 2 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	85
FIGURA 34 – Localização da linha 2 – entre as lagoas facultativas.....	86
FIGURA 35 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 3 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	87
FIGURA 36 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 4 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	88
FIGURA 37 – Interpretação da linha 4 – avanço da pluma contaminante proveniente das lagoas	89
FIGURA 38 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 5 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	90
FIGURA 39 – Fuga lateral de chorume na parte impermeabilizada do aterro - 21/12/2005	91
FIGURA 40 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 6 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	92
FIGURA 41 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 7 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	93
FIGURA 42 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 8 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	94
FIGURA 43 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 9; cabo de 10 m - 21/12/2005; cabos de 20 e 40 m – 15/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente.....	95
FIGURA 44 – Fraturas preenchidas por quartzo no trecho inicial da linha 9.....	96
FIGURA 45 – Perfil de caminhamento eletromagnético sobre a célula de lixo sem impermeabilização - 19/12/2005.....	97
FIGURA 46 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 10 - 21/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	99
FIGURA 47 – Linha 10 e o córrego de chorume efluente das lagoas - 21/12/2005	100
FIGURA 48 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 11 - 17/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	101
FIGURA 49 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 12 - 17/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	102

FIGURA 50 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 13 - 25/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	103
FIGURA 51 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 14 - 26/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	104
FIGURA 52 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 15 - 26/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	105
FIGURA 53 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 16 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	106
FIGURA 54 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 17 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	107
FIGURA 55 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 18 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	108
FIGURA 56 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 19 - 19/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	109
FIGURA 57 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 20 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	110
FIGURA 58 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 21 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	111
FIGURA 59 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 22 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	112
FIGURA 60 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 23 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	113
FIGURA 61 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 24 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	114
FIGURA 62 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 25 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente	115
FIGURA 63 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 15 m	116
FIGURA 64 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 30 m	117
FIGURA 65 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 60 m	118
FIGURA 66 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidades teóricas de 15, 30 e 60 m.....	119
FIGURA 67 – Localização das linhas 2 e 9	121

FIGURA 68 – Perfil de caminhamento elétrico da linha 2 - 15/03/2006 (a) resistividade elétrica em função da distância (b) pseudo-seção de resistividade elétrica.....	122
FIGURA 69 – Perfil de caminhamento elétrico da linha 9 - 14/03/2006 (a) resistividade elétrica em função da distância (b) pseudo-seção de resistividade elétrica.....	123
FIGURA 70 – Espectro de frequências da linha 2.....	124
FIGURA 71 – Espectros de frequências da linha 9 (a) 0 a 180 m (b) 180 a 360 m (c) 400 a 580 m.....	125
FIGURA 72 – Perfil de GPR da linha 2 - antena 50 MHz.....	127
FIGURA 73 – Linha 2 e os refletores que aparecem no perfil GPR.....	128
FIGURA 74 – Perfil de GPR da linha 9 - antena 50 MHz.....	129
FIGURA 75 – Paredão do Garimpo do Mineiro.....	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Ramos da geofísica ambiental, seus tópicos e as abordagens multidisciplinares preferenciais para solucionar os problemas (adaptado de MEJU, 2001)	34
TABELA 2 - Relação entre a profundidade investigada e a separação entre as bobinas, referente ao EM-34 da GEONICS Ltd.	69
TABELA 3 – Constante dielétrica e condutividade de alguns materiais (PORSANI, 1999)	71
TABELA 4 - Resistividade elétrica de alguns materiais geológicos (REYNOLDS, 1997)	77
TABELA 5 – Materiais geológicos e seus valores de condutividade elétrica PORSANI (1999)	82
TABELA 6 – Classificação adotada para faixas de condutividade e resistividade elétrica	83
TABELA 7 – Frequências limite utilizadas na filtragem dos sinais do GPR em cada perfil adquirido em campo	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	caminhamento elétrico
CMP	<i>Common Mid Point</i>
DMH	dipolo magnético horizontal
DMV	dipolo magnético vertical
DQO	demanda química de oxigênio
EMI	caminhamento eletromagnético indutivo
FEMA	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Mato Grosso
GPR	<i>ground penetration radar</i> - radar de penetração no solo
GPS	<i>global positioning system</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PEAD	polietileno de alta densidade
RSS	resíduos de serviços de saúde
RSU	resíduos sólidos urbanos
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SMSU	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos de Cuiabá
TAC	Termo de Ajuste de Conduta
VLF	<i>Very Low Frequency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

2-D	duas dimensões
3 R's	reduzir, reciclar e reutilizar
$\partial D/\partial t$	corrente de deslocamento
B	campo de indução magnética
Ba	bário
D	corrente de deslocamento
d	“depth” – profundidade
ΔV	diferença de potencial
E	campo elétrico
ϵ	permissividade dielétrica
ϵ_0	permissividade dielétrica do espaço livre
ϵ_r	permissividade dielétrica relativa
ϵ_r'	constante dielétrica
f	frequência
F.m ⁻¹	Faraday por metro
GHz	gigahertz
H	campo magnético
h	distância
ha	hectare
H _p	campo magnético primário
H _s	campo magnético secundário
I	corrente elétrica
J	corrente de condução
K	fator geométrico
K _d	coeficiente de distribuição linear
Kg.h ⁻¹	quilograma por hora
KHz	quilohertz
Km ²	quilômetros quadrados
m	metros

μ	permeabilidade magnética
m.ano ⁻¹	metro por ano
m ³	metro cúbico
m ³ .dia ⁻¹	metro cúbico por dia
mg.L ⁻¹	miligramas por litro
MHz	megahertz
Mn	manganês
mS.m ⁻¹	miliSiemens por metro
n	nível de investigação
NH ₄ ⁺	amônio
Ni	níquel
ns	nanosegundo
°C	graus Celsius
Pb	chumbo
pH	potencial hidrogeniônico
ppt	partes por mil
ρ	resistividade elétrica
R	distância entre os centros dos dipolos AB e MN
Rx	bobina receptora
s	espaçamento entre as bobinas
σ	condutividade elétrica
σ_a	condutividade elétrica aparente
t	tempo duplo
Tx	bobina transmissora
v	velocidade da onda
Ω .m	Ohm vezes metro
Zn	zinco
Z _T , Z	profundidade teórica de investigação

RESUMO

LAUREANO, A.T. *Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá, MT*. Cuiabá, 2007. 149p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

A presente pesquisa foi realizada na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT), que pertence à bacia hidrográfica do rio Cuiabá. Existe uma preocupação em relação à contaminação por chorume proveniente do lixo, pois as lagoas de tratamento de chorume e a primeira célula de disposição de lixo não foram impermeabilizadas. A pesquisa teve como principal objetivo determinar a extensão e a profundidade da pluma de contaminação, através da aplicação integrada dos métodos geofísicos de Caminhamento Eletromagnético Indutivo (EMI), Caminhamento Elétrico (CE) e Radar de Penetração do Solo (GPR). Foram realizados vinte e cinco ensaios de EMI, utilizando os cabos de 10, 20 e 40 m; dois ensaios de CE, em dois níveis de investigação; e dois perfis de GPR, com antena de 50 MHz. Os resultados mostraram fortes indícios de que o subsolo encontrava-se contaminado em boa parte da área, principalmente na região das lagoas de tratamento de chorume e nas laterais sul e norte do aterro. Foram detectadas evidências de contaminação em profundidades maiores que 60 m, porém a zona mais atingida pela poluição situou-se na faixa dos 30 m de profundidade. Nos locais onde a deposição de lixo era mais recente, os sinais de contaminação foram mais acentuados, mesmo havendo impermeabilização de base. Ou seja, a impermeabilização pode não estar sendo eficiente, permitindo que o chorume percole para o subsolo. Porém a pluma ainda não avançou para o lado norte, provavelmente devido à baixa condutividade hidráulica do filito. Mas a porção ao sul do aterro é mais preocupante, pois nesta região há presença de materiais geológicos permeáveis (metarenito e fraturas preenchidas por quartzo), os quais podem facilitar a expansão da pluma contaminante.

PALAVRAS-CHAVE: geofísica, lixo, chorume, pluma de contaminação.

ABSTRACT

LAUREANO, A.T. *Geophysics studies in Cuiabá landfill*. Cuiabá, 2007. 149p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

The present research was made in the area of the landfill of the Cuiabá city, that it belongs to the hydrographic basin of the Cuiabá River. There is a preoccupation in relation to the contamination for leachate, therefore the lagoons of treatment of leachate and the first cell of waste disposal had not been waterproofed. The research had as main objective to determine the extension and the depth of the contamination plume, through of the integrated application of the geophysical methods of inductive electromagnetic survey (EMI), electrical survey (CE) and Ground Penetration Radar (GPR). Twenty five assays of EMI method had been made using the cables of 10, 20 and 40 m; two assays of CE method, in two levels of inquiry; e two profiles of GPR, with antenna of 50 MHz. The results had shown to forts indications of that the subsoil was contaminated in great part of the area, mainly in the region of the leachate treatment lagoons and in the laterals south and north of the landfill. Contamination evidences in depths greatest that 60 m had been detected, however the zone more reached by the pollution was placed in the band of the 30 m depth. In the places where the waste deposition was more recent, the contamination signals had been more accented, even having base waterproofing. Therefore the waterproofing can not be being efficient, allowing that the leachate infiltrate for the subsoil. However the plume still not advances for the side north, probably by account of the low hydraulical conductivity of the filite. But the portion to the south of the landfill it is more preoccupying, because in this region it has presence of porous geologic materials (metasandstone and breakings filled for quartz), which can facilitate the expansion of the contamination plume.

KEYWORDS: geophysics, waste, leachate, contamination plume.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a geofísica aplicada tem sido usada na área ambiental, principalmente na investigação de plumas de contaminação. Muitos estudos têm sido realizados em áreas de deposição de resíduos sólidos, onde há suspeita de contaminação provocada pelo líquido que percola do lixo, o chorume.

A partir de 1997, a disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade de Cuiabá passou a ser realizada no aterro sanitário do município, localizado entre a Rodovia Manoel Pinheiro e o Bairro do CPA, próximo à Lagoa Bonita. Portanto o referido aterro situa-se na bacia do rio Cuiabá, principal manancial de água de diversos municípios como Cuiabá e Várzea Grande. Ocorrendo contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos por chorume, são gerados impactos negativos sobre o ambiente e a saúde da população residente na bacia.

O projeto inicial do aterro não previa a impermeabilização de base, tendo em vista que toda a matéria orgânica seria encaminhada à compostagem. No entanto não foi o que ocorreu e, devido a isso, a partir da segunda célula de deposição de resíduos, começou-se a impermeabilizar a base.

Porém a primeira célula e as lagoas de tratamento de chorume nunca foram impermeabilizadas, sendo fontes potenciais de contaminação do subsolo. Além disso, pode-se visualizar, principalmente nos períodos chuvosos, a contaminação dos cursos d'água superficiais, através do escoamento superficial do chorume tratado nas lagoas de estabilização e do chorume não tratado que esco diretamente das células, pelas laterais.

Na região da Baixada Cuiabana, a camada de solo é em geral pouco espessa e logo se encontram rochas do Grupo Cuiabá. Na área de estudo, particularmente, se encontra a Formação Miguel Sutil. 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 apresentam-se fissuradas o que torna o aquífero mais vulnerável à contaminação por poluentes, como foi verificado no estudo de SANTOS (2005). O mesmo foi realizado no antigo lixão de Cuiabá, que recebeu os RSU de Cuiabá até 1997, evidenciando uma penetração de chorume até profundidades maiores que 30 m.

Para estudar a área do aterro, foram realizadas quatro campanhas de campo, em dezembro de 2005, e março, abril e agosto de 2006, utilizando os métodos geofísicos não invasivos de caminhamento eletromagnético indutivo, de eletrorresistividade (caminhamento elétrico) e de radar de penetração no solo (GPR), também conhecido como georradar.

De acordo com CAVALCANTI et al (2001) e SHIRAIWA et al (2002) estes métodos são eficientes na localização e monitoramento da contaminação das águas subterrâneas, sobretudo considerando-se a rapidez e o baixo custo com que são obtidas as informações. PORSANI (1999) recomenda o uso do GPR na localização de plumas de contaminação. ELIS (1998) afirma que método de eletrorresistividade, em relação aos métodos do potencial espontâneo e da polarização induzida, mostrou-se a melhor ferramenta para aplicação nesse campo de estudo.

CAPOROSSI (2002) estudou, em sua dissertação de mestrado, o sistema de tratamento de chorume do aterro de Cuiabá. Baseando-se na inexistência de vazão efluente das lagoas de tratamento de chorume no auge do período seco, a autora sugere uma provável infiltração no subsolo, recomendando uma melhor averiguação. Somando-se o fato de não haver impermeabilização de base nas lagoas e na primeira célula de deposição de lixo, chega-se ao objetivo principal desta pesquisa: investigar, com o auxílio da geofísica, a existência de contaminação do aquífero freático por chorume na área do aterro sanitário de Cuiabá e no seu entorno, delimitando a pluma de contaminação resultante da possível lixiviação de chorume.

Os levantamentos geofísicos buscaram identificar a correlação das propriedades físicas de resistividade e condutividade com a pluma de contaminação proveniente do depósito de resíduos, objetivando determinar a extensão e a profundidade da pluma de contaminação. O método do GPR buscou identificar e delimitar as zonas contaminadas, onde há o desaparecimento do sinal devido à alta condutividade ocasionada pelo chorume.

Os resultados mostraram presença de contaminação na área estudada e serviram para caracterizar a área no entorno do aterro, confirmando o objetivo esperado.

Esta dissertação é composta basicamente por seis capítulos.

A introdução mostra a relevância do estudo e o conteúdo da dissertação.

A revisão bibliográfica apresenta a problemática dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, os mecanismos de formação de plumas de contaminação no subsolo, os métodos geofísicos usados para investigação de pluma de contaminação e alguns trabalhos realizados na área ambiental empregando métodos geofísicos.

O capítulo “área de estudo” apresenta as características da área estudada e do aterro sanitário.

O capítulo “material e métodos” apresenta o planejamento de campo, os métodos utilizados (eletromagnético indutivo, eletrorresistividade e GPR) e como foram produzidas as representações gráficas utilizadas no capítulo resultados e discussões.

O capítulo “resultados e discussões” apresenta e discute os gráficos e pseudo-seções de condutividade e resistividade de cada linha ensaiada, os mapas de isovalores de condutividade para três profundidades diferentes e os perfis de GPR adquiridos. O conjunto dos resultados mostraram a extensão e profundidade da pluma de contaminação.

Finalmente são apresentados o capítulo “conclusões e recomendações”, que traz as considerações sobre os resultados, e o capítulo das referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo inicia-se abordando aspectos da problemática ambiental em torno do tema “resíduos sólidos”. A seguir são apresentados os mecanismos de formação de plumas de contaminação no subsolo. E, por fim, há uma explanação sobre os métodos geofísicos usados para investigação de plumas de contaminação e alguns estudos já realizados aplicando geofísica na área ambiental, principalmente em depósitos de resíduos sólidos.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E MEIO AMBIENTE

A geração de resíduos sempre foi intrínseca ao cotidiano das pessoas. Antes da revolução industrial, porém, a população e a quantidade *per capita* de resíduos era muito menor e a composição menos nociva ao meio ambiente. Não havia muitos materiais não biodegradáveis, como plásticos e vidros, sendo o lixo facilmente assimilável pela natureza, através dos ciclos biogeoquímicos.

Após o evento da revolução industrial as empresas precisavam vender seus produtos e, então, a crescente população consumidora começou a produzir quantidades de resíduos cada vez maiores, sem haver uma preocupação com a forma de disposição dos mesmos. 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 (SANTOS, 2005).

Antes de abordar os diferentes destinos dados ao lixo e os respectivos impactos ambientais, é importante classificá-lo e quantificá-lo. São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As mais comuns são quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem (PEÑIDO MONTEIRO et al, 2001).

A Norma NBR 10.004/1987 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) classifica os resíduos em Classe I ou perigosos, Classe II ou não-inertes e Classe III ou inertes. De acordo com tal Norma, os primeiros “são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através

do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada”. Os resíduos não-inertes são aqueles “que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente”, não se enquadrando nas demais classificações. E os resíduos inertes “são aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, ...”.

Porém esta classificação dada pela referida Norma é muito técnica, sendo mais comum a classificação quanto à origem. Segundo este critério, PEÑIDO MONTEIRO et al (2001) agrupam os resíduos nas seguintes classes:

- a) Lixo doméstico ou residencial;
- b) Lixo comercial;
- c) Lixo público;
- d) Lixo domiciliar especial: entulho de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus;
- e) lixo de fontes especiais: lixo industrial, lixo radioativo, lixo de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, lixo agrícola e resíduos de serviços de saúde (RSS).

Um erro muito comum cometido por alguns técnicos é correlacionar a geração *per capita* somente ao lixo domiciliar (doméstico e comercial), em lugar de correlacioná-la aos resíduos sólidos urbanos (RSU), que compreende o lixo domiciliar, o público e o entulho, podendo até incluir os RSS (PEÑIDO MONTEIRO et al, 2001).

PEÑIDO MONTEIRO et al (2001) afirmam que a geração de resíduos domésticos no Brasil é de cerca de 600 g por habitante por dia. Além disso, são gerados mais 300 g por habitante por dia de resíduos de varrição, limpeza de logradouros e entulhos. Portanto a média nacional de produção de RSU é de 900 g por habitante por dia. Porém há variação de acordo com o tamanho da cidade, podendo chegar até a 1300 g por habitante por dia em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo.

A quantidade de resíduos produzida por uma população é bastante variável e depende de uma série de fatores, como renda, época do ano, modo de vida,

movimento da população nos períodos de férias e fins de semana e novos métodos de acondicionamento de mercadorias, com a tendência mais recente de utilização de embalagens não retornáveis (CUNHA, 2002).

O lixo doméstico no Brasil é composto de cerca de 50% de matéria orgânica. Esse percentual varia de acordo com os seguintes fatores:

- a) climáticos - as chuvas aumentam o teor de umidade. No outono há mais folhas e no verão, mais embalagens de bebida;
- b) épocas especiais – os feriados aumentam o teor de embalagens;
- c) demográficos – quanto maior a população urbana, maior a produção per capita;
- d) sócio-econômicos – quanto maior o nível cultural, educacional e aquisitivo, maior a incidência de materiais recicláveis e menor a incidência de matéria orgânica. Quando acontecem campanhas ambientais, há uma redução de materiais não-biodegradáveis como plásticos.

Em termos mundiais há uma variação significativa entre os países. De acordo com dados de BROWN (1993), a produção de lixo pode variar de aproximadamente 460 g por habitante por dia, em Kano (Nigéria), a 2.270 g por habitante por dia, em Chicago (Estados Unidos).

Em se tratando das alternativas de disposição final do lixo, o aterro sanitário é a solução menos impactante, pois o mesmo é projetado para impedir a contaminação do subsolo pelo chorume, líquido oriundo do lixo, altamente poluente, com elevada concentração de matéria orgânica e metais pesados. Há a impermeabilização da base onde é depositado o lixo. Também há drenagem dos gases e do chorume. Este é encaminhado ao tratamento antes de ser encaminhado ao corpo receptor. E aquele é geralmente queimado.

Além disso, o aterro é diariamente recoberto de terra, evitando a ação de vetores. Não é permitida a entrada de catadores, a não ser quando há um centro de triagem de lixo, o qual não se recomenda quando o município não possui coleta seletiva. No caso de Cuiabá, onde não há separação do lixo reciclável, todo o lixo que chega ao aterro passa por uma esteira elétrica, onde catadores retiram uma parcela do reciclável. Porém, além do problema de insalubridade desta atividade,

onde há contato com lixo de banheiro, por exemplo, não há viabilidade econômica, pois o gasto com energia, paga pela Prefeitura do município, é maior que a renda gerada pela venda dos recicláveis.

O chorume tratado, ao ser lançado ao ambiente, deve estar de acordo com os padrões estabelecidos em lei. Mas muitas vezes o tratamento é ineficiente e o chorume, mesmo recebendo tratamento, não atende a esses padrões.

Os gases gerados pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica, no interior da massa de lixo, têm como principal constituinte o metano, gás com grande potencial de efeito estufa. Ao invés de queimá-lo, esse gás poderia ser armazenado, encanado e utilizado para produção de energia. Nada mais é do que um biogás, combustível ecologicamente correto.

Os lixões são a forma mais comum para descarte final de lixo no Brasil. De acordo com CONSONI et al (2000), eles são inadequados, pois geram problemas como a depreciação da paisagem, a presença de vetores de doenças, a formação de gás metano e a degradação social de pessoas.

Outro método de disposição final dos resíduos é o aterro controlado, que é um lixão recoberto com terra. Não possui impermeabilização de base, causando danos ao meio ambiente similares ao lixão, pois o chorume percola no subsolo, contaminando os mananciais subterrâneos e também superficiais, na medida que a água contaminada do subsolo entra em contato com os cursos d'água, lagoas, etc. É menos prejudicial que os lixões pois o recobrimento com terra diminui a exposição do lixo, impedindo o contato direto com pessoas e vetores. Porém, trata-se de solução com eficácia bem inferior à possibilitada pelos aterros sanitários, pois, ao contrário destes, não ocorre inertização da massa de lixo em processo de decomposição (CUNHA, 2002).

Apesar do aterro sanitário ser a melhor solução para destinação final de lixo, ele não vem sendo utilizado da forma correta. Deveria ser depositado no aterro somente o que realmente é lixo, ou seja, os materiais que não podem ser reaproveitados ou reciclados. Dessa maneira a vida útil do aterro seria prolongada, os recursos naturais seriam poupados e o consumo de energia muito reduzido, tendo em vista a reciclagem. Se o princípio dos 3R's (reduzir, reciclar e reutilizar) fosse seguido, conseguir-se-ia atingir todos esses objetivos.

Acredita-se que o mais difícil seja reduzir a produção de resíduos, tendo em vista o paradigma econômico atual, que torna a sociedade extremamente consumista e ambientalmente insustentável.

“A pesquisa nacional de saneamento básico, realizada pelo IBGE no ano 2000, indicou que 82,3% dos domicílios do Mato Grosso eram atendidos por sistema de coleta dos resíduos sólidos. Dos resíduos gerados, no Mato Grosso, 78,5% eram dispostos em vazadouro a céu aberto ou lixão superior, enquanto no Brasil, esta forma de disposição inadequada chega a 71,5%” (COSTA et al, 2003).

COSTA *et al.* (2003), baseando-se no levantamento dos resíduos sólidos realizado pela FEMA (Fundação Estadual de Meio Ambiente de Mato Grosso), afirmam que a “coleta atingiu, em dezembro de 2000, aproximadamente 71% e 90% da população total e urbana, respectivamente. Quanto ao tratamento, como forma de diminuição do impacto de disposição dos resíduos, são poucas as iniciativas. A disposição final, através de aterros sanitários planejados e construídos sob licenciamento do órgão de controle ambiental do Estado (FEMA), representa 27,4% dos resíduos sólidos gerados pela população urbana, sendo que os 72,6% restantes, dispostos em depósitos a céu aberto, são os responsáveis direta e indiretamente pela poluição dos recursos hídricos do Estado do Mato Grosso”.

Esses dados mostram que não é dada a devida importância à questão dos resíduos sólidos por parte da sociedade e do governo matogrossense. São necessários investimentos em todas as etapas da gestão de resíduos sólidos no Estado.

Acredita-se que, em termos de Brasil, o percentual de municípios que estão dispondo o lixo em aterros sanitários tenha aumentado, devido às pressões da opinião pública e dos Ministérios Públicos, como é o caso de Santa Catarina. Neste Estado o Ministério Público impôs aos municípios a construção de aterros sanitários, através de Termos de Ajuste de Conduta (TAC), com prazos determinados. Na maioria dos casos, os TAC's foram cumpridos. Muitos municípios pequenos fizeram consórcios para a construção de aterros e outros pagam para depositar seu lixo em aterros privados.

Com relação ao lixo não coletado no Brasil, a Figura 1 mostra as destinações recebidas de acordo com as regiões.

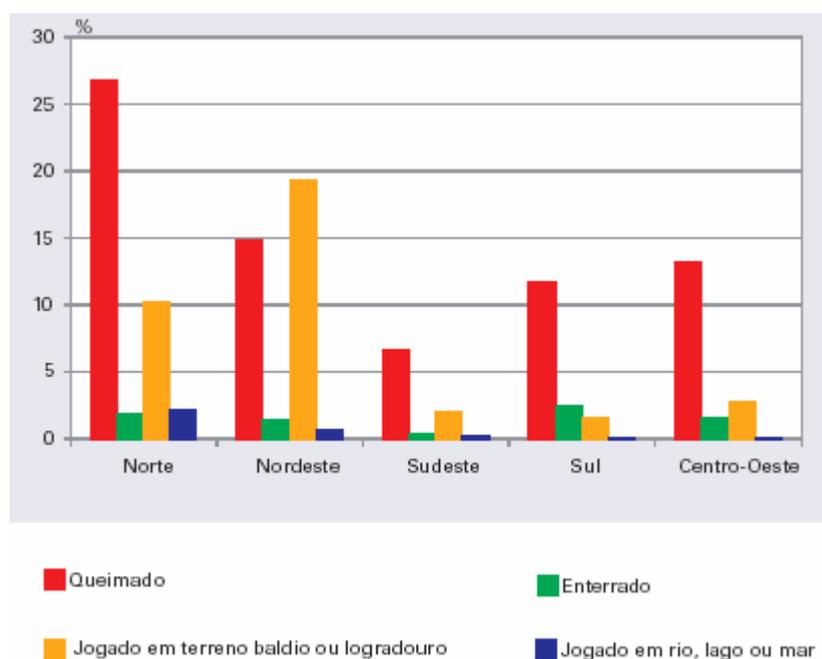


FIGURA 1 - Proporção de domicílios particulares permanentes, por destino do lixo não coletado, segundo as Grandes Regiões – 2000 (Fonte: IBGE, 2006)

Observa-se, na Figura 1, que é preciso ações governamentais nas regiões sem coleta de lixo, no sentido de educar a população para adotar a melhor solução de acordo com as suas peculiaridades. É mais difícil solucionar a questão do lixo em comunidades ribeirinhas da Amazônia, por exemplo, do que em favelas, onde é possível fazer a coleta, ou na zona rural, onde se dispõe de espaço para enterrar o lixo.

Na visão de SANTOS (2005), para solucionar os problemas resultantes da má gestão do lixo nos municípios, é importante a educação ambiental da comunidade, a separação do material reciclável, a compostagem da matéria orgânica (que representa, no caso do Brasil, mais de 50% da produção de lixo) e o que sobrar, que não for reaproveitável, deve ser disposto em aterros sanitários. Desta forma reduziria-se a quantidade de lixo a ser aterrado. De acordo com o modelo de gestão de RSU proposto por FEHR (2003), que é baseado na coleta diferenciada, é possível desviar até 80% dos resíduos dos aterros.

Vale salientar que a compostagem também é um tipo de reciclagem. E, para que se possa reciclar, é preciso que a população separe o lixo em três parcelas: reciclável seco, orgânico e rejeitos. A coleta deve ser diferenciada para cada tipo de

material. O município de Cuiabá foi um exemplo contrário disso. No aterro foi construída toda estrutura para realizar a compostagem do orgânico, mas não foi feita uma campanha para separação do orgânico. O resultado é que a compostagem tornou-se inviável devido à impossibilidade de separar o orgânico dos rejeitos, e os recursos gastos foram em vão.

2.2 FORMAÇÃO DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO

Unidades de disposição de resíduos sólidos, expostas à ação da água, podem constituir-se em fontes de contaminação do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. É o caso de aterros sanitários, onde há precipitação sobre os resíduos. Ao atingir a superfície do aterro, parte da água escoam superficialmente ou acumula-se na superfície e parte infiltra-se, sofrendo posteriormente evaporação ou, caso o aterro não tenha impermeabilização de base realmente efetiva, a água contaminada percola para o subsolo, abaixo dos resíduos, conforme Figura 2.

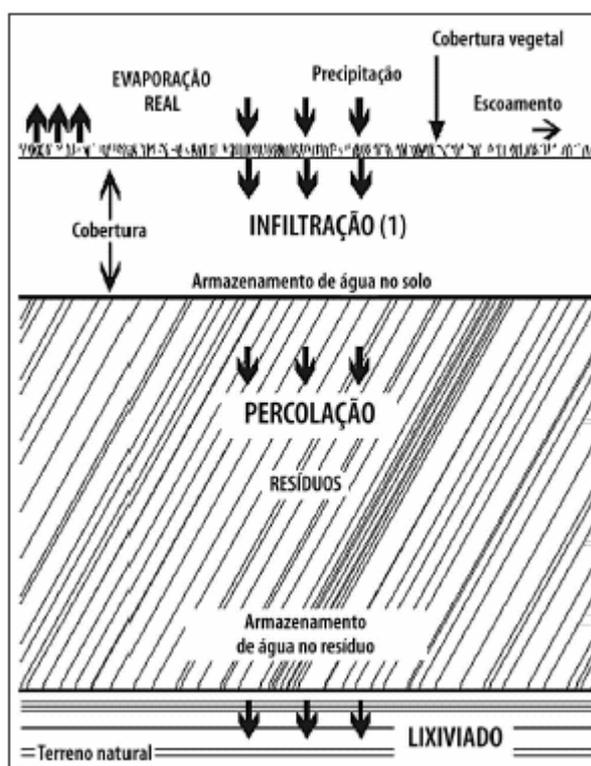


FIGURA 2 - Distribuição das águas da chuva sobre a superfície de um resíduo depositado a céu aberto (SOARES et al, 2005)

A água percolada através dos resíduos constitui o chorume, que contém muita matéria orgânica e íons em solução. Estes íons interagem com as fases sólida, líquida e gasosa do solo e a sua micro fauna e flora, afetando o transporte e/ou retenção dos íons. Essa interação juntamente com o fluxo da água subterrânea é o que vai definir o tamanho e a direção da pluma de contaminação, como ilustra a Figura 3.

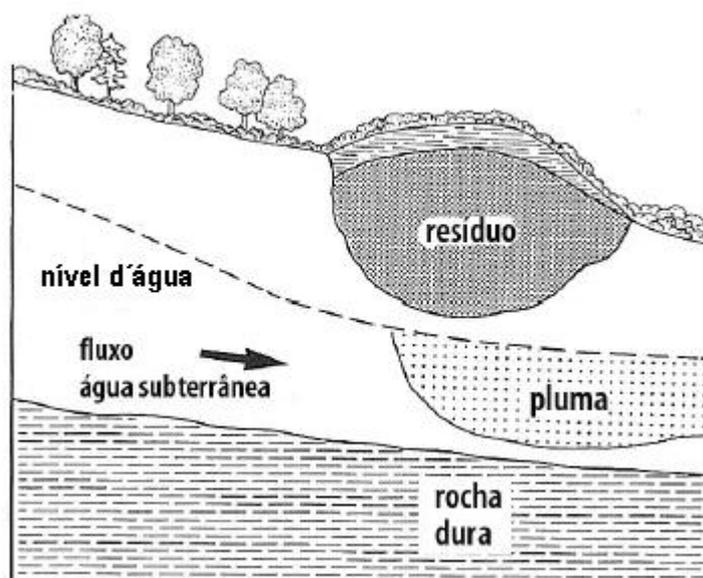


FIGURA 3 – Formação da pluma de contaminação sob depósito de resíduos (adaptado de SOARES et al, 2005)

Para a compreensão do que acontece com os contaminantes quando atingem o solo é necessário inicialmente entender o que é o solo, sua constituição, sua estrutura e suas interações com os contaminantes. Também é imprescindível conhecer os mecanismos de transporte dos contaminantes no solo. A seguir são apresentados todos esses fatores determinantes na evolução da pluma de contaminação.

2.2.1 O solo e suas interações com os contaminantes

O solo é um sistema multicomponente constituído pelas fases: sólida, líquida e gasosa. De acordo com SOARES et al (2005), a fração sólida constitui cerca de 50%, sendo que uma pequena parte é orgânica e a maior parte é inorgânica, com diferentes granulometrias.

De acordo com os mesmos autores, a fração orgânica corresponde a cerca de 2 a 5% do volume, estando localizada próximo à superfície. A fração inorgânica,

conforme a sua granulometria, pode ser denominada argila, silte e areia. As areias são constituídas principalmente de quartzo, os siltes de quartzo e minerais silicatados primários e secundários e as argilas de silicatos secundários e de alumino-silicatos. A proporção de cada fração é muito variável em solos naturais e a textura destes é dada de forma mais ou menos arbitrária pela proporção relativa das frações que apresentam.

SOARES et al (2005) afirma que as fases gasosa e líquida preenchem as posições entre os grãos do solo, compreendendo, cada uma, cerca de 20 a 30% do volume do solo. De acordo com os mesmos autores, a textura afeta as propriedades do solo como a condutividade hidráulica e a retenção de umidade, tendo, portanto, efeito importante na capacidade de transporte e retenção de íons.

A estrutura do solo é formada por camadas, com espessuras variando de alguns centímetros a alguns metros. Essas camadas, também conhecidas como horizontes, resultam do intemperismo físico, químico e biológico sofrido pela rocha originária, além de outros fatores como topografia, clima e tempo. Ocorrem movimentos verticais de materiais em solução e suspensão na água, além de reações químicas. A água, portanto, é o principal agente de transporte na formação das camadas do solo (SOARES et al, 2005).

Em termos mundiais há uma grande variação na estrutura dos solos. Quando o solo é mais desenvolvido, formam-se quatro horizontes a partir da superfície: A, B, C e D. Mas podem existir apenas um (a própria rocha) ou mais horizontes, dependendo das condições ambientais ocorridas ao longo do tempo (SOARES et al, 2005).

Os horizontes A e B são os mais superficiais e formam o solo verdadeiro. O horizonte A é subdividido em três subcamadas: A0, A1 e A2. Nos horizontes A1 e A2 há presença de frações orgânicas em vários estágios de decomposição, e na A2 ocorre a chamada zona de eluviação, onde se acumulam materiais lixiviados de A0 e A1. O horizonte B geralmente contém argilas e óxidos de alumínio e ferro. Este horizonte pode também acumular constituintes precipitados a partir da solução oriunda de camadas mais superficiais, ou trazidos de camadas inferiores pelas forças capilares e o movimento do aquífero freático (SOARES et al, 2005).

O horizonte C, também conhecido como saprolito, é constituído basicamente pelo material parcialmente intemperizado da rocha profunda. A rocha sã constitui o horizonte D (SOARES et al, 2005).

Os mecanismos de transporte de íons no solo estão relacionados ao intemperismo e à oxidação dos minerais no solo. Os minerais de ocorrência superficial são oxidados e, portanto, não são transportados, enquanto os íons dissolvidos, produtos da lixiviação de constituintes do solo ou da contaminação superficial, são transportados pela água (SOARES et al, 2005).

É possível afirmar, de modo simples, que a oxidação de minerais e a lixiviação dos íons ocorrem na chamada zona de oxidação, que se estende da superfície do terreno até o nível d'água da subsuperfície. Na verdade, esta zona vai até uma profundidade na qual o potencial de oxidação seja suficiente para que ocorra a oxidação, atingindo, a partir desse ponto, a zona de transição ou enriquecimento. Nesta região, podem ocorrer precipitação ou (ad)sorção dos íons dissolvidos. Mais adiante em profundidade chega-se à denominada zona de redução (SOARES et al, 2005).

Durante o processo de formação natural dos solos ocasionalmente ocorre, na zona de transição, um horizonte impermeável denominado zona dura, que é uma camada argilosa, relativamente impermeável, produzida como resultado da forte agregação de partículas de solo pela precipitação de materiais relativamente insolúveis como a sílica, o óxido de ferro, carbonato de cálcio e matéria orgânica (SOARES et al, 2005).

A zona dura pode atuar como um isolante mecânico para a migração dos íons, dificultando o acesso da água e do oxigênio a camadas de maior profundidade e definindo o início da zona de redução. Em depósitos de resíduos que contenham muitos metais pode haver a formação desses depósitos no solo de base (SOARES et al, 2005). Na região de Cuiabá ocorre naturalmente a formação de laterita, que são depósitos de minerais ferrosos.

A zona saturada é a região do solo onde os vazios são completamente preenchidos com água. Esta zona é constituída pelo aquífero freático ou por um aquífero mais profundo, protegido por uma camada impermeável. O aquífero freático

está mais exposto à contaminação, pois se situa acima da camada impermeável. O seu perfil geralmente acompanha a topografia local (SOARES et al, 2005).

A região acima do nível d'água, onde os poros do solo encontram-se apenas parcialmente preenchidos com água, denomina-se zona insaturada superior (SOARES et al, 2005).

De acordo com SOARES et al (2005), abaixo da camada impermeável pode haver um aquífero, confinado ou não. Se não for confinado, há uma zona saturada inferior, conforme a Figura 4.

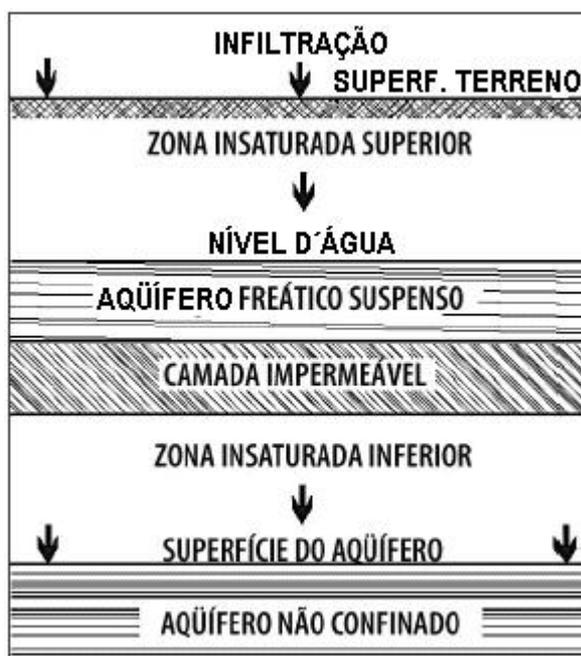


FIGURA 4 – Ocorrências de águas subterrâneas (SOARES et al, 2005)

Nas zonas insaturadas a migração de íons ocorre mais rapidamente, pois a condutividade hidráulica é maior e, portanto a velocidade de escoamento da água é maior, aumentando a velocidade de migração de íons dissolvidos por advecção, conforme será explicado no próximo item. Do mesmo modo, nas zonas com maior saturação a migração é mais lenta (SOARES et al, 2005).

2.2.2 Mecanismos de transporte e retenção de contaminantes no solo

O transporte de contaminantes no solo é regido pelos mesmos mecanismos que presidem o transporte de solutos em meios porosos. De maneira geral o transporte de solutos no solo é afetado por dois mecanismos básicos: a difusão e a

advecção. A difusão é o processo no qual o soluto move-se na solução de regiões de maior concentração para as de menor concentração. A advecção, por sua vez, pode ser entendida simplificada como o processo pelo qual a água, em movimento, carrega solutos dissolvidos. Em adição a estes mecanismos, contribuem também para o transporte de solutos os fenômenos de dispersão e de atenuação ou retardo (SOARES et al, 2005).

Através de mecanismos de difusão, é possível que o soluto migre no solo com velocidade maior que a da solução. A advecção é o transporte simultâneo de solutos e da solução que os carrega (SOARES et al, 2005).

Um exemplo de trabalho realizado sobre contaminação do subsolo por chorume de aterro foi realizado por OLIVEIRA & JUCÁ (2004). Ambos estudaram o acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula do aterro de resíduos sólidos da Muribeca. Concluíram que “os perfis de concentração dos metais pesados e de sólidos voláteis no solo mostraram que existe uma frente de contaminação em direção ao fundo, evidenciando-se também que ocorre ampla faixa de concentração dos metais analisados, relacionada à concentração de cada espécie no percolado. O Chumbo, o Cobre e o Manganês foram os metais preferencialmente sorvidos e apresentaram uma velocidade média de frente de saturação de $2,3 \times 10^{-2} \text{ m.ano}^{-1}$, que indica transporte por advectivo-dispersivo”.

Ao passar pelas zonas saturada e insaturada, a solução pode misturar-se com a água ali presente, resultando na diluição da solução e na conseqüente redução da concentração do soluto. Este fenômeno é conhecido como dispersão, sendo classificada como longitudinal, quando ocorre ao longo do eixo de escoamento, ou transversal, quando ocorre na direção perpendicular a este eixo (SOARES et al, 2005).

De acordo com SOARES et al (2005), as três principais causas da dispersão longitudinal, com alongamento da pluma de dispersão ao longo desta direção são:

- a) num escoamento em meio poroso, o movimento da água é mais rápido no centro dos poros do que junto a suas paredes;

- b) determinadas frações da solução se movem por caminhos mais longos que outras, sendo retardadas em função dos obstáculos que encontram em seu caminho;
- c) parte da solução que escoar através dos poros maiores tende a mover-se mais rápido do que aquela que o faz através de poros menores.

A Figura 5 ilustra aspectos da dispersão longitudinal.

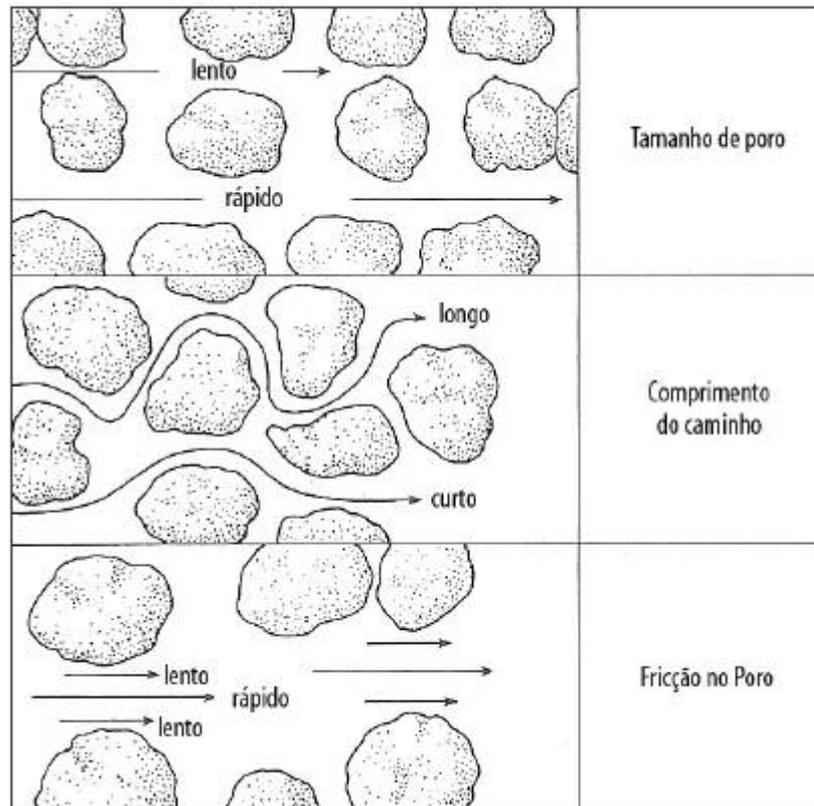


FIGURA 5 - Aspectos da dispersão longitudinal (SOARES et al, 2005)

A dispersão transversal é a divisão lateral do fluxo num meio poroso, em diferentes direções, mesmo em condições não turbulentas, conforme Figura 6a. Em regiões insaturadas, as forças de capilaridade também podem provocar a dispersão transversal do fluxo. A capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho dos poros. Estes formam tubos capilares e, quanto menor o diâmetro dos tubos (ou tamanho dos poros), maior será a força de capilaridade. Outro fator que aumenta a capilaridade é a baixa umidade de solo, ou seja, quanto mais insaturado for o solo, maior será a intensidade da força (SOARES et al, 2005).

CALÇAS et al. (2001) afirmam que “os solos arenosos são representativos das condições mais críticas do processo de atenuação e transporte de contaminantes,

que podem ocorrer em meio poroso não saturado”. Tais autores investigaram a atenuação natural de contaminantes do chorume de aterros sanitários em solos arenosos. Os resultados indicaram que “os efeitos de atenuação da contaminação pelo chorume são significativos, principalmente em relação à qualidade do chorume, mesmo para baixa compactação do solo. Ainda, a redução da permeabilidade do meio com base na recompressão do solo a 95% do Proctor Normal foi suficiente para conter, ..., a migração do chorume sob condições de baixa carga hidráulica”.

Segundo SOARES et al, (2005), quando a permeabilidade do solo varia com a profundidade também pode haver dispersão lateral. Na medida em que o fluxo descendente, induzido pela força gravitacional, encontra uma camada de menor permeabilidade, pode ocorrer simultaneamente o escoamento lateral. Assim, a solução acumular-se-á na parte superior da camada de menor permeabilidade até haja um nível de pressão capaz de vencer a resistência ao fluxo descendente, como representado no esquema da Figura 6b.

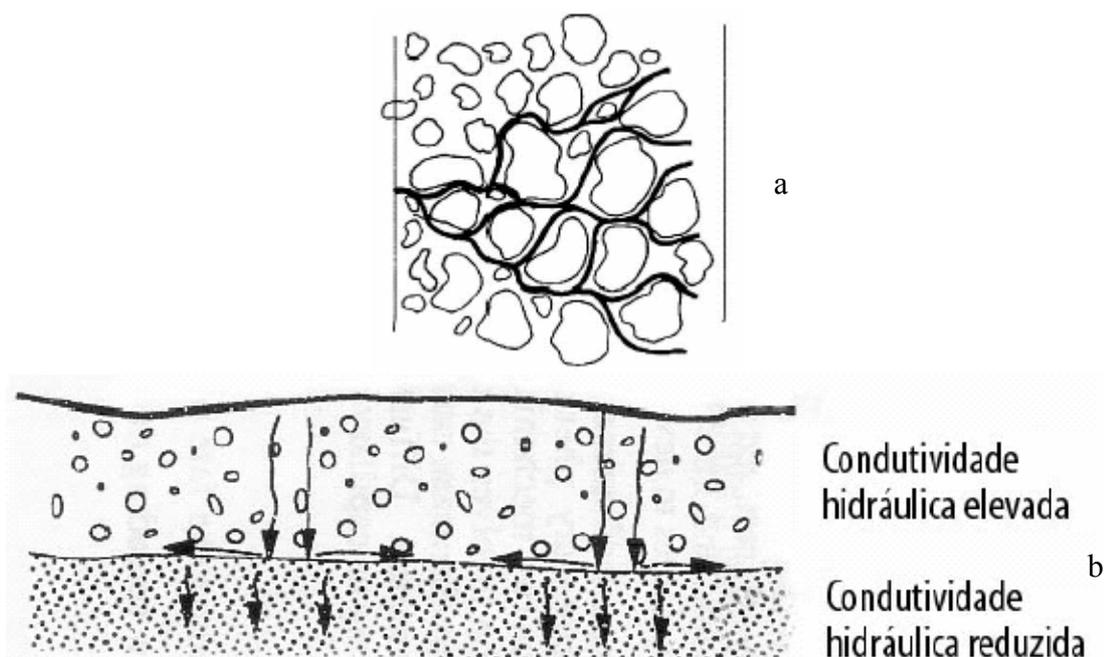


FIGURA 6 - Aspectos da dispersão transversal (SOARES et al, 2005)

DRURY (1999) afirma que fenômenos químicos, físico-químicos e biológicos podem contribuir para o retardo do transporte dos íons no solo. O principal fenômeno não biológico que retarda a migração de íons no solo é a sorção

que compreende os fenômenos de adsorção, precipitação e intrusão (SOARES et al., 2005).

A adsorção pode ser definida como a acumulação de elementos químicos sobre a superfície das partículas sólidas adsorventes, reduzindo a concentração do desses elementos na água circulante. A adsorção acontece devido à carga elétrica associada às partículas de solo e do tipo de íon em solução, ou seja, se a carga do material adsorvente for negativa, por exemplo, ele atrairá cátions, que possuem carga positiva. A adsorção é influenciada tanto por forças intermoleculares quanto pelo pH e potencial redox. No tratamento de água, por exemplo, pode-se utilizar carvão mineral, que adsorve substâncias indesejáveis presentes na água (SOARES et al, 2005).

