

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE
EM ÁREA CONTAMINADA SOB ATENUAÇÃO NATURAL**

César Augusto Moreira

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Dourado

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro – SP
2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE
EM ÁREA CONTAMINADA SOB ATENUAÇÃO NATURAL**

César Augusto Moreira

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Dourado

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – Campus de Rio Claro, para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro – SP
2005

551 Moreira, César Augusto
M838ap Aplicação do método eletromagnético transiente em área
 contaminada sob atenuação natural / César Augusto Moreira.
 -- Rio Claro : [s.n.], 2005
 161 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Orientador: João Carlos Dourado

 1. Geofísica. 2. Biorremediação. 3. Hidrocarboneto. 4.
 Pluma de contaminação. 5. Monitoramento. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça
IAG – USP

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho
DGA - UNESP

Prof. Dr. João Carlos Dourado
DGA - UNESP
(Orientador)

Dissertação aprovada com distinção

Dedico este trabalho a

Carlos, Dalva, Celso e Fabíola

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Pai Eterno por seu amparo e amor para com este servo. Por sua fidelidade nos momentos de sofrimento e de alegria, por iluminar minha mente e meus atos em todos os momentos desta vida. Obrigado meu Senhor por me carregar em seus braços em meio a espinhos e andar ao meu lado em verdes campos. A Deus Altíssimo seja todo o louvor e toda a glória pela conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Sr. Carlos Aparecido Moreira e a Sra Dalva de Souza Moreira por acreditarem e investir neste filho, confiantes e orgulhosos. Por estarem ao meu lado durante toda esta jornada, pelo auxílio financeiro e por jamais deixarem de me amar.

Agradeço ao Sr. Celso Alexandre Moreira, meu irmão querido, pelo auxílio na execução deste trabalho e em todos os momentos em que foi necessário.

Agradeço a Fabíola Coutinho Servidoni pelo amor e carinho, por toda paciência e auxílio, desde trabalhos de campo, processamento, interpretação e correção, pois em todos estes momentos estive ao meu lado, sempre preocupada com minha alimentação e com a hora de parar para namorar.

Agradeço ao meu Sr Miguel e a Sra Alvina, Sra Diva, aos meus tios Daniel, Adilson, Jacob, André e Esmeralda, e seus respectivas companheiros(as), por terem me auxiliado a amparado das mais diversas formas.

Ao Prof. Dr. João Carlos Dourado, agradeço pela orientação no presente trabalho e pelo aprendizado dos métodos, pelas correções tanto da escrita quanto da fala e pela confiança depositada em minha pessoa.

Agradeço também ao técnico Francisco Manuel Garcia Barrera (Paco) por seus serviços, atenção e paciência nos longos dias de trabalho de campo.

SUMÁRIO

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS E FOTOS	iv
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - MÉTODOS GEOFÍSICOS	3
3 - ATENUAÇÃO NATURAL	23
4 - ÁREA DE ESTUDOS	40
5 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	52
6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
7 - CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I	89
ANEXO II	94
ANEXO III	97
APÊNDICE I	104
APÊNDICE II	135
APÊNDICE III	147

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Generalidades	1
1.2 - Objetivos	1
2 - MÉTODOS GEOFÍSICOS	3
2.1 - Princípios Teóricos dos Métodos Elétricos	3
2.2 - Princípios Teóricos dos Métodos Eletromagnéticos	4
2.3 - Método de Eletrorresistividade	8
2.3.1 - Princípio da técnica de Sondagem Elétrica Vertical	9
2.3.2 - Princípio da técnica de Caminhamento Elétrico	10
2.4 - Método Eletromagnético Transiente	12
2.4.1 - Princípio do método Eletromagnético Transiente	13
2.4.2 - Princípio da técnica de Sondagem Eletromagnética	18
2.5 - Aplicação dos Métodos em estudos ambientais	19
3 - ATENUAÇÃO NATURAL	23
3.1 - Definição	23
3.2 - Eficiência do Processo	23
3.3 - Vantagens e Desvantagens	24
3.4 - Mecanismos Responsáveis pela Atenuação Natural	25
3.4.1 - Processos Físicos	26
3.4.2 - Processos Biológicos	28
3.4.2.1 - Biodegradação Aeróbica	30
3.4.2.2 - Biodegradação Anaeróbica	31
3.5 - Dissolução Mineral por ação de Ácidos Orgânicos	38