RODRIGUES & TAIOLI (2003) estudaram a retenção de metais pesados no solo de base e de cobertura do lixão de Ilhabela – SP. Concluíram que as amostras de solos que tiveram contato com chorume apresentam enriquecimento pelos íons Pb, Ni e Zn. Os testes de adsorção utilizando-se chorume indicaram que o solo utilizado para a cobertura tende a fornecer para o meio líquido íons de Ba e Mn, no entanto, é capaz de adsorver parte da quantidade de Pb, Ni e Zn encontrada no chorume produzido na degradação dos resíduos aterrados. Deve-se ressaltar que os metais que estão adsorvidos no solo podem ser mobilizados com as eventuais mudanças nas condições naturais, como chuva ácida e a característica físico-química do chorume produzido, podendo, assim, alterar prejudicialmente a qualidade das águas subterrâneas e superficiais da região. A retenção dos metais Pb, Zn e Ni pelo solo de cobertura é satisfatória para as concentrações encontradas no chorume produzido no lixão de Ilhabela, no entanto, o solo apresenta capacidade de fixação inferior a 50 % para valores acima de $4,0 \text{ mg.L}^{-1}$ (Pb) e $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ (Zn e Ni). Devido à predominância da fração areia no solo e por este não apresentar boa capacidade de retenção dos íons metálicos, é necessária a avaliação e o monitoramento da água subterrânea da região para que seu uso não seja comprometido pela disposição dos resíduos.

Um exemplo de estudo de medida de sorção foi realizado por RITTER et al (2001). Os autores avaliaram a capacidade de mitigação da argila orgânica presente na fundação e nas valas de contenção lateral para o chorume gerado no aterro

metropolitano de Gramacho – Rio de Janeiro. A análise ocorreu para o elemento amônio (NH_4^+), presente em altas concentrações no chorume. Foram realizados ensaios de difusão molecular. As determinações do coeficiente de difusão molecular e de K_d , coeficiente de distribuição linear (resultado da sorção) permitiram uma simulação do transporte do amônio através da cortina de vedação, com cerca de 1,0 m de largura, ao longo de 20 anos. Esta avaliação indica que a argila orgânica de Gramacho provavelmente irá reter o amônio por este período.

Destes dois estudos pode-se concluir, dentre outros, que os solos argilosos tendem a possuir maior poder de sorção comparativamente a solos arenosos, devido às cargas elétricas das argilas, que adsorvem os íons metálicos. Além do efeito benéfico da sorção no sentido de frear o crescimento da pluma de contaminação, os solos argilosos possuem baixa permeabilidade. Portanto a litologia pode ser considerada como um fator determinante na escolha de áreas para deposição de resíduos.

2.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPREGADOS NA INVESTIGAÇÃO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO

Comparada aos métodos tradicionais de investigação do subsolo, a geofísica é uma ferramenta que possibilita encontrar, de forma indireta e rápida, subsídios sobre as condições geológicas, hidrogeológicas e de contaminação do subsolo.

A geofísica utiliza técnicas não invasivas que permitem obter informações sobre as condições geológicas e hidrogeológicas, 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.

A natureza elétrica de um material é caracterizada por sua resistividade, constante dielétrica e temperatura. Segundo McNEILL (1980) os principais fatores que afetam a resistividade elétrica nos materiais geológicos próximos à superfície, são: conteúdo de água, porosidade, salinidade, conteúdo de argilas e de minerais

condutivos e a composição mineralógica. Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos reflete em uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação de métodos elétricos em estudos ambientais e hidrogeológicos, pois a presença de água e de contaminantes, que são normalmente ricos em sais e outros eletrólitos, são de uma maneira geral, facilmente detectáveis através de medidas de resistividade e condutividade elétrica.

A eletrorresistividade é um método geofísico que emprega corrente elétrica para identificar variações de resistividade elétrica no meio. A técnica de caminhamento elétrico permite identificar variações laterais de resistividade. As medições são efetuadas através de um par de eletrodos para injetar a corrente elétrica (I) no solo e outro par de eletrodos para medir a diferença de potencial resultante (ΔV). A resistividade aparente do meio por onde circulam a corrente é dada pela razão entre a diferença de potencial e a corrente e a geometria do arranjo (ORELLANA, 1972). A interpretação é efetuada qualitativamente em gráficos da resistividade aparente em função da distância e permite confrontar com os resultados do método eletromagnético indutivo.

O método eletromagnético indutivo permite determinar a condutividade elétrica aparente do meio constituído pelos materiais da subsuperfície. Neste método um campo eletromagnético é gerado por uma bobina transmissora colocada na superfície com frequência abaixo de 6,4 kHz, induzindo correntes no subsolo que originam um campo eletromagnético secundário que é detectado por uma bobina receptora a uma distância fixa da bobina transmissora (McNEILL, 1980). Aumentando-se a separação das bobinas aumenta-se a profundidade de investigação. A interpretação é realizada através do gráfico da condutividade em função da distância e através de mapas de isovalores de condutividade elétrica. Os mapas são gerados através de interpolação utilizando-se de técnicas estatísticas de krigagem linear. Uma das principais vantagens dos métodos eletromagnéticos é que o processo de indução não necessita de contato direto com o solo, como no caso dos métodos elétricos, onde os eletrodos devem ser cravados na superfície do solo. Outras

vantagens sobre os métodos elétricos são: velocidade na aquisição dos dados e portabilidade dos equipamentos.

O método de radar de penetração no solo - GPR (*Ground Penetrating Radar*) também pode ser utilizado para detectar contaminação na subsuperfície. Como descrito por DAVIS & ANNAN (1989) consiste em obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície, através da transmissão de um curto pulso de alta frequência para gerar ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 MHz a 1 GHz), que por sua vez é repetidamente radiada para dentro da terra por uma antena transmissora colocada na superfície. As mudanças das propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletida e parte refratada. Em lugares muito contaminados, por exemplo, o sinal é totalmente refratado em virtude da alta condutividade elétrica da contaminação. Dessa maneira identificam-se os locais onde há forte presença de poluentes.

2.4 TRABALHOS NA ÁREA AMBIENTAL EMPREGANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS

Diversos são os trabalhos na área ambiental que empregam métodos geofísicos. Muitos métodos, como a sísmica e os geoeletricos têm sido usados com sucesso. Os métodos geoeletricos incluem as técnicas da polarização induzida, eletromagnético, radar de penetração no solo, potencial espontâneo e eletrorresistividade. Esta última agrega as Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) e os Caminhamentos Elétricos (CE). Aqui são apresentados diversos trabalhos realizados no Brasil e em outros países, seguindo a ordem cronológica. Dessa maneira visualiza-se a evolução das técnicas utilizadas.

Nas últimas décadas tem aumentado o interesse por estudos na área ambiental. Na busca de novas técnicas de investigação de plumas de contaminação, começou-se a utilizar a geofísica devido à sua versatilidade, rapidez e baixo custo, comparativamente aos métodos convencionais de prospecção.

De acordo com SANTOS (2005), há cerca de quatro décadas, na América do Norte, iniciou-se a aplicação das técnicas de SEV e CE para definir a profundidade e a extensão de corpos de água subterrânea contaminados.

Apesar de suas limitações, os métodos geofísicos já eram aplicados, na década de 70, para estudar a contaminação do solo e da água. Porém desconheciam-se, na época, quais os níveis detectáveis de contaminação registrados pelo método da eletrorresistividade. Através da análise de correlação entre os resultados geofísicos e a qualidade das amostras de água contaminadas, foi possível saber onde os métodos geofísicos são passíveis de ser utilizados na área ambiental.

Um exemplo disto foi o estudo de KELLY (1976), que correlacionou a análise de amostras de água de poços de monitoramento de um depósito de resíduos com os resultados de sondagens elétricas no mesmo local. O grau de correlação foi bom, sendo os valores de condutividade obtidos semelhantes. Assim, constatou-se que a geofísica é eficaz na investigação de plumas de contaminação.

De acordo com PORSANI (1999), o método GPR existe desde a década de 20, mas somente na década de 80 teve seu reconhecimento como método de exploração geofísica por parte da comunidade geocientífica mundial. Isto se deve ao desenvolvimento tecnológico, que otimizou os equipamentos tornando-os portáteis e baixando seu custo. Em consequência disso foram publicados, nessa década, um grande número de trabalhos com GPR. Na década de 90, com o avanço tecnológico, o GPR passou a ser utilizado numa gama maior de problemas, incluindo a localização da pluma de contaminação em áreas impactadas pela disposição de resíduos.

BENSON & YUHR (1982) utilizaram seis técnicas geofísicas para o estudo de pluma de contaminação oriunda de depósito de resíduos, dentre as quais a resistividade, o método eletromagnético indutivo e do radar de penetração no solo. Além de detectar a pluma, tais métodos também comprovaram ser eficazes na localização de resíduos enterrados.

Algumas limitações eram e ainda podem ser encontradas no uso dos métodos geofísicos de investigação. A topografia, a precisão nas leituras dos equipamentos e os ruídos externos são exemplos de tais limitações. De acordo com GREENHOUSE & SLAINE (1983) a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações.

URISH (1983), utilizando o método da eletrorresistividade, investigou três fontes potenciais de contaminação do subsolo: áreas de depósitos de resíduos sólidos,

áreas de descarte de resíduos líquidos de reprocessamento de urânio e áreas litorâneas com intrusão salina no aquífero. O método forneceu resultados satisfatórios em todos os casos.

Medições de condutividade rotineiramente são feitas há muitas décadas na América do Norte e na Europa para mapear e monitorar contaminação de águas subterrâneas. De acordo com MONIER-WILLIAMS et al (1990), a introdução dos métodos elétrico e eletromagnético indutivo no Brasil foi feita em 1986, num programa entre as Universidades de Waterloo (Canadá) e São Paulo. Na vigência deste programa foram realizados três levantamentos em áreas de depósito de lixo no Estado de São Paulo. As áreas incluem dois aterros sanitários municipais (Novo Horizonte e Taubaté) e um depósito de lodos industriais gerados na produção de açúcar e álcool numa refinaria de açúcar em Novo Horizonte. Contrariamente às expectativas dos autores, os ambientes geoeletricos das três áreas foram similares àqueles dos aterros que têm sido estudados na América do Norte. Os valores de condutividade dos materiais inconsolidados superficiais foram uniformemente baixos.

MENDES (1987) usou os métodos de eletrorresistividade e eletromagnético indutivo para o estudo das seguintes áreas com potencial de contaminação: aterros sanitários de Taubaté, Novo Horizonte (esses dois em continuidade ao trabalho do programa entre as Universidades de Waterloo e São Paulo) e São José dos Campos, SP; áreas de infiltração de vinhaça em Novo Horizonte e Ribeirão Preto, SP; aquíferos costeiros de São Paulo contaminados por intrusões salinas; e áreas industriais com problemas de poluição e contaminação. O autor sugeriu a aplicação conjunta dos métodos para garantir um grau de confiança maior nos resultados obtidos, confirmando a afirmação de GREENHOUSE & SLAINE (1983), descrita anteriormente.

CAHYNA (1990) monitorou uma infiltração artificial usando métodos geoeletricos. O experimento foi conduzido numa área que contém sedimentos glaciofluviais em Bohemia do Norte, antiga Tchecoslováquia, pelo Serviço Hidrogeológico deste país. Foram infiltrados 1000L de uma solução de cloreto de cálcio. A direção do fluxo e a velocidade do avanço da solução foram monitoradas com o auxílio dos seguintes métodos geofísicos: sondagem elétrica vertical com

medidas de polarização induzida e perfilagem simétrica de resistividade com medidas de polarização induzida; método *mise-à-la-masse*; medidas de resistividade de água em poços; medidas de resistividade média da rocha usando eletrodos estáveis. Os dois primeiros métodos não foram capazes de monitorar o avanço da solução de cloreto de cálcio, mas contribuíram com informações sobre a geologia da área. O método *mise-à-la-masse* foi usado para determinar a direção do fluxo de água subterrânea. As medidas de resistividade da água dos poços foram suplementadas com monitoramento hidrogeológico da concentração de cloretos na água subterrânea. As informações fornecidas pelo sistema estacionário de eletrodos foram processadas quantitativamente para determinar a concentração de cloreto de cálcio na água infiltrando, gravadas em certos intervalos de tempo e taxas de infiltração nas áreas ao entorno do poço de infiltração.

MAZÁČ et al (1990) determinaram a extensão da contaminação de óleo na água subterrânea utilizando métodos geoeletricos. Eles aplicaram um novo método baseado em laboratório, modelagem matemática e análises teóricas, o método “screening body”. Este método é mais sensível para detectar o limite da pluma de óleo. Ele emprega o efeito de blindagem elétrica de óleos flutuantes no nível d’água da subsuperfície. É aplicável somente para casos raros onde, sob condições específicas, a parte poluída do aquífero forma uma camada resistiva em comparação à resistividade da parte não poluída. O princípio do método consiste em enterrar uma corrente de eletrodos em baixo da camada resistiva de óleo e observar o respectivo campo elétrico na superfície do solo. O limite da contaminação de óleo é claramente detectado por medidas de potencial ou gradiente do campo geoeletrico. As possibilidades de detecção são verificadas em laboratório e por modelagem matemática e demonstradas por um caso histórico. O método “screening body” é rápido e barato e pode completar ou substituir os métodos tradicionais de resistividade.

MAZÁČ et al (1990) utilizaram métodos geoeletricos de superfície para determinação da condutividade hidráulica do subsolo. Tal parâmetro é muito importante em investigações de poluição da água subterrânea. Os autores analisaram teoricamente e verificaram, na prática, relações mútuas entre parâmetros geológicos e condutividade hidráulica de aquíferos. Na zona saturada, encontraram que existem

relações diretas e inversas entre condutividade hidráulica e resistividade de rochas, dependendo da rocha e do tipo de permeabilidade dos aquíferos e sugeriram um modelo hidrogeofísico geral explicando razões para as relações controversas. Também encontraram, em campo e em laboratório, uma relação não confiável entre parâmetros de polarização induzida e condutividade hidráulica. Na zona insaturada, encontraram que um tratamento estatístico de medidas geoeletricas de superfície integradas pode contribuir na determinação da distribuição espacial representativa da condutividade hidráulica saturada. A distribuição da condutividade hidráulica determinada geofisicamente pode aperfeiçoar o conhecimento da dinâmica da expansão da poluição na rocha e cortar gastos nos levantamentos.

ROSS et al (1990) realizaram levantamentos de resistividade elétrica arranjo dipolo-dipolo em estudos em antigas áreas de depósitos de lixo (doméstico e industrial) no norte de Utah, EUA. O solo da região possui camadas de silte fino e argila, dificultando a migração vertical de chorume. Os perfis dipolo-dipolo foram feitos em dois grandes aterros sanitários e três depósitos de lixo no ano de 1982. As resistividades aparentes variaram de mais de 700 Ω .m a menos de 10 Ω .m em alguns perfis, o que indica a natureza heterogênea do material aluvionar, o grau de saturação e a presença de camadas de argila. Modelos numéricos de perfis selecionados ajudaram no mapeamento do topo das camadas de argila a profundidades de 3 a 20m e a morfologia de um bloco colapsado de um depósito de lixo químico. Os dados de resistividade, suplementados por perfis e magnéticos e de potencial espontâneo, forneceram a direção para uma perfuração e um programa de amostragem e seqüência para o entendimento dos resultados das amostras.

BARKER (1990) fez uma explanação sobre o progresso da qualidade dos dados de sondagem de resistividade nos estudos em aterros sanitários. O autor afirma que o sistema “offset” Wenner de sondagens elétricas verticais tem sido desenvolvido para reduzir significativamente os efeitos falsos em curvas de sondagem que são produzidas por variações laterais na resistividade do solo próximo à superfície. A facilidade de operação dos então novos sistemas de multi-cabos-condutores disponíveis tem conduzido ao crescimento do uso da técnica em estudos ambientais. A sondagem “offset” pode ser usualmente combinada com o método eletromagnético, fornecendo informações detalhadas da subsuperfície em estudos em

aterros, com rapidez e eficiência. Um exemplo de Yorkshire, Inglaterra, demonstrou o uso efetivo desta técnica na determinação da espessura e tipo de preenchimento. Em ambientes ruidosos tal técnica permitiu fazer curvas de sondagem de boa qualidade, que foram interpretadas mostrando que a camada sob o arenito foi contaminada por chorume percolado do aterro.

BUSELLI et al (1990) aplicaram, na Austrália, as técnicas de sondagens elétricas e os métodos eletromagnéticos no domínio do tempo para estabelecer a relação entre locais de disposição de resíduos sólidos e contaminação do subsolo por chorume. Os resultados mostraram que a aplicação conjunta destas técnicas foi mais efetiva para caracterizar os locais contaminados.

ELLERT et al (1990) investigou a pluma de contaminação oriunda do lixão de São Carlo, SP, utilizando o método eletromagnético indutivo. Valores muito altos de condutividade elétrica apontaram a presença de contaminação.

CARPENTER et al (1990), utilizando os métodos elétricos e eletromagnéticos, estudaram a estrutura de depósitos de lixo. O objetivo foi obter 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. Concluíram que os métodos utilizados foram capazes de caracterizar a estrutura dos depósitos de resíduos e monitorar e mapear a pluma contaminante, confirmando os resultados de BENSON & YUHR (1982), trabalho este descrito anteriormente.

CARPENTER et al (1991) estudaram uma zona fraturada num depósito de resíduos em Chicago, nos Estados Unidos. Os autores definiram a pluma de contaminação e o perfil vertical usando sondagens elétricas verticais e sísmica de refração. Compararam-se os resultados geofísicos com as amostras retiradas de poços perfurados, obtendo-se boa correlação. Outra conclusão importante obtida nesse trabalho é que a correlação dos dados sísmicos com os dados geo-elétricos auxiliou na determinação de zonas de fraturamento profundo abaixo da área do aterro, mesmo com as ondas sendo atenuadas pela massa de resíduos.

MALAGUTTI FILHO (1991) demonstrou a importância e a viabilidade da aplicação das técnicas geofísicas de sísmica de refração e de sondagem elétrica vertical no posicionamento do nível d'água da subsuperfície e na determinação das

espessuras dos diferentes horizontes da camada inconsolidada acima do topo rochoso, além da determinação das propriedades geológico-geotécnicas. Foi realizado um estudo experimental em três áreas de teste 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.

MEJU (1993) realizou um mapeamento geofísico de água subterrânea poluída numa área de aterro sanitário, na cidade de Leicester, Inglaterra. Ele usou os métodos de resistividade e eletromagnético no domínio do tempo. Concluiu que estes métodos fornecem informações vitais sobre as condições da água subterrânea, dentro e fora da área do depósito de lixo. Em particular, demonstrou que a então nova técnica de mapeamento do subsolo produz informações confiáveis, comparáveis a dados de poços e que os materiais que preenchem a área do antigo aterro coberto podem ser distinguidos com base nas suas características de resistividade. Os resultados desse estudo foram utilizados para a localizar as perfurações para investigações geotécnicas em rasas profundidades.

COSTA & FERLIN (1993) também utilizaram o método eletromagnético indutivo em depósitos de resíduos sólidos e áreas de deposição de lodo de curtume no Rio Grande do Sul, encontrando bons resultados. Em um dos depósitos de lixo estudados, foi feito um acompanhamento da evolução da pluma contaminante 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 passar do tempo.

LIMA & SATO (1993) estudaram a contaminação das águas subterrâneas na área do Centro Petroquímico de Camaçari, no estado da Bahia, usando técnicas de eletrorresistividade (SEV's). Constataram que há anomalias geo-elétricas condutivas notáveis delineadas no aquífero freático Marizal. Com os dados geológicos os autores concluíram que essas anomalias não são devidas às mudanças na litologia,

mas sim às mudanças de condutividade da água que satura o aquífero, provocadas pela infiltração vertical de fluidos condutivos produzidos nas áreas industriais. Concluíram, ainda, que, com base nos custos, na quantidade e qualidade das informações geofísicas (de eletrorresistividade), comparativamente aos resultados obtidos unicamente com procedimentos hidrogeológicos convencionais, a inclusão da tecnologia geo-elétrica constitui um das formas mais otimizadas para monitorar a qualidade e detectar a presença de zonas contaminadas em aquíferos freáticos.

BOIAN (1995) estudou a área do aterro sanitário de São José do Rio Preto, SP, utilizando o método geofísico eletromagnético indutivo. O objetivo foi estimar o grau de contaminação do ambiente hidrogeológico devido à deposição de RSU. Pretendendo-se estimar a influência do aterro sanitário na qualidade da água subterrânea local, correlacionou-se os dados obtidos através da geofísica com os dados de análises físico-químicas de amostras da água, obtendo-se um bom resultado.

FRANCO & PIRES (1995) estudaram a contaminação de águas superficiais e subterrâneas provocada pelo depósito de resíduos sólidos de Brasília, DF, utilizando técnicas geofísicas e análises químicas da água. As sondagens elétricas verticais realizadas na proximidade do aterro caracterizam bem a estruturação do solo desenvolvido sobre ardósia. Através de análises físico-químicas observou-se 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 antigo lixão. Concluiu-se que, para obter resultados mais conclusivos sobre a pluma de contaminação, seria necessário um maior adensamento de SEV's.

ELIS & ZUQUETTE (1997) utilizaram a interpretação conjunta dos métodos de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico arranjo dipolo-dipolo para caracterizar o aterro sanitário de Ribeirão Preto, SP. 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.

Visando determinar o fluxo da pluma contaminante RIGOTTI et al (1997) fizeram um mapeamento geoeletrico do aterro da Lamenha Pequena em Curitiba, PR. As técnicas utilizadas foram o caminhamento elétrico dipolo-dipolo com cinco níveis

de investigação e sondagens elétricas verticais com arranjo Schlumberger. Concluíram que as seções de resistividade aparente do arranjo dipolo-dipolo mapearam muito bem os limites laterais do lixão, indicando que o chorume é pervasivo, percolando por toda a coluna. As SEV's complementaram o estudo, determinando a espessura das camadas de lixo.

MALAGUTTI FILHO et al (1997) aplicaram os métodos de caminhamento elétrico dipolo-dipolo, polarização induzida, sondagem elétrica, sísmica de refração e eletromagnético indutivo para avaliar o impacto ambiental provocado pelo aterro controlado de Rio Claro, SP. Os resultados permitiram caracterizar os materiais geológicos, resíduos, nível d'água e fluxo subterrâneo.

BAGANHA (1997) utilizou a técnica de sondagem elétrica vertical para demonstrar 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 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 SEV's permitiu mapear e monitorar a pluma contaminante. Simultaneamente, foram extraídas amostras de água para análises químicas, objetivando a comparação desses dados com os resultados obtidos através da investigação geofísica.

Em sua tese de doutorado, ELIS (1998) investigou o lixão desativado de 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. Foram utilizados os métodos da Eletroresistividade, do Potencial Espontâneo e da Polarização Induzida. Porém, o método de eletroresistividade 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.

Em sua tese de doutorado, PORSANI (1999) propôs uma metodologia de emprego do GPR em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado, SP. O autor afirma que o GRP possui, atualmente, a mais alta resolução dentre os métodos geofísicos. A pesquisa focalizou problemas geológicos,

geotécnicos, ambientais e urbanos, comuns na realidade brasileira, visando avaliar suas potencialidades, bem como parâmetros ótimos de seu emprego. Os trabalhos de campo foram realizados na região central da cidade de Rio Claro (para localização de um provável túnel arqueológico, dentre outros objetivos), no aterro sanitário de Rio Claro (para localização da pluma de contaminação, dentre outros objetivos), na pedreira Stavias (para determinar a profundidade do topo da soleira de diabásio e imagear os sedimentos) e na mineração Jundu (para imagear com detalhe a estratigrafia, dentre outros objetivos). Os resultados da interpretação final apresentaram excelente concordância com os furos de sondagem, poços de monitoramento e estudos geológicos de afloramentos. Utilizaram-se as frequências de 50, 100 e 200 MHz, possibilitando imagear objetivos localizados até 30 m de profundidade. O autor recomenda o emprego do método GPR para o imageamento de detalhe de estruturas geológicas e para a localização de plumas de contaminação.

O trabalho de NASCIMENTO et al (1999) empregou a resistividade elétrica para monitorar a contaminação do subsolo provocada pela percolação de esgoto tratado em tanque séptico através de valas de infiltração. O contraste de resistividade elétrica entre o solo seco e o solo com presença de efluente permitiu delimitar as áreas contaminadas. Os resultados obtidos possibilitaram identificar um padrão de movimentação tanto horizontal, como vertical do contaminante. Dados complementares, obtidos através de coleta de amostras da água do subsolo, mostram que a contaminação já atingiu um aquífero freático que se situa a cerca de 8 metros abaixo das valas de infiltração.

ELIS & ZUQUETTE (1999) utilizaram a técnica de caminhamento elétrico dipolo-dipolo para avaliar as relações entre dimensões do empreendimento e qualidade dos resultados obtidos. Os autores investigaram o aterro sanitário em Ribeirão Preto, SP, o aterro Bandeirantes em São Paulo, SP e uma área de disposição de resíduos de curtume em Franca, SP. Observaram 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.

Utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger e caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo BRAGA et al (1999) estudaram áreas de disposição de resíduos industriais em Iracemápolis, SP.

Os estudos geofísicos visaram obter um diagnóstico prévio dos materiais em subsuperfície frente à possível contaminação por resíduos industriais. As SEV's caracterizaram a litologia dos materiais em subsuperfície e a profundidade do nível d'água. O caminhamento permitiu delimitar a área de disposição de resíduos, avaliar as condições da pluma de contaminação e determinar as direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo. Mapas referentes a três níveis de investigação (profundidades teóricas de 10, 20 e 30 metros) evidenciam que a pluma tende a diminuir sua faixa de contaminação em função da profundidade, restringindo-se a locais isolados. Duas direções preferenciais do fluxo subterrâneo d'água foram identificadas, acompanhando, de um modo geral, a topografia do local estudado.

CAVALCANTI et al (1999) estudaram a área do Aterro Sanitário Centro, situado na região metropolitana de Salvador, utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger, de polarização induzida e de potencial espontâneo. Pelo fato de o aterro ser recente, o enfoque do trabalho não foi investigar a contaminação subterrânea, mas sim monitorar o aquífero freático com o objetivo de mantê-lo são. A análise dos dados coletados possibilitou o 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. O potencial medido deve estar associado ao fluxo de água subterrânea. O sistema freático foi definido a partir de informações de potencial espontâneo: anomalias negativas foram associadas à áreas de recarga e anomalias positivas à áreas de descarga.

LUIZ et al (1999) utilizaram o método da eletrorresistividade (SEV's arranjo Schlumberger) para estudar a área do lixão de Santana de Aurá em Ananindeua, PA, que recebe os RSU da cidade de Belém, PA. Os dados 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 subterrâneo contaminado era sul e oeste e extrapolavam os limites do Lixão. Dando continuidade ao trabalho, MORALES et al (2001), utilizando a

técnica do imageamento elétrico, com arranjo Wenner, observaram que a água subterrânea está sendo atingida pelo deslocamento da pluma de contaminação provocada pelo chorume, confirmando as investigações realizadas por LUIZ et al (1999).

CAVALCANTI et al (2001) mostraram que a área do aterro sanitário de Salvador é relativamente heterogênea do ponto de vista elétrico. Dessa forma, a área pode ser satisfatoriamente caracterizada pelos métodos elétricos. Os autores frisaram que, em investigações futuras, as variações elétricas não detectadas próximas ao aterro poderão estar relacionadas com alterações na qualidade da água subterrânea.

BRATUS & NIETO YABAR (2001) caracterizaram um sistema de três diferentes depósitos de lixo na Itália, usando resistividade e polarização induzida. O primeiro foi fechado nos anos oitenta e não teve nenhum tipo de impermeabilização de base; o segundo foi fechado nos anos noventa e foi impermeabilizado com uma camada de argila como previa a lei italiana de 1982; e o terceiro está aberto e possui uma impermeabilização de PEAD. Em todos os casos estudados a profundidade do corpo de lixo é cerca de 20m e o nível da água está a uma profundidade de 70m. Duas linhas norte-sul e uma leste-oeste foram feitas em diferentes períodos do ano a fim de definir a mais apropriada disposição geométrica de medição, a geometria dos aterros, as características de resistividade e cargabilidade do lixo e a contaminação do subsolo devido à lixiviação do chorume. A resposta aos levantamentos geofísicos foi satisfatória. Foi constatada a presença de duas plumas de lixiviação no segundo e no terceiro aterro, ou seja, nos mais recentes, apesar de haver impermeabilização de base. Os autores ressaltam ainda o baixo custo dos levantamentos geofísicos em comparação a outros tipos de levantamento.

MOURA et al (2001), dando continuidade ao trabalho de MALAGUTTI FILHO et al (1997), apresentaram uma modelagem de pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes para subsidiar a avaliação do impacto ambiental causado no aterro controlado em Rio Claro, SP. Constatou-se 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.

Através dos métodos elétrico e eletromagnético MONTEIRO & COSTA (2001) determinaram a espessura da camada saturada de chorume no depósito de lixo de Bangu na cidade do Rio de Janeiro. Dessa forma foi confirmada a contaminação do rio Sarapuí, situado próximo ao depósito de lixo. Foi possível, ainda, sugerir o sentido de migração do chorume.

Utilizando a técnica do GPR conjuntamente com os métodos elétricos, DOURADO et al (2001) determinaram a espessura das camadas de resíduos, a profundidade do nível d'água e a pluma contaminante oriunda do aterro sanitário de Jundiaí, SP.

AQUINO & BOTELHO (2001), objetivando aumentar a precisão do levantamento geofísico numa área de disposição de resíduos industriais no município de Araras, SP, combinaram os métodos eletromagnético indutivo no domínio da frequência e GPR, sendo detectada a contaminação do solo e da água subterrânea do local.

MEJU (2001) faz uma explanação sobre o uso da geofísica no estudo das águas subterrâneas e solos contaminados, comentando sobre os problemas e apontando os caminhos a seguir. O autor sugere uma abordagem multidisciplinar para solucionar os problemas ambientais. A Tabela 1 relaciona os ramos da área ambiental com as colaborações multidisciplinares potenciais.

TABELA 1 - Ramos da geofísica ambiental, seus tópicos e as abordagens multidisciplinares preferenciais para solucionar os problemas (adaptado de MEJU, 2001)

Ramo da área ambiental	Tópicos	Colaboração multidisciplinar potencial
Meio ambiente urbano	Monitoramento de ruídos/vibrações, sismologia Mapeamento geológico urbano	Monitoramento sísmico, engenharia de processamento de sinal Imageamento geofísico
Investigação de fundações e grandes estruturas de engenharia	Litologia e estrutura geológica, profundidade da rocha/nível d'água Cavidades, minas Propriedades físicas das rochas/solos	Imageamento geofísico, geotécnica Imageamento geofísico, engenharia civil e arqueologia Sedimentologia, geotécnica, física do solo/rocha
Avaliação de recursos hídricos subterrâneos	Distribuição da água subterrânea, qualidade e uso	Geologia, geofísica, engenharia de águas, química da água
Investigação de solos contaminados	Poluição da água subterrânea Lixiviação de depósitos de lixo (formação de migração e química/reatividade) Destino de poluentes orgânicos (líquidos leves e densos de petróleo)	Geofísica, geotécnica, engenharia, química da água, microbiologia (toxicologia) Hidrogeologia, química da água, engenharia, toxicologia, microbiologia, modelagem de transporte de fluidos, leis ambientais Imageamento geofísico, química, modelagem do fluxo de fluidos, modelagem de reações químicas, leis
Depósitos de resíduos perigosos	Segurança de depósitos de lixo tóxico	Geofísica, engenharia, toxicologia
Ameaças naturais rápidas ou em grande escala	Deslizamento de terras, erupções vulcânicas e previsão de terremotos; planejamento de melhorias	Vulcanologia, sismologia, modelagem matemática, imageamento geofísico, engenharia, geografia-GIS
Mudanças climáticas globais	Variações do nível do mar, aquecimento global, inundações catastróficas	Estratigrafia, paleontologia, vulcanologia, modelagem matemática, dinâmica dos fluidos, geofísica, geografia-GIS, física da atmosfera

COSTA et al (2001) produziu um imageamento elétrico 2-D de alta resolução aplicado à avaliação ambiental de posto de combustível em Porto Alegre, RS. Concluíram que essa técnica é uma ferramenta confiável e importante no desenvolvimento de pesquisas dessa natureza. Os perfis geofísicos marcaram com grande definição anomalias que demonstraram estar relacionadas diretamente à pluma de contaminação no subsolo, que por sua vez está associada com as atividades do posto de combustível estudado, já que as análises revelaram a presença de compostos derivados de petróleo na amostra de água selecionada em um dos poços de monitoramento instalados na área do estabelecimento. Determinaram, ainda, com o auxílio de testes de permeabilidade, que a pluma tende a seguir a direção nordeste, nordeste, provavelmente migrando lentamente junto às águas subsuperficiais, até finalmente atingir o Rio Guaíba, nas imediações do Porto de Porto Alegre.

Conforme COSTA E SILVA (2001) em São Paulo, Recife e Belém, estudos em diversos cemitérios constataram casos de contaminação das águas. Em Belém foi fechado o cemitério do Bengui, baseando-se nos dados da geofísica. Além disso, a geofísica ajudou na elaboração do primeiro *Termo de Referência para Elaboração de Estudos visando a Implantação ambientalmente Correta de Cemitérios Horizontais*. A autora aborda no artigo o programa PAX-VÓBIS, proposto pelo Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Pará, para a Prefeitura de Belém, tendo os seguintes objetivos para o uso da geofísica: estudos ambientais e monitoramento de cemitérios, revisão da lei de implantação de cemitérios e curso sobre estudo de impacto de cemitérios usando a geofísica. Dessa forma fica comprovada a eficiência do uso da geofísica aplicada a cemitérios.

MORAES & GRAZINOLI (2001), através do método da resistividade, estudaram a contaminação do subsolo por um pesticida organoclorado denominado BHC e seus subprodutos em Duque de Caxias, RJ. As técnicas usadas foram as SEV's com configuração Schlumbereger e CE com arranjo Werner. As anomalias condutivas na área do foco de contaminação podem ser devidas à presença da contaminação por triclorobenzeno e subprodutos da reação entre a cal e o pesticida, ocorrida em 1995 como tentativa de remediação.

SILVA et al (2001) utilizaram os métodos elétricos e eletromagnéticos para detectar as variações de condutividade elétrica causadas por terrenos cársticos em

municípios próximos a Curitiba, PR. O terreno cárstico, propenso a colapso, apresenta dutos e cavidades que podem estar vazias ou preenchidas por água e lama, oferecendo risco à população residente na área. Os métodos elétricos e eletromagnéticos podem detectar as variações de condutividade elétrica causadas por tais feições e prover seu adequado mapeamento. Contudo, os ruídos, principalmente indutivos, nas áreas urbanas, tornam os métodos elétricos com corrente contínua ou muito baixa frequência vantajosos com relação ao EMI. Mostram-se seções de resistividade muito consistentes obtidas em área urbana, indicando, particularmente, uma zona de possível alteração e percolação em terreno calcário, em frente a uma escola na cidade de Almirante Tamandaré, PR. Os exemplos aqui mostrados indicam que os métodos geofísicos, principalmente os geo-elétricos, são ferramentas que podem auxiliar muito na avaliação de risco geológico em terrenos cársticos.

HAMADA et al (2002) demonstraram as limitações da metodologia usualmente empregada no monitoramento do subsolo em locais de disposição de lixo, os sistemas de poços de monitoramento. Para tanto, realizaram investigações geofísicas utilizando caminhamento elétrico e sondagens com piezocone de resistividade em dois casos no interior do Estado de São Paulo. Os locais estudados 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. Os sistemas de poços de monitoramento consistem em poços instalados à montante (*background*) e outros à jusante, com o intuito de monitorar o aquífero freático. Constatou-se que esses sistemas 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. A geofísica dá suporte na caracterização do meio físico – nível d'água, fluxo subterrâneo, espessura da cobertura inconsolidada, presença de fraturas – e nas relações entre os resíduos e local de disposição. Dessa forma, quando são realizados os levantamentos geofísicos, os resultados permitem localizar novos poços de monitoramento e orientar ensaios intrusivos necessários para a adequada caracterização geoambiental da área.

SHIRAIWA et al (2002) buscaram informações sobre o impacto causado pela área de disposição de lixo (antigo lixão) de Cuiabá. Para tanto realizaram

levantamentos de resistividade (SEV), caminhamento eletromagnético indutivo (EMI) e GPR. As SEV's foram adquiridas com arranjo Schlumberger. Os resultados mostraram que a interpretação integrada geofísica-geológica permitiu caracterizar a área do lixão e a pluma de contaminação resultante. Mostrou também que a pluma contaminante atingiu a zona saturada. Da interpretação das SEV's caracterizou-se a transição solo-rocha, a espessura do lixo e as profundidades do topo da rocha e do aquífero freático.

Dando continuidade aos estudos de ELIS & ZUQUETTE (1997), SILVA et al (2003) detectaram a pluma de contaminação provocada pelo lixão desativado de Ribeirão Preto, SP. Os ensaios de resistividade e eletromagnético indutivo indicaram que a contaminação está avançando dentro da zona saturada e para fora da área do Lixão.

MOREIRA & DOURADO (2003) realizaram uma análise temporal de pluma de contaminação por meio de GPR com antena de 100MHz. A técnica do GPR apresenta vantagens neste tipo de estudo, devido à facilidade de aquisição de dados, possibilitando a execução de perfis, versatilidade do equipamento em campo, dentre outros. Contudo, a profundidade de penetração é limitada pela presença de camadas com alta condutividade. Os autores propuseram, nesse estudo, uma análise comparativa dos dados obtidos através do GPR em um intervalo de cinco anos, com a finalidade de determinar a posição atual da pluma contaminante. A comparação mostrou a evolução da pluma de contaminação, evidenciando a migração de 10 a 15m na direção norte.

STEVANATO et al (2003) utilizaram dados de cargabilidade e resistividade 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.

MALAGUTTI FILHO & MOURA (2003) empregaram os métodos geofísicos da eletrorresistividade e a polarização elétrica induzida na caracterização geoambiental do aterro controlado de Piracicaba, SP. Os resultados mostraram que a resistividade e a polarizabilidade são sensíveis à presença dos resíduos urbanos, que

apresentaram altos valores de polarizabilidade refletindo a presença de materiais polarizáveis dentro da cava de resíduos, como metais enferrujados, restos eletrônicos e papel impresso. A polarizabilidade, muito mais do que a resistividade, foi sensível à presença dos resíduos urbanos, sendo mais eficiente no mapeamento dos limites laterais da cava de resíduos. A resistividade foi sensível à presença da contaminação no subsolo ao redor dos limites da área de resíduos, sendo possível o mapeamento das zonas contaminadas, ao contrário da polarizabilidade, que não apresentou evidências de sensibilidade na presença da contaminação.

GALLAS et al (2003), utilizando os métodos geoeletricos, fizeram o mapeamento da pluma de contaminação do lixão do Alvarenga em São Bernardo do Campo, SP. Foram determinados os limites da pluma e a permeabilidade dos solos locais, além de fornecidas orientações gerais para recuperação ambiental da área. Os resultados obtidos mostraram que os métodos do potencial espontâneo, eletrorresistividade e polarização induzida são excelentes ferramentas em estudos ambientais que envolvam áreas contaminadas, permitindo uma precisa delimitação da área atingida pelos poluentes, bem como os fluxos presentes.

MOURA & MALAGUTTI FILHO (2003), dando continuidade ao trabalho de MALAGUTTI FILHO et al (1997), utilizaram os métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida (domínio do tempo) com o objetivo de avaliar as potencialidades da integração dos métodos na caracterização geoeletrica da área do aterro controlado da cidade de Rio Claro, SP. As técnicas aplicadas foram a da sondagem elétrica vertical e do caminhamento elétrico (configurações Schlumberger e dipolo-dipolo, respectivamente). Os autores concluíram que a interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, além de reduzir a ambigüidade dos modelos geoeletricos unidimensionais e bidimensionais interpretados, permite determinar a geometria das cavas de resíduos, zonas de percolação de chorume e identificar os diferentes litotipos das Formações, identificando materiais arenosos e siltosos. Ficou evidente, ainda, 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.

LAGO et al (2003) estudaram as relações espaciais entre uma área de disposição de RSU e o meio físico, numa área de ocorrência de arenitos do Grupo Bauru, na cidade de Bauru, SP. Foram realizados ensaios de polarização induzida e eletrorresistividade, com as técnicas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo e sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger. Os resultados do caminhamento elétrico mostraram 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, conclui-se que 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 SEV's 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.

Continuando esse trabalho, LAGO & ELIS (2004) utilizaram, agora, além da eletrorresistividade e da polarização induzida, o método do potencial espontâneo. Com as medidas de potencial espontâneo, foi construído um mapa de potencial espontâneo da área de estudo. Como foram tomados cuidados na escolha do local da estação base, no uso de eletrodos não-polarizáveis, não ocorrendo registro de chuvas na área no período do levantamento e sem considerar a influência dos resíduos, o potencial medido deve estar associado ao comportamento do fluxo da água subterrânea, que é caracterizado pelo aumento dos valores de potencial natural no sentido do fluxo. O fluxo da água subterrânea detectado pelo potencial espontâneo segue no sentido principal de leste para oeste-noroeste da área. Os resultados obtidos pelos ensaios geofísicos possibilitaram a identificação da pluma de contaminação e orientaram na locação de ensaios por métodos diretos de investigação, assim como, a locação de poços de monitoramento permanente na área; portanto, mostraram-se ferramentas importantes na caracterização geoambiental de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.

STEVANATO et al (2004) mapearam a pluma de contaminação no aterro sanitário de Coronel Vivida, PR, utilizando polarização induzida, imageamento elétrico 2-D (CE, arranjo dipolo-dipolo) e sondagem elétrica vertical. A aplicação dos métodos geofísicos elétricos empregados neste trabalho revelou-se satisfatória, tanto na definição dos limites lateral e vertical do depósito, mapeamento da pluma de contaminação (chorume), quanto na caracterização de zonas de fratura no substrato geológico (basaltos), percoladas por fluidos condutivos.

DEHAINI (2004) aplicou o GPR em estudos de contaminação por hidrocarbonetos. As seções de GPR apresentaram anomalias na forma de "ausência" de reflexão de sinal denominadas por "zonas de sombra" ou "apagão". Apesar das condições adversas de campo, o método GPR possibilitou a delimitação da pluma de contaminação além da extensão detectada inicialmente por métodos diretos, o que mostra sua aplicabilidade e eficiência na detecção deste tipo de contaminação.

SOUZA et al (2004) aplicaram métodos geoeletricos no mapeamento de contaminação por disposição clandestina de resíduos domésticos e esgoto em áreas do Parque de Ciências e Tecnologia, situado na região da Água Funda, próxima a divisa dos municípios de São Paulo, São Bernardo do Campo e Diadema, ambos no Estado de São Paulo. Os métodos utilizados neste estudo são a eletrorresistividade (SEV's com arranjo Schlumberger) e o eletromagnético indutivo. A contaminação foi confirmada nos ensaios, sendo determinado o sentido do fluxo da pluma de contaminação.

DAHLIN (2004) citou alguns exemplos do uso de técnicas de imageamento elétrico em aplicações ambientais e de engenharia em vários países. O autor afirma que a tendência atual é o uso de arranjos não convencionais de eletrodos, que são mais eficientes em equipamentos com multi-eletrodos e multi-canais de medição.

PEREIRA et al (2004) realizaram um diagnóstico da contaminação hídrica subterrânea e superficial provocada por resíduos sólidos urbanos e de curtume, no município de Alagoinhas, BA. Contaminações hídricas estão sendo associadas à presença de um antigo lixão, aos resíduos de um curtume, e ao atual aterro sanitário municipal. Para tal caracterização utilizou-se geofísica elétrica em conjunto com análises físico-químicas e bacteriológicas de águas. Resultados de 49 SEV's delimitaram uma anomalia condutiva tridimensional, que se estende desde 5m a mais

de 40m de profundidade. Esta é interpretada como resultante da invasão de líquidos originados do lixão e lagoas residuais do curtume.

GALLAS et al (2005) realizaram ensaios de resistividade no aterro sanitário de Londrina, que se situa na Bacia do Paraná, localmente representada por rochas basálticas da Formação Serra Geral. Foi estabelecida uma correlação entre os valores mais baixos de resistividade e as possíveis contaminações, uma vez que a condução elétrica ocorre principalmente através de íons, que são abundantes no chorume. Também se encontrou a direção geral do fluxo de contaminação (SE). Outra descoberta foi que também há um fluxo para SW, que flui através de fraturas horizontais ou superfícies de alteração em contatos dos derrames basálticos.

SANTOS (2005), dando continuidade ao trabalho de SHIRAIWA et al (2002) no antigo lixão de Cuiabá, MT, utilizou os métodos geofísicos da eletroresistividade (CE e SEV's com arranjo Schlumberger) e eletromagnético indutivo para investigar o subsolo, objetivando a determinação da extensão e evolução temporal da pluma de contaminação provocada pelo chorume produzido pela degradação dos resíduos sólidos da área. A combinação destes métodos associados com a interpretação geológica do local contribuem para acompanhar a evolução da pluma e seu monitoramento.

HUBER et al (2005) aplicaram os métodos elétrico (CE com arranjo dipolo-dipolo), eletromagnético indutivo e GPR no delineamento de zonas contaminadas por resíduos de um curtume em Várzea Grande, MT. Os mapas de condutividade elétrica aparente e as tomografias elétricas 2D permitiram localizar e diferenciar as áreas potencialmente contaminadas, suspeitas de contaminação e não contaminadas, tanto em extensão lateral, como em profundidade. O GPR permitiu delinear com precisão os limites das zonas potencialmente contaminadas e livres de contaminação.

ZAGO et al (2005) aplicaram o método da eletroresistividade (SEV's) no monitoramento ambiental de área urbana da Farolândia, em Aracaju, SE. O diagnóstico ambiental da área estudada, realizada após o levantamento geofísico, identificou uma grande quantidade de água. A uma profundidade de 15 metros há um material de condutividade elevada, indicando a presença de água salobra.

BRITO & BATISTA (2005) aplicaram o método da eletroresistividade (SEV's com arranjo Schlumberger) no monitoramento ambiental da bacia

hidrográfica do Riacho Caboblé. O objetivo foi verificar o nível de salinização do solo e subsolo em comparação com os dados de amostras de solos no estudo do diagnóstico/prognóstico dos impactos ambientais da referida bacia provocados ao longo do tempo pela empresa denominada AMBIENTEC. Os resultados obtidos estão em consonância aos dados geoquímicos, com o diferencial que o levantamento geofísico foi realizado em um intervalo menor de tempo e é menos oneroso.

Visando à localização e o delineamento de uma possível pluma de contaminação de hidrocarbonetos, ORTEGA & PORSANI (2005) realizaram um levantamento utilizando os métodos GPR e tomografia elétrica (eletrorresistividade – CE dipolo-dipolo). A área de estudos está localizada no Estado de São Paulo, e corresponde a um posto de abastecimento de locomotivas, onde se encontra com pontos de contaminação originados por hidrocarbonetos derramados ou vazados. Os resultados preliminares apresentaram assinaturas geofísicas nítidas de três regiões anômalas coincidentes. Para as regiões anômalas, os perfis GPR mostraram ausência de reflexão, denominada de zona de sombra; e as seções de caminhamento elétrico dipolar mostraram regiões de baixa resistividade (elevada condutividade). Provavelmente, as anomalias condutivas são devido à ação da biodegradação, e que podem estar relacionadas com a contaminação por hidrocarbonetos (óleo diesel).

LAGO & ELIS (2005), dando continuidade ao trabalho de LAGO et al (2003) e LAGO & ELIS (2004), utilizaram a técnica de sondagem elétrica vertical para estudar uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru, SP. A técnica forneceu uma série de informações que, por sua vez, auxiliam no processo de análise da área de estudo quanto às características do meio físico e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição.

Como visto neste item, a geofísica pode ser usada com sucesso em diversos segmentos da área ambiental, tais como cemitérios, depósitos de lixo urbano e industrial, intrusões salinas, áreas contaminadas por pesticidas, derivados de petróleo (hidrocarbonetos), esgoto ou qualquer outro contaminante que interfira na condutividade ou resistividade do solo e/ou da água subterrânea. Ficou evidente que os métodos mais empregados para o estudo dessas contaminações são os geoelétricos, principalmente a eletrorresistividade (SEV e CE), o eletromagnético indutivo e o GPR.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Cuiabá localiza-se na região Centro Oeste do Brasil, no estado de Mato Grosso. Faz parte da província geomorfológica da Baixada Cuiabana. A altitude varia de 146 a 250 metros na área urbana e seu entorno. A população é da ordem de 530 mil habitantes, a área do município de 3.224,68 Km² 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 1.250 a 1.500 mm durante o ano e a precipitação é mais intensa no verão. Entre os meses de abril e outubro ocorre um período seco, com raras precipitações.

De acordo com SAFFORD (2001) a Bacia do rio Cuiabá abrange uma extensa área de cerca de 100.000 Km² até chegar no rio Paraguai, formando o Pantanal Mato-grossense, área de proteção e preservação ambientais.

3.1.1 Localização da Área

O aterro sanitário localiza-se a nordeste da área urbana de Cuiabá, ao lado do Garimpo do Mineiro, entre o Bairro do CPA, em Cuiabá, e a Rodovia Manoel Pinheiro, que liga Cuiabá à Chapada dos Guimarães, conforme Figura 7. A área do aterro é de aproximadamente 15,16 ha e as coordenadas geográficas de latitude e longitude são respectivamente: 15°35'12''S e 56°04'16''W.

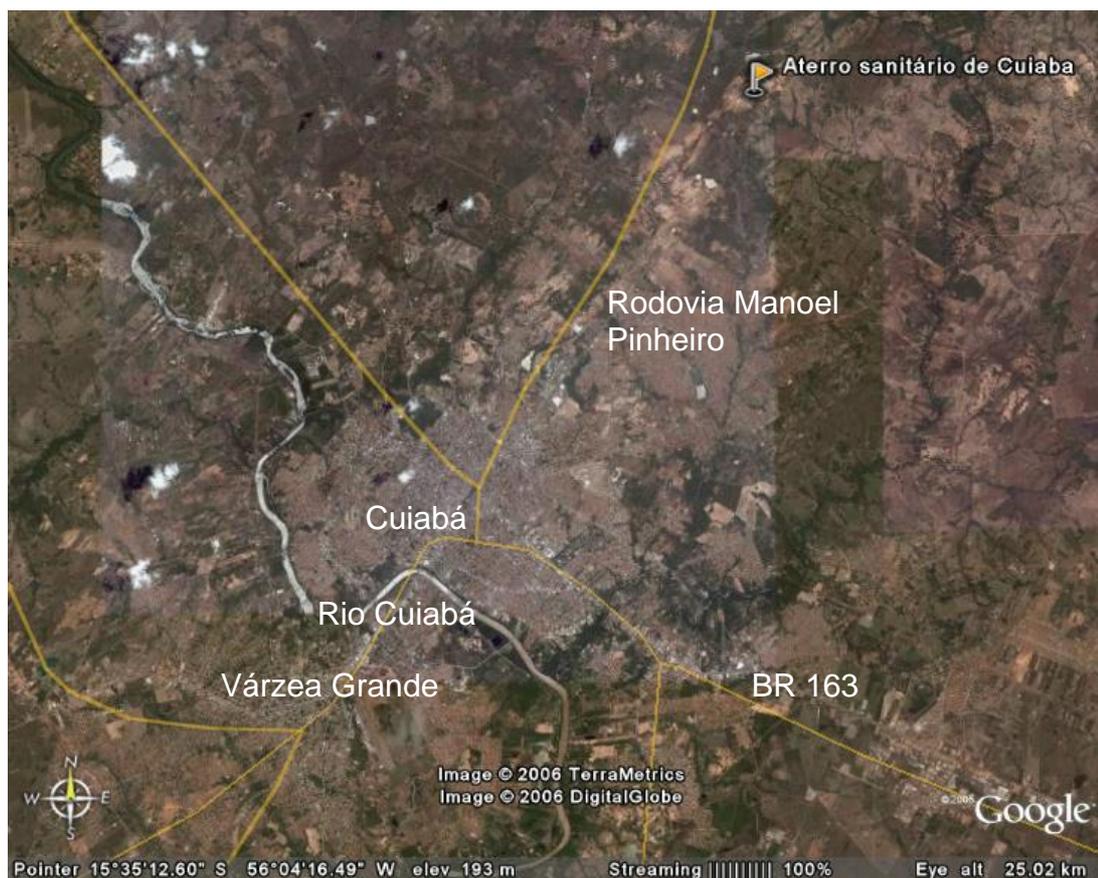


FIGURA 7 – Localização do aterro sanitário em relação à cidade de Cuiabá (adaptado de GOOGLE, 2006)

A noroeste há uma área onde uma empresa extrai cascalho, conforme Figura 8. Esta área será utilizada posteriormente para ampliação do aterro sanitário.



FIGURA 8 – Área do aterro sanitário de Cuiabá (adaptado de GOOGLE, 2006)

A 1ª célula do aterro e as lagoas de tratamento do chorume não tiveram impermeabilização de base, sendo fontes potenciais de contaminação do subsolo. As demais células de deposição de lixo possuem impermeabilização de base com manta de PEAD, assim como drenagem de chorume, o qual é encaminhado ao tratamento através de tubulações plásticas. Também há drenagem de águas superficiais e queima de gases.

Na Figura 8 pode-se observar a trajetória do chorume tratado ao sair das lagoas de tratamento. Nota-se, com isso, que a cota topográfica vai diminuindo nesse sentido.

Ao sul do aterro localiza-se uma antiga área de garimpo de ouro, denominada “Garimpo do Mineiro”. A geologia desta área é composta por filitos e metarenitos, possuindo fraturas preenchidas por quartzo. O metarenito e as fraturas podem facilitar a migração do chorume que percola da primeira célula do aterro, que não possui impermeabilização de base.

3.1.2 Geologia da área

A área estudada se situa nos domínios geológicos do Grupo Cuiabá, pertencente a Faixa Interna de Dobramentos Paraguai, mais precisamente no compartimento geomorfológico denominado “Baixada Cuiabana”, compreendido entre o Planalto do Guimarães e a Província Serrana.

Em relação a geomorfologia, visualiza-se, na região da Baixada Cuiabana, dois compartimentos de relevos, representados principalmente por diferenças litológicas. Nas regiões onde predominam metarenitos o relevo possui cotas mais elevadas, devido à resistência dessas rochas ao intemperismo. As regiões adjacentes, compostas na sua maioria por filitos possuem uma topografia arrasada (LUZ et al., 1980).

Segundo a proposta de LUZ et al (1980), que subdivide o Grupo Cuiabá na região da Baixada Cuiabana em 9 Subunidades, a região do aterro sanitário de Cuiabá está inserida na Subunidade 5 em contato com a Subunidade 6, conforme Figura 9.

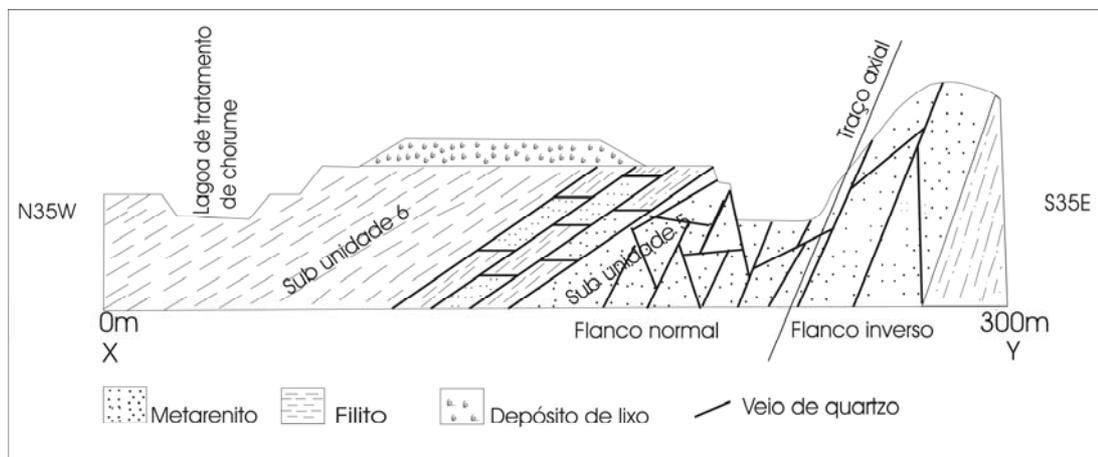


FIGURA 9 – Perfil geológico transversal do aterro sanitário de Cuiabá (FERNANDES et al, 2006)

O aterro situa-se imediatamente ao lado do Garimpo do Mineiro, o qual teve sua geologia minuciosamente descrita por SILVA (1999) em sua dissertação de mestrado. Portanto esta descrição cabe também à porção sudeste do aterro. De acordo com o referido autor, nesta área foi distinguida uma seqüência de metassedimentos, parte da Subunidade 5, com rochas filíticas em sua base, uma unidade intermediária marcada por uma alternância entre filitos, metassiltitos e

metarenitos finos. Sobre estas se seguem rochas metareníticas quartzosas de granulação fina a grossa intercaladas a filitos esverdeados. No topo da seqüência ocorre uma unidade constituída de quartzo-filitos cuja feição característica é sua cor de alteração rósea. Os termos mais pelíticos são compostos basicamente por mica branca e por uma menor quantidade de quartzo com uma abundância variável de opacos. Os termos mais quartzosos são formados basicamente por quartzo, e uma menor quantidade de feldspato e mica branca. As unidades acima descritas passam a metadiamicritos com matriz pelítica, intercaladas a metarenitos feldspáticos correspondentes a Subunidade 6.

A litologia de parte da Subunidade 5, presente no Garimpo do Mineiro, foi descrita por SILVA (1999), conforme Figura 10, sendo dividida em três conjuntos:

- Conjunto 1 - metarenitos e metarenitos conglomeráticos, com intercalações de camadas centimétricas de filitos verdes laminados;
- Conjunto 2 - quartzo-filitos, de coloração rósea, finamente laminados. São constituídos por quartzo, micas e opacos;
- Conjunto 3 - metadiamicritos, ocorrendo por vezes com intercalações de camadas de metarenito feldspático.

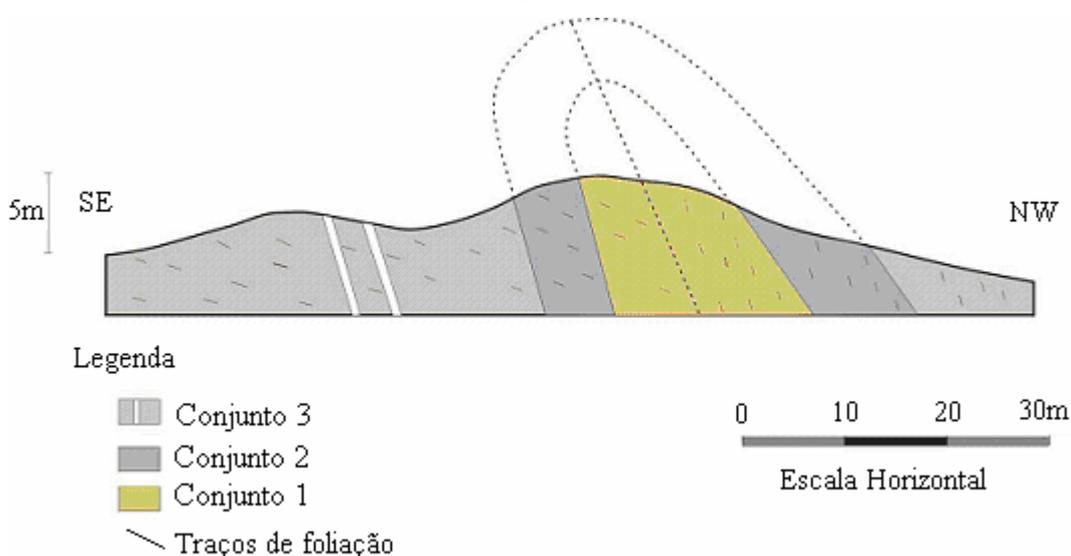


FIGURA 10 – Geologia do Garimpo do Mineiro (adaptado de SILVA, 1999)

Devido à elevada permeabilidade e porosidade e à presença de fraturas preenchidas por quartzo, a área do aterro situada na Subunidade 5 é mais passível de contaminação por chorume proveniente do aterro.

De acordo com SILVA (1999), a área correspondente à Subunidade 6 é composta basicamente por filitos conglomeráticos, que possuem cores que variam entre cinza-esverdeada e esverdeada (quando frescos) e amarelada, amarronzada e avermelhada (quando alterados). A granulação é fina e a matriz filítica, localmente arenosa. Os clastos geralmente são de fragmentos de rocha, cujos diâmetros variam de grânulos a calhaus, subarredondados a angulosos. Há também a presença de metarenitos, que ocorrem em lentes, sendo compostos basicamente por quartzo e cristais alterados de feldspato.

VILELA et al (2006) estudaram o solo na região do aterro (Subunidade 6). Os autores caracterizaram os horizontes do solo em quatro pontos localizados a nordeste e noroeste do aterro, conforme Figura 11. Tal caracterização foi realizada através da escavação de trincheiras, seguida de descrição geológica.

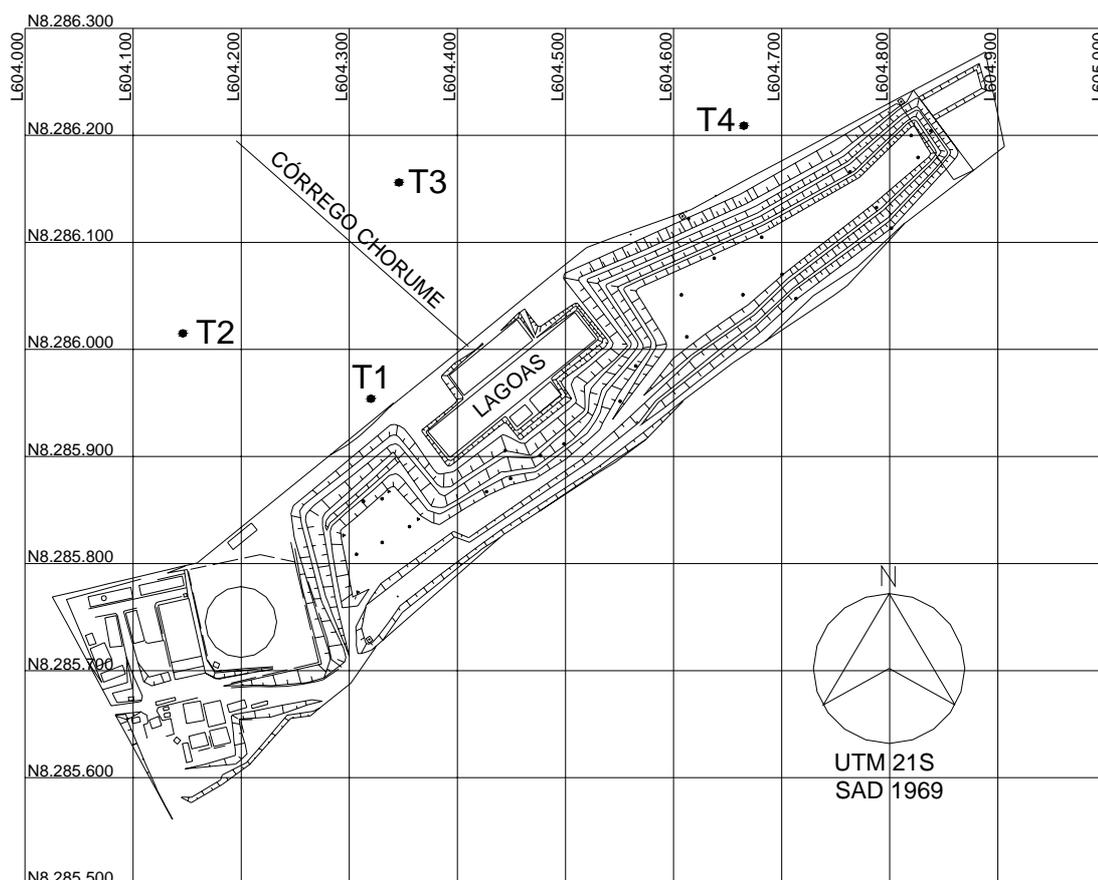


FIGURA 11 – Localização das trincheiras onde o solo foi caracterizado

A Figura 12 ilustra os horizontes da Trincheira T1.

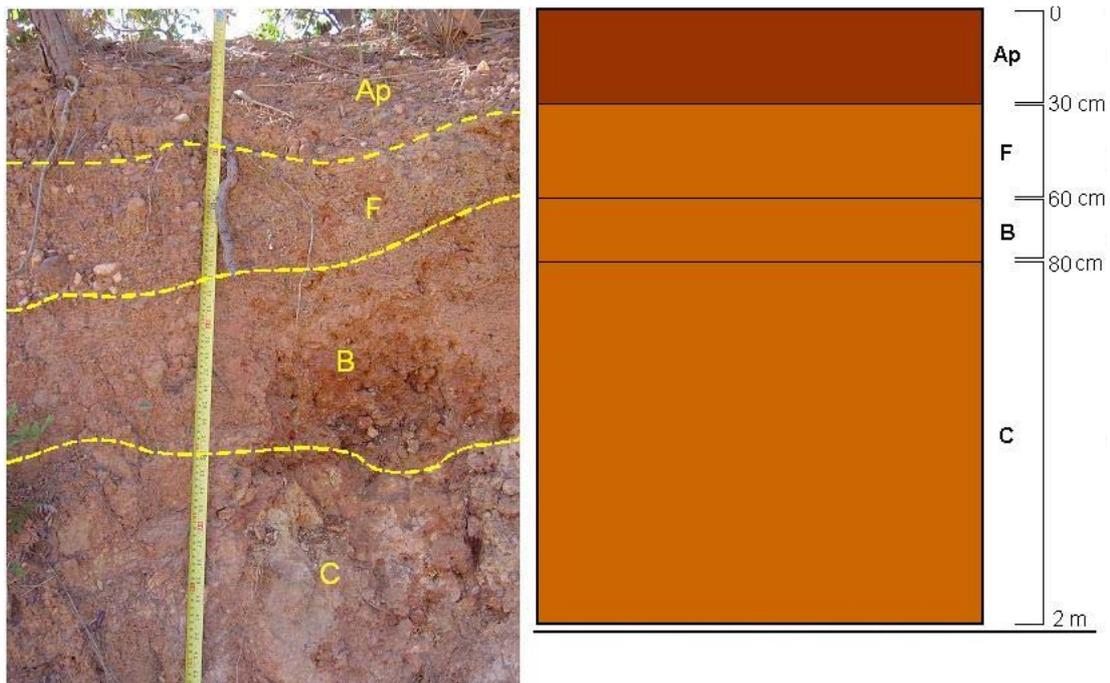


FIGURA 12 – Perfil da Trincheira T1 (VILELA et al, 2006)

De acordo com VILELA et al (2006), na Trincheira T1 o solo é constituído por quatro níveis de horizontes, sendo estes definidos por:

- Horizonte “Ap” (Antrópico) - concentrado em quartzo;
- Horizonte “F” - concentrado em laterita (óxido de ferro);
- Horizonte “B” - sem vestígio da rocha e sem laterita, e
- Horizonte “C” - apresenta vestígios da rocha (Filito alterado).

Pelas características de cada horizonte constatou-se que os Horizontes “Ap” e “F” são do tipo Plintossolo Petro-Plíntico, constituído por couraças ferruginosas e cascalhos de quartzo, sendo muito porosos, e com isso, apresentando grande permeabilidade (VILELA et al, 2006).

Já os Horizontes “B” e “C” são camadas impermeáveis por possuírem argilas e serem pouco porosos (VILELA et al, 2006).

A Figura 13 ilustra os horizontes da Trincheira T2.

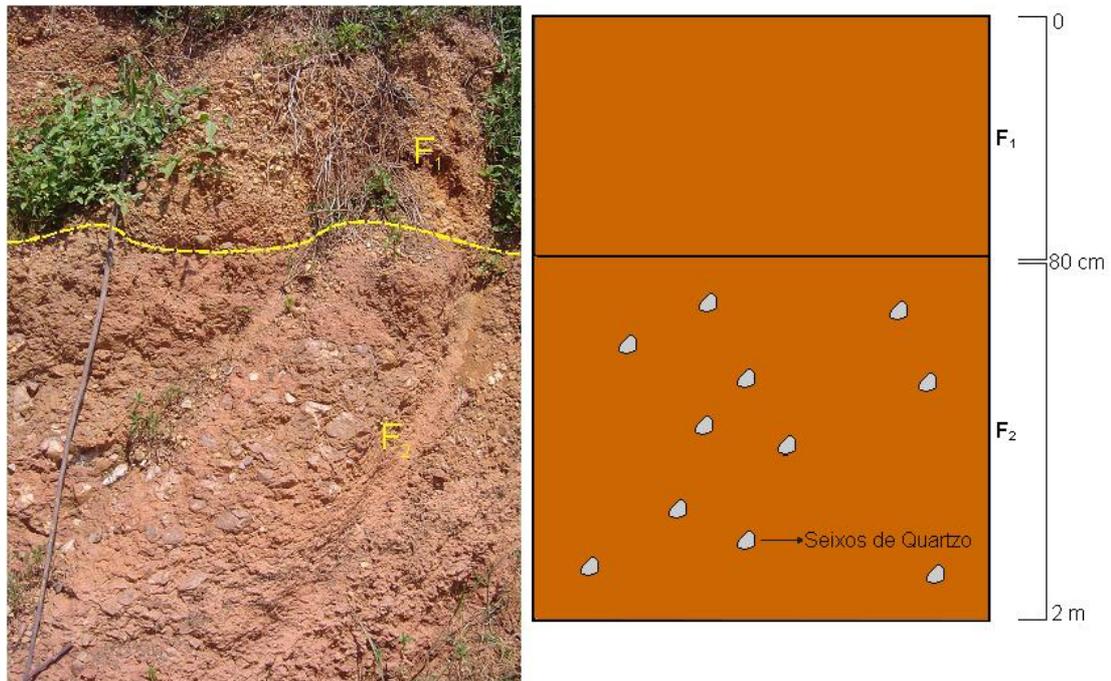


FIGURA 13 – Perfil da Trincheira T2 (VILELA et al, 2006)

Segundo VILELA et al (2006), a Trincheira T2 é constituída pelo Horizonte “F” (descrito na Trincheira T1), porém com algumas características distintas, como a presença de uma couraça ferruginosa formada pela cimentação do óxido de ferro em uma camada sedimentar (fenômeno da concentração absoluta) e a presença de dois níveis, conforme a descrição a seguir:

- “F1” – caracterizado por possuir um cascalho mais fino e ter uma espessura de 80 cm;
- “F2” – caracterizado por possuir uma couraça ferruginosa pouco intemperizada com fragmentos de quartzo e ter 1,20 m de espessura.

O solo também é denominado como Plintossolo Petro-Plíntico (VILELA et al, 2006).

A Figura 14 ilustra os horizontes da Trincheira T3.

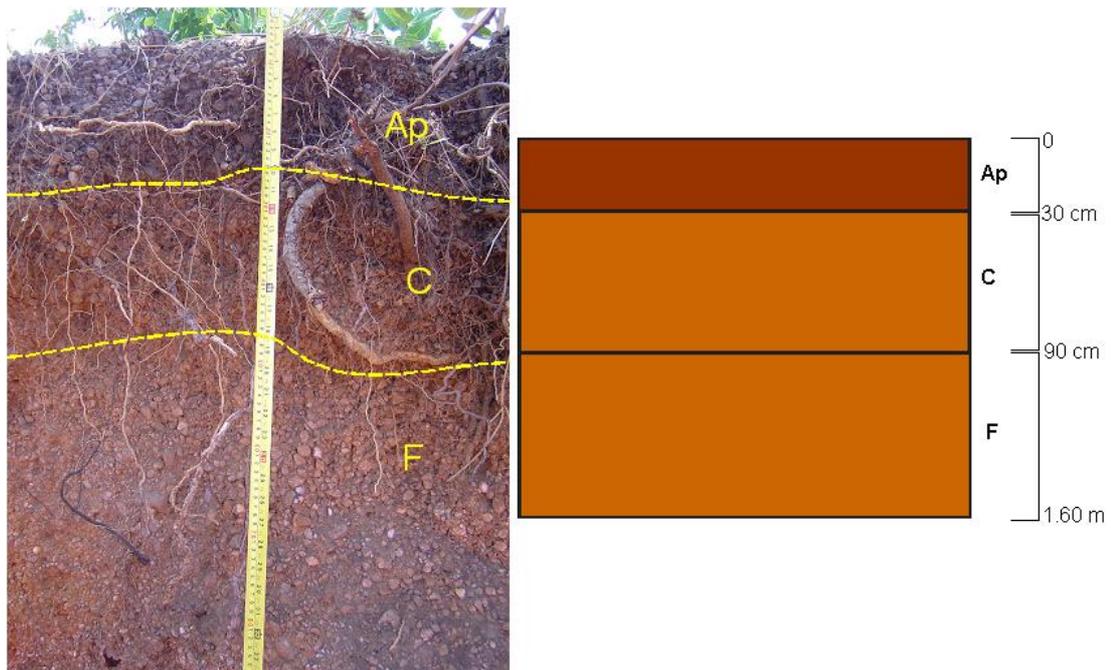


FIGURA 14 – Perfil da Trincheira T3 (VILELA et al, 2006)

Segundo VILELA et al (2006), a Trincheira T3 é constituída pelos Horizontes “Ap”, “C” e “F”, assim descritos:

- Horizonte “Ap” - composto pelas mesmas características do Horizonte “Ap” da Trincheira T1 mas com coloração cinza escura;
- Horizonte “C” - possui cascalho de quartzo e pouca matriz areno-argilosa centimétrica e milimétrica;
- Horizonte “F” - caracterizado por possuir grãos de quartzo milimétrico e alguns centimétricos cimentados por óxido de ferro (FeO_2) pouco alterado.

A Figura 15 ilustra os horizontes da Trincheira T4.

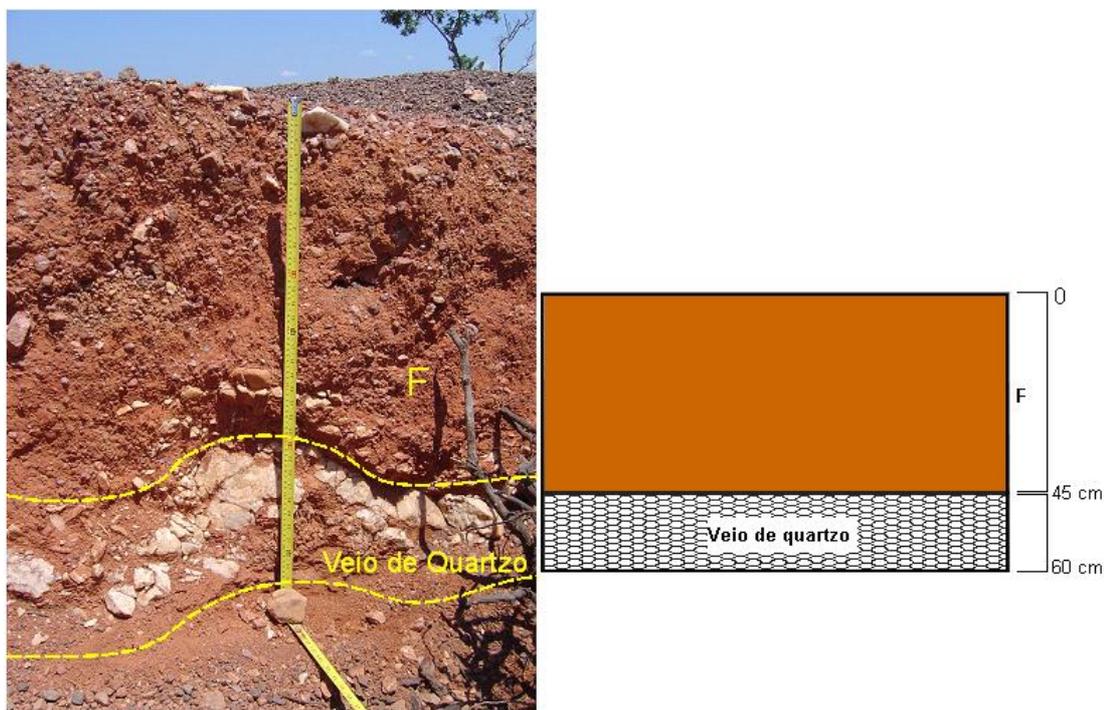


FIGURA 15 – Perfil da Trincheira T4 (VILELA et al, 2006)

A Trincheira T4 possui um só tipo de horizonte e um veio de quartzo de aproximadamente 15 cm. O horizonte descrito é o “F”, que possui as mesmas características do Horizonte “F” da Trincheira T3 (VILELA et al, 2006).

Como observado na Trincheira T1 a rocha de base é o filito. Nas demais trincheiras não se encontrou o filito pois o mesmo encontrava-se mais profundo. Simplificadamente pode-se afirmar que, na área estudada, a rocha de base - o filito - é coberta por camadas de cascalhos de quartzo e laterita, podendo apresentar fraturas preenchidas por quartzo em alguns pontos. A espessura das camadas sobre o filito varia de alguns centímetros a alguns metros.

SILVA (2001) também estudou o solo que compõe a área do aterro. Os ensaios revelaram que o solo é argilo-siltoso, classificado com 7,85% de areia, 35,11% de silte e 57,04% de argila.

De acordo com a UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (2006), os filitos são rochas metamórficas intermediárias entre ardósia e xisto na evolução metamórfica de pelitos. Diferentemente da ardósia, o plano de xistosidade é bem definido e brilhante, determinado pela disposição de mica muscovítica e clorita principalmente.

De acordo com SILVA et al (2006), os filitos apresentam uma condutividade hidráulica muito baixa. Em uma mina de Minas Gerais os autores encontraram um

valor de $0,13 \text{ cm.h}^{-1}$, provavelmente em razão do maior número de microporos e da textura mais fina apresentada pelo filito, fato também relatado por SILVA (1990) e SOBREIRA (2001).

Segundo SILVA (2006), a infiltração da água no filito é lenta, devendo estar relacionada à sua alta percentagem de silte, que tem facilidade de se desprender pelo impacto das gotas da chuva, produzindo um selamento superficial. Dessa forma, pode provocar escoamento superficial da água ao invés de infiltração.

A microporosidade encontrada por SILVA et al (2006), para o filito da mesma mina em MG, foi de 42,3%, enquanto a macroporosidade foi de apenas 15,5%. A porosidade total foi de 57,6%. SILVA et al (2006) afirmam, ainda, que o filito apresenta boa capacidade de armazenamento de água, sendo encontrada uma capacidade de campo de 31,80%, valor considerado alto, em razão de seu elevado teor de argila.

A subunidade 6, com predominância filítica, encontra-se na porção noroeste do aterro e a jusante do mesmo. Nesta área topograficamente a jusante do aterro - entre este e a estrada que liga o bairro do CPA à Rodovia Manoel Pinheiro - existe atualmente extração de cascalho. Neste local a Prefeitura de Cuiabá pretende, num futuro próximo, fazer a ampliação do aterro.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO ATERRO SANITÁRIO

A Central de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos de Cuiabá é compreendida por diversas unidades, tais como o setor de recepção e pesagem do lixo, usina de triagem, onde se realiza a classificação e prensagem do material, passando para o beneficiamento de plásticos, setor de compostagem e o aterro sanitário, conforme Figura 16.

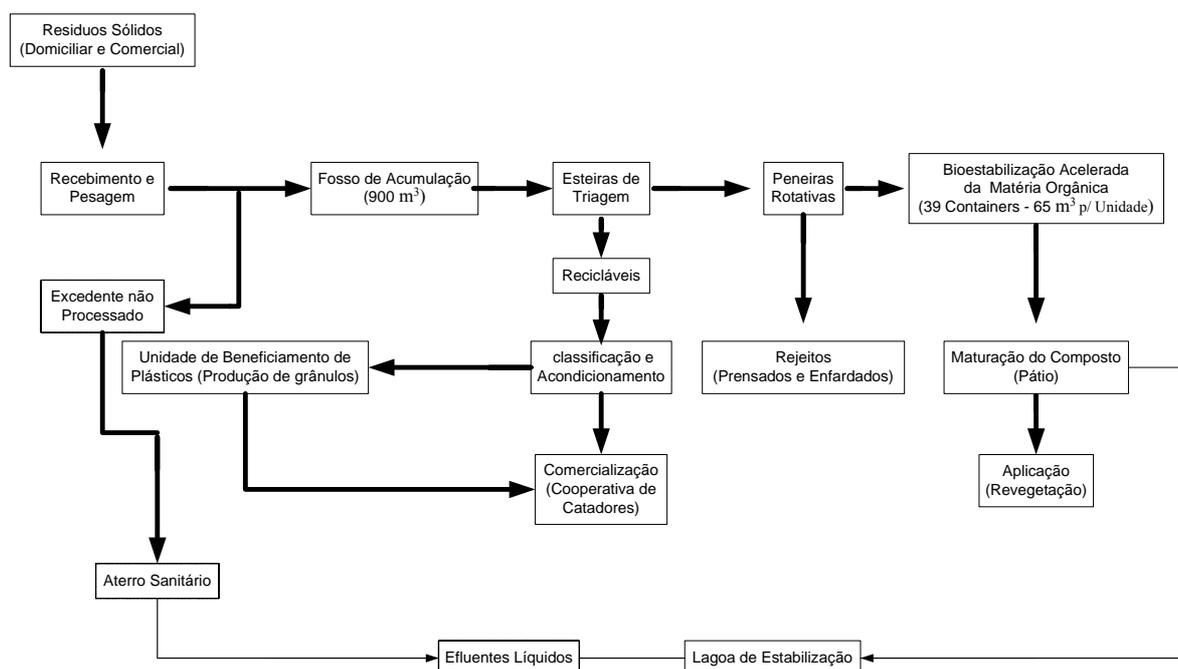


FIGURA 16 - Fluxo dos resíduos na central de disposição final de resíduos sólidos urbanos da cidade de Cuiabá/MT (CAPOROSI, 2002)

O aterro possui uma guarita para o registro de entrada dos caminhões de coleta, seguida de uma balança rodoviária para pesagem e controle, com capacidade para 34 toneladas; um pátio de recepção de lixo e fosso de acumulação com capacidade para 730 m³, onde é depositado o lixo bruto resultante da coleta regular (SMSU, 2001).

O lixo bruto é transportado mecanicamente até as esteiras de triagem, onde são retiradas, através da catação, os materiais inertes. A capacidade nominal de triagem dos materiais está relacionada com a velocidade ergonômica do conjunto das esteiras da triagem. É essa velocidade que permite a triagem manual do lixo pelos catadores. A capacidade nominal de 200 t/dia é determinada pela capacidade nominal de 5 t.h⁻¹ por esteira de triagem em operação durante 8 horas/dia (SMSU, 2001).

Nesse setor, ocorre a separação dos materiais recicláveis presentes no lixo, através de cinco linhas de esteiras alimentadas através de moegas dosadoras onde é feita a triagem manual. A separação dos materiais ferrosos é realizada com um dispositivo eletromagnético instalado no final da esteira e a separação da matéria orgânica através das peneiras rotativas hexagonais. Cada esteira possui 15 metros de comprimento e 36 polegadas de largura, sendo que sua velocidade varia de 0,07 a

0,42 m.s⁻¹. A matéria orgânica bruta, após passar pela malha das peneiras rotativas, deve ser transportada até o setor de compostagem através de correias (SMSU, 2001). Porém não é o que ocorre, sendo a fração orgânica *in natura* encaminhada ao aterro juntamente com os rejeitos.

Ao lado do setor de separação dos materiais recicláveis, existem duas áreas a céu aberto de 300 m² destinados ao armazenamento de material prensado, enfardado e selecionado. Esse material passa por uma classificação, sendo depois encaminhada para o enfardamento. Existem dois tipos de prensa, a do tipo vertical com capacidade para 1.250 kg.h⁻¹ e a do tipo horizontal com capacidade para 800 kg.h⁻¹ (CAPOROSI, 2002).

Após triagem, o plástico é transformado em matéria prima reciclada. Este processo é composto pela classificação, moagem, lavagem, secagem, aglutinação, extrusão e granulação dos materiais classificados.

O material da compostagem é selecionado nas peneiras rotativas do setor de triagem, e encaminhado, através dos transportadores por correias, até o conjunto de 39 *containers*, sendo que cada um possui 61,35 m³ para a matéria orgânica e 3,65 m³ para a câmara de aeração. Ao todo são 44 *containers*, pois 39 são para a compostagem e 5 para biofiltros com objetivo de tratar o ar que é liberado para a atmosfera, absorvendo os gases responsáveis pelo mau cheiro da compostagem, formando conjuntos dispostos de forma circular no pátio (SMSU, 2001).

O aterro sanitário foi projetado para receber material proveniente das atividades da usina de triagem e compostagem de lixo domiciliar urbano da cidade de Cuiabá, o chamado rejeito, após serem prensados e enfardados. Porém, atualmente os resíduos são depositados no aterro sanitário “*in natura*” e sem enfardamento.

No ano de 2005 o aterro sanitário de Cuiabá recebeu em média 386 toneladas de RSU por dia. Deste montante, 93% é lixo doméstico, sendo coletado pela Prefeitura; e 7% é lixo público ou proveniente de particulares. Desse montante, 150 ton.d⁻¹ são encaminhados à usina de processamento, dos quais são retirados apenas 3% de material reciclável, sendo o restante encaminhado ao aterro sanitário.

Além disso, o aterro recebe 7 ton.d⁻¹ de RSS, os quais são dispostos em vala séptica, separadamente dos demais resíduos. O aterro não recebe entulho de obra. O mesmo é disposto no antigo lixão da cidade.

De acordo com IBGE (2006), a população estimada para 2005 no município de Cuiabá era de 533.800 habitantes. Como não há dados quantitativos atuais para a quantidade de entulho de obra, não é possível estimar a produção per capita de RSU. Pode-se estimar apenas a geração de resíduos domésticos, que, utilizando-se os dados apresentados anteriormente, resulta em 674 g por habitante por dia no ano de 2005, estando um pouco acima da média brasileira, por se tratar de uma cidade de porte médio.

A coleta de lixo funciona de acordo com o horário de funcionamento da usina, ou seja, de segunda a sábado, com horários bem definidos: de 07h00 às 11h00 e de 13h00 às 17h00. O aterro funciona 24 horas por dia.

O sistema de impermeabilização do solo é indicado nas faixas de disposição do aterro, com o objetivo de se evitar contaminação das águas subterrâneas do aquífero freático pelo chorume percolado. Porém de acordo com o levantamento hidrogeotécnico realizado para a elaboração do projeto técnico, o solo possui baixa permeabilidade. Por isso e pelo fato de estar prevista a compostagem do material orgânico, inicialmente não foi feita a impermeabilização da base do aterro e nem das lagoas de tratamento. Somente da segunda célula de lixo em diante foi feita a impermeabilização da base. Mas a primeira célula e as lagoas até hoje não foram impermeabilizadas.

O aterro possui sistema de drenagem superficial, que tem a finalidade de garantir que apenas as águas precipitadas diretamente nos módulos do aterro entrem em contato com o lixo, sendo as outras águas coletadas e canalizadas, não entrando em contato com a massa confinada de lixo.

Também há um sistema de drenagem do chorume. Segundo a SMSU (2001), foi executado um sistema de drenagem de fundação permitindo a drenagem de fundo pelos canais formados. E após cada camada de resíduo são executadas valas de drenagem que são interligadas às caixas coletoras para o encaminhamento ao sistema de tratamento.

A drenagem dos gases gerados também é realizada, evitando que os gases produzidos na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, principalmente o metano, se acumulem nas células do material confinado. Neste caso, uma

concentração da ordem de 5 a 15% poderá formar com o ar uma mistura explosiva. Os drenos de gases são os mesmos do sistema de drenagem vertical de líquidos.

Finalmente há um sistema de tratamento do líquido percolado: o chorume. Após a captação, o chorume é encaminhado a um sistema de tratamento, com objetivo de remover a carga orgânica e reduzir o potencial patogênico. O sistema adotado para o aterro sanitário de Cuiabá foi o de lagoas de estabilização em série, detalhado a seguir.

3.2.1 Sistema de tratamento

O sistema de tratamento do chorume do aterro sanitário é composto por um tanque de equalização, uma lagoa anaeróbia e duas facultativas, em série. O fluxograma pode ser visualizado na Figura 17.

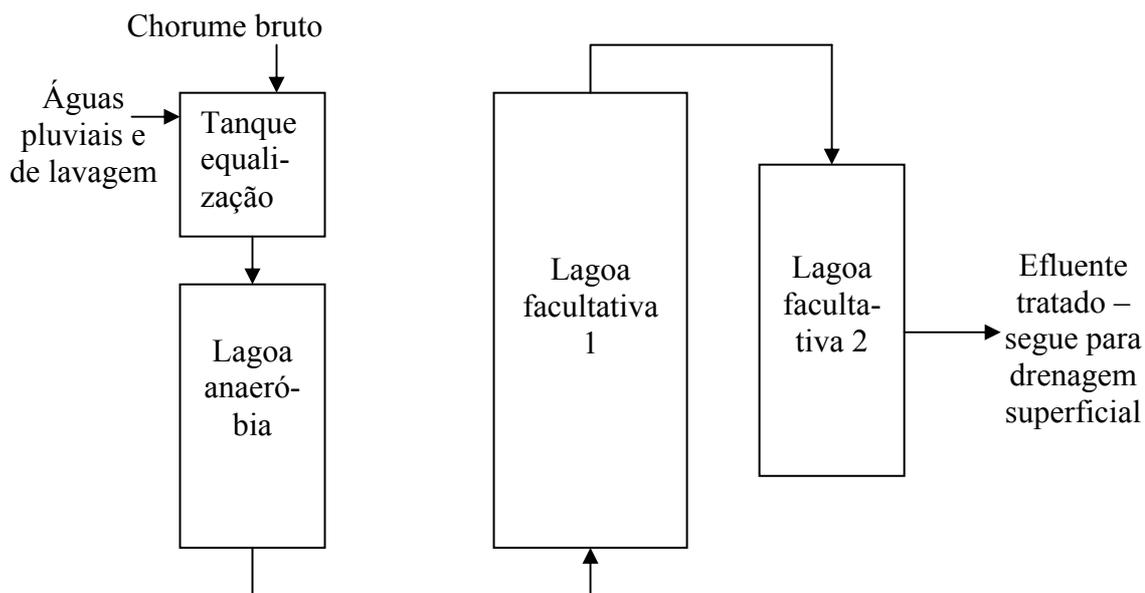


FIGURA 17 – Fluxograma do sistema de tratamento de chorume

Além de chorume bruto, o tanque de equalização também recebe as águas pluviais do pátio da usina, as águas de lavagem dos caminhões e águas de lavagem da unidade de beneficiamento de plástico. Os estudos de CAPROSSI (2002) apontaram uma vazão afluyente média de $20,74 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, máxima na lagoa anaeróbia de $188,35 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ e mínima de $6,91 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ para o ano de 2001. As DQOs média, máxima e mínima do líquido afluyente, para o mesmo ano, são de $2.540 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $6.860 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e $970 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. Já as DQOs média, máxima e mínima do

chorume bruto, para o mesmo ano, são de 16.150 mg.L⁻¹, 35.000 mg.L⁻¹ e 6.040 mg.L⁻¹, respectivamente. Portanto há uma diluição da concentração de poluentes no líquido afluente.

Observando os dados da referida autora, percebe-se que a eficiência do sistema de tratamento varia de acordo com a vazão. Quando esta é máxima, a eficiência é menor (cerca de 76%). Quando a vazão é mínima, a eficiência é maior (100%), pois o tempo de detenção hidráulica é maior, otimizando o tratamento biológico. A eficiência média ficou em torno de 96%, não atingindo os padrões que a legislação estabelece. Dessa forma, caso fosse tratado apenas o chorume bruto nas lagoas, a eficiência do sistema seria otimizada. Poderia ser construído um sistema de tratamento separado para as águas pluviais e de lavagem.

De acordo com CAPOROSI (2002), no período seco ocorre inexistência de vazão efluente das lagoas (ocorrido em setembro de 2001, por exemplo). A autora afirma que as possíveis causas sejam as elevadas temperaturas e uma provável infiltração, sugerindo que esta última deve ser mais bem averiguada. Tal sugestão foi acatada no presente trabalho. Porém vale salientar que a demanda evaporativa da atmosfera, no período seco, é muito elevada, ou seja, a evaporação superficial é muito grande. Por outro lado, como não há impermeabilização das lagoas, é possível que haja realmente lixiviação de chorume para o subsolo, apesar da baixa permeabilidade da matriz filítica da área.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PLANEJAMENTO DE CAMPO

As campanhas de campo foram realizadas em dezembro de 2005 e março, abril e agosto de 2006 na área do aterro sanitário de Cuiabá, conforme Figura 18.

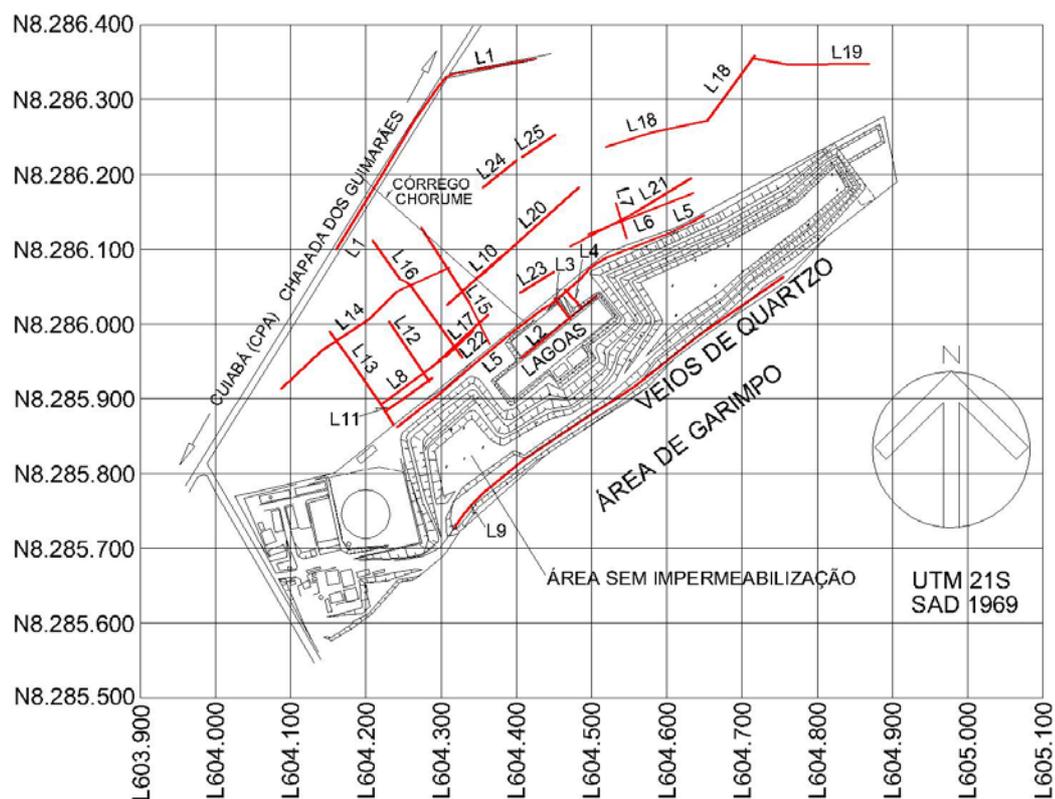


FIGURA 18 – Localização dos ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá

Os ensaios de campo procuraram abranger as laterais do depósito de lixo e das lagoas de tratamento de chorume, e a área topograficamente a jusante do aterro, ou seja, a área mais baixa, para onde convergem as águas superficiais e o chorume tratado. Esta área situa-se na parte noroeste da Figura 18, entre o aterro e a estrada, onde foram realizadas a maior parte dos ensaios.