4 -	ÁREA DE ESTUDO	40
4.1 -	Localização	40
4.2 -	Histórico do Passivo Ambiental	40
4.3 -	Fisiografia	42
4.4 -	Pedologia	43
4.5 -	Geologia Regional	44
4.6 -	Geologia Local	47
4.8 -	Hidrogeologia Regional	49
4.9 -	Hidrogeologia Local	50
5 -	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	52
5.1 -	Introdução	52
5.2 -	Equipamentos	52
5.3 -	Aquisição dos Dados	54
5.4 -	Processamento dos dados de SEV e CE	56
5.5 -	Processamento dos dados de TEM	56
6 -	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
6.1 -	Análise Comparativa entre Sondagem eletromagnética e Sondagem Elétrica Vertical	58
6.2 -	Análise Comparativa entre Gráficos de Resistividade e Modelos de Inversão	63
6.2 -	Análise dos Resultados no âmbito dos processos de Atenuação Natural	67
7 -	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO I	89
	ANEXO II	94

ANEXO III	97
APÊNDICE I	104
APÊNDICE II	135
APÊNDICE III	147

ÍNDICE DE FIGURAS E FOTOS

Figura 2.1 – Propagação de corrente elétrica em um meio homogêneo (Orellana, 1972)	03
Figura 2.2 – Arranjo Schlumberger para medidas de resistividade (Modificado de Braga, 1999)	08
Figura 2.3 – Técnica de Caminhamento Elétrico com arranjo Dipolo-dipolo (Modificado de Braga, 1999)	11
Figura 2.4 – Esquema de propagação dos campos magnéticos (Sheriff, 1989)	14
Figura 2.5 - Princípio físico do método eletromagnético transiente: Campo primário (A). Indução eletromotiva (B). Campo secundário (C). (modificado de McNeill, 1980)	15
Figura 2.6 – Densidade de correntes <i>eddy</i> em diferentes períodos (Nabighian, 1979)	16
Figura 2.7 – Razão de difusão máxima de intensidade de corrente <i>eddy</i> para diferentes níveis uniformes de resistividade (modificado de McNeill 1980)	17
Figura 2.8 – Exemplo de curva de decaimento transiente (Mills et al, 1989)	18
Figura 2.9 – Arranjo de <i>loop</i> central	19
Figura 3.1 – Partição de compostos de Fase Líquida Não Aquosa (NAPL) no solo, água e ar (Huling & Weaver, 1991; Newell et al, 1995; EPA, 2004)	27
Figura 3.2 – Zonas de degradação de hidrocarbonetos (Adap. de Rabus e Heider, 1998)	29
Figura 3.3 - Metabolismo de microorganismos em cadeias aromáticas segundo o padrão de clivagem orto ou meta (adaptado de Juhasz & Naidu, 2000)	31
Figura 3.4 – Tentativa de seqüenciação da degradação de tolueno por culturas	32

metanogênicas (adaptado de Grbic-Galic & Vogel, 1986)	
Figura 3.5 – Efeitos da concentração de oxigênio no processo de desnitrificação (adaptado de Parkin & Tiedje, 1984)	37
Figura 3.6 – Esquema de ramificação de transporte de elétrons (Lloyd, 1993)	37
Figura 4.1 – Mapa de localização	41
Foto 4.1 – Vista parcial da área da antiga Industria Sulfabrás	42
Figura 4.2 - Mapa Geológico da região de Araras (Modificado de CPRM, 1985)	46
Figura 4.3 – Mapa Geológico Local	48
Figura 4.4 – Sistemas Aquíferos da região de Araras (Mod. de DAAE, 1981)	50
Figura 4.5 – Mapa Potenciométrico Local (Modificado de CETESB, 1997)	51
Foto 5.1 – Equipamento TEM	53
Foto 5.2 – Resistivímetro Bison, módulos de potencial (esq.) e módulo de corrente (dir.)	53
Foto 5.3 - Aquisição de dados com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical em arranjo Schlumberger (sondagem SEV-9)	54
Foto 5.4 - Aquisição de dados com a técnica de Caminhamento Elétrico em arranjo Dipolo-dipolo (linha LB)	55
Foto 5.5 – Aquisição de dados com a técnica de Caminhamento Eletromagnético em arranjo de <i>loop</i> central (sondagem LB-19)	55
Figura 6.1 – Sondagem Eletromagnética-LF-05 (esquerda) e Sondagem Elétrica Vertical SEV-1 (direita). Note a diferença nos valores de resistividade num mesmo ponto	60
Figura 6.2 – Resposta transiente em meio com baixa polarizabilidade	61

Figura 6.3 – Resposta transiente em meio com elevada polarizibilidade	62
Figura 6.4 – Locação das Sondagens Eletromagnéticas e Sondagens Elétricas Verticais	63
Figura 6.5 – Linhas de Caminhamento Elétrico	64
Figura I.1 – Descrição geológica das sondagens a percussão (CETESB, 1997)	90
Figura I.2 – Descrição geológica das sondagens a percussão (CETESB, 1997)	91
Figura I.3 – Descrição geológica dos poços de monitoramento (CETESB, 1997)	92
Figura I.4 – Descrição geológica dos poços de monitoramento (CETESB, 1997)	93
Figura IV.1 – Pontos de Sondagem Eletromagnética e respectivas Linhas de Caminhamento Eletromagnético	105
Figura IV.2 – Sondagens Eletromagnéticas LB-01, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	106
Figura IV.3 – Sondagens Eletromagnéticas LB-03, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	106
Figura IV.4 – Sondagens Eletromagnéticas LB-05, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	107
Figura IV.5 – Sondagens Eletromagnéticas LB-06, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	107
Figura IV.6 – Sondagens Eletromagnéticas LB-07, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	108
Figura IV.7 – Sondagens Eletromagnéticas LB-08, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	108
Figura IV.8 – Sondagens Eletromagnéticas LB-10, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita	109

Figura IV.9 – Sondagens Eletromagnéticas LB-12, com a curva de campo à 109 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.10 – Sondagens Eletromagnéticas LB-13, com a curva de campo à 110 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.11 – Sondagens Eletromagnéticas LB-14, com a curva de campo à 110 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.12 – Sondagens Eletromagnéticas LB-15, com a curva de campo à 111 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.13 – Sondagens Eletromagnéticas LB-16, com a curva de campo à 111 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.14 – Sondagens Eletromagnéticas LB-18, com a curva de campo à 112 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.15 – Sondagens Eletromagnéticas LB-19, com a curva de campo à 112 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.16 – Sondagens Eletromagnéticas LB-20, com a curva de campo à 113 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.17 – Sondagens Eletromagnéticas LB-21, com a curva de campo à 113 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.18 – Sondagens Eletromagnéticas LB-22, com a curva de campo à 114 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.19 – Sondagens Eletromagnéticas LC-01, com a curva de campo à 115 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.20 – Sondagens Eletromagnéticas LC-02, com a curva de campo à 115 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.21 – Sondagens Eletromagnéticas LC-04, com a curva de campo à 116

esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.22 – Sondagens Eletromagnéticas LC-05, com a curva de campo à 116 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.23 – Sondagens Eletromagnéticas LC-06, com a curva de campo à 117 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.24 – Sondagens Eletromagnéticas LC-07, com a curva de campo à 117 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.25 – Sondagens Eletromagnéticas LC-08, com a curva de campo à 118 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.26 – Sondagens Eletromagnéticas LD-01, com a curva de campo à 119 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.27 – Sondagens Eletromagnéticas LD-03, com a curva de campo à 119 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.28 – Sondagens Eletromagnéticas LD-06, com a curva de campo à 120 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.29 – Sondagens Eletromagnéticas LD-07, com a curva de campo à 120 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.30 – Sondagens Eletromagnéticas LD-08, com a curva de campo à 121 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.31 – Sondagens Eletromagnéticas LD-09, com a curva de campo à 121 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.32 – Sondagens Eletromagnéticas LD-10, com a curva de campo à 122 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.33 – Sondagens Eletromagnéticas LD-11, com a curva de campo à 122 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.34 – Sondagens Eletromagnéticas LD-13, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 123