As vinte e cinco linhas vermelhas da Figura 18 (L1 a L25) representam os segmentos onde foram realizados os ensaios de campo. Em todas as linhas foi realizado o caminhamento eletromagnético indutivo, com o equipamento EM-34 da Geonics, utilizando-se os seguintes cabos:

- a) 10m – 2 linhas (L9 e 10);

- b) 20m – 17 linhas (L2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25);
- c) 40m – 11 linhas (L1, 2, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17).

Em duas linhas (L2 e 9) foram realizados ensaios de GPR, com equipamento da marca RAMAC, utilizando-se a antena de 50MHz.

Em duas linhas (L2 e 9) foi realizado o caminhamento elétrico (CE), utilizando-se o equipamento Syscal R2. Os ensaios de CE foram realizados em dois níveis, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, com os seguintes espaçamentos:

- a) Nível 1: AB = 20m(x), MN = 20m(x), BM = 20m (1x), profundidade teórica de investigação = 20m (R/2);
- b) Nível 2: AB = 20m(x), MN = 20m(x), BM = 40m (2x), profundidade teórica de investigação = 30m (R/2);

Em virtude do objetivo do presente trabalho, que foi investigar apenas o subsolo, não foram realizados ensaios sobre as camadas de lixo confinado. A condutividade do lixo certamente seria elevada, o que afetaria os resultados. Desejava-se que estes refletissem somente a condutividade do solo (e não a do lixo).

Na confecção dos mapas de isovalores do levantamento eletromagnético também se evitou a influência da elevada condutividade do lixo. Nas linhas paralelas ao aterro, quando se dispunha de dados relativos à mesma profundidade, obtidos com cabos diferentes, optou-se pelos dados oriundos de Dipolo Magnético Vertical (DMV), que possui menor interferência do material condutivo lateral – o lixo.

Para a localização geográfica das linhas onde foram realizados os ensaios foi usado um GPS (*Global Positioning System*) Geoexplorer II da marca Trimble® e usado o programa Panthfinder Office para transferência dos dados para extensão dxf. Os arquivos com extensão “dxf” trazem o desenho das linhas, mantendo as coordenadas geográficas. Os mesmos foram abertos no programa AutoCAD2000, sobrepondo o mapa do aterro. Sobre cada linha foram colocados os pontos de coleta de dados, seguindo o espaçamento das planilhas de campo. Com os pontos marcados, extraiu-se as coordenadas dos mesmos, para posteriormente ser possível fazer o mapa de isovalores.

4.2 MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.2.1 Métodos Eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos se baseiam na propagação de campos eletromagnéticos (contínuos ou transitórios) no subsolo. Podem ser classificados em sistemas no domínio do tempo e no domínio da frequência. Os métodos eletromagnéticos podem ser passivos, utilizando sinais naturais da Terra (ex. magnetotelúrico), ou ativos, onde um transmissor artificial é utilizado próximo do campo (ex., condutímetro de solo) ou distante do campo (utilizando transmissores militares de alta potência como no caso do mapeamento VLF - *Very Low Frequency*) (REYNOLDS, 1997).

A Figura 19 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.

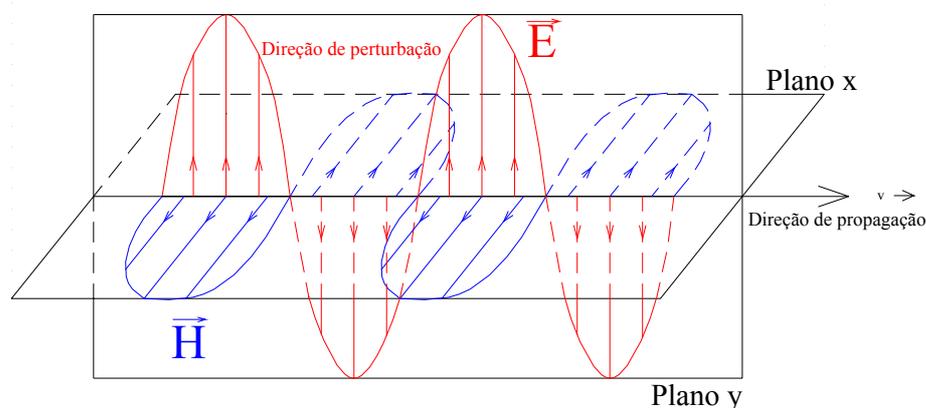


FIGURA 19 – Propagação da onda eletromagnética (adaptado de REYNOLDS, 1997)

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 eletromagnética 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 (Eq. 1) e produzem o campo magnético (H):

$$\nabla \times H = J + \partial D/\partial t \quad (1)$$

A Lei de Faraday (Eq. 2) descreve o campo elétrico (E) produzido pela variação do campo indução magnética (B) em relação ao tempo:

$$\nabla \times E = - \partial B/\partial t \quad (2)$$

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 (σ);
- b) permissividade dielétrica (ϵ);
- c) permeabilidade magnética (μ).

Como mostra a Lei de Ohm (Eq. 3), a condutividade relaciona a densidade de corrente de condução (J) ao campo elétrico (E) e representa a primeira relação constitutiva do meio:

$$J = \sigma E \quad (3)$$

Geralmente a movimentação de íons por meio de solução aquosa constitui o principal mecanismo de corrente de condução. A Figura 20 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.

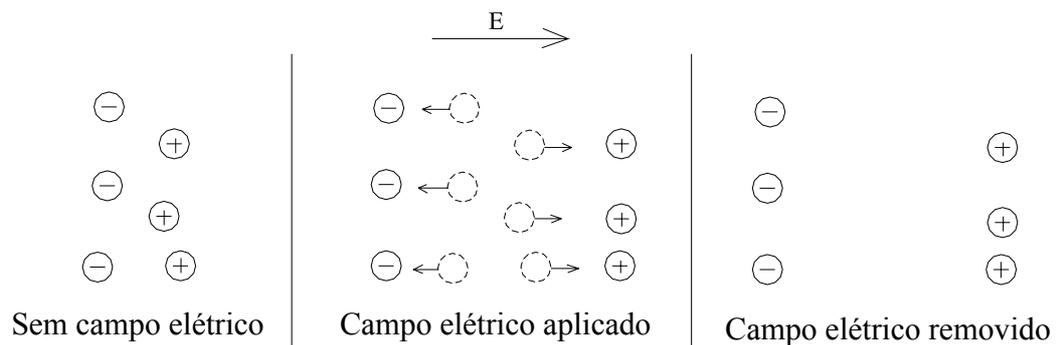


FIGURA 20 – Movimentação de cargas associada à corrente de condução (adaptado de ANNAN, 1992)

A condutividade elétrica (σ), expressa em Siemens por metro ($S.m^{-1}$), é o inverso da resistividade elétrica (ρ) que é expressa em Ohm vezes metro ($\Omega.m$).

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

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

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

A permissividade dielétrica (ϵ) dos materiais geológicos, expressa pela equação 4 em Faraday por metro ($F.m^{-1}$), representa a segunda relação constitutiva do meio e relaciona a densidade de corrente de deslocamento (D) ao campo elétrico (E):

$$D = \epsilon E \quad (4)$$

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 21 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.

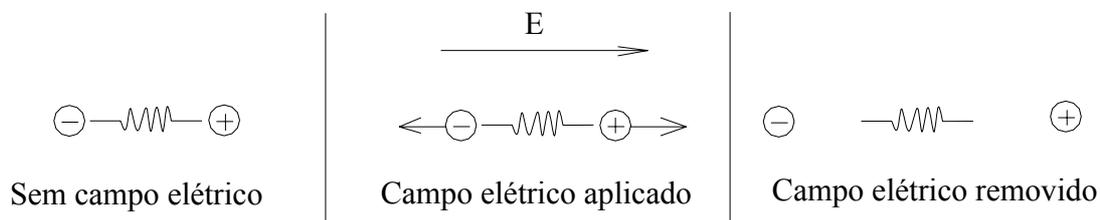


FIGURA 21 – Movimentação de cargas associada à corrente de deslocamento (adaptado de ANNAN, 1992)

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

A permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) é definida como sendo a razão entre a permissividade dielétrica do material (ϵ) e a permissividade dielétrica do espaço livre ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$) e está apresentada na equação 5.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (5)$$

A terceira relação constitutiva do meio (Eq. 6) é representada pela permeabilidade magnética (μ) e relaciona o campo de indução magnética (B) com o campo magnético (H):

$$B = \mu H \quad (6)$$

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.

Para estudar as ondas eletromagnéticas, deve-se considerar 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 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 (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ). 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.

4.2.1.1 Método Eletromagnético Indutivo (EMI)

Os métodos eletromagnéticos indutivos (EMI) fundamentam-se na propagação de ondas eletromagnéticas de baixas frequências (inferiores a 1 MHz), onde predominam as correntes de condução, uma vez que a corrente de deslocamento tem pouca intensidade. Assim a propagação depende quase exclusivamente da condutividade do meio.

No presente trabalho este método foi empregado para detectar zonas anômalas de condutividade no subsolo. Para tanto se compara os valores coletados em campo com a condutividade média da formação geológica da área (sem contaminação).

O sistema eletromagnético mais comum utilizado em investigações geofísicas, de engenharia e ambiental é o método de dupla de bobinas de fonte móvel (McNEILL, 1990). Duas bobinas separadas conectadas por um cabo de referência fornecem a base do sistema; uma bobina serve com um transmissor para gerar um campo magnético primário e outra atua como receptor que mede tanto o campo primário quanto o campo secundário. A separação entre as bobinas é mantida fixa e o par de bobinas é movido ao longo de um perfil, que se deseja estudar, em intervalos discretos. O ponto de referência para a medida é o centro entre as bobinas (REYNOLDS, 1997). Os sistemas podem medir a componente em quadratura ou em fase (*in-phase*), ou somente a primeira.

Quando uma bobina transmissora (Tx) é energizada com uma corrente alternada em uma frequência de áudio, é colocada em um meio uniforme e uma bobina receptora (Rx) está localizada em uma distância curta (s), o campo magnético variante no tempo proveniente da corrente alternada da bobina transmissora induz fracas correntes no solo: correntes de indução. Estas correntes geram um campo magnético secundário (H_s) que é sentido junto com o campo magnético primário (H_p) pela bobina receptora. Na Figura 22 estão representados os campos eletromagnético primário e secundário e as correntes de indução.

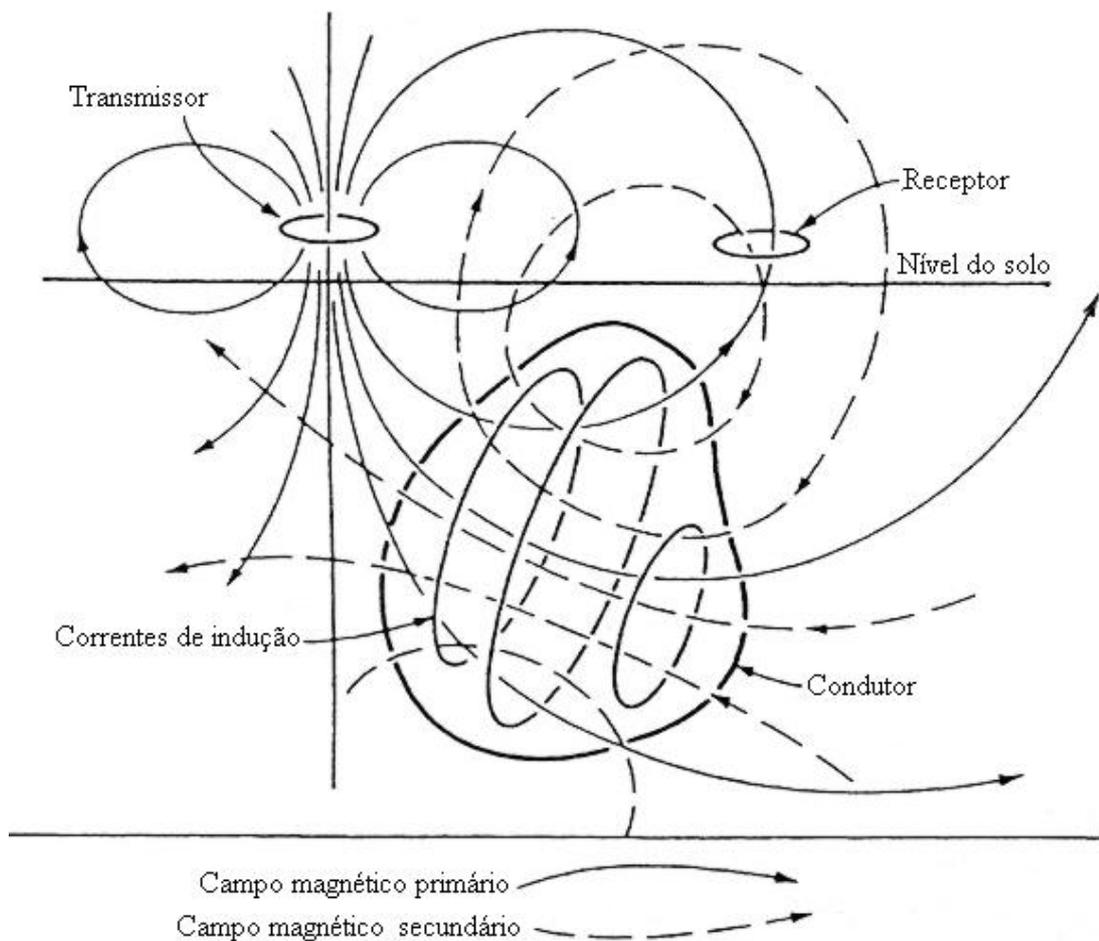


FIGURA 22 – Esquema geral do método EM (adaptado de REYNOLDS, 1997)

A razão do espaçamento entre as bobinas (s) dividido pelo *skin depth* (δ) é conhecido como o “número de indução” (B). Quando o número de indução é muito menor do que 1, então a razão entre H_s e H_p no receptor é diretamente proporcional à condutividade aparente (σ_a), conforme equação 7.

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (7)$$

sendo, $i = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$, f a frequência em Hz, μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo, σ a condutividade, e s a separação entre as bobinas em metros.

O instrumento é desenvolvido para fornecer diretamente no visor do aparelho o valor de condutividade elétrica. Para tanto se aplica a equação 8, que é derivada da equação 7.

$$\sigma_a \approx \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)_q \quad (8)$$

onde o subscrito “q” denota a quadratura.

A frequência (f) é selecionada, o espaçamento (s) entre as bobinas é conhecido, H_s e H_p são medidos conjuntamente pelo instrumento e, com a resposta projetada de H_p (para um dado transmissor), obtém-se H_s . Então a condutividade elétrica (σ) pode ser calculada, conforme equação 8.

Um dos equipamentos mais utilizados nos métodos de condutividade do solo é fabricado pela GEONICS Ltd. O instrumento fornece uma leitura direta da componente quadratura como a condutividade aparente (σ_a) em miliSiemens por metro (mS.m^{-1}). A componente EM-fase é medida em partes por mil (*parts per thousand* - ppt). A GEONICS Ltd., atualmente, fabrica 3 tipos de condutímetro de solo, sendo individualizados pela frequência de operação: EM-34, EM-31 e EM-38. Foi detalhado somente o EM-34, utilizado neste trabalho.

O equipamento EM-34 da GEONICS Ltd. permite a utilização de três distâncias entre as bobinas, pois possui três cabos de ligação entre ambas: 10, 20 e 40m. Em relação à posição das bobinas, há uma peculiaridade: quando as mesmas estão dispostas horizontalmente, ocorre o dipolo magnético vertical (DMV); e quando estão dispostas verticalmente, ocorre o dipolo magnético horizontal (DMH), conforme Figura 23.

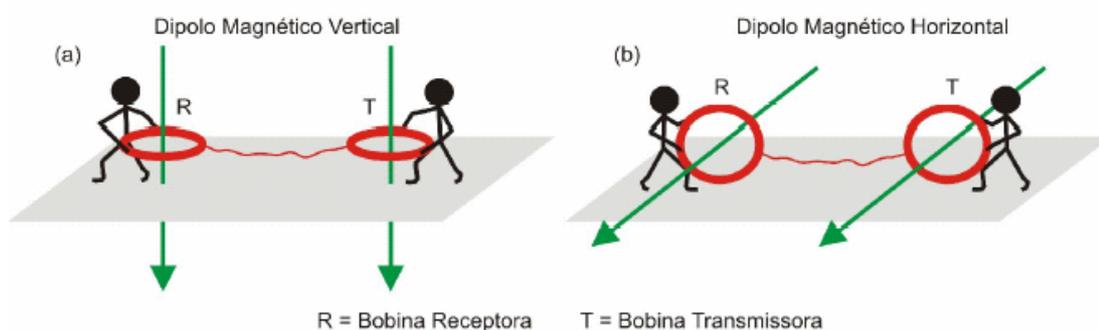


FIGURA 23 - Configurações convencionais de bobinas utilizadas no método de dupla bobina. (a) Bobinas horizontais, com dipolo magnético vertical. (b) Bobinas verticais, com o dipolo magnético horizontal (BORGES, 2004)

Os ensaios de campo realizados com o método EMI possibilitam a medição da condutividade elétrica aparente em diversas profundidades teóricas, dependendo da distância entre as bobinas transmissora e receptora e da posição de ambas – se

estão dispostas na horizontal ou na vertical. De acordo com McNEILL (1980), a profundidade efetiva de operação para os dipolos magnéticos horizontal e vertical, em um meio homogêneo, é aproximadamente 0,75 e 1,5 vezes o espaçamento (s) entre as bobinas, respectivamente.

Para confecção das pseudo-seções de condutividade aparente, foram consideradas as profundidades efetivas de operação para ambos os dipolos, conforme Tabela 2.

TABELA 2 - Relação entre a profundidade investigada e a separação entre as bobinas, referente ao EM-34 da GEONICS Ltd.

Separação entre bobinas s (m)	DMV	DMH
	Profundidade investigada (m)	Profundidade investigada (m)
10	15	7,5
20	30	15
40	60	30

A Figura 24 ilustra essa relação entre a profundidade investigada e a separação entre as bobinas, referente ao EM-34 da GEONICS Ltd., para os dipolos magnéticos vertical (DMV) e horizontal (DMH).

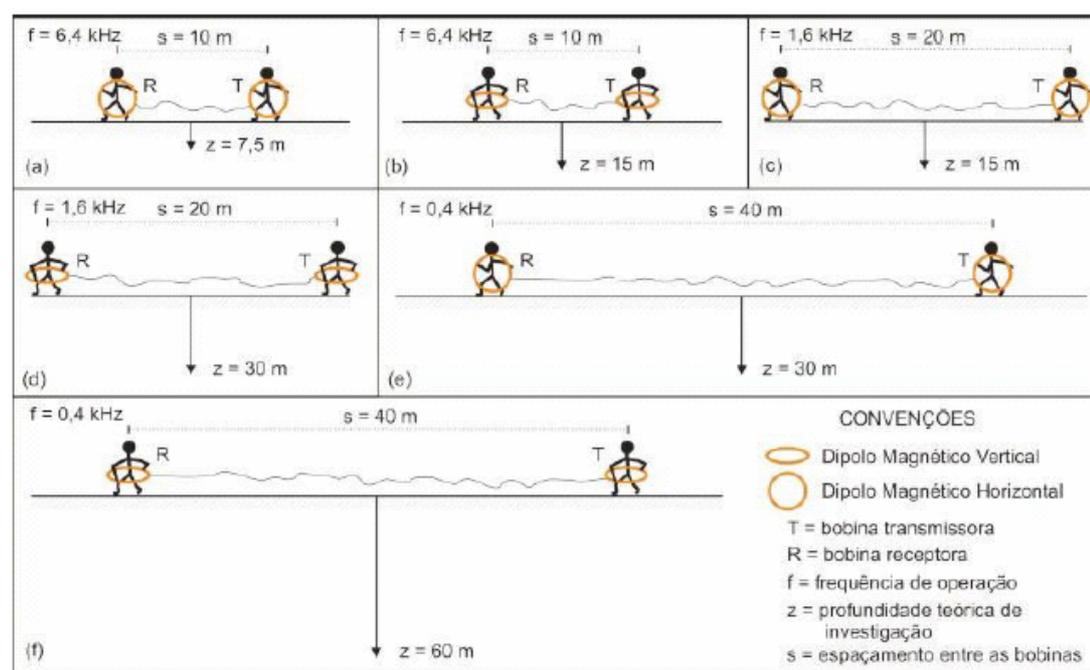


FIGURA 24 - Configuração esquemática do equipamento EM34, nos modos dipolo magnético horizontal e vertical, os respectivos espaçamentos entre as bobinas, frequência de operação e profundidade teórica de investigação (BORGES, 2004)

As bobinas transmissora e receptora devem ser dispostas em um mesmo plano, ou seja, devem ser coplanares. O posicionamento sobre o terreno influi na profundidade investigada.

Os ensaios de campo são geralmente na forma de caminhamentos, que devido à praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são realizados com muita rapidez. Durante o levantamento de campo deve-se observar o alinhamento, o posicionamento e a separação das bobinas, pois estes fatores podem interferir na leitura dos dados.

Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, há limitação para a execução de sondagens. Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas, conforme pode ser visto no item sobre construção de mapas de isovalores.

No presente trabalho utilizou-se os cabos de 10, 20 e 40m, dentro e fora da área do aterro, conforme pode ser visto no item planejamento de campo.

4.2.1.2 Radar de penetração no solo (GPR)

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 – 1000 MHz) para localizar estruturas e feições geológicas rasas de subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem, dentre outros. O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR é semelhante à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que o GPR é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas.

Este método se baseia no princípio de transmissão de ondas eletromagnéticas, que são repetidamente radiadas para o interior da Terra por meio de uma antena transmissora colocada junto à superfície. A propagação do sinal é função da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são influenciadas pelo conteúdo de água presente no solo. Quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda eletromagnética. As mudanças que ocorrem nas propriedades elétricas da subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletido e parte refratado. A principal propriedade elétrica que interfere na

reflexão das ondas eletromagnéticas produzidas pelo GPR é a constante dielétrica. Quando ocorre uma mudança brusca na constante dielétrica há a presença de um refletor. Na Tabela 3 encontram-se alguns materiais e seus respectivos valores de constante dielétrica (ϵ_r') e condutividade elétrica (σ).

TABELA 3 – Constante dielétrica e condutividade de alguns materiais (PORSANI, 1999)

Materiais secos	ϵ_r'	σ mS.m ⁻¹	Materiais saturados	ϵ_r'	σ mS.m ⁻¹
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia seca e cascalho	2-6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila seca	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito seco	5	1	Areia saturada	20-30	0,1-1
Calcário seco	4	0,5	Silte saturado	10	1-10
Solo arenoso seco	2,6	0,14	Argila saturada	40	1000
Solo argiloso seco	2,4	0,27	Solo arenoso saturado	25	6,9
Sal seco	5-6	0,01-1	Solo argiloso saturado	15	50
Granito seco	5	0,01	Arenito saturado	6	40
Basalto seco	6	1	Siltito saturado	30	100
Diabásio seco	7	10	Folhelho saturado	7	100
Ferro	1	10 ⁹	Calcário saturado	8	2
Aço	1	∞	Granito saturado	7	1
PVC	8	0	Basalto saturado	8	10
Asfalto	3-5	0	Diabásio saturado	8	100
Concreto seco	5,5	0	Concreto saturado	12,5	0

As ondas refletidas e difratadas em subsuperfície são recebidas através de outra antena receptora, também colocadas na superfície da Terra (Modo Biestático). Assim a energia refletida é registrada em função do tempo de atraso, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador *notebook* (DAVIS & ANNAN, 1989). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

Os fundamentos do método GPR encontram-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas.

Além das ondas refletidas, chegam também na antena receptora as ondas aéreas e as *groundwave* (ondas diretas no solo). Estas últimas viajam diretamente de uma antena para outra, respectivamente pelo ar e pelo solo, conforme Figura 25.

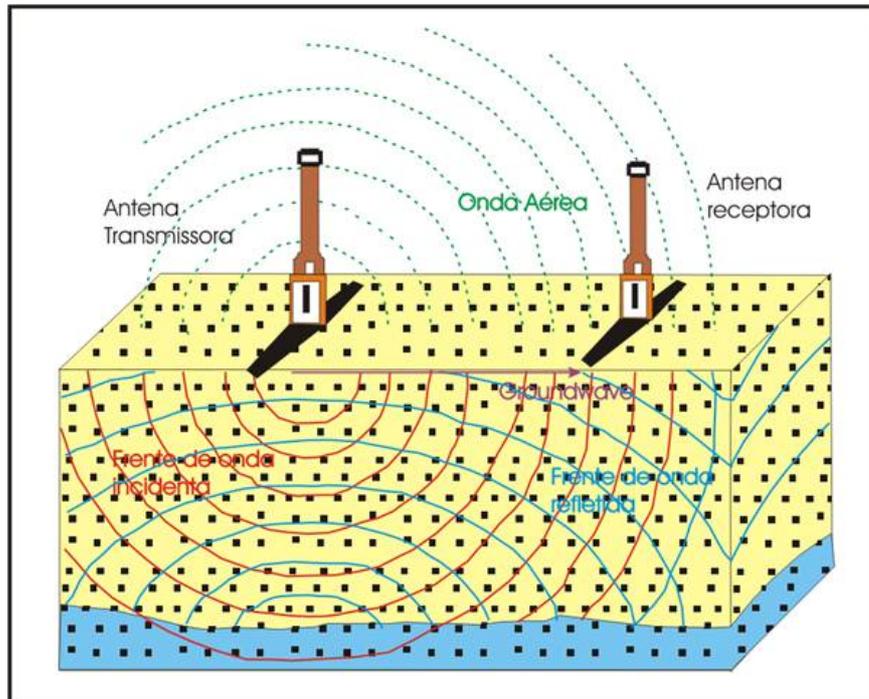


FIGURA 25 – Diagrama de um par de antenas bi estática (BORGES, 2002)

O equipamento utilizado foi o sistema sueco RAMAC/GPR. O sistema consiste em seis módulos: duas antenas, uma transmissora e outra receptora, uma unidade eletrônica do transmissor, uma unidade eletrônica do receptor, uma unidade de controle central e um computador portátil. A antena receptora envia o sinal para um console central e este por sua vez digitaliza e envia os dados para um microcomputador aonde a amplitude das ondas é registrada na forma de traços em função do tempo de percurso.

Neste trabalho de pesquisa foram utilizadas as técnicas de afastamento constante e sondagem de velocidade (CMP - *Common Mid Point*), obtidas nos mesmos perfis.

O perfil de reflexão é obtido pela técnica de afastamento constante, com as antenas mantidas a um espaçamento fixo e as medidas efetuadas a passo constante ao longo do perfil. A seqüência de traços adquiridos pode ser visualizada lado a lado na tela do computador portátil, formando uma imagem dos extratos refletores existentes em subsuperfície.

Após a aquisição dos dados de GPR, é necessária uma seqüência de processamentos para melhorar os sinais, eliminando ruídos e ressaltando os refletores

de interesse. Esta seqüência envolve a seguintes etapas: ajuste do tempo zero; análise do espectro de freqüências; definição dos parâmetros para os filtros para eliminar ruídos de baixa e alta freqüência; filtragem; amplificação dos sinais para permitir uma melhor visualização dos sinais mais fracos; conversão tempo/profundidade; edição para impressão.

Foi utilizada a antena de freqüência central de 50 MHz. Porém a largura da banda (espectro de freqüência) varia de 0,5 a 1,5 vezes a freqüência central, ou seja, para a antena de 50 MHz, varia de 25 a 75 MHz.

No eixo vertical do perfil GPR encontra-se o tempo de percurso da onda, ou seja, o tempo transcorrido entre o momento que ela foi gerada na antena transmissora, foi refletida no subsolo e foi captada pela antena receptora. Portanto trata-se de um tempo duplo (tempo de ida e de volta do sinal GPR). Na fase de processamento dos dados, este tempo duplo deve ser convertido em profundidade. Para tanto, é necessário conhecer a velocidade da onda no meio. As sondagens CMP são usadas para obter a velocidade do sinal GPR no solo/rocha. Na técnica CMP, as antenas estão sempre centradas sobre um mesmo ponto e distância entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos ao ponto central fixo. A estimativa da velocidade para as ondas no solo é feita através da análise de *Seibance* (YILMAZ, 1987).

A conversão do tempo duplo (t) dos perfis de reflexão em profundidade (d) é realizada partindo-se da velocidade (v) da onda adquirida na CMP, como mostra a equação 9.

$$d = \frac{vt}{2} \quad (9)$$

Onde:

v = velocidade da onda de radar

d = “depth” - profundidade (m)

t = tempo (ns).

A profundidade de investigação e resolução do GPR varia de acordo com a freqüência da antena. Quanto maior a freqüência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação. Os fatores que influenciam a profundidade de penetração do sinal GPR são os espalhamentos geométricos, atenuação pelo terreno e

a partição da energia nas interfaces, todos relacionados à perda de energia durante a propagação da onda eletromagnética.

De acordo com PORSANI (1999), as profundidades de penetração para as antenas de 50 e 100 MHz, são 30 m e 25 m, respectivamente. E as resoluções teóricas são de 0,5 a 1 m para a antena de 100 MHz, e 0,25 a 0,5 m para a antena de 50 MHz.

A orientação das antenas utilizada foi a perpendicular, de acordo com a Figura 26.

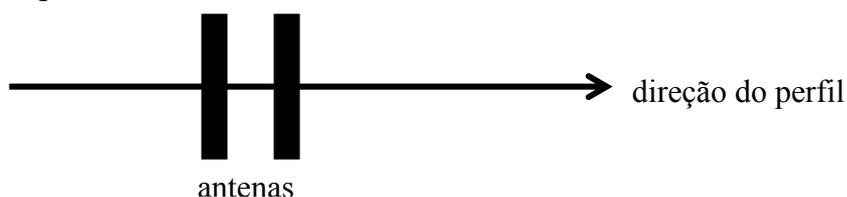


FIGURA 26 – Orientação das antenas

No perfil GPR, além de refletores existentes na subsuperfície, podem aparecer refletores não desejados, que representam ruídos. Esses refletores podem estar localizados no entorno da linha pesquisada. Por isso é imprescindível que, na interpretação do perfil, sejam considerados os possíveis ruídos. Sabendo-se a distância que o refletor indesejado se encontra do local de aquisição, pode-se identificá-lo no perfil, utilizando a velocidade da onda no ar (velocidade da luz).

Quando a condutividade da subsuperfície é muito elevada, ocorrem regiões anômalas no perfil, onde há ausência de reflexão. Essas regiões são denominadas zonas de sombra ou *shadow zone*, que, na investigação de plumas de contaminação, indicam que a área está contaminada, como visto nos estudos de caso.

4.2.2 Método da Eletrorresistividade

Os métodos elétricos constituem um dos grupos principais entre as técnicas de exploração geofísica. Uma vez que cada uma das técnicas mede as diferentes propriedades físicas dos materiais do subsolo, e uma combinação de técnicas pode apresentar melhores resultados na prática. Os métodos elétricos são muito utilizados devido à possibilidade de aplicação nos mais diversos campos como a mineração,

geologia de engenharia, hidrogeologia e estudos ambientais. Além de existir uma diversidade de técnicas de aquisição (Sondagem Elétrica Vertical, Caminhamento Elétrico e Perfilagem Elétrica) existe uma variedade ainda maior de arranjos de eletrodos (Schlumberger, Wenner, pólo-dipolo, dipolo-dipolo, etc.).

Isso confere aos métodos elétricos uma versatilidade muito grande, permitindo que a aplicação de técnicas e arranjos de eletrodos diferentes atenda às necessidades de investigação de uma grande quantidade de parâmetros importantes para caracterização geológica hidrológica de áreas de disposição de resíduo.

A Eletroresistividade é um método elétrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais. Este método permite investigar a variação de resistividade ao longo do meio. Uma corrente elétrica (I) é injetada no terreno, através de dois eletrodos de corrente A e B, e a diferença de potencial (ΔV) é medida em outros dois eletrodos, que são chamados de eletrodos de potencial M e N. A resistividade dos materiais em subsuperfície é obtida por uma relação entre estas medidas e a disposição dos eletrodos. Os eletrodos de corrente, quando instalados próximos um em relação ao outro no solo, farão com que a corrente flua de forma superficial, com isso fornecendo o valor de resistividade da camada superficial. Quando estes eletrodos de corrente são dispostos com um afastamento maior, fornecerão valores de resistividade a profundidades maiores.

A resistividade elétrica aparente para o meio onde circula a corrente é calculada através da equação 10.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

onde: ΔV = diferença do potencial, I = corrente elétrica, K = fator geométrico e ρ_a = resistividade elétrica aparente

O fator geométrico depende do arranjo utilizado, variando com a disposição dos eletrodos. A Figura 27 ilustra vários arranjos de eletrodos e seu fator geométrico.

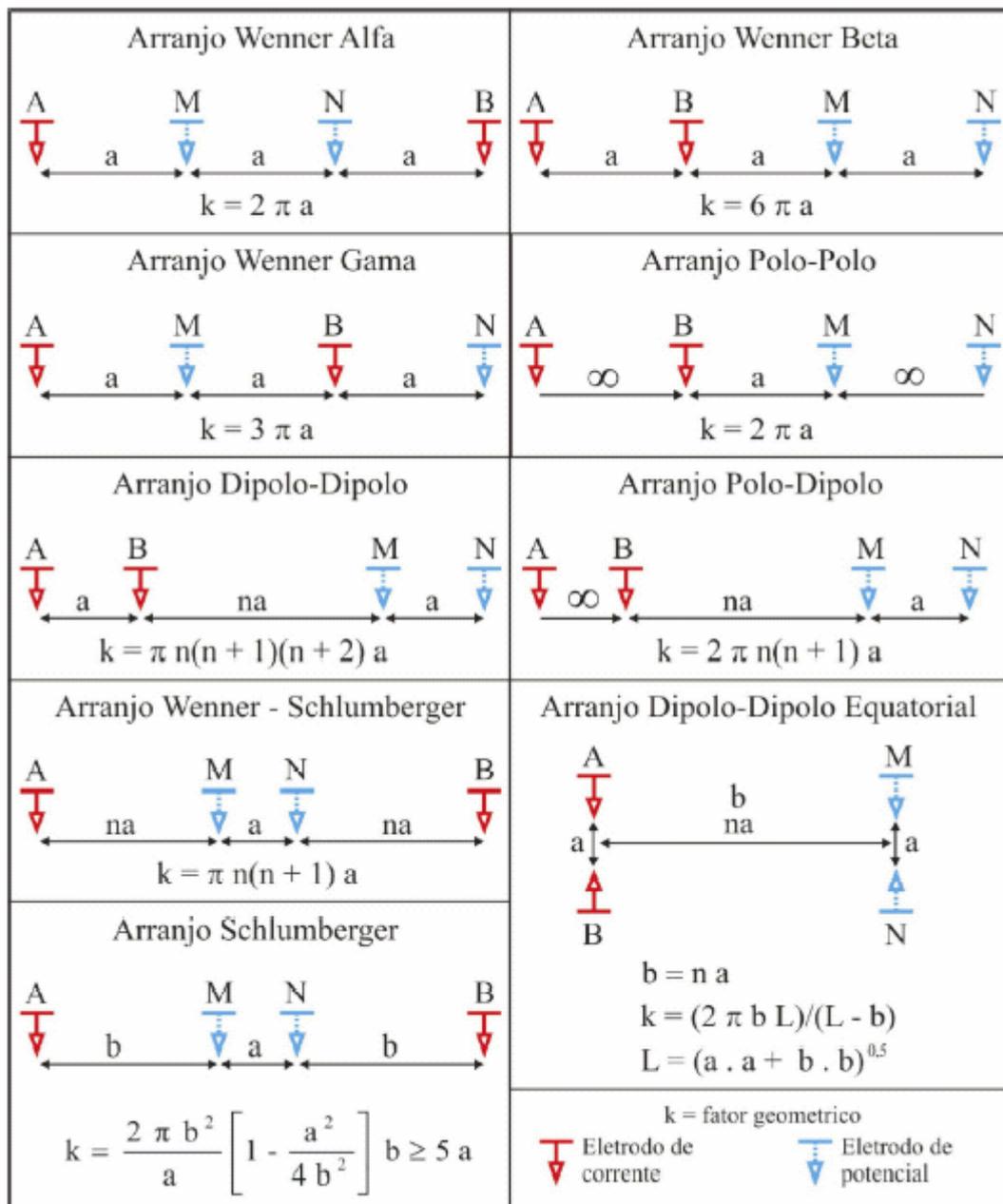


FIGURA 27 - Principais arranjos eletrolíticos e seus fatores geométricos (BORGES, 2004)

A resistividade elétrica dos materiais é um parâmetro físico que associado a diferentes tipos litológicos permite obter informações de porosidade e umidade do solo. Os fatores que influenciam na resistividade de uma rocha condutora de corrente elétrica são:

- Resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
- Resistividade dos líquidos e gases que preenchem seus poros;
- Porosidade;

- d) Umidade;
- e) Textura da rocha e forma de distribuição de seus poros.

Um mesmo tipo litológico pode representar uma ampla gama de resistividade, pois são vários os fatores que interferem na resistividade dos materiais. A resistividade do solo quando saturado pode ser correlacionado com diferentes tipos de solos. Quando os solos estão secos, os valores de resistividades são muitas vezes exagerados apresentando uma ampla gama de variação, não permitindo a identificação do tipo de solo. A Tabela 4 mostra valores de referência para alguns materiais geológicos.

TABELA 4 - Resistividade elétrica de alguns materiais geológicos (REYNOLDS, 1997)

Materiais geológicos	Intervalos de Resistividade (ohm.m)
Xisto	$20 - 10^4$
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenito	$1 - 7,4 \times 10^8$
Argilas	$1 - 10^2$
Areias e alúvios	$10 - 8 \times 10^2$

A técnica de ensaio utilizada no presente trabalho para aquisição dos dados de resistividade aparente foi o caminhamento elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo, apresentado a seguir.

4.2.2.1 Caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo

O CE é aplicado quando o alvo de interesse é o estudo da variação lateral da resistividade, mantendo-se uma profundidade teoricamente constante. O arranjo dipolo-dipolo foi utilizado porque ele consegue distinguir com maior precisão do que os arranjos Wenner e Schlumberger, variações laterais de resistividade (WARD, 1990). Tal arranjo foi usado também devido ao seu enorme sucesso na identificação de plumas de contaminação (ELIS, 1998).

As características do arranjo dipolo-dipolo são as seguintes:

- a) O centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, mas se deslocam ao longo do perfil;
- b) O espaçamento entre os eletrodos AB é igual ao espaçamento entre MN;
- c) O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se, simultaneamente, vários dipolos MN disposto ao longo da linha, e cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação (n).

A Figura 28 ilustra a disposição inicial do arranjo ao longo de uma linha a ser estudada. Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, apresenta um nível de investigação.

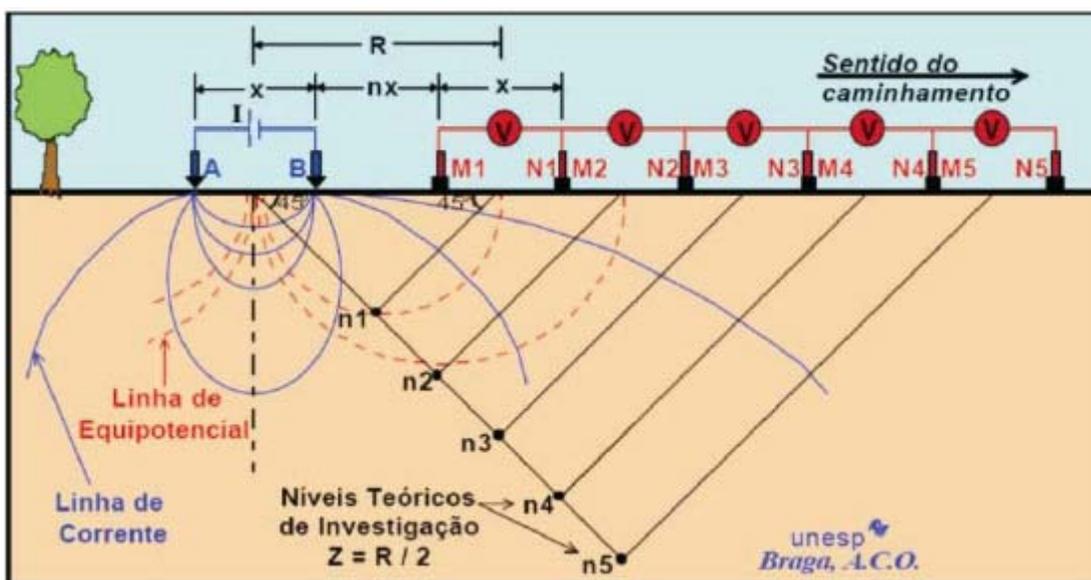


FIGURA 28 - Esquema do arranjo dipolo-dipolo utilizado em caminhamentos elétricos (BRAGA, 1999)

A resistividade elétrica aparente do meio é dada pela equação 10, e o fator geométrico (K) para o arranjo dipolo-dipolo é calculada pela equação 11.

$$K = 2 \pi G x \quad (11)$$

Onde: x é o espaçamento entre os dipolos e G é expresso pela equação 12.

$$G = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{n} \right) - \left(\frac{2}{n+1} \right) - \left(\frac{1}{n+2} \right) \right]} \quad (12)$$

sendo “n” o nível de investigação correspondente.

A profundidade teórica investigada pode ser tomada por R/2, onde o R é a distância entre os centros dos dipolos AB e MN.

O sistema de plotagem considera do ponto de atribuição da leitura como o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de 45 graus a partir dos centros dos dipolos (Figura. 29) sendo representado em uma distribuição de pontos em vários níveis de profundidade (Figura 30).

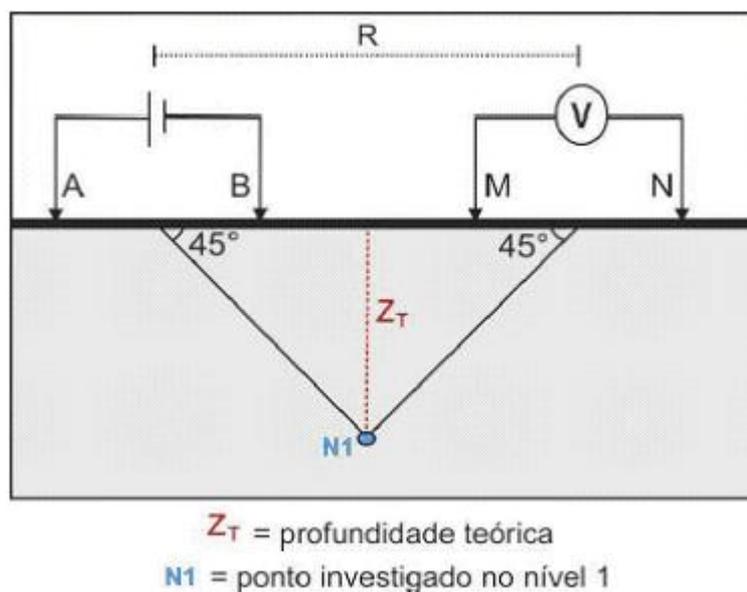


FIGURA 29 - Sistema de plotagem do arranjo dipolo-dipolo no CE, e equação para cálculo da profundidade teórica (Adaptado de BRAGA, 1999)



FIGURA 30 - Distribuição de pontos investigados em uma pseudo-seção através do arranjo dipolo-dipolo (BORGES, 2004)

Aplicando-se a regra do triângulo-retângulo na Figura 29, chega-se à equação 13, que fornece a profundidade do respectivo nível de investigação.

$$Z_T = \frac{R}{2} \tag{13}$$

Onde: Z_T é a profundidade teórica de investigação e R é a distância entre os centros dos dipolos AB e MN.

No presente estudo foram executados dois níveis de investigação, conforme visto no item de planejamento de campo.

4.3 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS

Os resultados alcançados com todos os métodos geofísicos são apresentados de forma gráfica no capítulo 5, facilitando a compreensão.

O principal levantamento realizado foi o eletromagnético indutivo (EMI). Com os dados de condutividade elétrica aparente obtidos com esta técnica, foram plotados gráficos de cada linha (distância *versus* condutividade), utilizando-se o programa EXCEL. Foi feito um gráfico para cada profundidade investigada. Também foram produzidos mapas de isovalores e pseudo-seções, utilizando-se o programa SURFER versão 8.01, da Golden Software Inc.

Os mapas de isovalores de condutividade aparente foram produzidos no programa SURFER utilizando-se interpolação. 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. Dentre as técnicas disponíveis para interpolação esta foi considerada a mais adequada, oferecendo os melhores resultados.

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 por um 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).

Na construção das pseudo-seções de condutividade aparente também se utilizou a krigagem ordinária, com pontos em três ou quatro profundidades médias, de acordo com a disponibilidade de dados. Conforme visto na Tabela 2, as profundidades médias para o método EMI são de 7,5 m, 15 m, 30 m e 60 m.

Com os dados de resistividade, adquiridos através da técnica de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, foi possível apenas fazer os gráficos e produzir as pseudo-seções de cada linha. Não foi possível fazer o mapa de isovalores, pois não foram realizadas linhas o suficiente.

O resultado dos perfis GPR foi uma imagem da subsuperfície, ou seja, um perfil que apresenta os refletores e as zonas de contaminação, onde não existe reflexão proveniente da subsuperfície.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se os resultados e as discussões dos levantamentos geofísicos realizados para caracterizar o subsolo. Os ensaios de campo procuraram abranger a área do aterro e os seus entornos, conforme Figura 31.