Figura IV.35 – Sondagens Eletromagnéticas LD-14, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 123

Figura IV.36 – Sondagens Eletromagnéticas LF-01, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 124

Figura IV.37 – Sondagens Eletromagnéticas LF-02, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 124

Figura IV.38 – Sondagens Eletromagnéticas LF-03, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 125

Figura IV.39 – Sondagens Eletromagnéticas LF-04, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 125

Figura IV.40 – Sondagens Eletromagnéticas LF-05, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 126

Figura IV.41 – Sondagens Eletromagnéticas LF-06, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 126

Figura IV.42 – Sondagens Eletromagnéticas LD-08, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 127

Figura IV.43 – Sondagens Eletromagnéticas LF-09, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 127

Figura IV.44 – Sondagens Eletromagnéticas LF-10, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 128

Figura IV.45 – Sondagens Eletromagnéticas LG-01, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 129

Figura IV.46 – Sondagens Eletromagnéticas LG-02, com a curva de campo à esquerda e a curva processada a direita 129

esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.47 – Sondagens Eletromagnéticas LG-03, com a curva de campo à 130 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.48 – Sondagens Eletromagnéticas LG-04, com a curva de campo à 130 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.49 – Sondagens Eletromagnéticas LG-05, com a curva de campo à 131 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.50 – Sondagens Eletromagnéticas LG-06, com a curva de campo à 131 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.51 – Sondagens Eletromagnéticas LH-01, com a curva de campo à 132 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.52 – Sondagens Eletromagnéticas LH-02, com a curva de campo à 132 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.53 – Sondagens Eletromagnéticas LH-03, com a curva de campo à 133 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.54 – Sondagens Eletromagnéticas LH-04, com a curva de campo à 133 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.55 – Sondagens Eletromagnéticas LH-05, com a curva de campo à 134 esquerda e a curva processada a direita

Figura IV.56 – Sondagens Eletromagnéticas LH-06, com a curva de campo à 134 esquerda e a curva processada a direita

Figura V.1 – Pontos de Sondagem Eletromagnética, com respectivas Linhas de 136 Caminhamento Eletromagnético e pontos de Sondagem Elétrica Vertical

Figura V.2 – SEV-01: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos 137 níveis de saturação do solo

Figura V.3 – SEV-02: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	138
Figura V.4 – SEV-03: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	139
Figura V.5 – SEV-04: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	140
Figura V.6 – SEV-05: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	141
Figura V.7 – SEV-06: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	142
Figura V.8 – SEV-07: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	143
Figura V.9 – SEV-08: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	144
Figura V.10 – SEV-09: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	145
Figura V.11 – SEV-10: curva de campo, modelo geoeétrico e interpretação dos níveis de saturação do solo	146
Figura VI.1 - Linhas de Caminhamento Elétrico e pontos de Sondagem Elétrica Vertical	148
Figura VI.2 -Valores de resistividade da linha LB para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	149
Figura VI.3 - Valores de resistividade da linha LB para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	149
Figura VI.4 - Valores de resistividade da linha LB para 15m de profundidade,	150

obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.5 - Caminhamento elétrico na linha LB, com pseudo-seção (superior), 150
pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

Figura VI.6 - Valores de resistividade da linha LC para 5m de profundidade, 151
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.7 - Valores de resistividade da linha LC para 10m de profundidade, 151
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.8 - Valores de resistividade da linha LC para 15m de profundidade, 152
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.9 - Caminhamento elétrico da linha LC, com pseudo-seção (superior), 152
pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

Figura VI.10 - Valores de resistividade da linha LD para 5m de profundidade, 153
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.11 - Valores de resistividade da linha LD para 10m de profundidade, 153
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.12 - Valores de resistividade da linha LD para 15m de profundidade, 154
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.13 - Caminhamento elétrico da linha LD, com pseudo-seção (superior), 154
pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

Figura VI.14 - Valores de resistividade da linha LF para 5m de profundidade, 155
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.15 - Valores de resistividade da linha LF para 10m de profundidade, 155
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.16 - Valores de resistividade da linha LF para 15m de profundidade, 156
obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