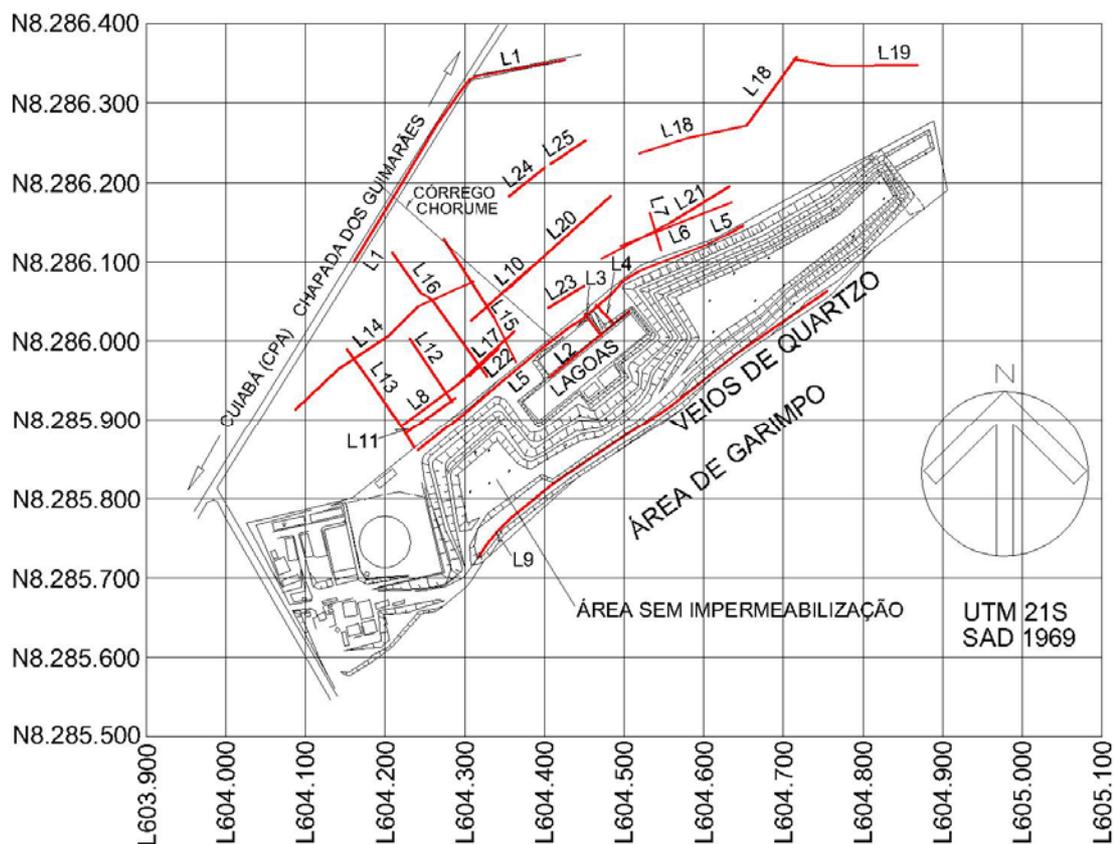


FIGURA 31 – Localização dos ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá

Não foram realizados ensaios sobre as camadas de lixo, pois se pretendia investigar apenas o subsolo. Por isso tentou-se minimizar as influências diretas do lixo compactado nas medidas de condutividade.

Antes de iniciar a discussão sobre os resultados obtidos foi adotada uma classificação para os intervalos de condutividade e resistividade elétrica que indicam as zonas contaminadas. Esta classificação levou em conta a litologia local e seus valores indicativos de condutividade elétrica, encontrados na bibliografia, bem como os valores encontrados em áreas supostamente sem contaminação.

Como visto na revisão bibliográfica, na região a noroeste do aterro (Subunidade 6) a rocha de base - o filito - é coberta por camadas de cascalhos de quartzo e, em alguns pontos, há presença de laterita. Também apresenta raras fraturas preenchidas por quartzo. A espessura de cascalho sobre o filito é pequena (varia de alguns centímetros a poucos metros).

Já a litologia da região ao sul do aterro (Subunidade 5) é constituída predominantemente por metarenito, mas há presença de filito e grande concentração de fraturas preenchidas por quartzo.

De acordo com SILVA (2001) o solo da área do aterro de Cuiabá é argilo-siltoso, com mais de 57% de argila em sua composição. A camada de cascalho de quartzo que encobre o filito não contribui muito significativamente para a condutividade elétrica aparente, considerando sua pequena espessura.

A Tabela 5 apresenta os valores de condutividade elétrica para alguns materiais geológicos.

TABELA 5 – Materiais geológicos e seus valores de condutividade elétrica PORSANI (1999)

Materiais	Condutividade elétrica (σ) - mS.m ⁻¹
Arenito seco	0,01
Arenito saturado	0,1-1
Solo arenoso seco	0,14
Solo arenoso saturado	6,9
Solo argiloso seco	0,27
Solo argiloso saturado	50

Ensaio de calibração realizados na área do aterro, onde se supõem que não havia contaminação, indicaram condutividade elétrica entre 4 e 16 mS.m⁻¹, predominando 12 mS.m⁻¹, que seria a condutividade de *background* da área do aterro.

Baseando-se nessas informações, a Tabela 6 apresenta as faixas de condutividade elétrica aparente e suas respectivas classificações adotadas no presente trabalho.

A classificação adotada para a resistividade elétrica, também na Tabela 6, baseou-se em HUBER et al (2005), que estudaram uma área de disposição de

resíduos de curtume em Várzea Grande, MT, onde se supõem que a resistividade elétrica de *background* seja semelhante à da área do aterro, pois também se localiza na região da Baixada Cuiabana.

TABELA 6 – Classificação adotada para faixas de condutividade e resistividade elétrica

Classificação	Faixa de condutividade elétrica aparente (σ_a) - mS.m ⁻¹	Faixa de resistividade elétrica aparente (ρ_a) - Ohm.m
Área não contaminada	< 20	> 50
Área suspeita de contaminação	20 - 40	30 - 50
Área potencialmente contaminada	> 40	< 30

HUBER et al (2005) adotaram a mesma classificação para a condutividade elétrica aparente. AQUINO & BOTELHO (2001) consideraram que o valor de 50 mS.m⁻¹ corresponde a uma contaminação aguda. Portanto o presente trabalho considerou valores limite de condutividade aparente dentro dos padrões usuais, para locais onde a condutividade elétrica de *background* apresenta baixos valores.

Já para resistividade elétrica aparente, a exemplo do presente trabalho, muitos autores consideram valores menores que 30 Ohm.m como áreas contaminadas, como observado nos trabalhos de GALLAS et al (2003), MOURA & MALAGUTTI FILHO (2003), STEVANATO et al (2003), dentre outros.

A seguir são apresentados os resultados obtidos através de cada técnica utilizada.

5.1 CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

Conforme visto na metodologia, as profundidades de investigação para o método do caminhamento eletromagnético indutivo (EMI) foram de 7,5 m, 15 m, 30 m e 60 m. Com este método foram realizados 25 ensaios. Utilizou-se os cabos de 10, 20 e 30 m, que correspondem ao espaçamento entre as bobinas (s). Porém em apenas duas linhas foram utilizados todos os cabos e em uma utilizou-se dois cabos. Nas demais linhas utilizou-se somente um cabo. O mais utilizado foi o cabo de 20m, seguido pelo de 40 m. Os resultados – gráficos e pseudo-seções – de cada linha

investigada encontram-se a seguir. A Figura 32 apresenta tais resultados para a linha 1.

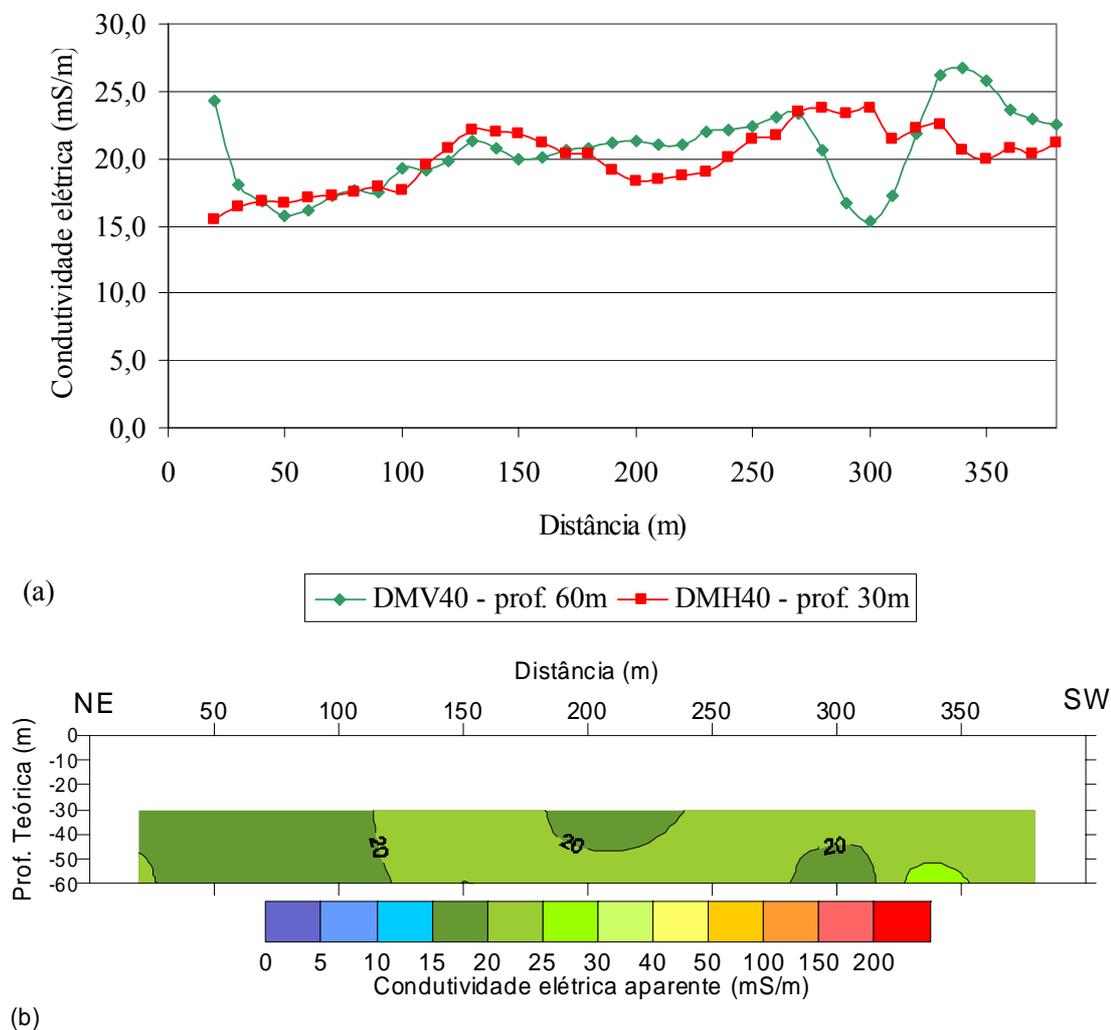


FIGURA 32 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 1 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 1 situou-se sobre a estrada próxima à Lagoa Bonita. É possível que houvesse contaminação nesta linha, pois na maior parte do trecho a condutividade foi maior do que 20 mS.m^{-1} . Porém esta linha foi feita no final do mês de abril de 2006, quando a Lagoa Bonita estava cheia, podendo interferir na umidade do solo e, conseqüentemente, na condutividade do mesmo. Mas a região mais próxima à Lagoa (início do perfil) é a que apresentou a menor condutividade, contradizendo a suposição anterior. Na posição 299 m passava o córrego de chorume, que também pode ter interferido na condutividade elétrica da área.

A Figura 33 apresenta os resultados para a linha 2.

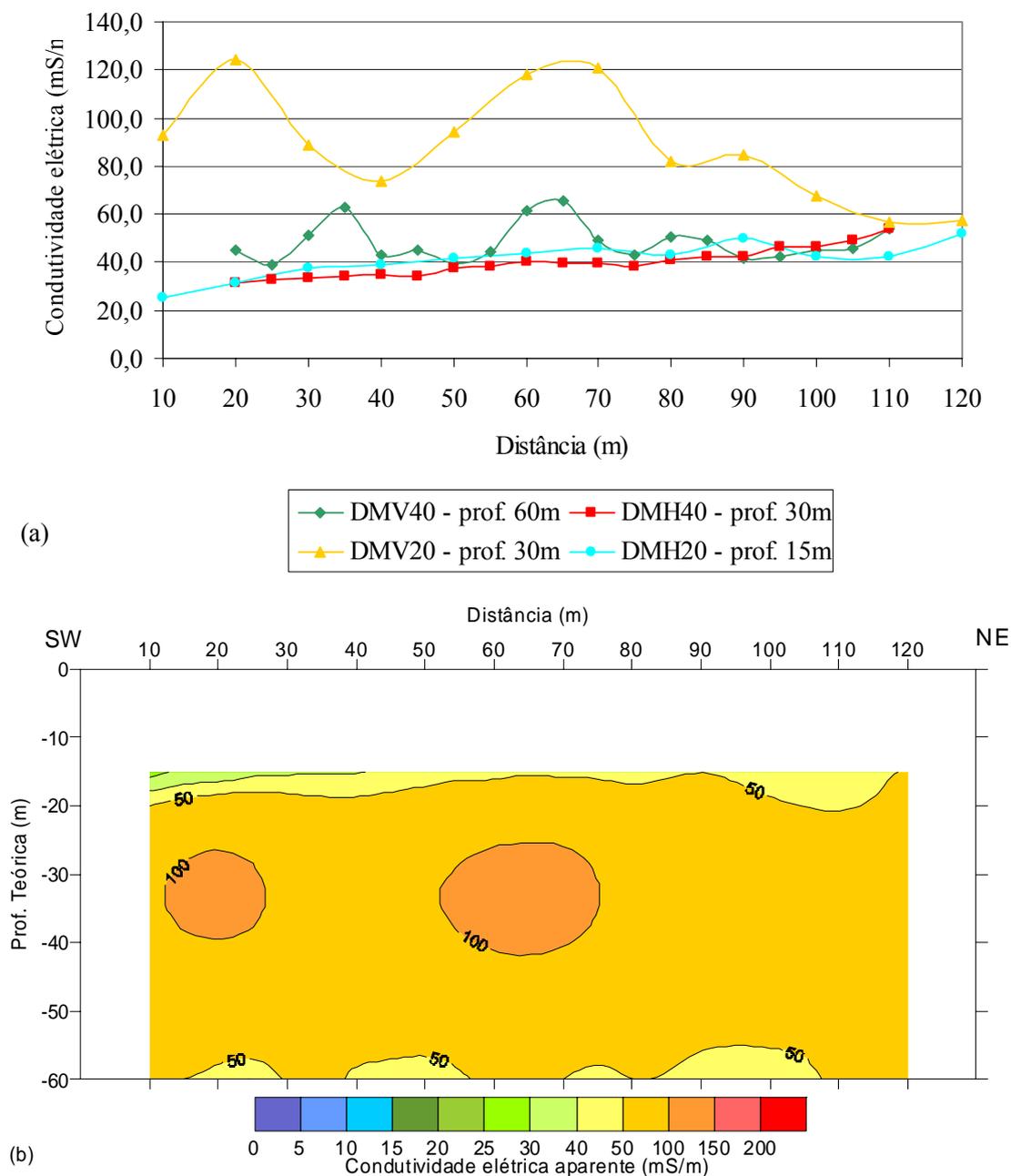


FIGURA 33 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 2 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

Conforme pode ser observado na Figura 33, os valores de condutividade foram extremamente elevados, chegando a ultrapassar $120 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Pode-se correlacionar a condutividade com uma possível contaminação por chorume, uma vez que a condução elétrica ocorre principalmente através de íons, que são abundantes no chorume.

A possível pluma contaminante atingiu profundidades de até 60m. Nesta profundidade ainda encontrou-se valores entre 40 e 60 mS.m^{-1} .

Nas áreas próximas a 20 e 65 m houve um aumento significativo da condutividade aparente, podendo indicar que estas duas regiões sejam mais permeáveis.

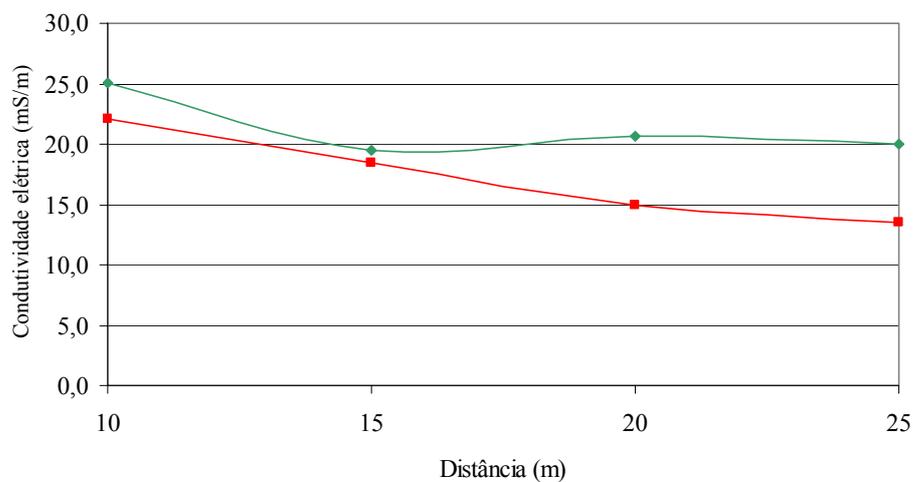
Para fazer a pseudo-seção da linha 2 consideraram-se, para a profundidade de 30 m, os valores do DMV20. O DMH40 sofreria mais influência do lixo, que está situado próximo à linha.

A linha 2 foi muito importante para esta pesquisa pois a mesma situa-se entre as duas lagoas facultativas (Figura 34), que não possuem impermeabilização no fundo e nem nas laterais. Portanto as lagoas podem ser as principais causas de contaminação nesta área.

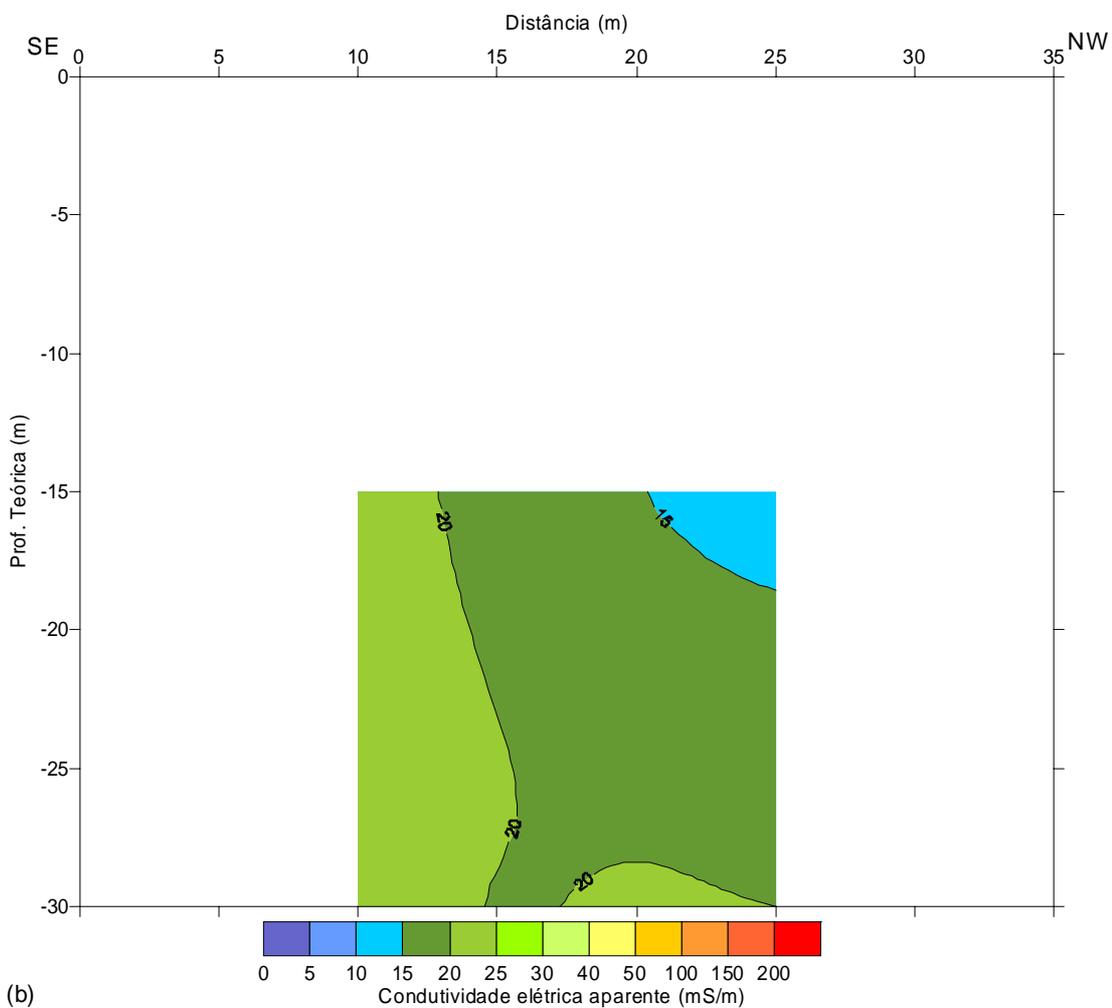


FIGURA 34 – Localização da linha 2 – entre as lagoas facultativas

A Figura 35 apresenta os resultados para a linha 3.



(a) ◆ DMV20 - prof. 30m ■ DMH20 - prof. 15m



(b)

FIGURA 35 – Perfil de caminhada eletromagnético da linha 3 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 3 situou-se a 1 m do menor lado da última lagoa facultativa, sendo paralela à mesma e perpendicular à linha 2, cruzando-a em 87 m. Neste perfil a condutividade máxima foi de 25 mS.m^{-1} , podendo estar contaminado. O menor valor de condutividade em relação à linha 2 pode ser devido ao fato de que, na última lagoa facultativa, o efluente já está em melhores condições, com menos íons e menor condutividade.

A Figura 36 apresenta os resultados para a linha 4.

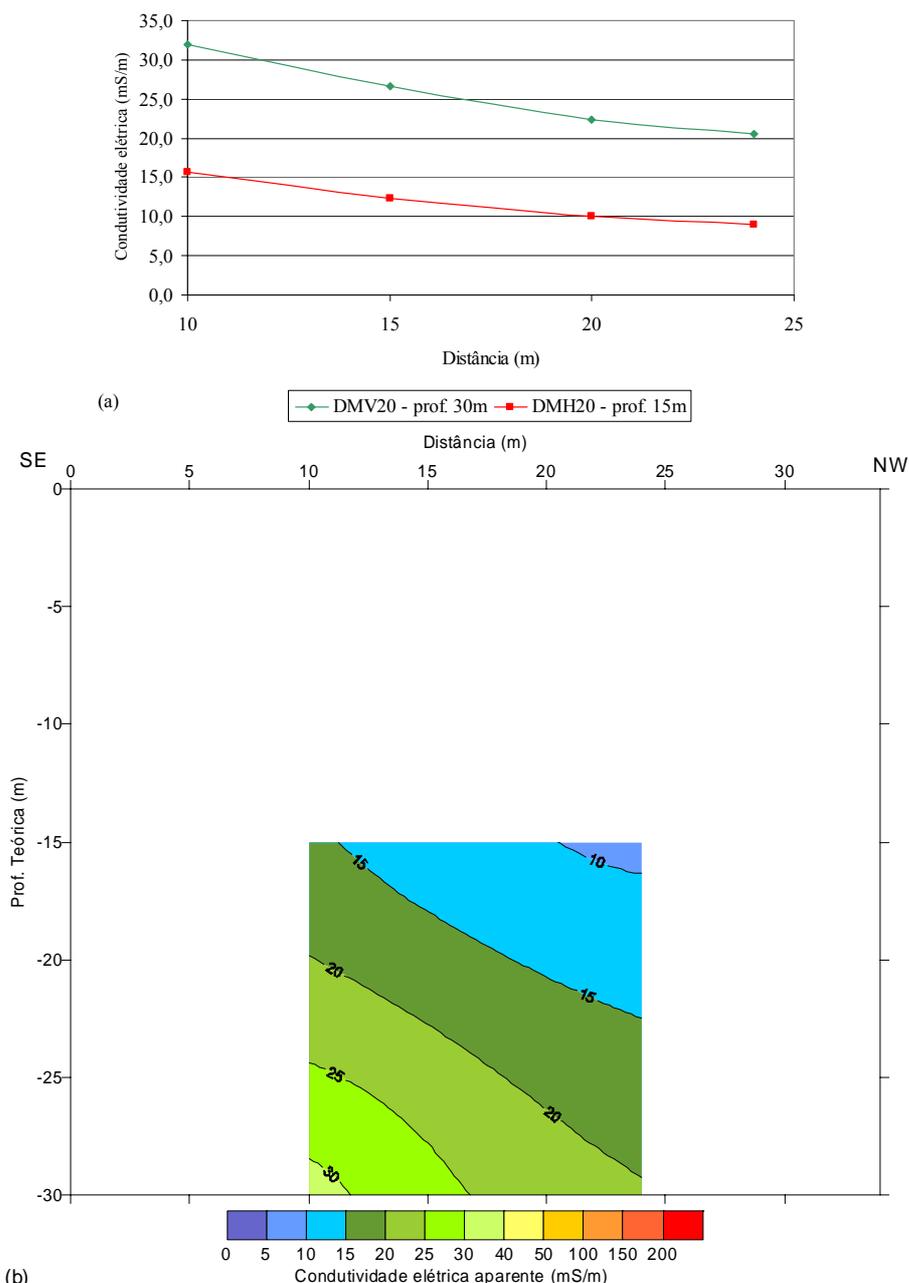


FIGURA 36 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 4 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 4 foi paralela à linha 3 e perpendicular à linha 2, cruzando-a em 108 m. Neste perfil a condutividade máxima foi de 32mS.m^{-1} , podendo estar contaminado. Esta condutividade elevada está próxima à primeira lagoa facultativa, aumentando com a profundidade. Isto pode indicar que a contaminação era proveniente das laterais e do fundo da lagoa e que a pluma contaminante avançava em profundidade e lateralmente, conforme a Figura 37.

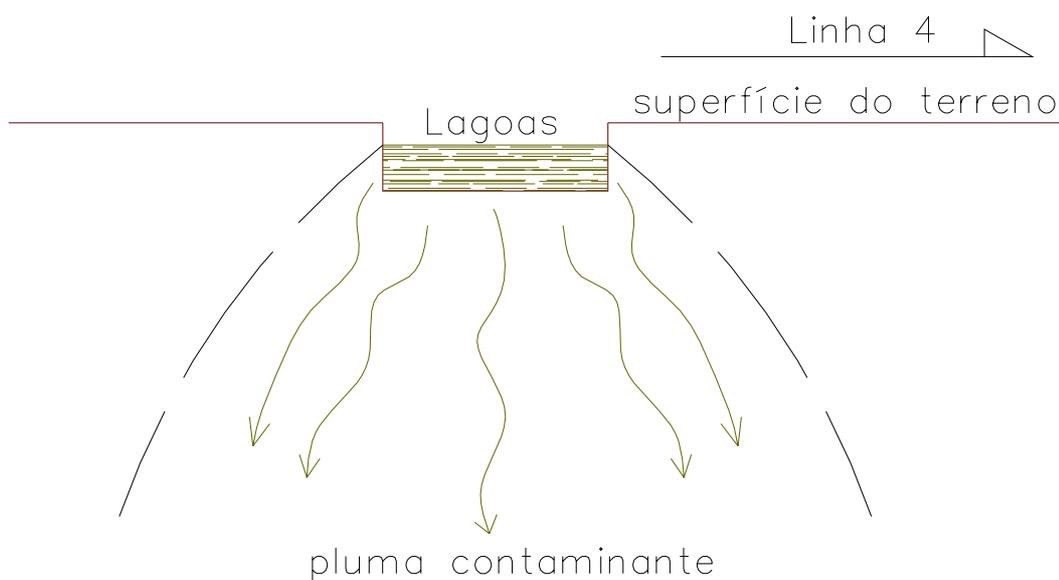


FIGURA 37 – Interpretação da linha 4 – avanço da pluma contaminante proveniente das lagoas

A Figura 38 apresenta os resultados para a linha 5.

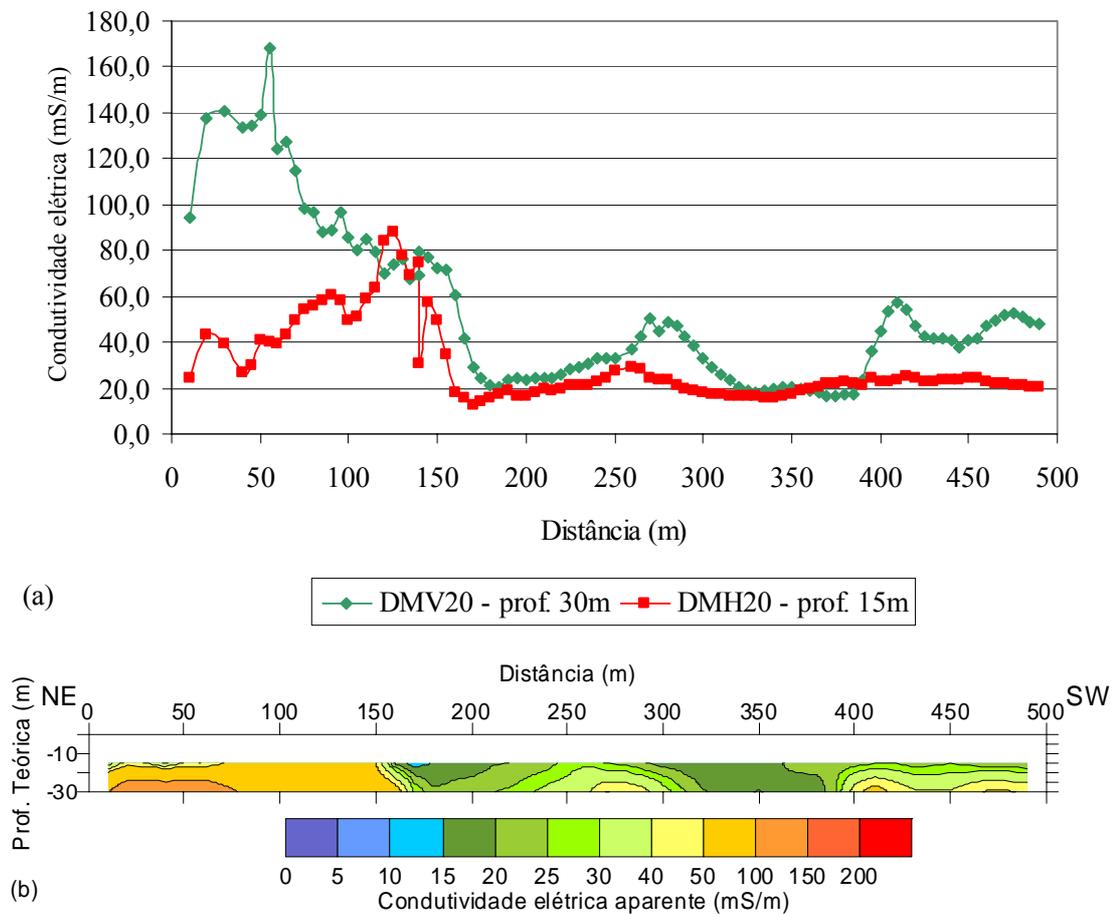


FIGURA 38 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 5 - 19/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 5 situou-se paralelamente às células de deposição de lixo do aterro e à última lagoa da série, no lado noroeste, conforme o mapa da Figura 31. De maneira geral, toda a linha estava contaminada.

Os maiores valores de condutividade foram encontrados no trecho paralelo à parte impermeabilizada do aterro (0 a 190 m), onde a deposição de lixo era mais recente. O dipolo vertical, que sofre menor influência do lixo lateral, apresentou valores maiores, quando comparado ao dipolo horizontal, indicando que realmente há contaminação do subsolo. Esta contaminação já atingiu profundidades maiores que 30 m. Daí conclui-se que a impermeabilização não estava sendo eficiente. Provavelmente estava havendo fuga de chorume. Na Figura 39 observou-se um exemplo dessa fuga, fotografada em dezembro de 2005.



FIGURA 39 – Fuga lateral de chorume na parte impermeabilizada do aterro - 21/12/2005

No mês de março de 2006, estação chuvosa, encontrou-se fugas maiores, com maior volume de chorume, que escoava superficialmente para fora do aterro, contaminando uma grande área, matando a vegetação por onde passava e, inclusive, formando uma lagoa numa baixada.

No trecho de 190 a 232 m da linha 5 não havia nem lixo nem lagoa imediatamente ao lado da linha ensaiada. Os valores deste trecho variaram de menos de 20 mS.m^{-1} a mais de 30 mS.m^{-1} , podendo haver contaminação. A partir de 232 m inicia a lagoa e em 260 m começa uma subida brusca. A lagoa vai até 315 m, onde a linha encontrava-se a aproximadamente 7 m acima do nível d'água da lagoa. Neste trecho a condutividade aumentou significativamente, indicando a contaminação do subsolo proveniente das lagoas.

O trecho de 330 m até o final da linha é paralelo à célula sem impermeabilização de base. Em grande parte desse trecho foram constatados valores de condutividade superiores a 40 mS.m^{-1} , indicando a contaminação do subsolo. Estes valores elevados correspondem principalmente à profundidade média de 15 m. Os valores para a profundidade média de 7,5 m foram menores, mostrando que a

contaminação neste trecho está mais profunda. Provavelmente é proveniente da base do aterro, que não é impermeabilizada.

A Figura 40 apresenta os resultados para a linha 6.

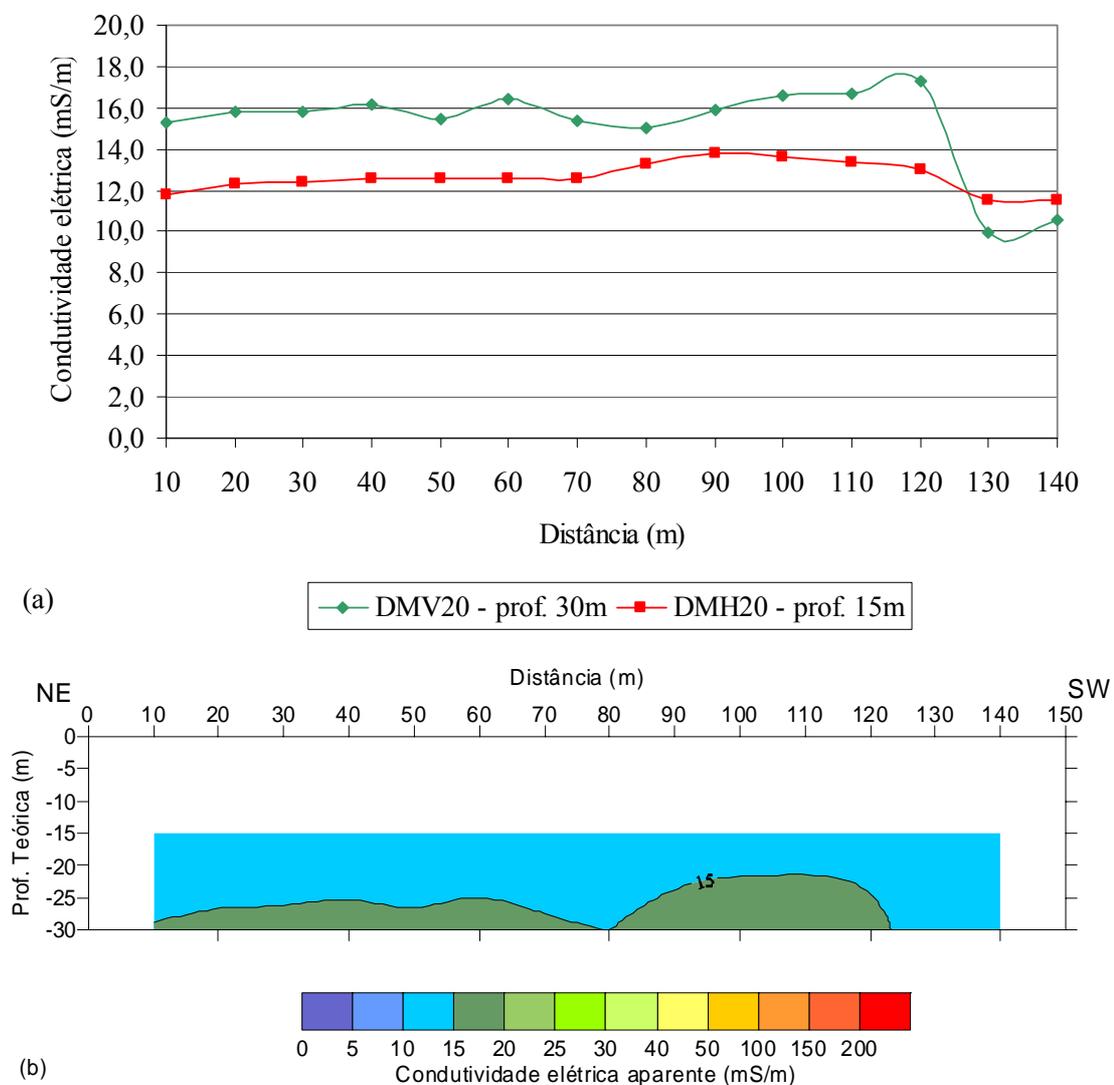


FIGURA 40 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 6 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 6 situou-se paralelamente à linha 5 em seu trecho inicial, ou seja, paralela à célula com impermeabilização. A linha 5 situava-se a 5 m do depósito de lixo, enquanto a linha 6 encontrava-se a 40 m do mesmo. Na linha 5 este trecho apresentou elevados valores de condutividade elétrica, mas na linha 6 os valores praticamente se normalizaram, indicando que a pluma ainda não avançou até essa distância.

Já a linha 7, representada na Figura 41, foi perpendicular ao aterro e cruzou a linha 6 em 103 m. Iniciou a 20 m do aterro e terminou a 70m do mesmo, porém as leituras foram feitas de 30 a 60 m de distância do aterro (trecho de 10 a 40 m da linha), pois se utilizou o cabo de 20 m.

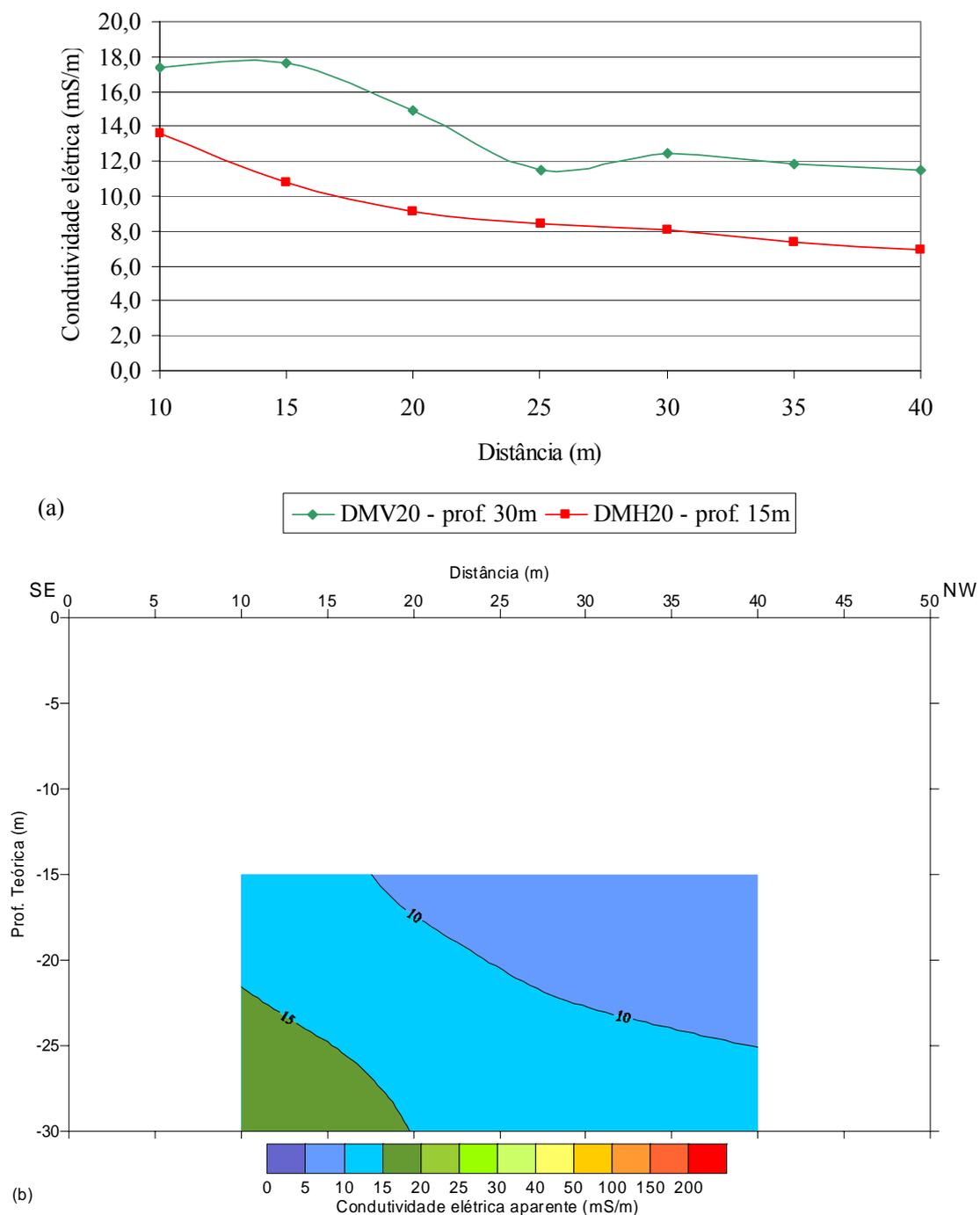


FIGURA 41 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 7 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A condutividade do perfil foi diminuindo à medida que o mesmo se afastou do aterro, mostrando que provavelmente existia uma interferência do lixo nos valores coletados.

A Figura 42 apresenta os resultados para a linha 8.

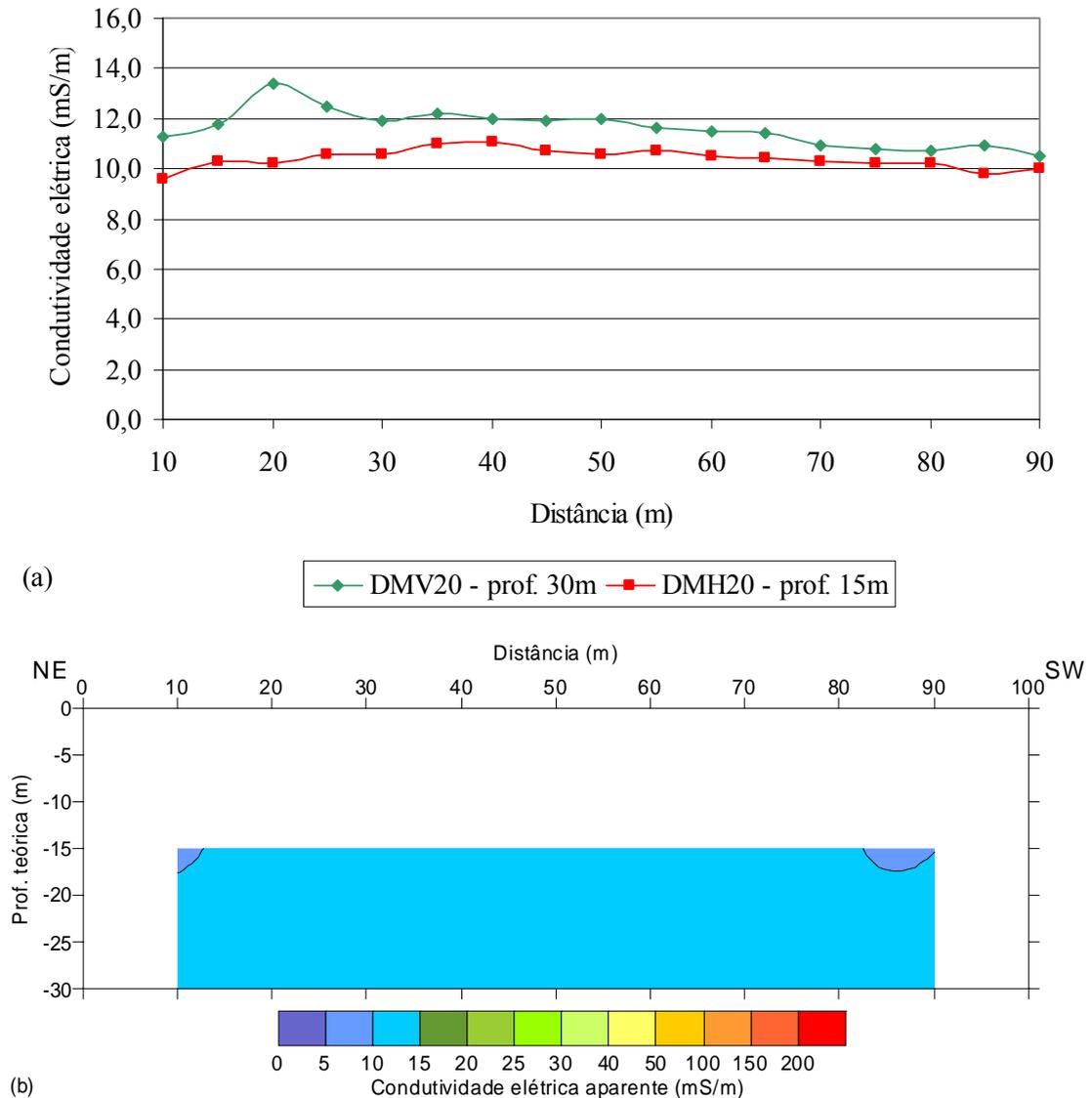


FIGURA 42 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 8 - 20/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 8 foi paralela à parte não impermeabilizada do aterro, a 45 m do mesmo. Os valores encontrados podem ser considerados normais, indicando que a pluma ainda não avançou até esta região.

A Figura 43 apresenta os resultados para a linha 9.

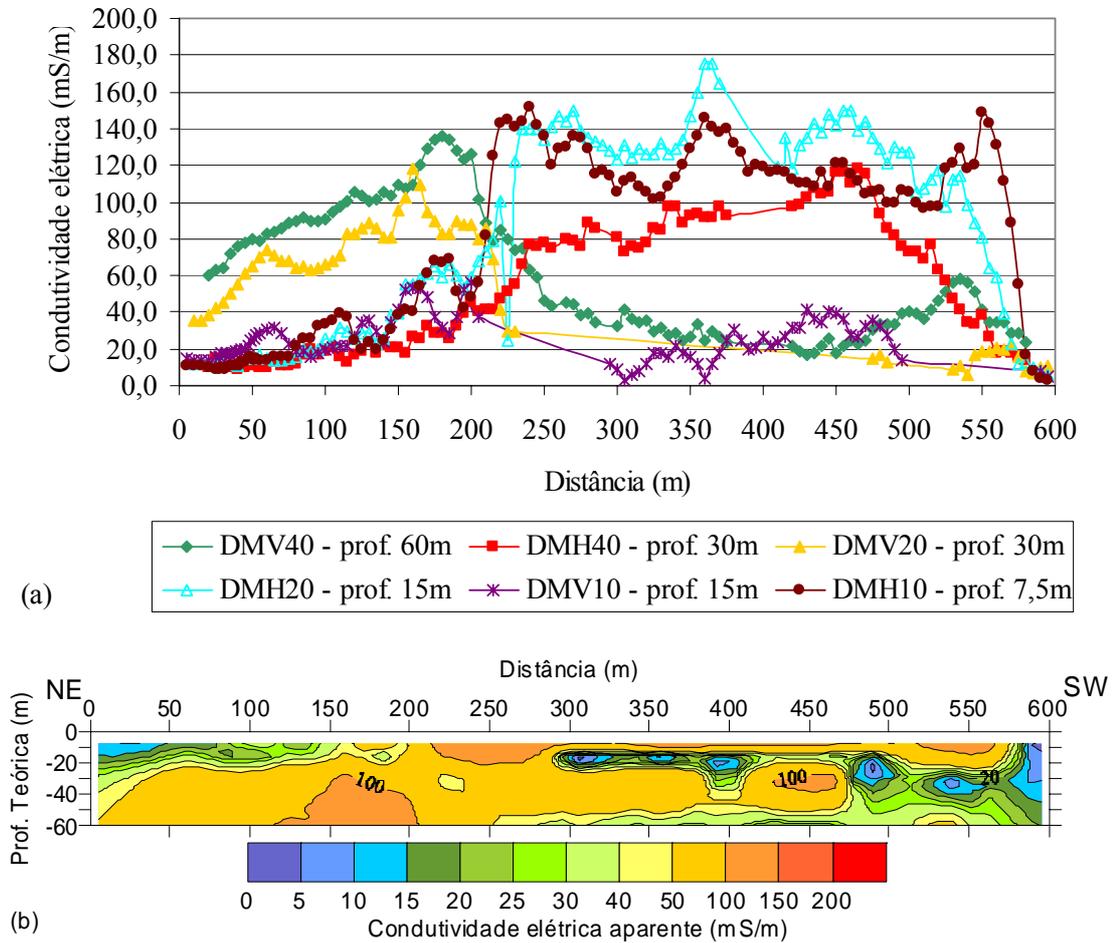


FIGURA 43 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 9; cabo de 10 m - 21/12/2005; cabos de 20 e 40 m - 15/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 9 foi paralela ao aterro, no lado sudeste, ao lado do antigo Garimpo do Mineiro. Esta região é a mais problemática do aterro, pois caso haja contaminação por chorume, este pode percolar facilmente através da litologia porosa e das fraturas preenchidas por quartzo. De 0 a 50 m visualizam-se tais fraturas, conforme Figura 44.



FIGURA 44 – Fraturas preenchidas por quartzo no trecho inicial da linha 9

O trecho inicial da linha 9, que contém as fraturas aparentes, preenchidas por quartzo, apresentou fortes evidências de contaminação. Neste trecho os valores de condutividade elétrica foram elevados, principalmente os lidos com o DMV, que sofre menor influência do lixo lateral. A situação, portanto, é preocupante, devido à facilidade de percolação do chorume através dessa formação geológica.

Para os dados do DMV20 houve um trecho da linha 9, entre 235 e 470 m (235 m de extensão), que os valores de condutividade foram negativos. Esses valores não foram considerados no gráfico e na pseudo-seção pois não teriam sentido na interpretação. Nesse trecho, então, utilizou-se os dados do DMH40 que, assim como o DMV20, corresponde à profundidade de 30 m.

Foram obtidas informações, junto à administração do aterro, de que num trecho da linha 9 – de aproximadamente 12 m – havia lixo enterrado, podendo

interferir na condutividade elétrica aparente. Não foi especificada a localização exata deste trecho. Com base nas características do perfil de condutividade feito sobre a célula de lixo sem impermeabilização (Figura 45), tentou-se identificar, por semelhança, o trecho da linha 9 onde o lixo estava enterrado.

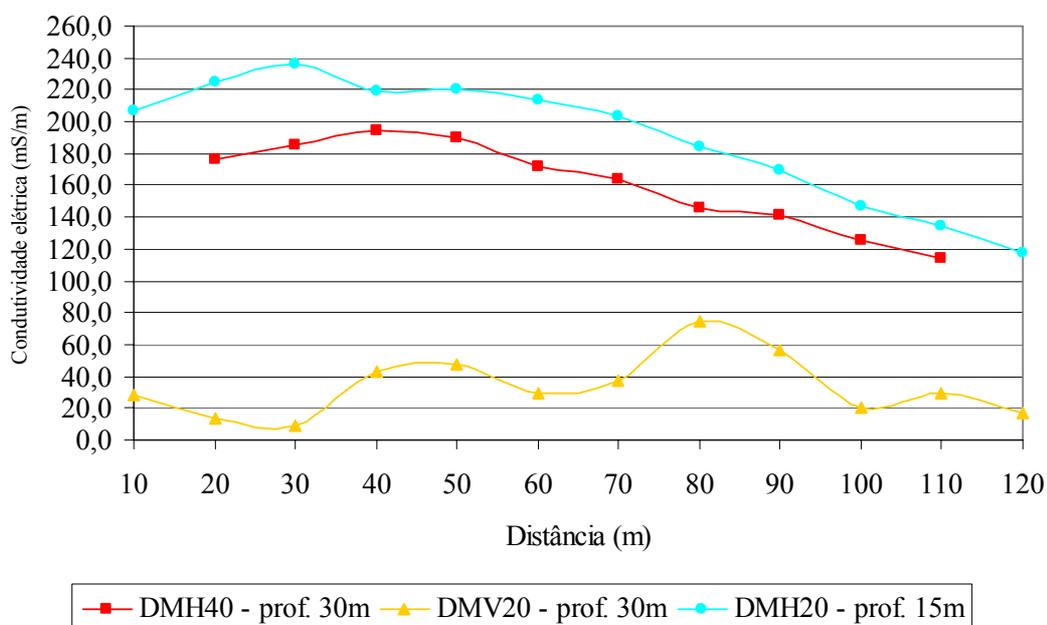


FIGURA 45 – Perfil de caminhamento eletromagnético sobre a célula de lixo sem impermeabilização - 19/12/2005

Sobre a célula de lixo, os valores de condutividade aparente (DMV40) foram negativos, a exemplo do que aconteceu em um trecho de 235 m da linha 9 (DMV20). Em ambos os casos os valores de condutividade lidos com todos os cabos, utilizando dipolo magnético horizontal, foram elevadíssimos. E ainda, os valores de condutividade lidos com os outros cabos, utilizando dipolo vertical, apresentaram valores muito inferiores aos lidos com o dipolo horizontal, para as mesmas profundidades teóricas. Analisando essas semelhanças, supõe-se que pode haver lixo enterrado no trecho de 235 a 470 m da linha 9, ou seja, num trecho muito maior do que os 12 m informados pela administração do aterro.

Poder-se-ia afirmar que os elevados valores de condutividade para o DMH no referido trecho da linha 9 estariam sofrendo forte influência do lixo lateral. Mas esta hipótese pode ser descartada observando-se o trecho inicial da linha 9, que também

se situa ao lado do depósito de lixo e não apresentou elevados valores de condutividade para o DMH.

Nas leituras realizadas com DMH sobre a célula de lixo os valores de condutividade foram extremamente elevados (até 230 mS.m^{-1}), o que é perfeitamente aceitável, pois o lixo é muito condutivo. No trabalho de SILVA et al (2003), realizado no lixão de Ribeirão Preto, também foram encontrados valores elevados de condutividade. Sobre as cavas de lixo de 10 m de espessura foram lidos valores superiores a 150 mS.m^{-1} . Os valores, embora elevados, foram menores em relação ao aterro de Cuiabá pois a espessura de lixo em Ribeirão Preto era menor e provavelmente o lixo era mais antigo e, portanto, quimicamente mais estável. A espessura de lixo no aterro de Cuiabá seguramente é maior que 15 m.

Os baixos valores encontrados para os DMV10 e 40 no trecho entre 235 e 470 m da linha 9, podem ser explicados pela suposta composição da camada lida, onde se acredita que a parte superior seja composta por lixo e a parte inferior por solo. A leitura do aparelho corresponde a uma condutividade “média” de toda a camada. Por isso a condutividade é chamada “aparente”. Apesar da leitura do DMV10 corresponder a uma profundidade teórica de 15 m, ela reflete a condutividade da camada de 0 a 15 m, sendo a maior contribuição em 4 m ($0,4 \times$ espaçamento entre as bobinas, conforme McNEILL, 1980). Porém em 15 m de profundidade, onde não há lixo, a contribuição ainda é significativa. Já o DMH20, apesar de também corresponder a uma profundidade teórica de 15 m, é mais influenciado pela parte superficial da camada (McNEILL, 1980), justamente onde se acredita estar o lixo. Por isso os valores de condutividade para o DMH20 foram maiores do que para o DMV10.

A Figura 46 apresenta os resultados para a linha 10.

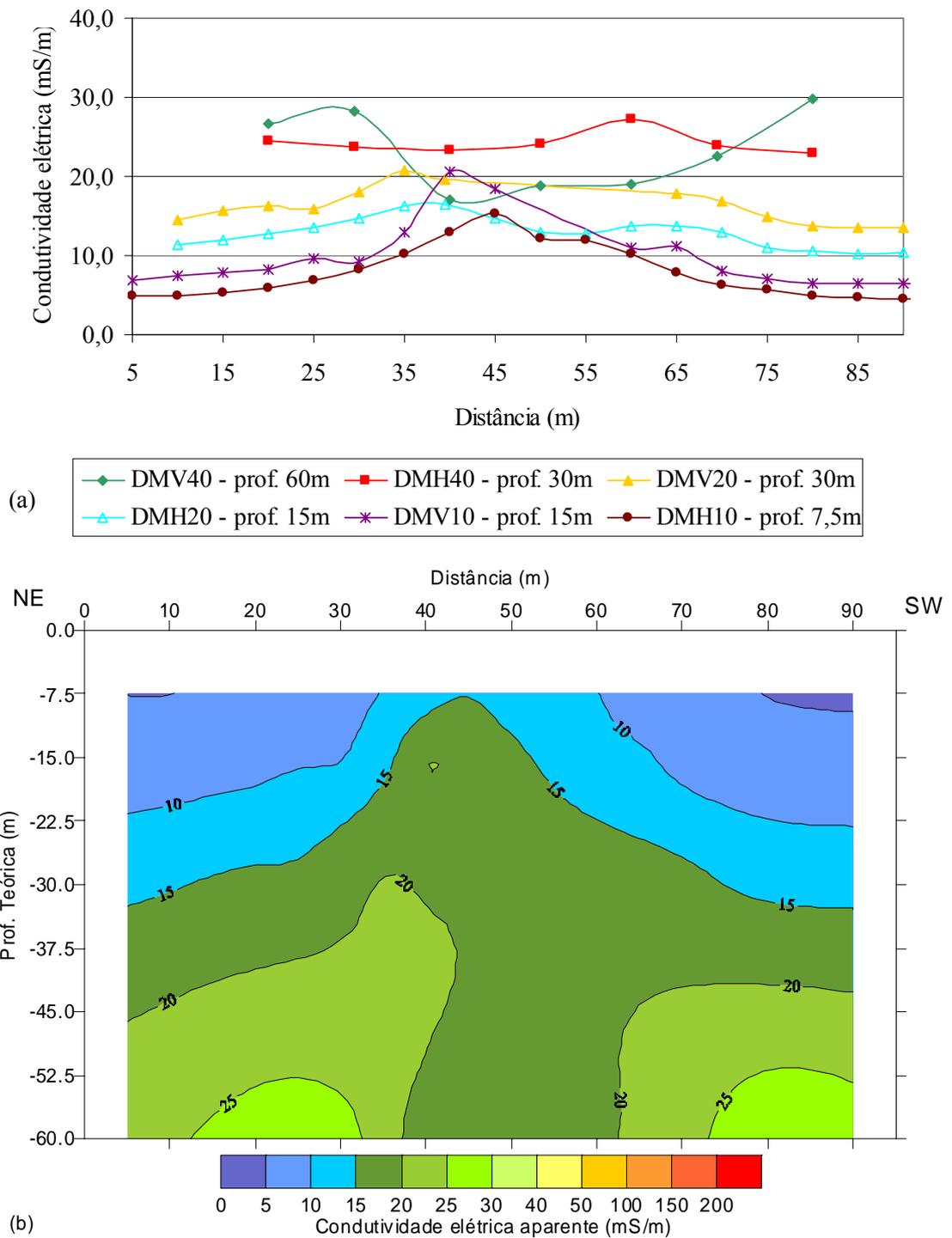


FIGURA 46 – Perfil de caminhada eletromagnética da linha 10 - 21/12/2005 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

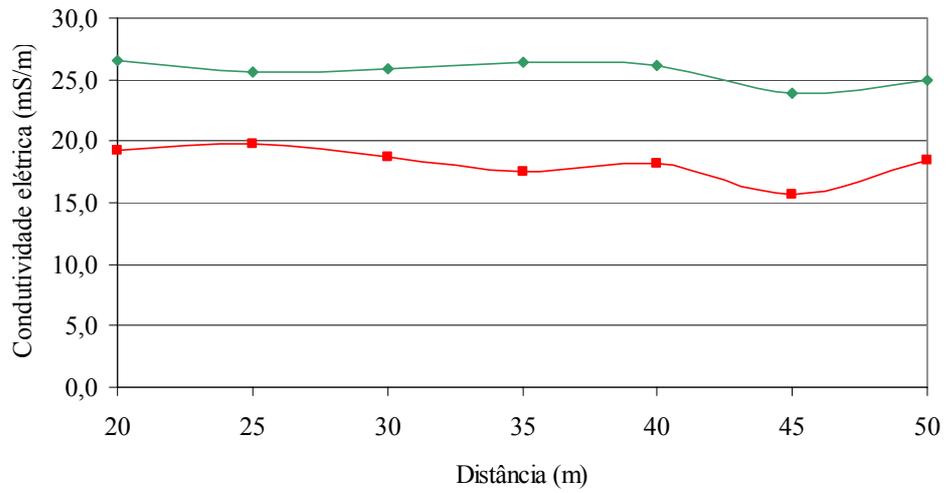
A linha 10 foi paralela às lagoas, situando-se a 95 m do término da última lagoa. De acordo a Figura 41, é possível que haja certo nível de contaminação do

subsolo abaixo de 30 m de profundidade. Em 43 m passa o córrego do chorume que sai das lagoas, que parece ter influenciado na condutividade. A Figura 47, a seguir, mostra a linha 10 e o córrego de chorume.

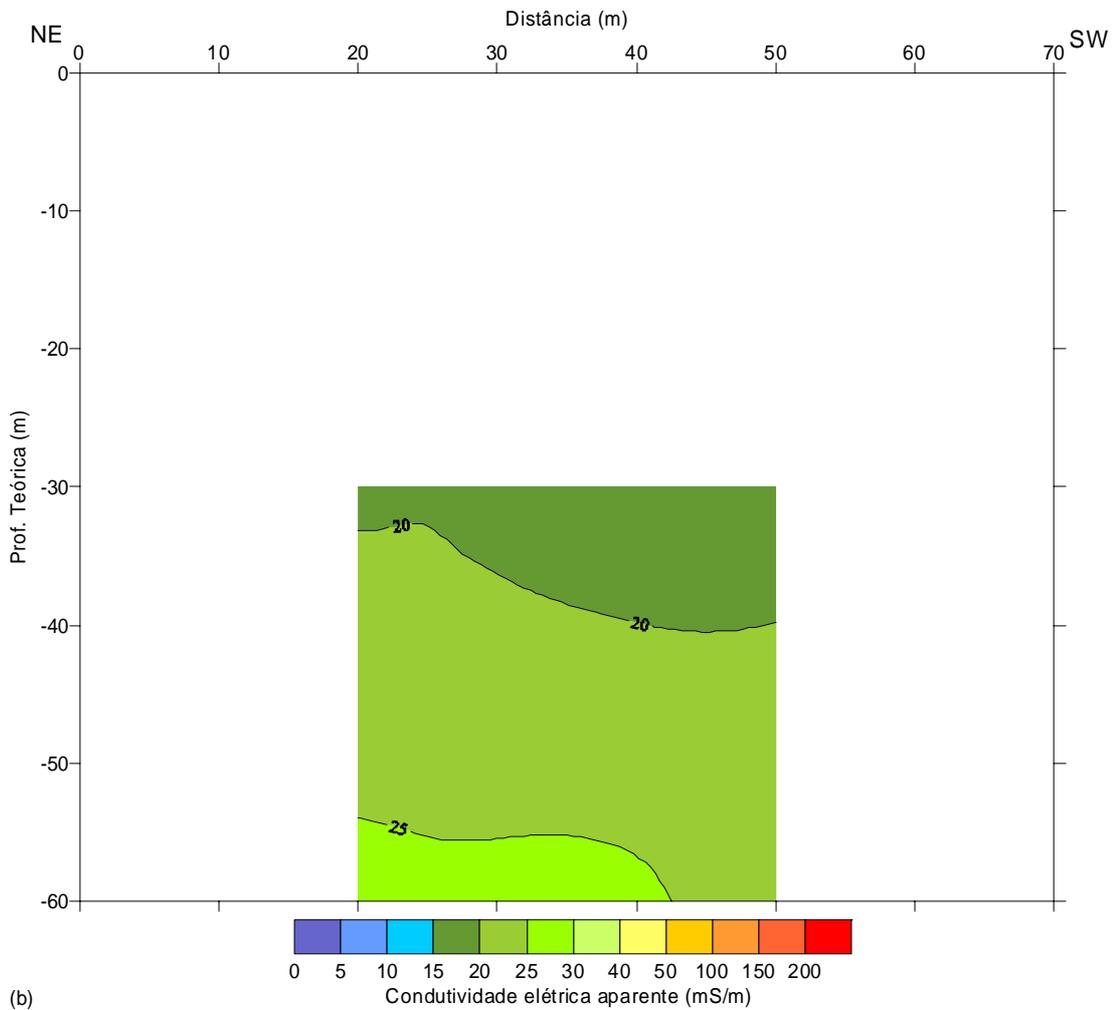


FIGURA 47 – Linha 10 e o córrego de chorume efluente das lagoas - 21/12/2005

A Figura 48 apresenta os resultados para a linha 11.



(a)



(b)

FIGURA 48 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 11 - 17/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 11 foi paralela à parte não impermeabilizada do aterro, situando-se entre as linhas 5 e 8. Está a 33 do depósito de lixo. De acordo com a Figura 48, a linha 11 poderia estar contaminada, principalmente abaixo de 50 m de profundidade, apresentando valores superiores a 25 mS.m^{-1} . Estava menos contaminada que a linha 5 e mais contaminada que a linha 8, mostrando que a pluma de contaminação estava sendo atenuada à medida que se afastava do aterro.

A Figura 49 apresenta os resultados para a linha 12.

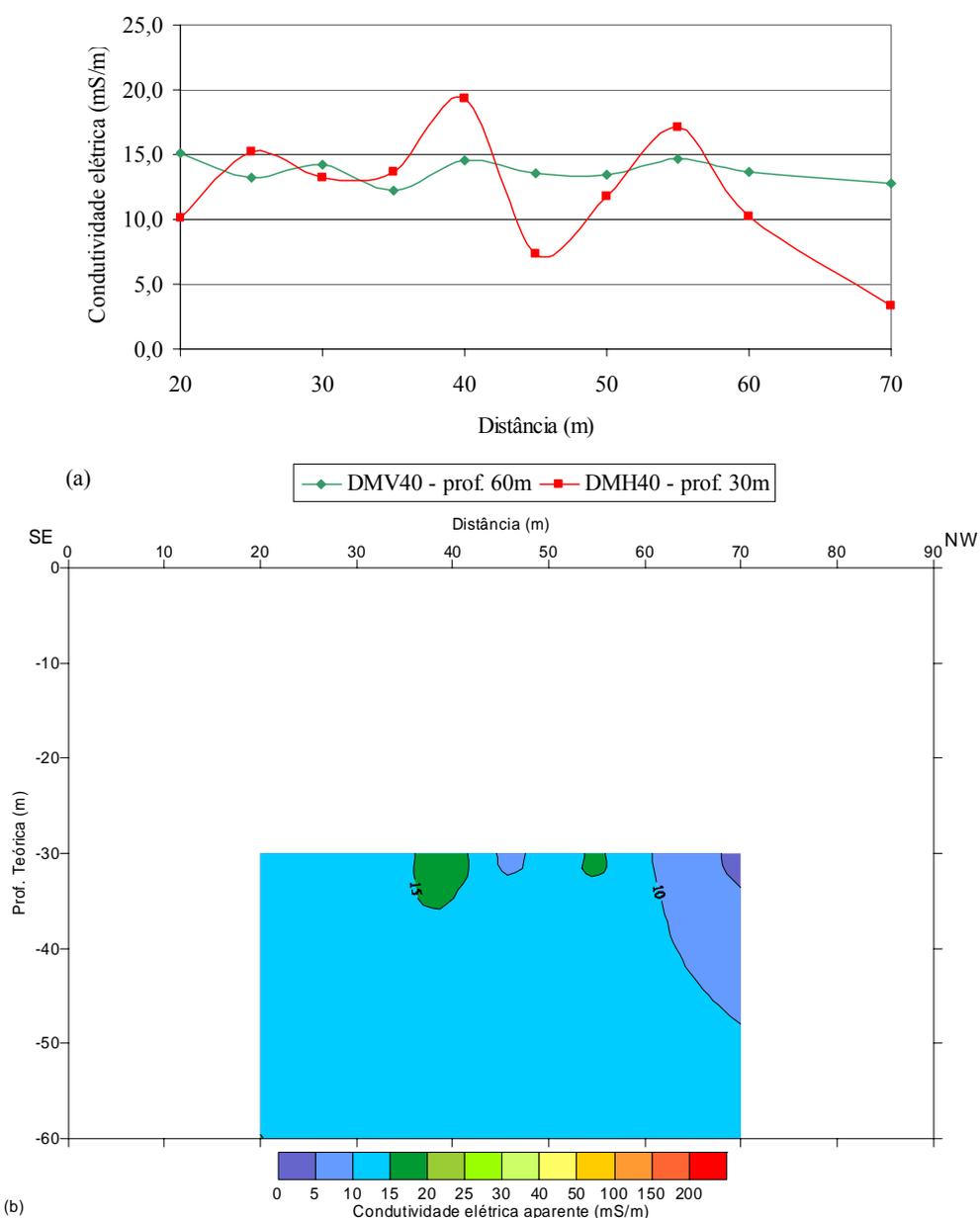


FIGURA 49 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 12 - 17/03/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 12 foi perpendicular à parte não impermeabilizada do aterro e cruzava a linha 8 em 23 m. Iniciou a 30 m do aterro, mas a primeira leitura foi feita a 50 m do aterro, pois se utilizou o cabo de 40 m. A linha 12 não apresentou zonas de condutividade anômala, não estando contaminada.

A Figura 50 apresenta os resultados para a linha 13.

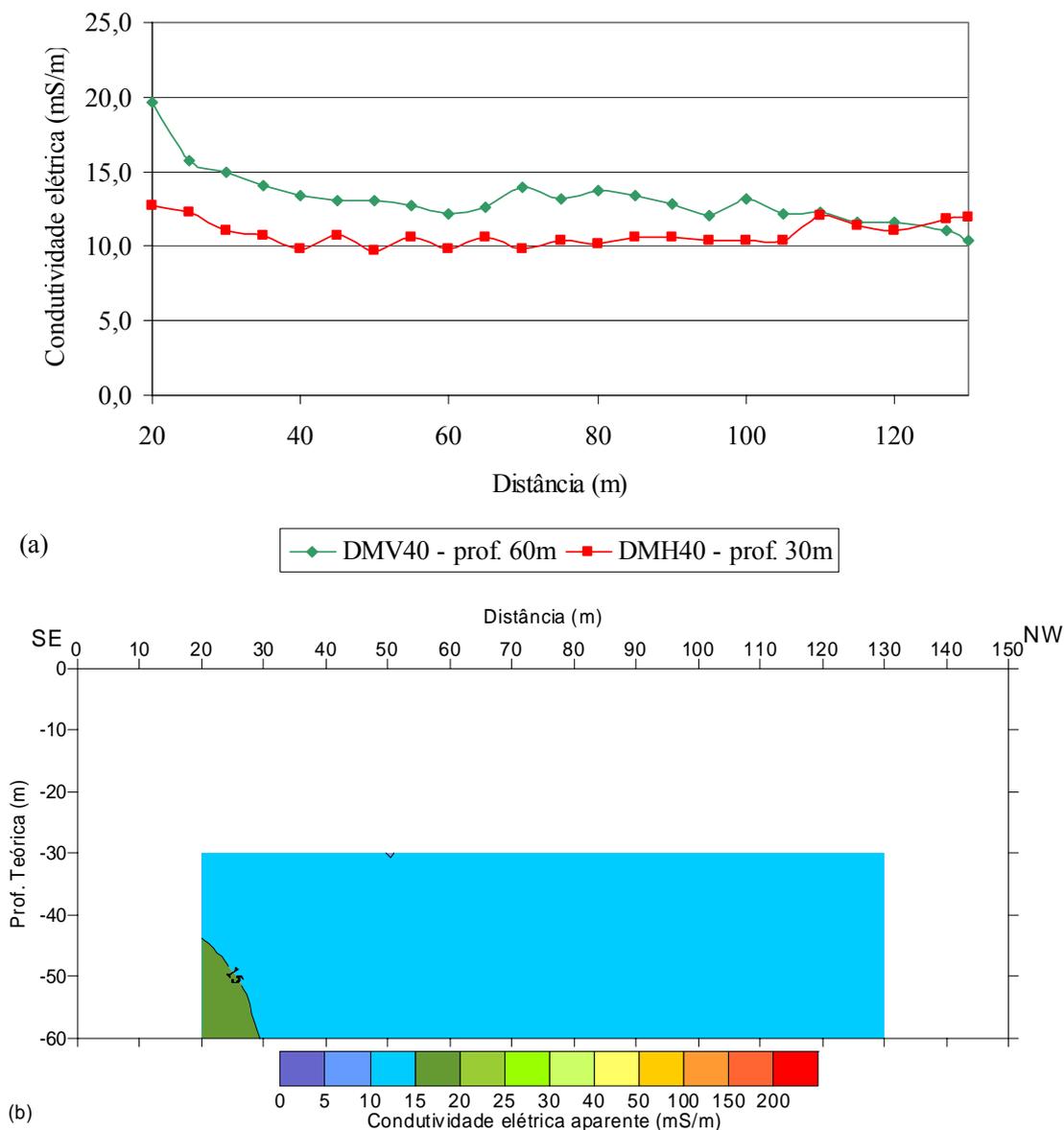


FIGURA 50 – Perfil de caminhada eletromagnética da linha 13 - 25/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 13 foi perpendicular ao aterro, iniciando a 15 m da célula sem impermeabilização. Porém a primeira leitura foi feita a 35 m do aterro, pois se

utilizou o cabo de 20 m. Esta linha não apresentou condutividade significativa. Todas as leituras foram inferiores a $20 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, mas os valores foram diminuindo a medida que a linha se afastou do aterro, indicando que poderia haver uma certa influência do chorume nas leituras.

A Figura 51 apresenta os resultados para a linha 14.

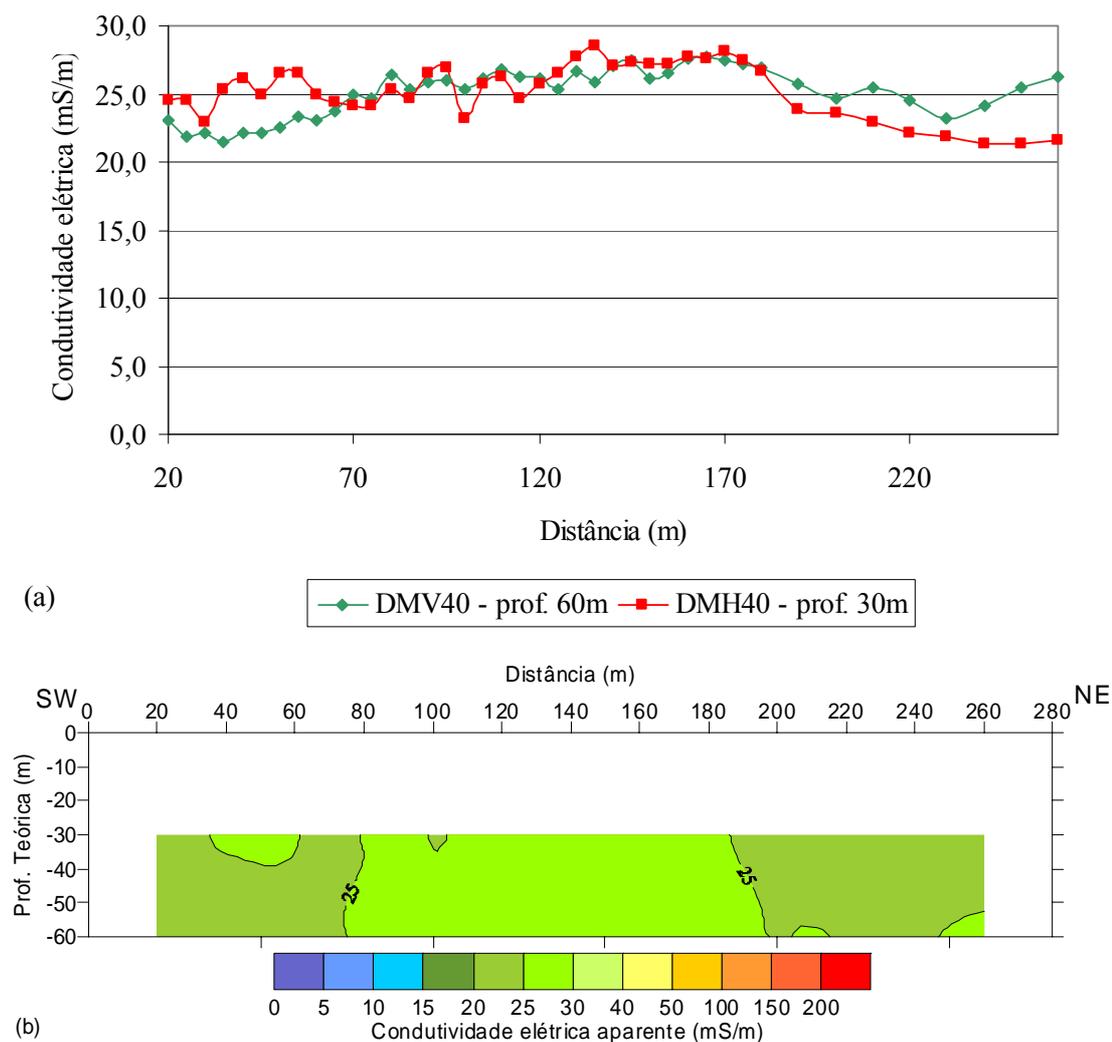


FIGURA 51 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 14 - 26/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 14 foi paralela ao aterro, situando-se a aproximadamente 148 m da célula não impermeabilizada. Próximo a esta linha formou-se uma lagoa de chorume sem tratamento, proveniente de fuga lateral do aterro. Este chorume escoou superficialmente e formou tal lagoa. Os valores de condutividade maiores que 20

$\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ provavelmente se devem à contaminação provocada pelo chorume escoado e pela lagoa.

A Figura 52 apresenta os resultados para a linha 15.

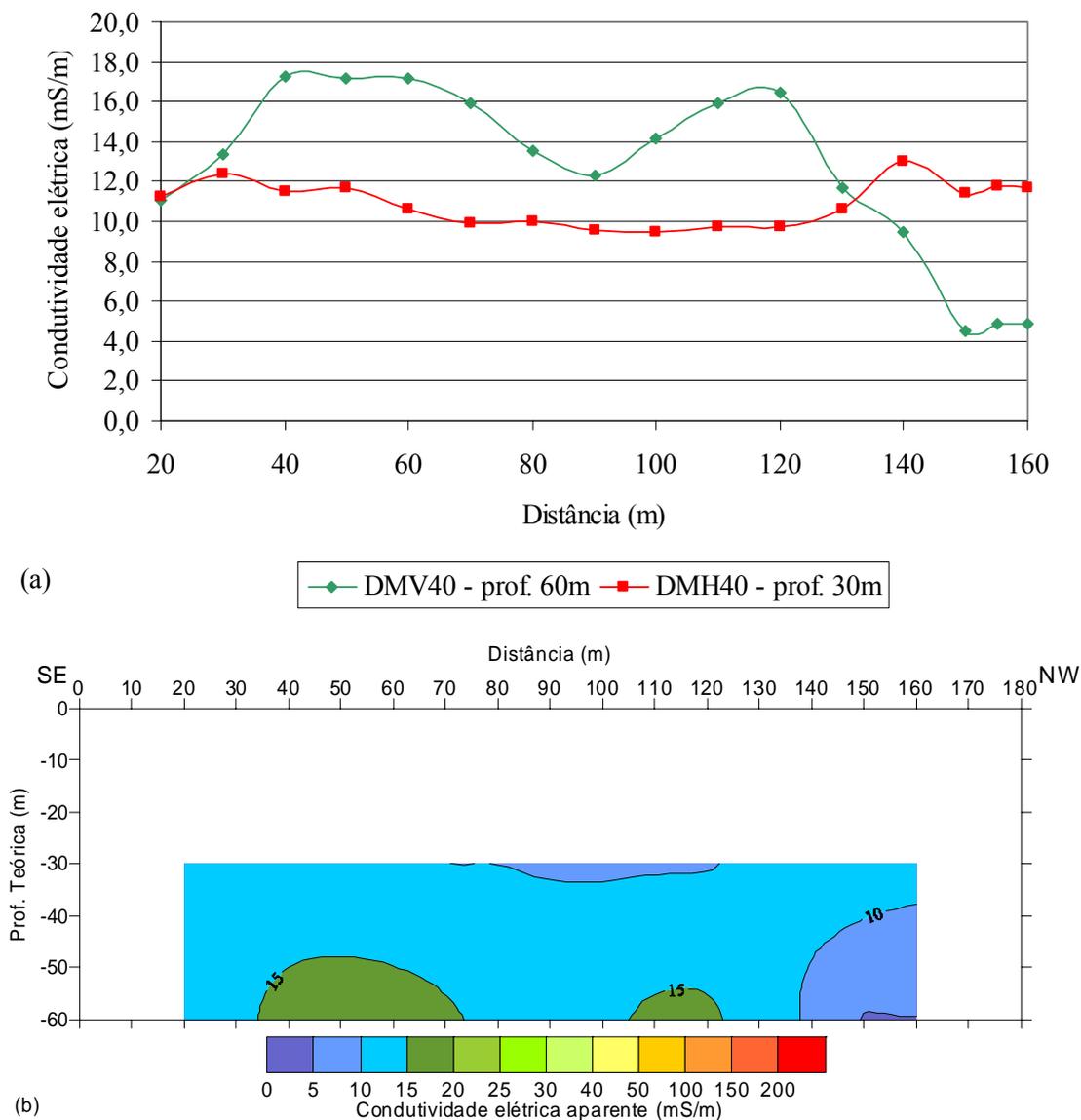


FIGURA 52 – Perfil de caminamento eletromagnético da linha 15 - 26/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 15 foi perpendicular à lagoas de tratamento de chorume. A primeira leitura foi a 40 m da última lagoa. Os valores de condutividade não foram significativos, indicando que a pluma de contaminação não havia chegado ainda nesta área.

A Figura 53 apresenta os resultados para a linha 16.

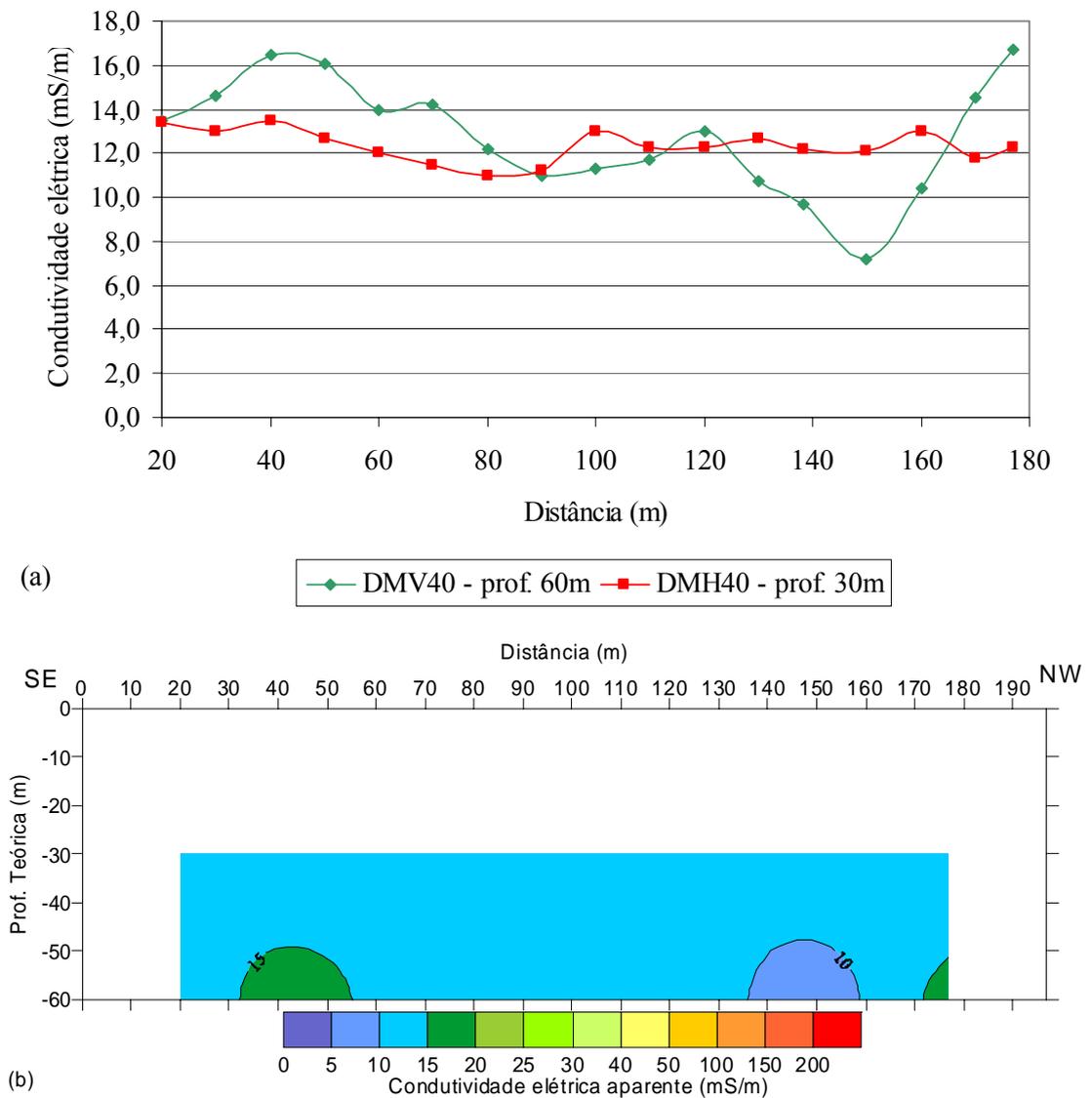


FIGURA 53 – Perfil de caminamento eletromagnético da linha 16 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 16 foi paralela à linha 15, situando-se a aproximadamente 50 m a oeste da linha 15. Portanto foi perpendicular ao aterro. Os valores de condutividade também não foram significativos.

A Figura 54 apresenta os resultados para a linha 17.

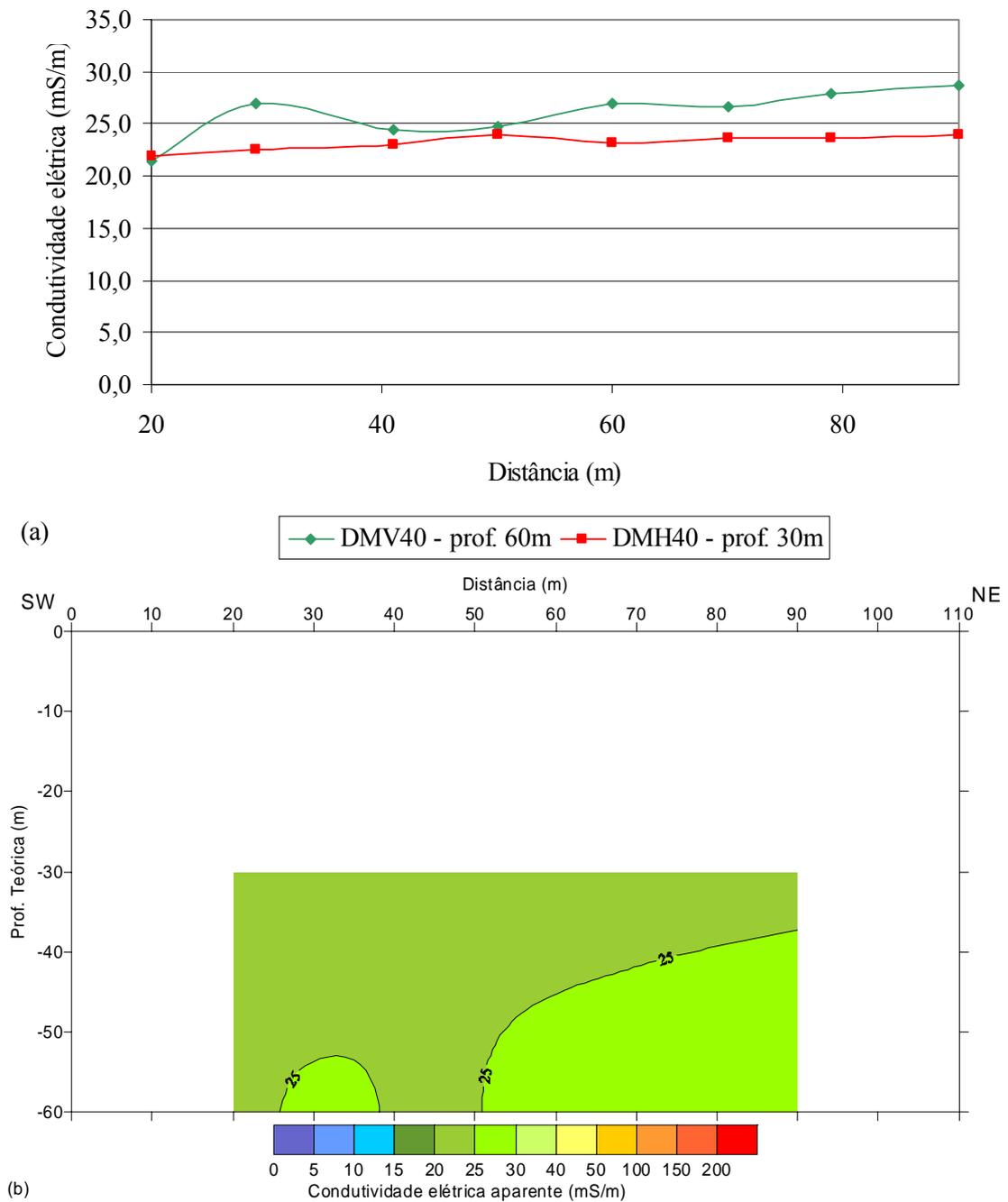


FIGURA 54 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 17 - 27/04/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 17 foi paralela à parte não impermeabilizada do aterro e às lagoas. Os valores de condutividade próximos a 30 mS.m^{-1} mostram que pode ter havido contaminação. Poder-se-ia afirmar que houve influência da umidade do solo nas leituras, pois as mesmas foram feitas no final do período chuvoso. Mas as linhas 15 e

16, que cortavam a linha 17 e foram feitas no mesmo dia, tiveram valores de condutividade inferiores a 20 mS.m^{-1} .

A Figura 55 apresenta os resultados para a linha 18.

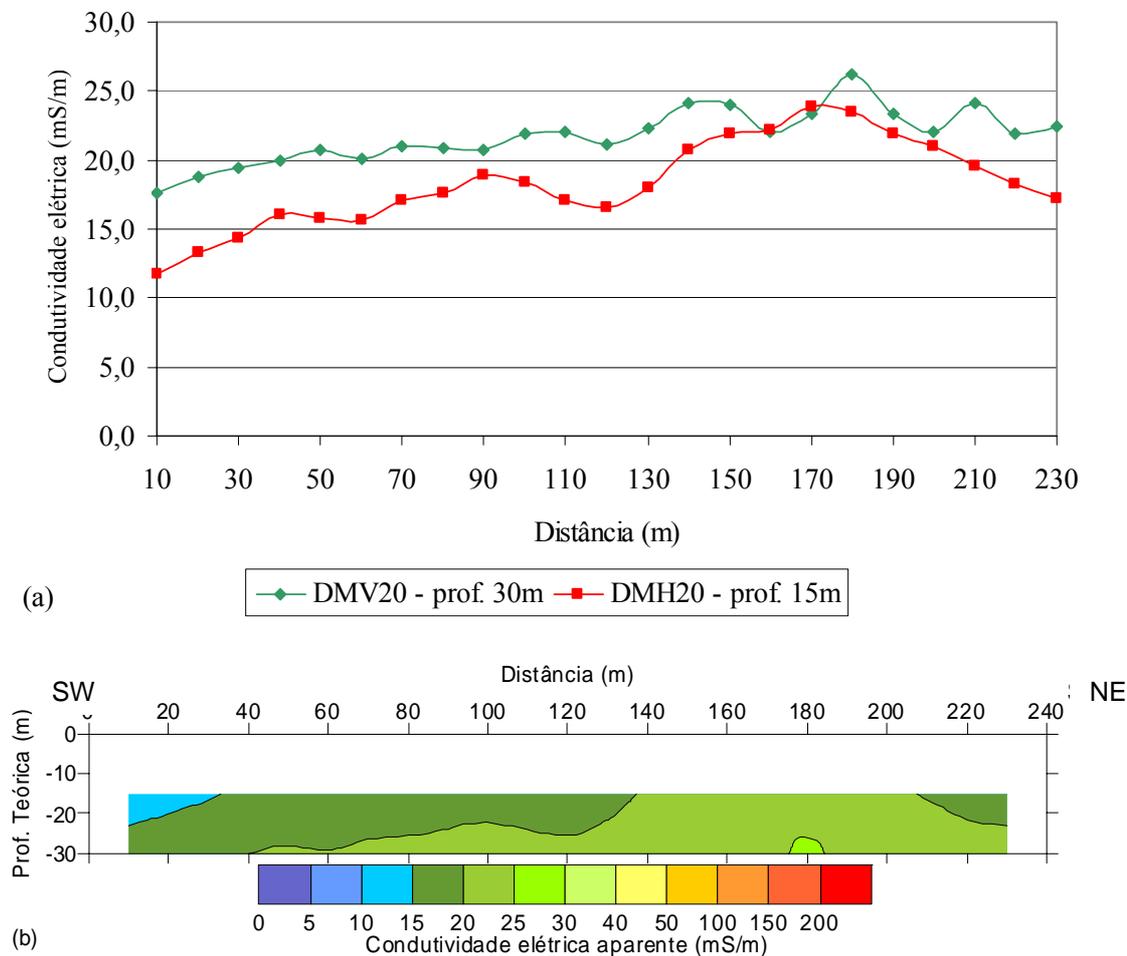


FIGURA 55 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 18 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 18 situava-se a nordeste do aterro, em média a 130 m da célula de lixo com impermeabilização. Os valores de condutividade foram superiores a 20 mS.m^{-1} , podendo indicar contaminação.

A Figura 56 apresenta os resultados para a linha 19.

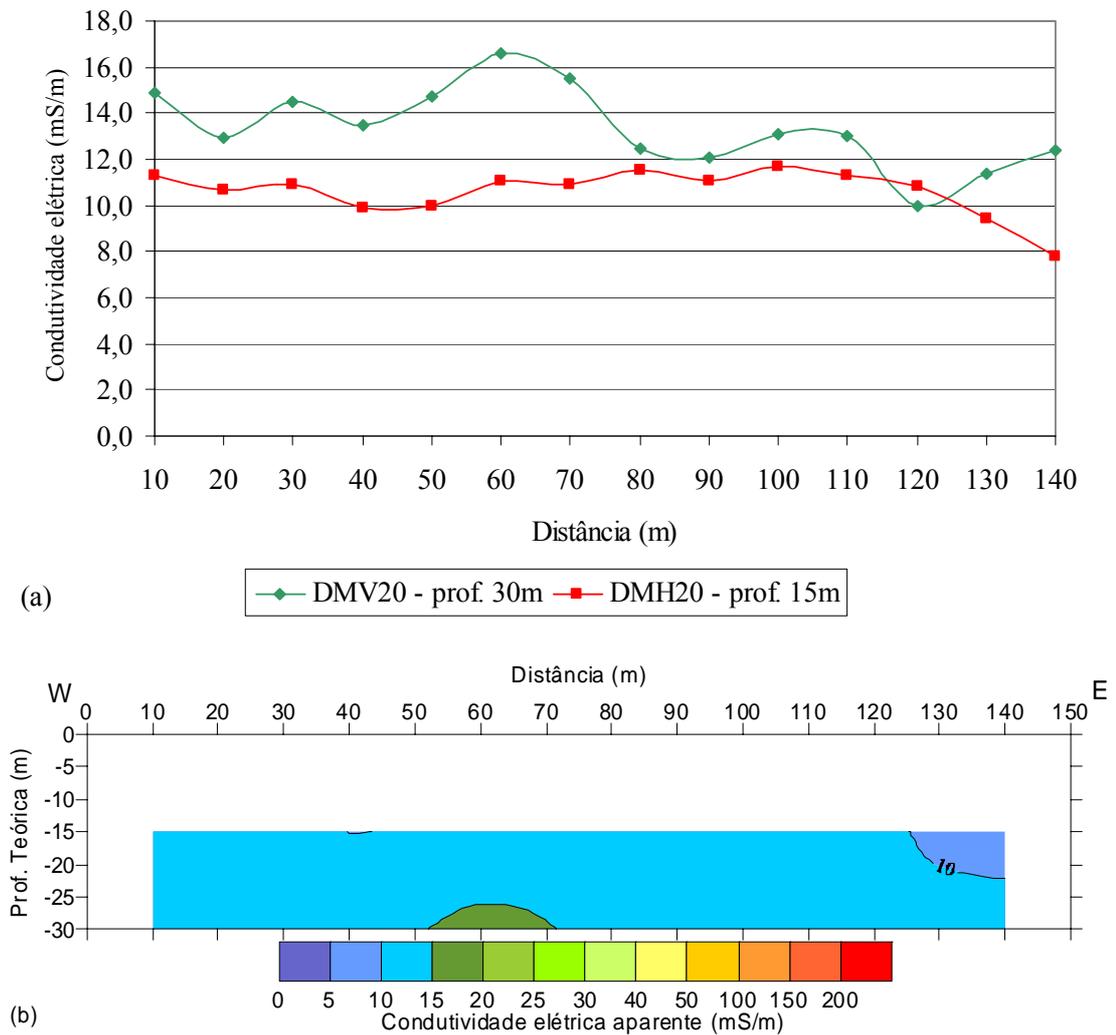


FIGURA 56 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 19 - 19/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 19 situava-se ainda mais a nordeste do aterro, em média 125 m afastada da célula de lixo com impermeabilização. Não apresentou indícios de contaminação.

A Figura 57 apresenta os resultados para a linha 20.

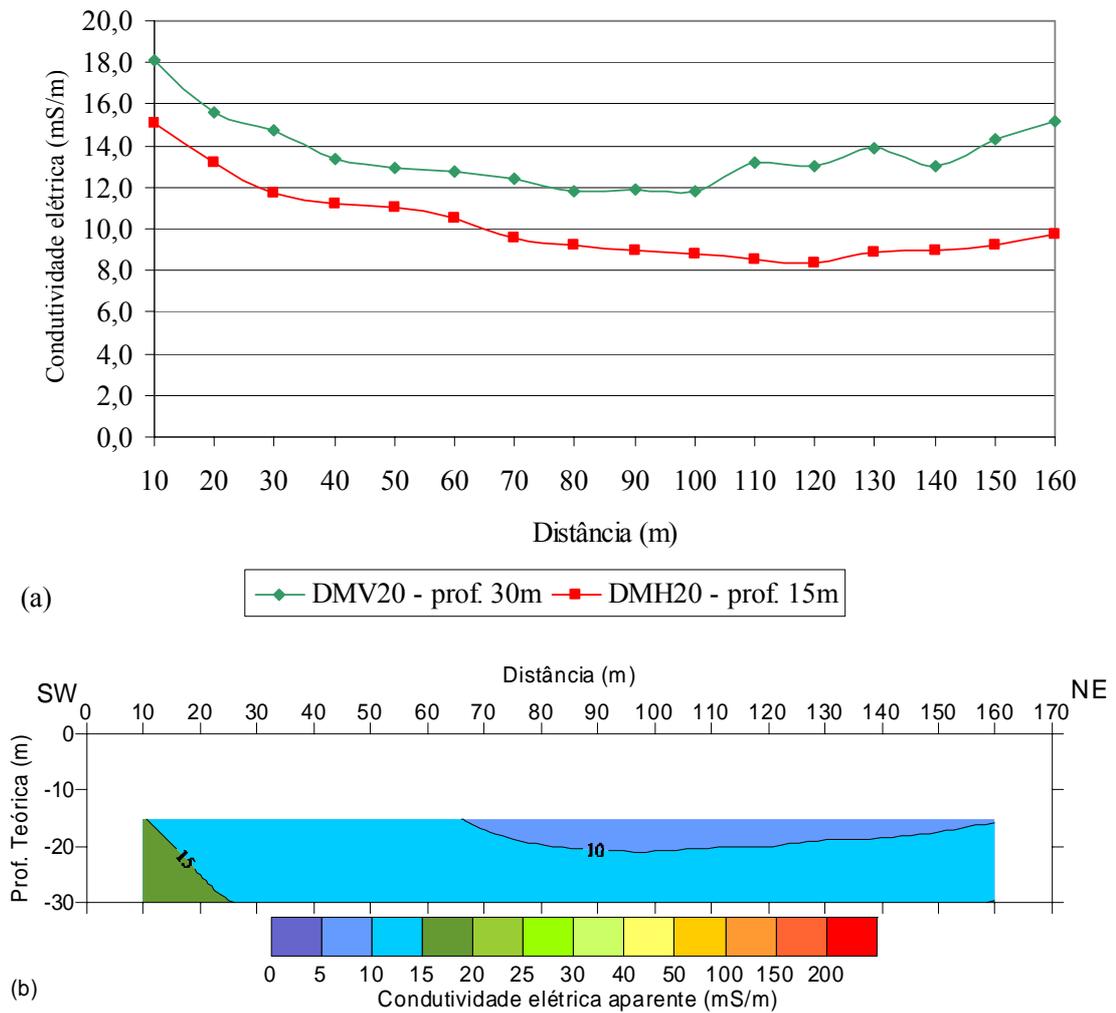


FIGURA 57 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 20 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 20 foi paralela às lagoas e à célula impermeabilizada do aterro. Não apresentou valores de condutividade significativos. Parte da linha 20 fez intersecção com parte da linha 10. Os valores da linha 10 foram parecidos com os da linha 20 até 30 m de profundidade. Abaixo desta profundidade a linha 10 apresentou valores de condutividade superiores a $20 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, os quais não podem ser comparados com a linha 20, pois esta investigou somente até 30 m de profundidade.

A Figura 58 apresenta os resultados para a linha 21.

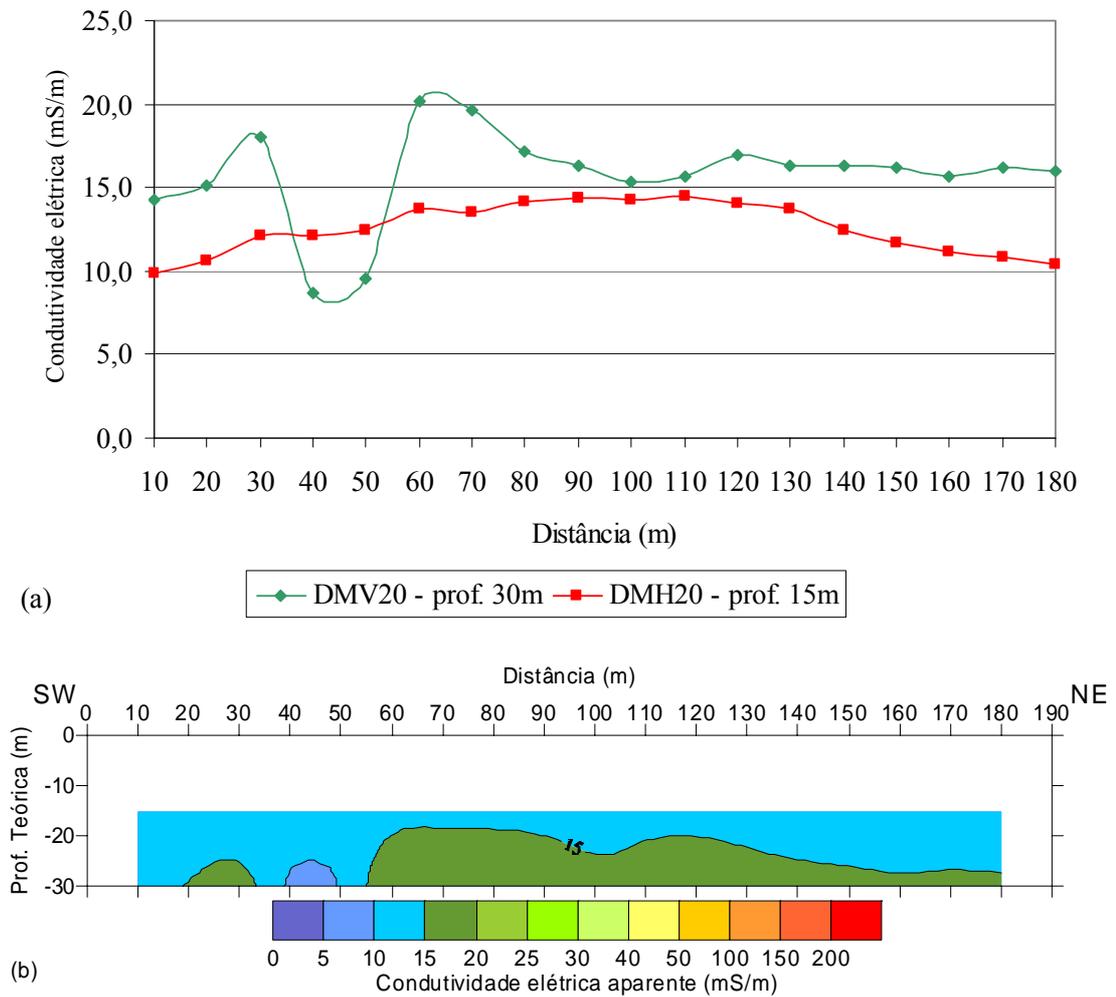


FIGURA 58 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 21 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 21 foi paralela à parte impermeabilizada do aterro, próximo às linhas 6 e 7. As medidas de condutividade ficaram abaixo de 20 mS.m^{-1} , com exceção de um pico acima desse valor em 60 m, na profundidade de 30 m, nada significativo.

A Figura 59 apresenta os resultados para a linha 22.

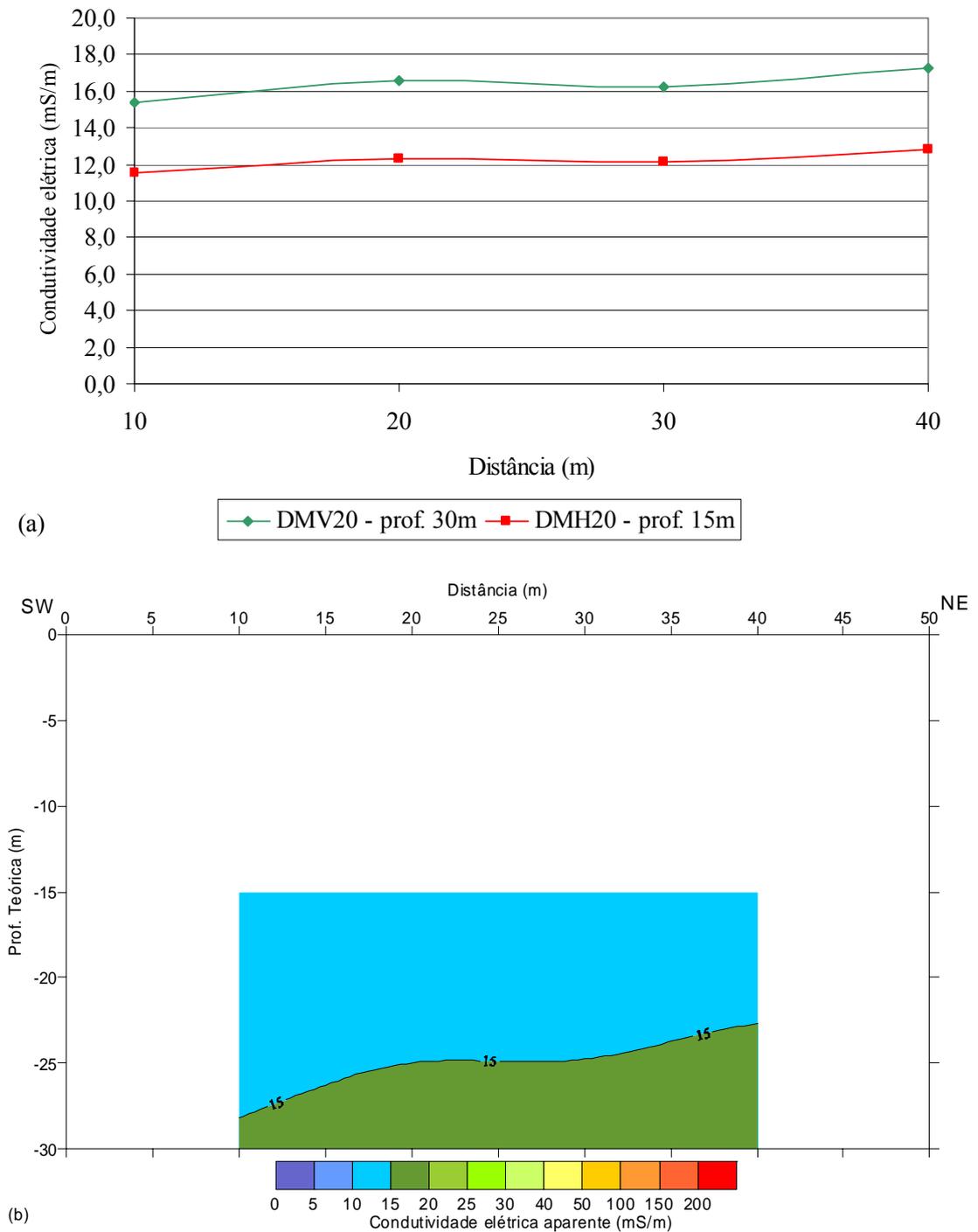


FIGURA 59 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 22 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 22 foi paralela à linha 17, situando-se a 2 m da mesma. Não apresentou valores significativos de condutividade. A linha 17 foi feita com cabo de 40, portanto o perfil foi de 30 a 60 m de profundidade. Já a linha 22 foi feita com o

cabo de 20, gerando um perfil de 15 a 30 m de profundidade. Analisando-se os dois perfis, constatou-se que a condutividade aumenta com a profundidade. Também se constatou que poderia haver uma diferença na umidade do solo entre as datas dos dois ensaios, o que afetaria as leituras. Porém essa influência não foi muito significativa, girando em torno de $6 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, quando comparou-se pontos muito próximos na profundidade de 30 m. Parte dessa diferença pode ser creditada aos dipolos, que para as leituras de uma linha foi vertical e para a outra foi horizontal.

A Figura 60 apresenta os resultados para a linha 23.

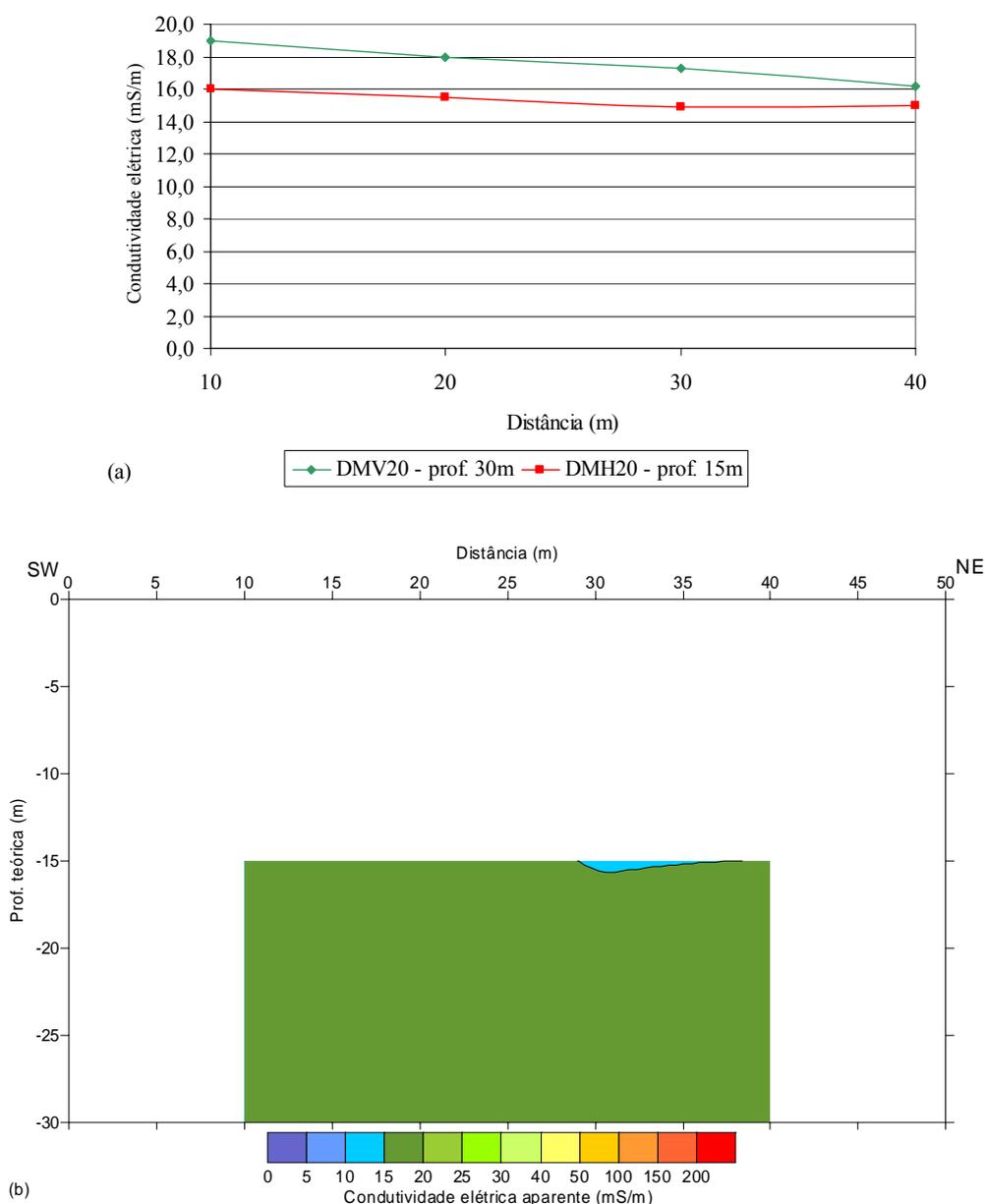


FIGURA 60 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 23 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 23, até 33 m, foi paralela às lagoas, estando a 40 m do final da última lagoa. Apesar dos valores serem menores que $20 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, pôde-se notar a influência das lagoas na condutividade. Em 10 m essa influência foi maior, pois o ponto encontrava-se mais próximo à lagoa. Já em 40 m a interferência foi menor, pois se ultrapassou o limite da lagoa.

A Figura 61 apresenta os resultados para a linha 24.

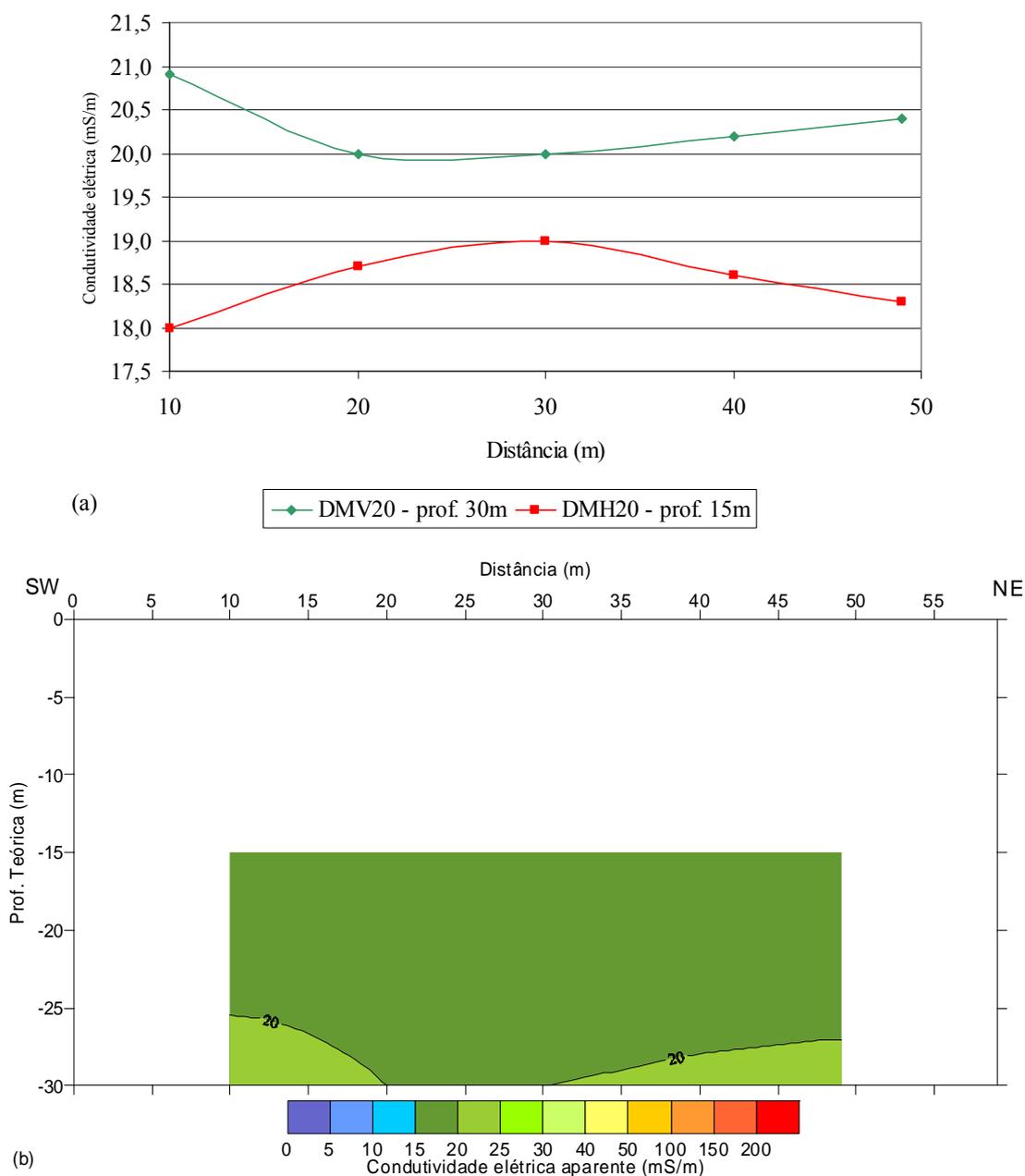


FIGURA 61 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 24 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 24 situou-se a 180 m do aterro. Apresentou alguns valores de condutividade maiores que $20 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$, mas nada muito significativo.

A Figura 62 apresenta os resultados para a linha 25.

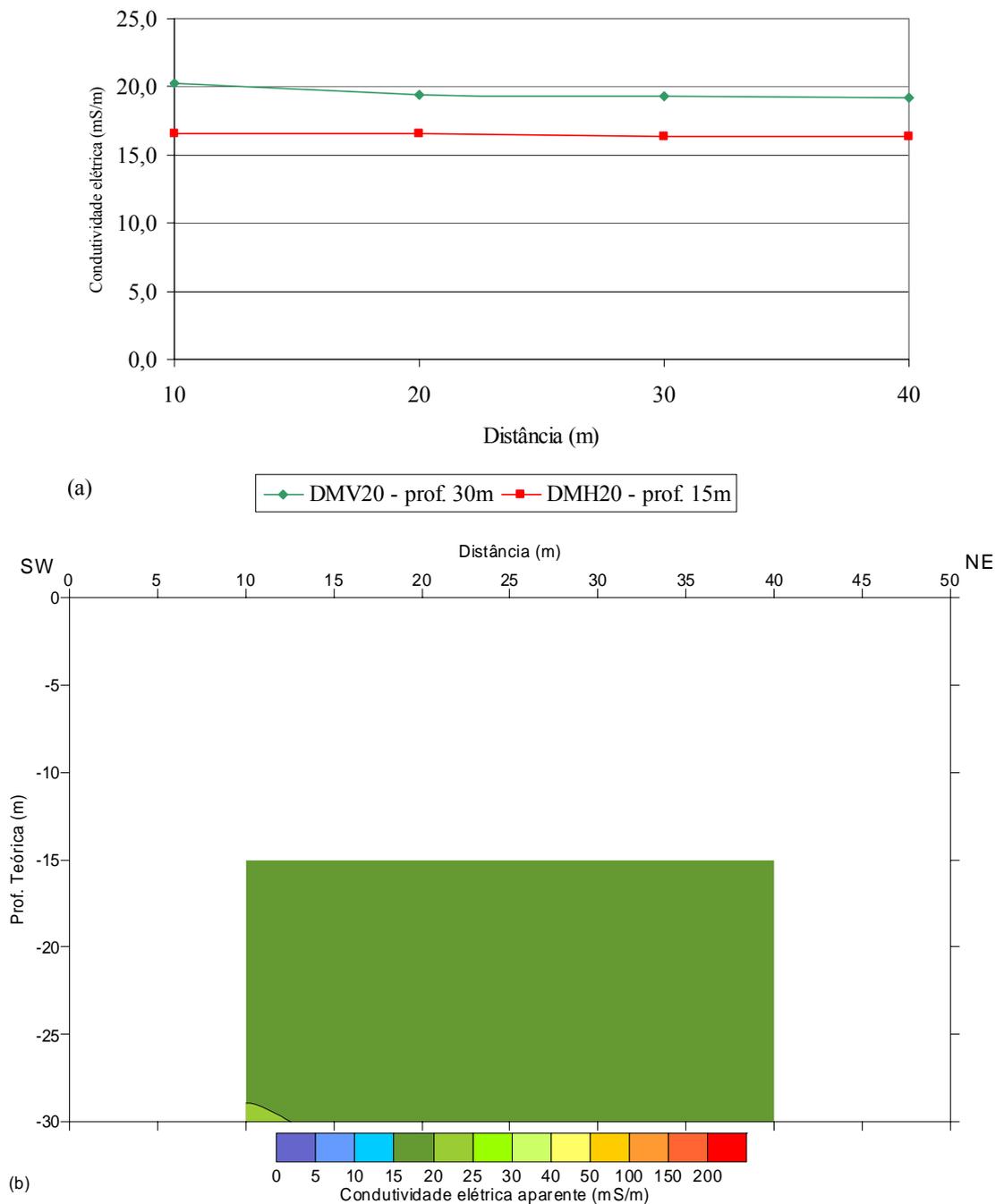


FIGURA 62 – Perfil de caminhamento eletromagnético da linha 25 - 18/08/2006 (a) condutividade aparente em função da distância (b) pseudo-seção de condutividade aparente

A linha 25 também se situou a cerca de 180 m do aterro. Apenas um ponto apresentou valor de condutividade maior que 20 mS.m^{-1} , não sendo significativo.

As Figuras 63, 64 e 65 ilustram a condutividade aparente nas profundidades teóricas de 15 m, 30 m e 60 m, respectivamente.

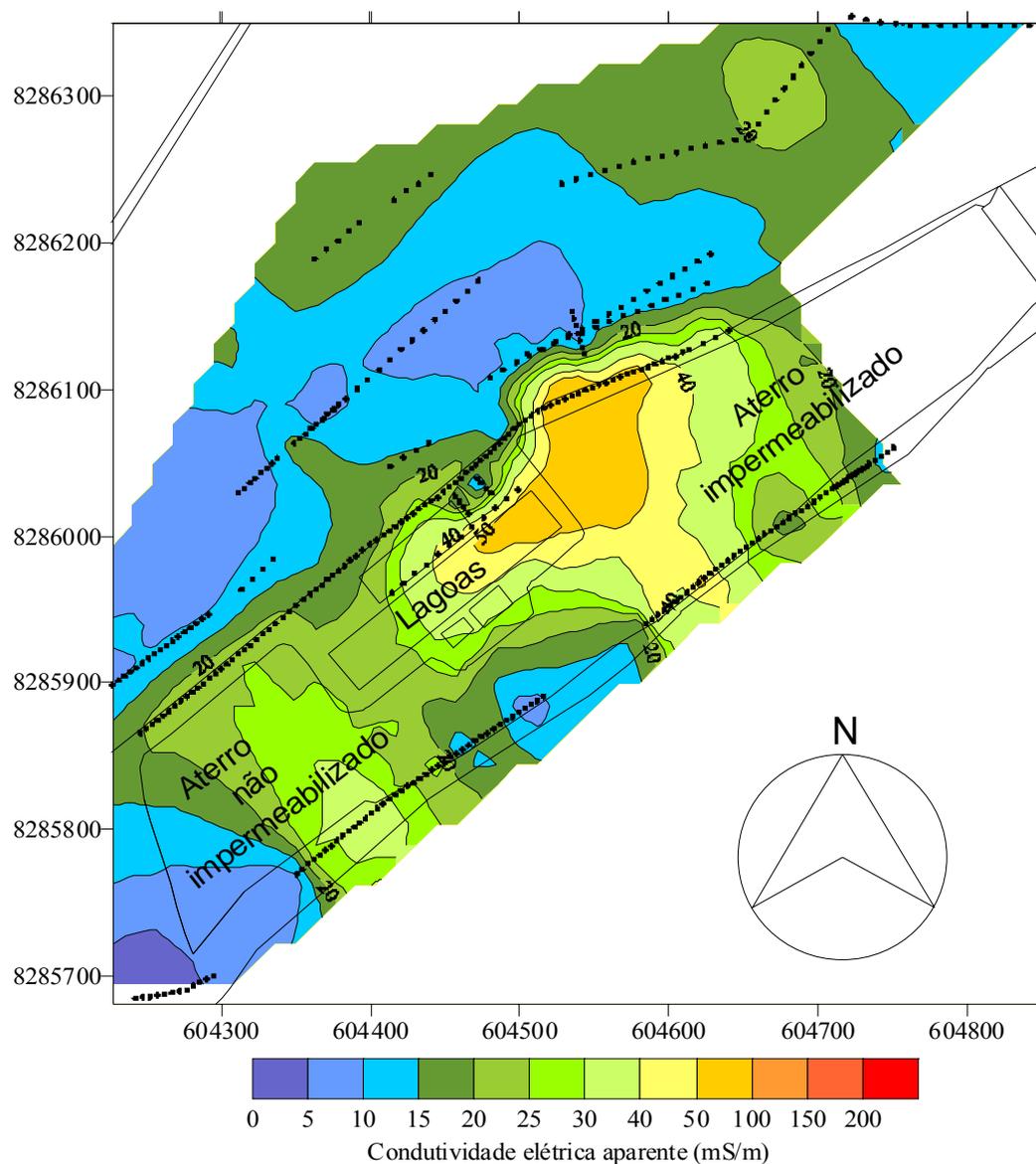


FIGURA 63 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 15 m

Para a profundidade teórica de 15 m (Figura 63) a zona mais condutiva foi encontrada na região das lagoas e nos lados sul e norte da célula impermeabilizada, principalmente no norte, com valores de condutividade superiores a 40 mS.m^{-1} . Na época do ensaio o lixo estava sendo depositado nesta parte do aterro. Portanto o lixo era mais instável e a produção de chumbo certamente era maior. Este chumbo

produzido provavelmente encontrou pontos de fuga, contaminando o subsolo nessas regiões. A maior preocupação foi no lado sul, devido às fraturas preenchidas por quartzo. O mapa da Figura 63 sugere que houve percolação de chorume através dessas formações.

Na parte não impermeabilizada os valores de condutividade estiveram abaixo de 40 mS.m^{-1} , mas em muitos locais foram maiores que 20 mS.m^{-1} . Como discutido no início deste capítulo, nesta faixa de condutividade pode haver contaminação. Provavelmente esses valores foram menores devido à maior estabilidade do lixo, que foi depositado neste local há alguns anos.

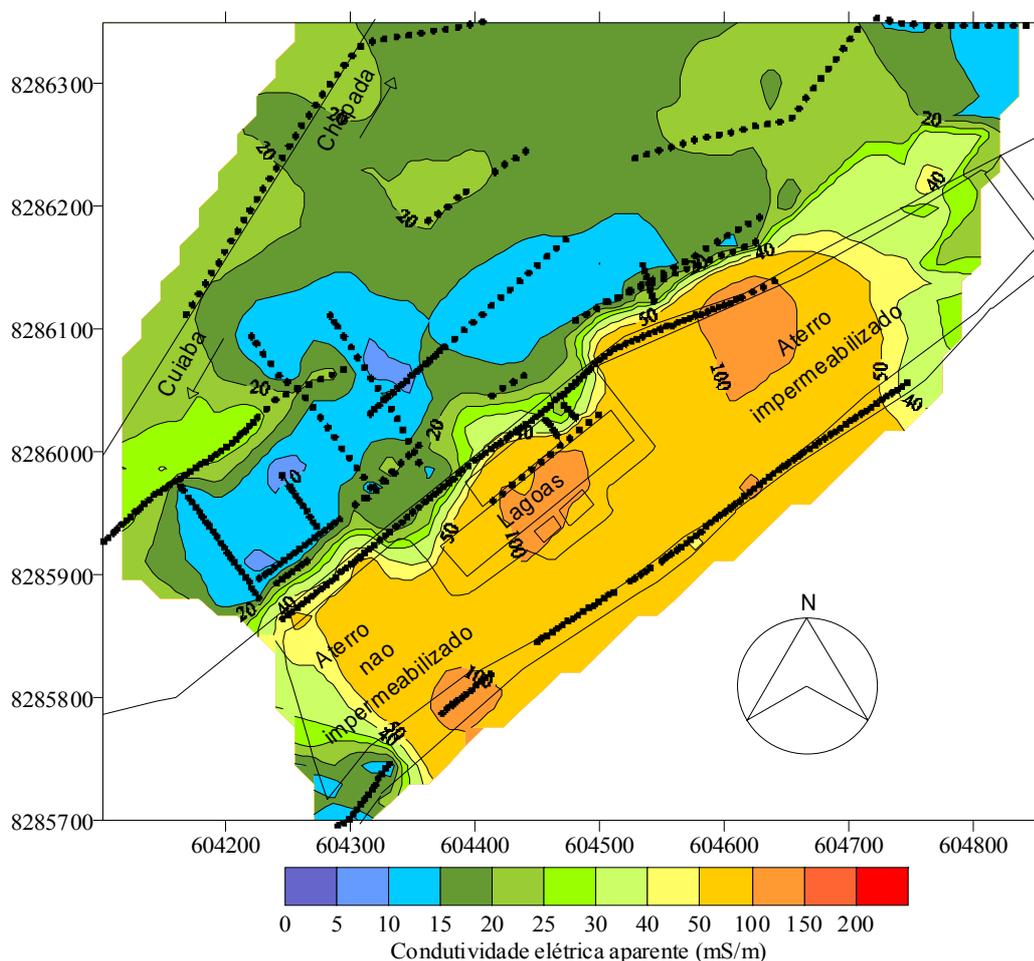


FIGURA 64 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 30 m

Os valores da condutividade aparente para a profundidade teórica de 30 m aumentaram, ultrapassando os 100 mS.m^{-1} nas lagoas e nas áreas com e sem impermeabilização. E, ainda, na maior parte da área do aterro a condutividade foi maior que 40 mS.m^{-1} , indicando que a contaminação já atingiu praticamente todo o

subsolo imediatamente próximo ao aterro. Na camada de 15 a 30 m a condutividade aumentou com a profundidade.

De acordo com CAPOROSI (2002) o nível d'água na área do aterro, em 2001, era de aproximadamente 16 m. Presumindo-se que durante os ensaios o nível d'água manteve-se nesta média, pode-se inferir que o aumento da condutividade com a profundidade foi reflexo da saturação de água abaixo de 16 m. A camada que influencia na leitura situa-se entre 0 e 30 m de profundidade. Portanto houve influência do aquífero freático. Porém mesmo havendo esta influência pode-se afirmar que havia contaminação, pois em muitos pontos os valores ultrapassam os 50 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$, que é a condutividade máxima de uma camada argilosa saturada.

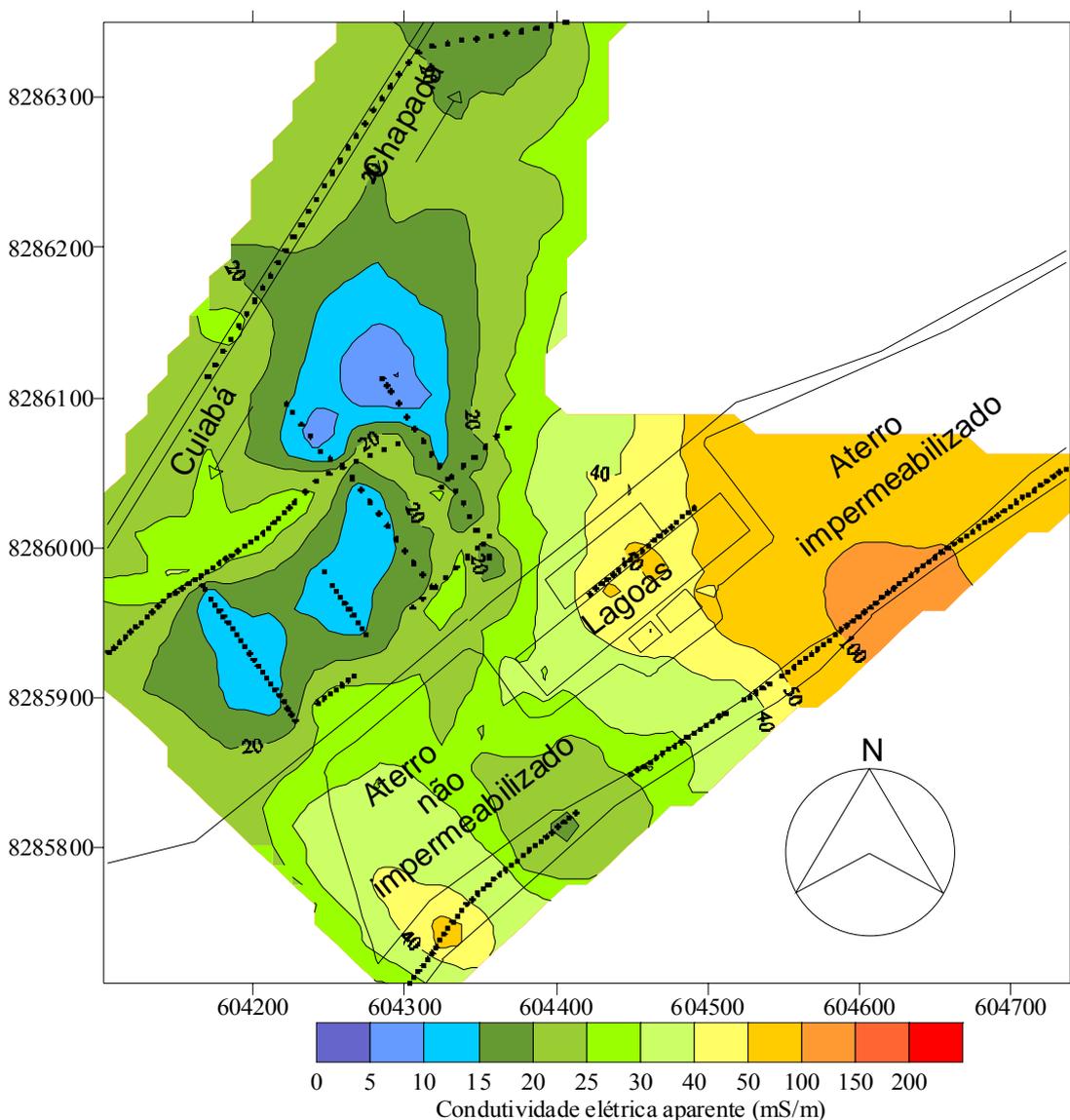


FIGURA 65 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidade teórica de 60 m

Para a profundidade teórica de 60 m (Figura 65) os valores de condutividade foram menores do que para 30 m, principalmente na região das lagoas. Isto indica que, de 30 a 60 m de profundidade, a suposta contaminação diminui.

A Figura 66 apresenta os resultados para as profundidades de 15, 30 e 60 m.

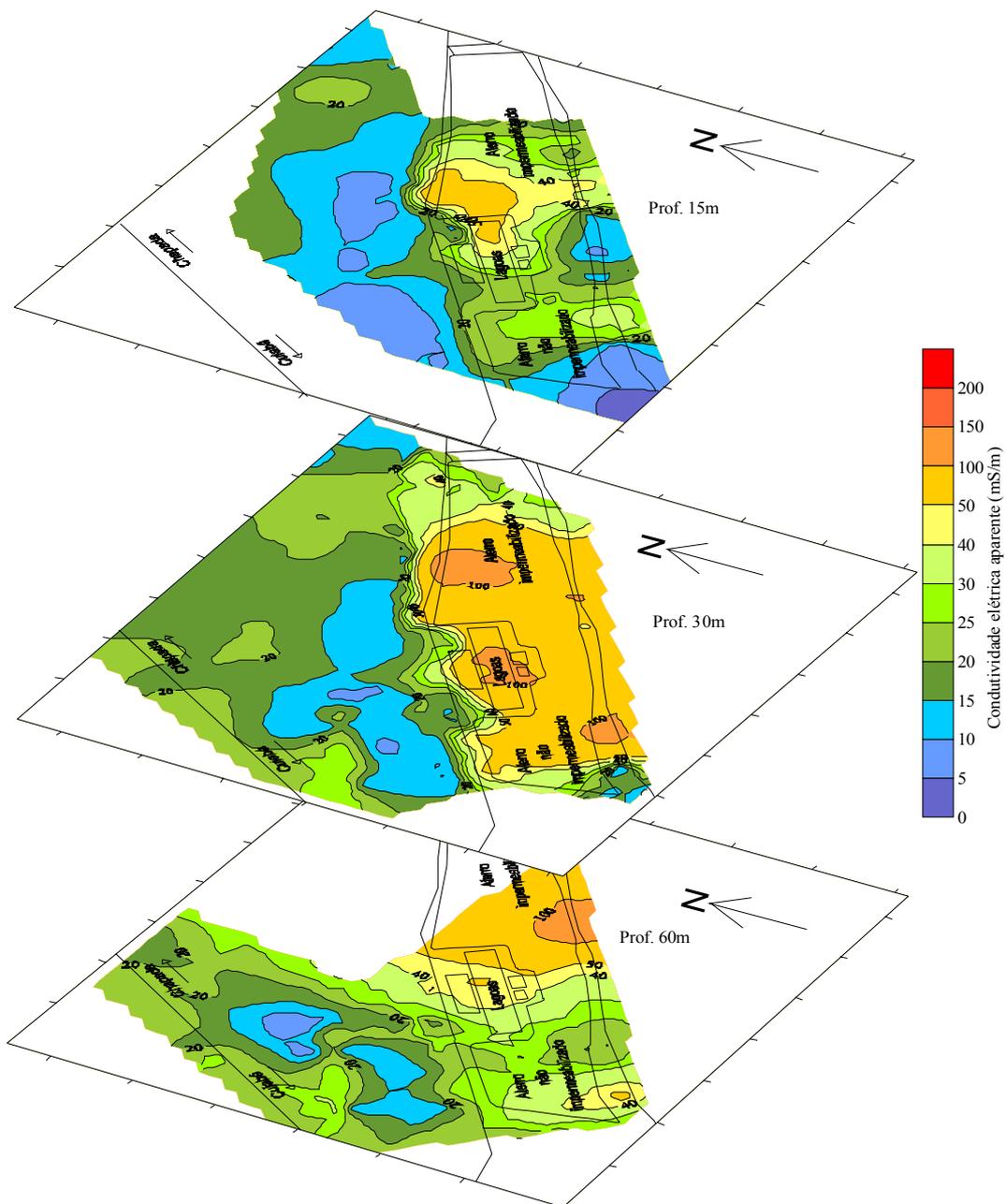


FIGURA 66 – Mapa de isovalores de condutividade elétrica aparente para a área do aterro sanitário de Cuiabá, profundidades teóricas de 15, 30 e 60 m

Na Figura 66 observou-se que os indícios de contaminação foram maiores na profundidade teórica de 30 m, mas em 15 e 60 m também houve áreas potencialmente contaminadas (condutividade acima de 40 mS.m^{-1}).

Houve um pico que se repetiu nas três profundidades, no lado sul da parte impermeabilizada. Neste ponto pode ter havido fuga de chorume, contaminando as fraturas preenchidas por quartzo.

Além deste pico mais visível, também se observou outro pico no lado norte da parte impermeabilizada. Na região das lagoas também se obteve elevados valores de condutividade, indicando que a falta de impermeabilização das lagoas pode ter contaminado o subsolo.

Os resultados indicam de que a parte não impermeabilizada do aterro também pode ter contaminado o subsolo, porém com menor intensidade, devido à estabilidade do lixo, que era mais antigo nesta área.

É importante salientar que as zonas de condutividade acima de 25 mS.m^{-1} também são suspeitas de contaminação, a exemplo do trabalho de SILVA et al (2003). Os ensaios eletromagnéticos realizados por tais autores no lixão de Ribeirão Preto, SP, revelaram zonas anômalas de condutividade fora das cavas de lixo com valores de até 30 mS.m^{-1} , sendo que a condutividade de *background* da região era muito baixa (abaixo de 10 mS.m^{-1} , pois trata-se de arenito).

Para a profundidade teórica de 7,5 m não foi possível fazer o mapa de isovalores. Não havia dados suficientes para tanto.

5.2 ELETORRESISTIVIDADE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO ARRANJO DIPOLO-DIPOLO

O caminhamento elétrico (CE) utilizou o arranjo dipolo-dipolo, com investigação em dois níveis. Adotou-se, para os dipolos AB e MN, espaçamento (x) de 20 m. Portanto a distância entre B e M (nx), para o nível 1, é também de 20 m (1x20), e para o nível 2, é de 40 m (2x20). Assim, utilizando-se a equação 13, chega-se aos níveis de investigação, que são 20 e 30 m.

O CE foi feito nas linhas 2 e 9, as quais podem ser observadas na Figura 67.

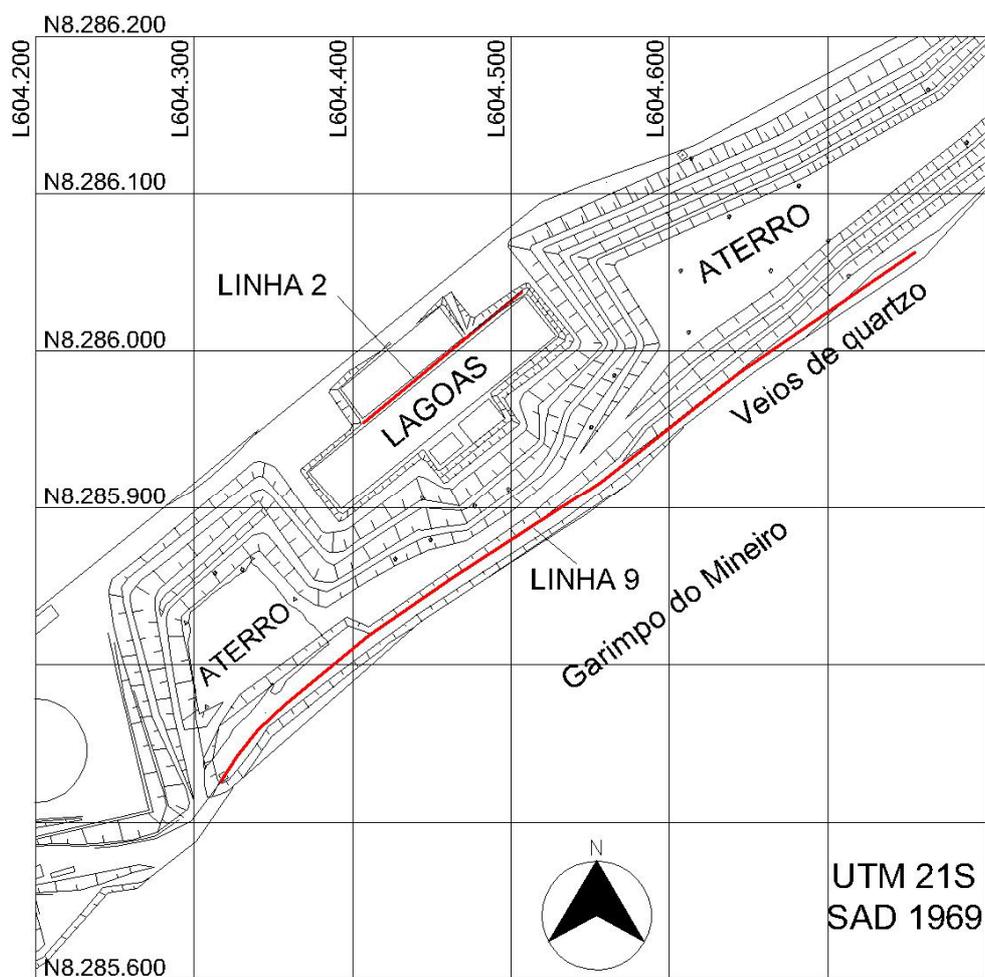


FIGURA 67 – Localização das linhas 2 e 9

A linha 2 possui 120 m de comprimento e o ensaio foi realizado no sentido de sudoeste para nordeste. Porém, devido ao arranjo dipolo-dipolo e ao espaçamento entre os eletrodos, o perfil possui menos de 120 m. As leituras foram feitas a cada 20 m, e correspondem ao ponto médio do arranjo no momento da leitura. A primeira leitura foi feita em 30 m, para o nível 1, e 40 m, para o nível 2. E a última em 80 m, para o nível 1, e 90 m, para o nível 2.

A Figura 68 apresenta o perfil de caminhamento elétrico para a linha 2, que fica entre as lagoas facultativas de tratamento de chorume.

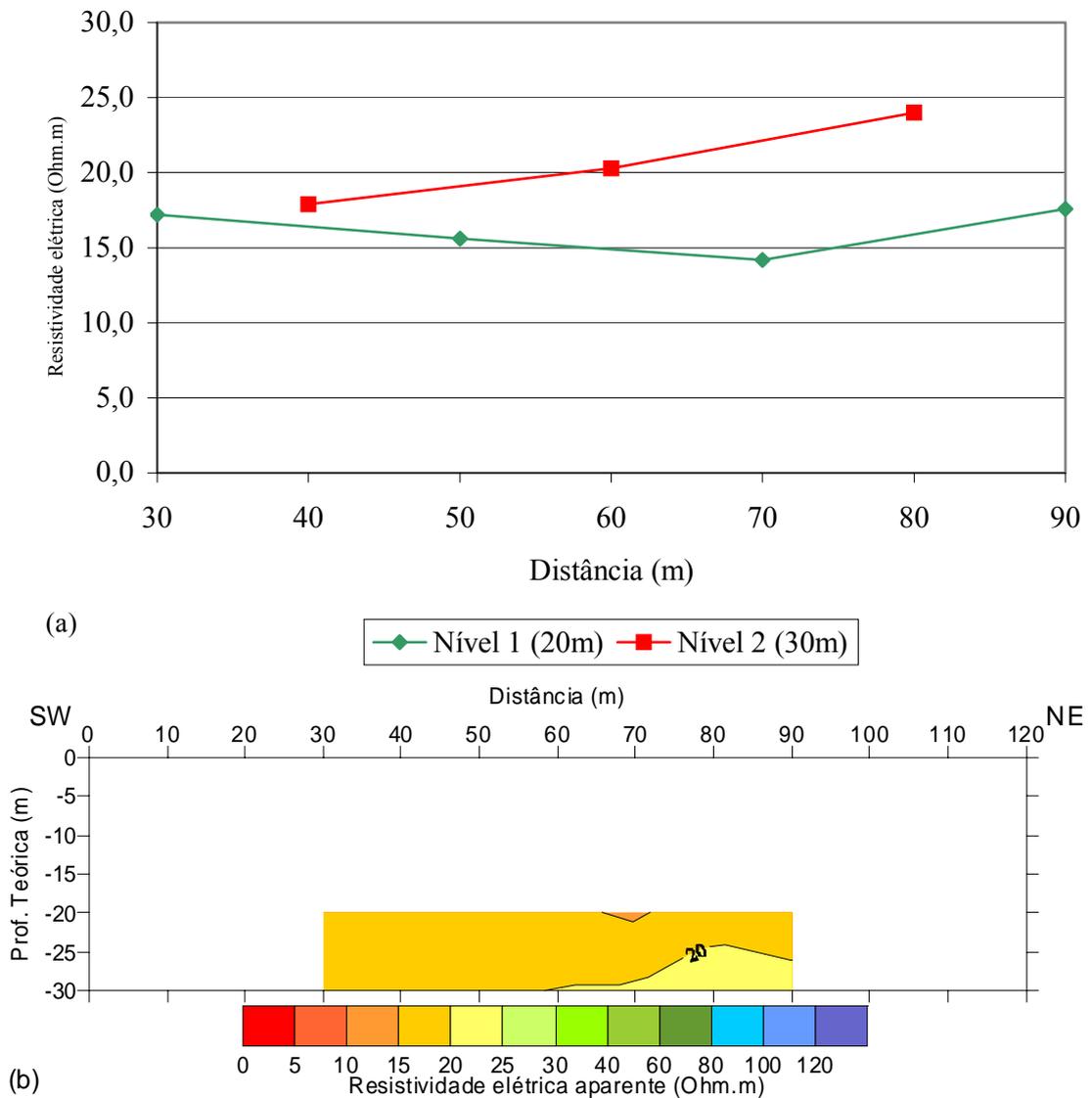


FIGURA 68 – Perfil de caminhada elétrica da linha 2 - 15/03/2006 (a) resistividade elétrica em função da distância (b) pseudo-seção de resistividade elétrica

Observa-se, na Figura 68, que a resistividade elétrica esteve abaixo de 25 Ohm.m em todo o perfil, sugerindo contaminação, uma vez que a condução elétrica (o inverso da resistividade elétrica) ocorre principalmente através de íons, que são abundantes no chorume. A contaminação foi maior em 20 m do que em 30 m de profundidade.

A Figura 69 apresenta o perfil de resistividade da linha 9, que se situou no lado sul do aterro.

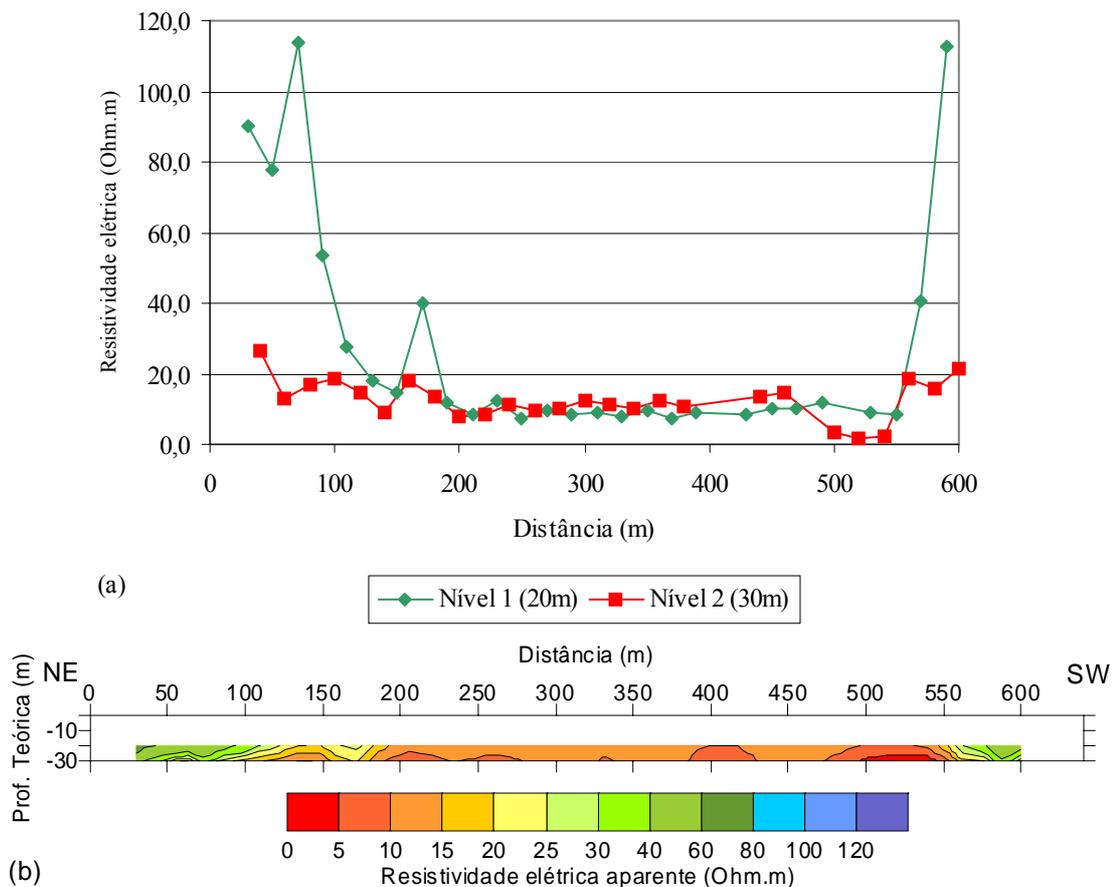


FIGURA 69 – Perfil de caminhamento elétrico da linha 9 - 14/03/2006 (a) resistividade elétrica em função da distância (b) pseudo-seção de resistividade elétrica

A linha 9 apresentou valores de resistividade elétrica menores que 20 Ohm.m na maior parte do perfil, chegando a até 1,8 Ohm.m. Os baixos valores encontrados apontam que o subsolo encontrava-se contaminado por chorume, a exemplo do que sugere os trabalhos de SILVA et al (2003) e GALLAS et al (2005).

Os ensaios realizados por SILVA et al (2003) no antigo lixão de Ribeirão Preto, SP, apresentaram baixos valores de resistividade elétrica sobre as cavas de lixo (alguns locais com resistividade abaixo de 5 Ohm.m) e fora delas (zona anômala de 30 Ohm.m). GALLAS et al (2005), em estudo numa área vizinha ao aterro sanitário de Londrina, PR, onde predominam as formações basálticas (resistividade acima de 50 Ohm.m, de acordo com WARD, 1990), encontraram valores de resistividade abaixo de 30 Ohm.m, chegando até a 7 Ohm.m em algumas regiões.

Mesmo que realmente haja lixo enterrado no trecho de 235 a 470 m da linha 9, os baixos valores de resistividade ocorreram em quase todo o perfil. Ou seja, a

contaminação atinge toda a lateral sul do aterro, onde há ocorrência de formações permeáveis (metarenitos e fraturas preenchidas por quartzo).

5.3 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)

Com o método GPR foram adquiridos dois perfis (linhas 2 e 9) com afastamento constante, utilizando antenas não blindadas de 50 MHz.

Para aquisição dos perfis foi mantido o espaçamento constante de dois metros entre as antenas transmissora e receptora. A linha 2 possui 130 m de comprimento e foi adquirida no sentido de sudoeste para nordeste. E a linha 9 possui 580 m de comprimento e foi adquirida no sentido de nordeste para sudoeste. Ela foi dividida em três trechos: o primeiro de 0 a 180 m; o segundo de 180 a 360 m; e o terceiro de 400 a 580 m. O trecho de 360 a 400 m não pôde ser adquirido pois no dia do ensaio havia uma poça de água no local.

Ambos os perfis de GPR foram adquiridos a cada metro, um traço médio resultante do empilhamento (*stack*) de 128 traços. Cada traço médio foi registrado em uma janela de tempo 1018 ns, contendo 512 amostras.

Após a aquisição dos dados de GPR, foi realizada uma seqüência de processamentos para melhorar os sinais, eliminando ruídos e ressaltando os refletores de interesse. Esta seqüência envolveu a seguintes etapas: ajuste do tempo zero; análise do espectro de freqüências; definição dos parâmetros para os filtros para eliminar ruídos de baixa e alta freqüência; filtragem; amplificação dos sinais para permitir uma melhor visualização dos sinais mais fracos; conversão tempo profundidade; e edição para impressão.

As Figuras 70 e 71 apresentam os espectros de freqüência para as linhas 2 e 9.

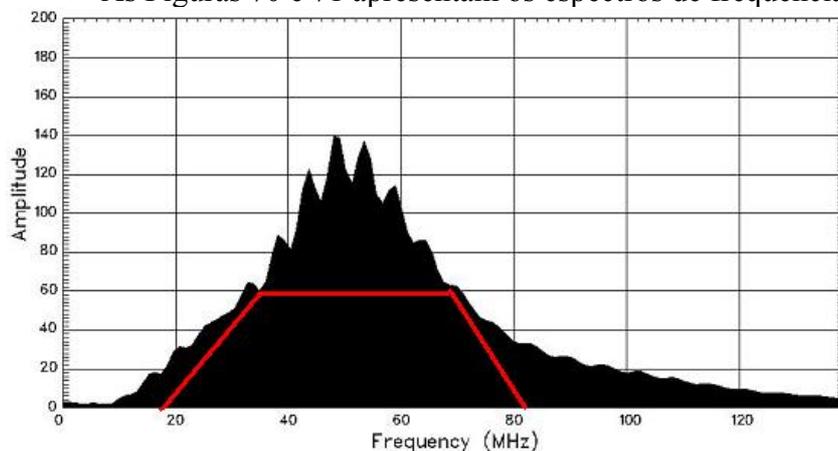


FIGURA 70 – Espectro de freqüências da linha 2

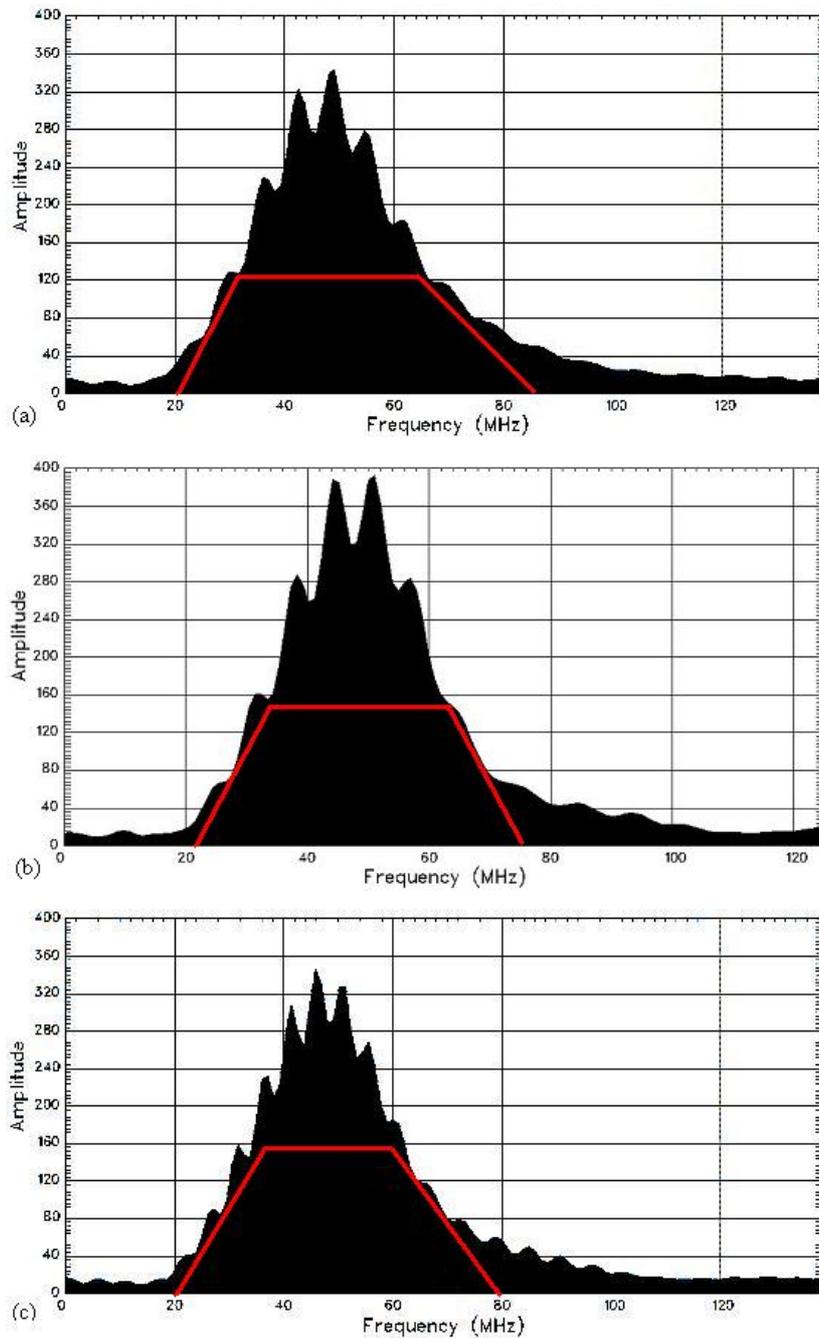


FIGURA 71 – Espectros de frequências da linha 9 (a) 0 a 180 m (b) 180 a 360 m (c) 400 a 580 m

Os trapézios formados nas Figuras anteriores (linhas vermelhas) representam as frequências utilizadas no filtro de eliminação de ruídos de baixa e alta frequência. Na Tabela 7 foram definidos os parâmetros utilizados na filtragem, baseados nos referidos trapézios.

TABELA 7 – Frequências limite utilizadas na filtragem dos sinais do GPR em cada perfil adquirido em campo

Linha / trecho	Frequência mínima inferior F1 (MHz)	Frequência mínima superior F2 (MHz)	Frequência máxima superior F3 (MHz)	Frequência máxima inferior F4 (MHz)
Linha 2	18	35	72	82
Linha 9 – trecho 1	20	30	65	85
Linha 9 – trecho 2	22	35	65	75
Linha 9 – trecho 3	20	37	61	80

Para melhorar a visualização dos traços com menor amplitude, foi aplicado ganho linear no sinal por intervalos (*range gain*).

Para converter o tempo duplo dos sinais refletidos em profundidade, foi necessário conhecer a velocidade da onda do meio. Procurou-se determiná-la através de sondagens CMP (*Common Mid Point*), porém tais sondagens realizadas nas linhas 2 e 9 não apresentaram refletores hiperbólicos para reflexão em um ponto médio comum. Por este motivo as sondagens CMP foram descartadas. Então se buscou os valores de velocidade para a geologia da área na literatura. PORSANI (1999) apresentou os seguintes valores de velocidade:

- solo argiloso seco – 0,19 m/ns;
- solo argiloso saturado – 0,07 a 0,09 m/ns;
- solo arenoso seco – 0,18 m/ns;
- solo arenoso saturado – 0,06 m/ns;
- arenito seco – 0,15 m/ns;
- arenito saturado – 0,06 m/ns.

Considerando-se a litologia da Subunidade 6 (lado norte), descrita anteriormente, e certo teor de umidade do solo, porém não saturado, adotou-se uma velocidade média de 0,10 m/ns para essa região (linha 2).

Considerando-se a litologia da Subunidade 5 (lado sul), descrita anteriormente, e certo teor de umidade do solo, porém não saturado, adotou-se uma velocidade média de 0,09 m/ns para essa região (linha 9).

Depois de realizados todas as etapas preliminares, os perfis de GPR das linhas 2 e 9 foram editados e são apresentados a seguir, nas Figuras 72 e 74, respectivamente.

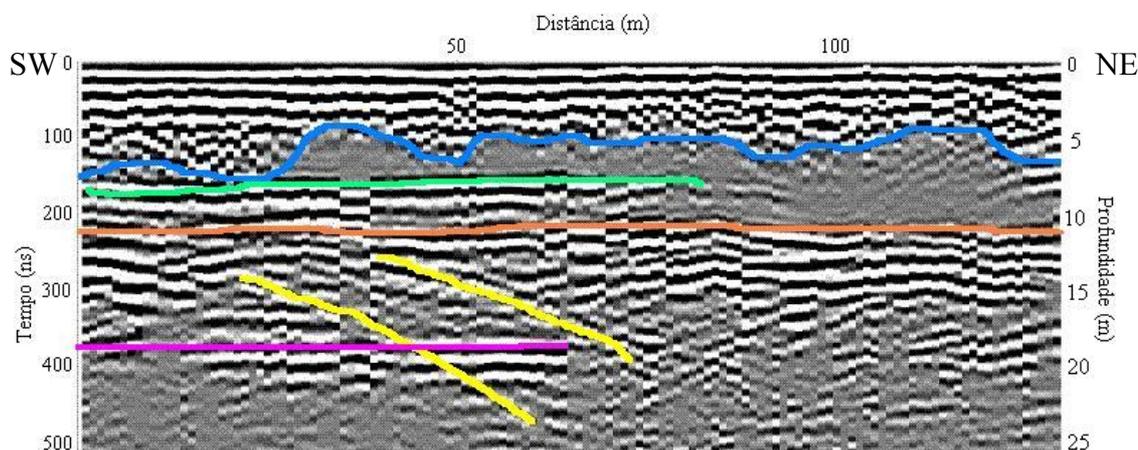


FIGURA 72 – Perfil de GPR da linha 2 - antena 50 MHz

O perfil da linha 2, representado na Figura 72, mostrou ausência de reflexão, denominada de zona de sombra ou *shadow zone*, de 25 a 150 m. Neste local, portanto, provavelmente há contaminação do subsolo, pois a alta condutividade atenuou o sinal. Os refletores que aparecem abaixo da zona de sombra são refletores aéreos, os quais são explicados a diante.

A zona de sombra da linha 2 iniciou-se a 5-6 m de profundidade, abaixo da linha azul da Figura 72. Ou seja, logo abaixo do fundo das lagoas, indicando que a ausência de impermeabilização está possibilitando a percolação de chorume para o subsolo.

As outras linhas da Figura 72 (verde, laranja, rosa e amarelas) são ondas aéreas, que representam alguns refletores presentes na área. Para calcular a distância dos refletores em relação ao perfil, utilizou-se a equação 9. Como a onda é aérea, a velocidade de propagação da onda é a da luz (0,3 m/ns).

O refletor caracterizado pela linha verde está a 24 m da linha 2. Baseando-se nesta informação, conclui-se que se trata da parede lateral da última lagoa facultativa. O refletor termina em 80 m, justamente no término desta lagoa.

O refletor caracterizado pela linha cor laranja está a 33 m da linha 2. Baseando-se nesta informação, conclui-se que se trata da parede lateral da penúltima lagoa facultativa. O refletor acompanha todo o perfil, assim como a lagoa.

O refletor caracterizado pela linha rosa está a 55 m da linha 2. Baseando-se nesta informação, conclui-se que se trata do paredão de lixo que fica atrás das primeiras lagoas.

Os refletores caracterizados pelas linhas amarelas provavelmente são os paredões de lixo perpendiculares à linha 2. Todos esses refletores podem ser observados com suas respectivas cores na Figura 73.

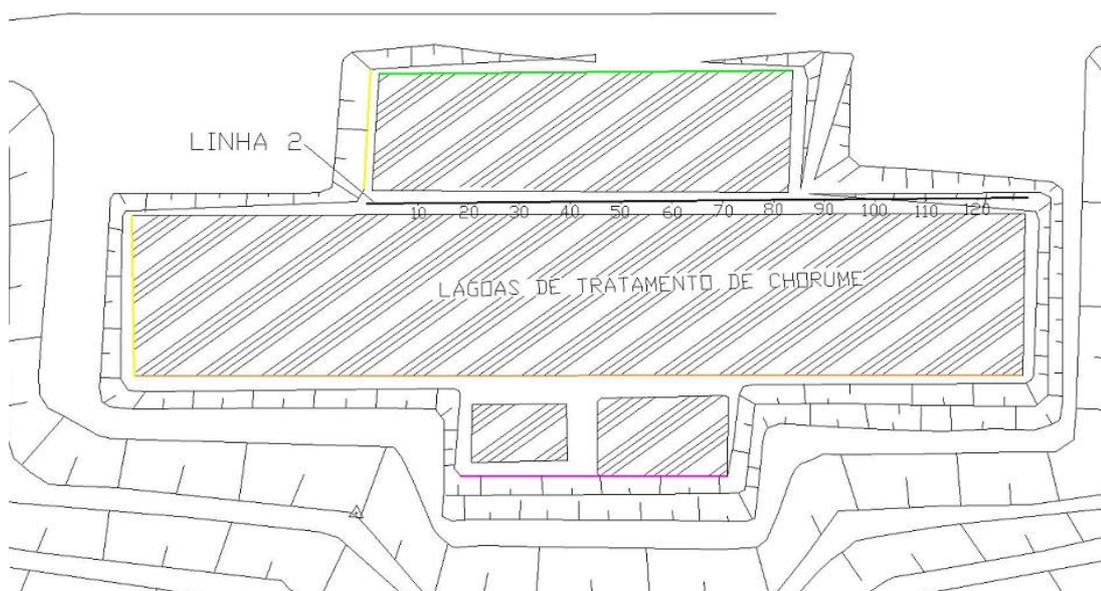


FIGURA 73 – Linha 2 e os refletores que aparecem no perfil GPR

A Figura 74 apresenta os perfis de GPR da linha 9, que se situa no lado sul do aterro, ao lado do Garimpo do Mineiro.

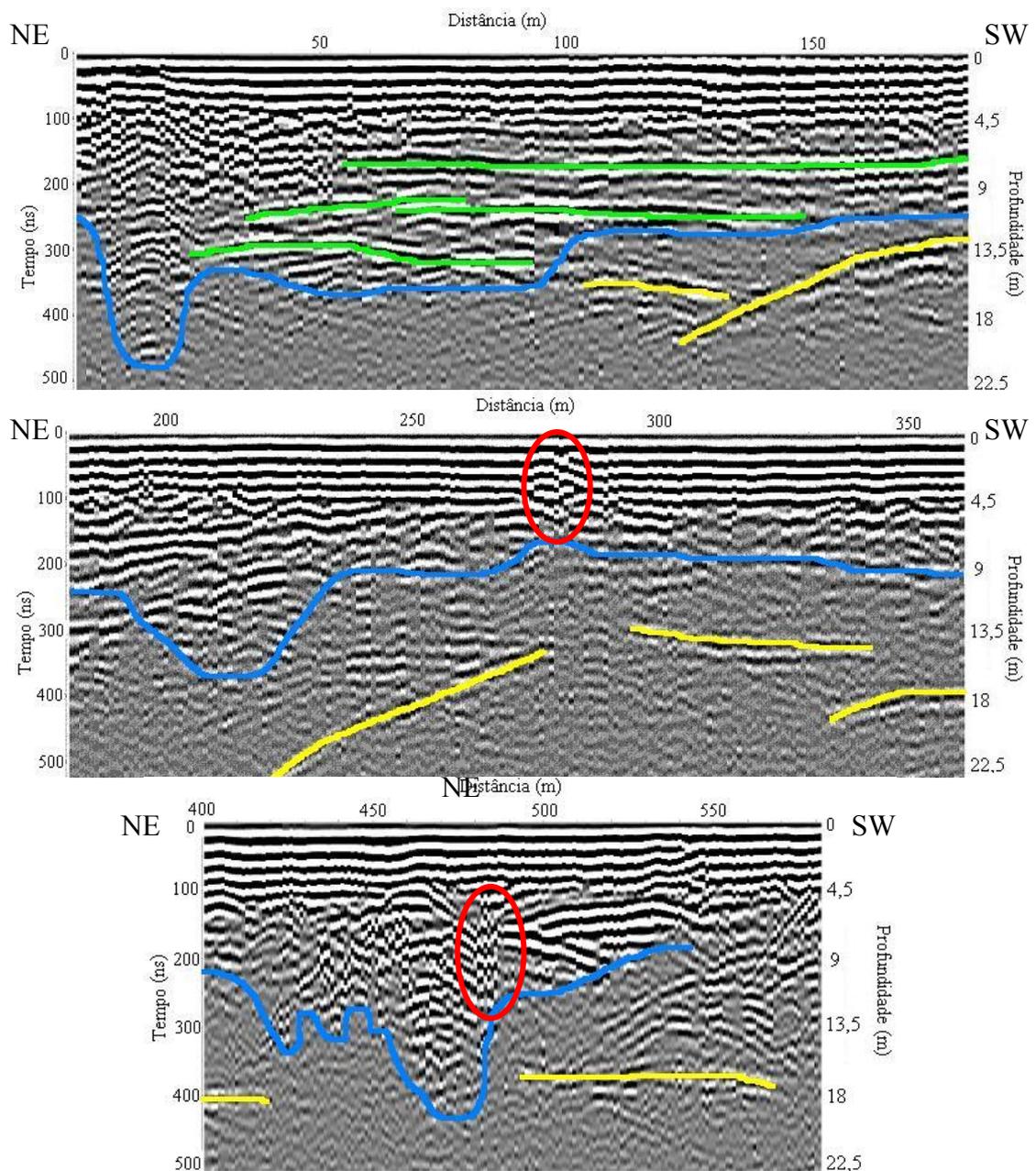


FIGURA 74 – Perfil de GPR da linha 9 - antena 50 MHz

Os perfis de GPR da linha 9, representados na Figura 74, mostraram ausência de reflexão em determinados trechos, abaixo da linha azul. As zonas de sombra, que são as áreas contaminadas, estão, na maior parte do perfil, abaixo de 14 m de profundidade.

No início do perfil (0 a 50 m) visualizam-se as fraturas preenchidas por quartzo. As linhas verdes do perfil da Figura 74 são refletores que representam a geologia da área.

As regiões internas às elipses vermelhas representam feições geológicas locais.

As linhas amarelas são ondas aéreas e representam refletores localizados de 45 a 60 m de distância da linha 9. Baseando-se nesta informação deduz-se que tais refletores representem as feições irregulares do paredão do Garimpo do Mineiro, que é relativamente paralelo à linha 9. No lado direito da Figura 75, a seguir, pode-se visualizar tal paredão.



FIGURA 75 – Paredão do Garimpo do Mineiro

Os perfis de GPR das linhas 2 e 9 confirmaram os resultados dos levantamentos eletromagnético e de eletrorresistividade, mostrando a importância da integração dos métodos geofísicos para melhorar a interpretação dos resultados.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi estabelecida uma correlação entre os valores elevados de condutividade e baixos de resistividade e as possíveis contaminações, uma vez que a condução elétrica ocorre principalmente através de íons, que são abundantes no chorume.

Os resultados apresentam fortes indícios de que o subsolo encontrava-se contaminado em boa parte da área do aterro, principalmente na região das lagoas de tratamento de chorume e nas laterais sul e norte do aterro. Houve evidências de contaminação em profundidades teóricas de até 60 m, mas a zona mais atingida pela suposta poluição ficou na faixa dos 30 m de profundidade.

Nos locais onde a deposição de lixo era mais recente os indícios de contaminação foram mais acentuados, mesmo havendo impermeabilização de base. Ou seja, a impermeabilização pode não estar sendo eficiente, permitindo a fuga de chorume através da base do aterro. Também foi visto e registrado (Figura 39) que houve fuga de chorume através das bordas laterais do aterro.

As possíveis zonas de fugas da base do aterro estão situadas nas Subunidades 5 e 6. A Subunidade 5 constitui-se na área mais problemática, pois há presença de metarenito, que possui maior permeabilidade, porosidade, além das fraturas preenchidas por quartzo, oferecendo riscos aos recursos hídricos subterrâneos. Foi evidenciada contaminação nessa área, mas não foi possível saber até onde ia a pluma contaminante. Não foi viável realizar levantamentos em áreas mais ao sul devido à área alagada entre o aterro e o garimpo, e à topografia irregular do próprio garimpo do Mineiro.

No lado norte, onde predomina a Subunidade 6, composta basicamente por filitos conglomeráticos, foram realizados muitos ensaios eletromagnéticos indutivos. Próximo às lagoas e ao aterro os indícios de contaminação foram acentuados. Mas a pluma ainda não havia se espalhado muito lateralmente, provavelmente devido à baixa condutividade hidráulica do filito (aproximadamente $0,13 \text{ cm.h}^{-1}$, de acordo com SILVA et al, 2006).

É importante ressaltar que o uso integrado de diferentes métodos geofísicos permitiu que os resultados de um método fossem confirmados pelos outros. No presente trabalho utilizou-se, em maior escala, o método eletromagnético indutivo.

Este método pode sofrer influência de materiais condutivos que não interessam ao trabalho, como, por exemplo, o lixo que se situava próximo das linhas 2, 3, 4, 5 e 9. Para reforçar os resultados, então, foram realizados os perfis de caminhamento elétrico e os perfis de GPR, que também evidenciaram contaminação do subsolo.

Em virtude dessas evidências, recomenda-se que seja realizada a impermeabilização de base da área não impermeabilizada do aterro. Os custos envolvidos em tal ação seriam relativamente elevados do ponto de vista econômico, mas os benefícios seriam incalculáveis do ponto de vista ambiental.

Também se recomenda que a impermeabilização existente seja revisada, principalmente nas bordas, devido às evidências de percolação de chorume para o subsolo na área impermeabilizada do aterro.

Para resolver o problema do tratamento ineficiente de chorume, recomenda-se que as lagoas tratem apenas o chorume bruto coletado pelo sistema de drenagem de base do aterro. Portanto há a necessidade de construir um sistema de tratamento separado para as águas pluviais coletadas em áreas potencialmente contaminadas pelos resíduos que chegam ao aterro e para as águas de lavagem de caminhões e equipamentos. A eficiência do sistema de lagoas seria otimizada, pois não haveria diluição do chorume no período chuvoso.

Também é recomendável que seja realizada a desinfecção do chorume tratado, antes de lançá-lo ao ambiente, evitando, dessa forma, que pessoas adquiram doenças ao entrar em contato com o efluente, que desemboca no Rio Cuiabá, principal manancial de água dos municípios de Cuiabá e Várzea Grande.

Além disso, a fim de evitar a contaminação do subsolo proveniente do chorume efluente das lagoas de tratamento, recomenda-se a canalização do córrego que sai das lagoas. Como se observa na Figura 46 tal córrego influencia na condutividade do subsolo, ou seja, é muito provável que esteja contaminando o mesmo.

Porém a principal recomendação para as lagoas de tratamento de chorume é que seja feita uma impermeabilização no fundo e nas laterais de todas elas. Foram encontradas fortes evidências de que as lagoas estão contaminando o subsolo, atingindo profundidades de até 60 m. Como já discutido, a baixa condutividade hidráulica do filito ainda não permitiu que a contaminação se espalhasse

lateralmente. Mas, se não for feita a impermeabilização, supõe-se que, ao passar do tempo, a pluma de contaminação espalhar-se-á, prejudicando acentuadamente a fauna, a flora e os recursos hídricos da região.

Para dar continuidade ao projeto de pesquisa “EGASC” – Estudos Geofísicos no Aterro Sanitário de Cuiabá – e confirmar os resultados desta pesquisa, recomenda-se que sejam perfurados poços nos locais onde a condutividade aparente é maior, baseando-se nos mapas de isovalores do presente trabalho, onde a condutividade elétrica aparente foi maior.

No momento da perfuração sugere-se que se retirem amostras de solo para análise físico-química. Após a perfuração podem-se realizar análises físico-químicas e bacteriológicas mensais da água do subsolo, ao longo de pelo menos um ano, a fim de monitorar a qualidade da água, verificando se há contaminação por chorume e qual o grau de contaminação. Esta análise também poderia ser feita com a água que fica na depressão entre o aterro sanitário e o garimpo do Mineiro. Também seria interessante fazer os levantamentos geofísicos todo ano para avaliar a evolução da pluma contaminante.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A.P. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes**. Mississauga: Sensors & Software, Inc., 1992. 130 p. (Internal Report). Disponível em: <<http://www.sensoft.on.ca>>. Acesso: 18 ago. 2006.

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. **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 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo, Rio Claro, 1997.

BARKER, R.D. Improving the quality of resistivity sounding data in landfill studies. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics**. v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 245-251.

BENSON, R.C.; YUHR, L. **Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration**. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 1982. 236p.

BOIAN, C. **Aplicação geofísica a estudos ambientais em sedimentos do grupo Bauru: aterro sanitário de São José do Rio Preto (SP)**. 1995. 173 p. Dissertação

(Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo, Rio Claro, 1995.

BORGES, W.R. **Investigações Geofísicas Na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade.** (Mestrado em Geofísica) - Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, 2002.

BORGES, W.R. **Princípios Básicos da investigação Elétrica 2D.** Anexo I. Relatório de Bolsa PAE. 2004.

BRAGA, A.C.O., et al. Métodos Geométricos 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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

BRATUS, A.; NIETO YABAR, D. Characterisation of three different waste disposals using resistivity and IP methods. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p.216-219.

BRITO, M.J.C.; BATISTA, L.S. Aplicação do método da eletrorresistividade no monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do Riacho Caboblé. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2005.

BROWN, D.T. **The legacy of the landfill: perspectives on the solid waste crisis.** St. Catharines: Brock University. Institute of Urban and Environmental Studies, 1993. Disponível em <<http://www.brocku.ca/epi/legacy.txt>>. Acesso em: 25 jul 2006.

BUSELLI, G., et al. Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. In: WARD, S.H. (ed.),

Geotechnical and Environmental Geophysics. v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 27-39.

CAHYNA, F. Monitoring of artificial infiltration using geoelectrical methods. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics.** v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 101-106.

CALÇAS, D.A.N.Q.P.; HAMADA, J.; GIACHETI, H. Atenuação natural de contaminantes do chorume de aterros sanitários em solos arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

CAPOROSSI, Sara Suely Attílio. **Análise Comportamental do Chorume do Aterro Sanitário e do Sistema de Tratamento na Central de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos de Cuiabá/MT.** 2002. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CARPENTER, P.J.; KAUFMANN, R.S.; PRICE, B. The use of resistivity soundings to determine landfill structure. **Ground Water**, v. 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**, v. 56, n. 11, 1991. p. 1896-1904.

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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999. 4p.

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, n. 2, mai./ago. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 31 jul. 2006.

CONSONI, A.J.; SILVA, I.C.; GIMENEZ FILHO, A. Disposição final do lixo. In: D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. (Coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, 2000. cap. 5, p. 251-291.

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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1993. p. 1210-1212.

COSTA, A.F.U.; PINTO, I.F.; COSTA, R.T. Imageamento elétrico 2-D aplicado à avaliação ambiental de posto de combustíveis. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 255-258.

COSTA, B.S., et al. Plano de gestão de resíduos sólidos de Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 2003.

COSTA E SILVA, L.M. Programa PAX-VÓBIS. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 275-277.

CUNHA, V.; CAIXETA FILHO, J.V. Management of solid urban waste collection: structuring and application of a non-linear goal programming model. **Gestão & Produção**, Aug. 2002, v. 9, n. 2. p.143-161.

DAHLIN, T. Electrical imaging techniques for environmental and engineering applications. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 6p.

DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, 1989. p. 531–551.

DEHAINI, J. GPR aplicado a estudos de contaminação por hidrocarbonetos. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 8p.

DOURADO, J.C., et al. 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. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 285-288.

DRURY, W.J. Treatment of acid mine drainage with anaerobic solid - substrate reactors, **Water Env. Research**, v. 71, n. 6, Sept./Oct. 1999.

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. **Avaliação da Aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospecção Geofísica no Estudo de Áreas Utilizadas para Disposição de Resíduos**. 1998. 177p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

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. **Anais...** São Paulo: SBGf, 1997. 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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999.

ELLERT, N., et al. Mapeamento geofísico do lixão de São Carlos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6., 1990, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: CBAS, 1990. p. 82-88.

FEHR, M. O fator geográfico da gestão de resíduos sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 2003.

FERNANDES, M.C.; GARCIA, F.O.; CATEN, B.T. **Relatório do campo de geofísica no aterro sanitário de Cuiabá.** Cuiabá. Relatório interno. ICET/UFMT, 2006.

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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1995. p. 925-928.

GALLAS, J.D.F., et al. Lixão do Alvarenga – mapeamento da pluma de contaminação pelos métodos geoeletricos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 4p.

GALLAS, J.D.F., et al. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n. 1, 2005. p.51-59.

GOLDEN SOFTWARE, INC. **SURFER version 6.01**. Surface Mapping System Copyright ©, Colorado. 1993-1994.

GOOGLE. **Google Earth System Online**. Disponível em: <www.earth.google.com>. Acesso em: 31 jul. 2006.

GREENHOUSE, J.; SLAINE, D.D. The use of reconnaissance electromagnetic methods to map contaminant migration. **Ground Water Monitoring Review**, v. 3, n. 2, 1983. p. 47-59.

HAMADA, J., et al. 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. **Resumo...** Cancún: AIDIS, 2002. 6 p.

HUBER, F., et al. Métodos elétrico e eletromagnético aplicados ao delineamento de zonas contaminadas por resíduos de um curtume. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2005. 6p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas das populações residentes, em 01.07.2005, segundo os municípios**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 julho 2006.

KELLY, W.E. Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. 1976. **Ground Water**, v. 14, n. 1, p. 6-10.

LAGO, A.L., et al. 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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 6p.

LAGO, A.L.; ELIS, V.R. Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 4p.

LAGO, A.L.; ELIS, V.R. Técnica de sondagem elétrica vertical utilizada no estudo de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2005. 4p.

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, 20p. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em 11/09/2006.

LIMA, O.A.L.; SATO, H.K. Detecção da contaminação de águas subterrâneas usando técnicas de eletrorresistividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 3., 1993, Rio de Janeiro. **Coletânea de anais de congressos 89/97...** Rio de Janeiro: SBGf, 1993. p. 416-420.

LUIZ, J.G., et al. Apparent resistivity measurements in Complexo do Aurá landfill, Ananindeua – Pará – Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999. 4p.

LUZ, J.S., et al. 1980. **Projeto Cóxipo**. Goiânia, DNPM/CPRM. v. 1, 136p. (Relatório Final).

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, 1991.

MALAGUTTI FILHO, W., et al. 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. **Anais...** São Paulo: SBGf, 1997. 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, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 6p.

MAZÁČ, O., et al. Determination of the extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics.** v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 107-124.

MAZÁČ, O., et al. Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectrical methods. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics.** v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 125-131.

McNEILL, J.D. **Technical Note TN-5:** Electrical conductivity of soils and rocks. Geonics Limited. Ontario: 1980. 22p.

McNEILL, J.D. **Technical Note TN-6:** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Limited. Ontario: 1980. 15p.

MEJU, M.A. Geophysical mapping of polluted groundwater in a closed landfill site. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 3., 1993, Rio de Janeiro. **Coletânea de anais de congressos 89/97...** Rio de Janeiro: SBGf, 1993. p. 425-428.

MEJU, M.A. Groundwater and contaminated land geophysics: pressing problems and the way forward. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 251-254.

MENDES, J.M.B. **Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.** 1987. 195 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

MIGLIORINI, R.B. **Hidrogeologia em Meio Urbano.** Região de Cuiabá e Várzea Grande. 1999. 146 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MONIER-WILLIAMS, M.E., et al. Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics.** v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 41-55.

MONTEIRO, A.C.; COSTA, R.G.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. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 263-266.

MORAES, E.; GRAZINOLI, P. Prospecção do contaminante (BHC) através da eletrorresistividade. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 278-280.

MORALES, G.P., et al. 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. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 232-235.

MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C. Análise temporal de pluma de contaminação por meio de GPR. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 6p.

MOURA, H.P.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A.C.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. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 271-273.

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

NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S.; PIRES, A.C.B. Contaminação do subsolo monitorada por resistividade elétrica. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999. 4p.

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.

OLIVEIRA, F.J.S.; JUCÁ, J.F.T. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 211-217, jul./set. 2004.

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

ORTEGA, R.A.; PORSANI, J.L. Localização e delineamento de pluma de contaminação por hidrocarbonetos através dos métodos GPR e tomografia elétrica: resultados preliminares. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Anais ...** Salvador: SBGf, 2005. 6p.

PEÑIDO MONTEIRO, J.H., et al. ZVEIBIL, V.Z. (Coord.) **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

PEREIRA, P.A.; RÊGO, M.J.M.; LIMA, O.A.L. Diagnóstico da contaminação hídrica subterrânea e superficial provocada por resíduos sólidos urbanos e de curtume, no município de Alagoinhas, BA. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 4p.

PORSANI, J.L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado, SP. 1999. 159p.** Tese (Doutorado em Geociências) – Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

REYNOLDS, J.M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 1.ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1997. 795 p.

RIGOTTI, A.; PINHEIRO JÚNIOR, V.; GÓIS, J.R. Mapeamento geolétrico do aterro da Lamenha Pequena. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE

BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 5., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 1997. p. 1216-1219.

RITTER, E.; LEITE, A.E.B.; MACHADO, V.F. Avaliação da capacidade de mitigação da argila orgânica presente na fundação e nas valas de contenção lateral para o chorume gerado no aterro metropolitano de Gramacho – Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

RODRIGUES, C.L.; TAIOLI, F. Retenção de metais pesados no solo de cobertura do lixão de Ilhabela – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 2003. 4p.

ROSS, H.P.; MACKELPRANG, C.E.; WRIGTH, P.M. Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study in northern Utah. In: WARD, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics**. v. 2. Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 145-152.

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 19 ago. 2006.

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

SHIRAIWA, S., et al. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil – resultados preliminares. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n. 3, p.181-186. 2002.

SILVA, J.T.G. **Preliminary engineering geologic maps of Belo Horizonte, São Sebastião das Águas claras, Nova Lima e Santa Luzia Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Master of Engineering.** Colorado School of Mines. Golden, Colorado, EUA. 1990. 147 p.

SILVA, C.H. **Caracterização estrutural de mineralizações auríferas do grupo cuiabá, baixada cuiabana (MT).** 1999. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1999. 129p.

SILVA, M.J., et al. Investigações geofísicas na avaliação de risco geológico em áreas cársticas urbanas - exemplos da região metropolitana de Curitiba, PR, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 7., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2001. p. 259-262.

SILVA, S.R.C.M. **Chorume como poluente em uma área experimental no Aterro Sanitário de Cuiabá/MT.** 2001. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Saúde Coletiva, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2001.

SILVA, J.E., et al. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.20, n. 3, 2003. p.193-198.

SILVA, G.P., et al. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, 2006. p. 45-52.

SMSU. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos/SMSU. **Limpeza Urbana: Cuiabá Passando a Limpo**, 2001.

SOARES, P.S.M.; YOKOYAMA, L.; FREIRE, D.D.C. **Transporte de metais pesados no solo no contexto da disposição de resíduos sólidos**. Série Tecnologia Ambiental. CETEM / MCT: 2005. 43p.

SOBREIRA, F.G. Susceptibilidade a processos geológicos e suas conseqüências na área urbana de Mariana, MG. **Geo.br**, v. 1, n. 1, 2001. p. 43-60.

SOUZA, G.C.; ELIS, V.R.; MANTOVANI, M.S.M. Métodos geoeletricos aplicados no mapeamento de contaminação por disposição clandestina de resíduos domésticos. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 4p.

STEVANATO, R., et al. 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. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 6p.

STEVANATO, R., et al. Mapeamento de pluma de contaminação no aterro sanitário de Coronel Vivida-PR. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 2004. 5p.

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

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Instituto de Geociências. **Glossário geológico ilustrado**. Disponível em: <<http://www.unb.br/ig/glossario>>. Acesso em: 18 ago. 2006.

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

VILELA, D.; SALOMÃO, F.X.T.; SHIRAIWA, S. **Descrição de quatro perfis de solo na área do aterro sanitário de Cuiabá.** Cuiabá, Relatório Interno, ICET/UFMT, 2006.

WARD, S.H. (Ed). **Geotechnical and Environmental Geophysics.** Volume I: Review and Tutorial. Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa: 1990. 389p.

YILMAZ, O. **Seismic data processing.** Society of exploration geophysics press, Tulsa: 1987.

ZAGO, M.A.; SANTOS, L.H.; BATISTA, L.S. Aplicação da eletrorresistividade no monitoramento ambiental de áreas urbanas. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: SBGf, 2005. 5p.