Figura VI.17 - Caminhamento elétrico da linha LF, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)	156
Figura VI.18 - Valores de resistividade da linha LG para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	157
Figura VI.19 - Valores de resistividade da linha LG para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	157
Figura VI.20 - Valores de resistividade da linha LG para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	158
Figura VI.21 - Caminhamento elétrico da linha LG, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)	158
Figura VI.22 - Valores de resistividade da linha LH para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	159
Figura VI.23 - Valores de resistividade da linha LH para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	159
Figura VI.24 - Valores de resistividade da linha LH para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	160
Figura VI.25 - Valores de resistividade da linha LH para 20m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas	160
Figura VI.26 - Caminhamento elétrico da linha LH, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)	161

ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

Quadro 3.1 – Mecanismos responsáveis pela Atenuação Natural	26
Quadro 3.2 – Propriedades dos compostos que constituem a pluma contaminante na área da antiga industria Sulfabrás (valores obtidos a 20°C) (Newell et al, 1995)	27

Tabela 6.1 – Comparação dos valores de resistividade dos níveis geoeletricos definidos por Sondagem Eletromagnética e Sondagem Elétrica Vertical (em Ohm.m)	59
Tabela II.1 - Medidas de nível d'água obtidas em sondagens a percussão (em metros) (CETESB, 1997)	95
Tabela II.2 - Medidas do nível freático nos poços de abastecimento (em metros) (CETESB, 1997)	95
Tabela II.3 - Medidas do nível freático, obtidas nos poços de monitoramento (em metros) (CETESB, 1997)	96
Tabela II.4 - Medidas de Condutividade Hidráulica, obtidas por meio de ensaios de infiltração (em cm/s) (CETESB, 1997)	96
Tabela III.1 - Padrões de potabilidade de água para consumo humano (CETESB 2001; EPA, 2003)	98
Tabela III.2 - Resultado de análises químicas em amostras de água do poço de infiltração descrito na indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (19/08/1987) (CETESB, 1997)	98
Tabela III.3 - Resultado de análises químicas em amostras de água do poço de infiltração reconhecido na indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (1988) (CETESB, 1997)	99
Tabela III.4 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 7/6/1990) (CETESB,1997)	99
Tabela III.5 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 06/06/1990) (CETESB, 1997)	100
Tabela III.6 - Resultado de análises químicas para íons solúveis em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (mg/L) (coleta em 07/06/1990) (CETESB, 1997)	100

Tabela III.7 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 21/01/1992) (CETESB, 1997)	101
Tabela III.8 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 21/01/1992) (CETESB, 1997)	101
Tabela III.9 - Resultado de análises químicas para íons solúveis em amostras de água de poços próximos a Sulfabrás (mg/L) (21/01/1992) (CETESB, 1997)	102
Tabela III.10 - Resultado de análises químicas em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)	102
Tabela III.11 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)	102
Tabela III.12 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)	103
Tabela III.13 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 30/11/2000) (CETESB, 2001)	103
Tabela III.14 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 30/11/2000) (CETESB, 2001)	103

RESUMO

Este trabalho discute a aplicabilidade do método geofísico Eletromagnético Transiente (TEM) a partir de análise comparativa com o método de Eletrorresistividade, em uma área industrial contaminada por derivados de petróleo e atualmente sob processos de Atenuação Natural. Dentre os contaminantes presentes no solo e água subterrânea estão o Benzeno, Tolueno, Xileno, 1,2 Dicloroetano, Sódio, Cloreto e Sulfato. A remediação da área é realizada exclusivamente por Atenuação Natural, ou seja, ação de processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pela degradação, dispersão e diluição dos contaminantes. Foram utilizadas as técnicas de sondagem eletromagnética de “loop” central, caminhamento eletromagnético, sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. Os resultados apresentam uma anomalia de baixa resistividade adjacente aos poços de injeção, e anomalias de alta resistividade sob estes poços. A grande área abrangida pela anomalia de baixa resistividade é fruto principalmente da biodegradação dos contaminantes de fase líquida leve não aquosa – LNAPL, cujas sucessivas quebras em compostos mais simples por ação de microorganismos resulta em ácidos orgânicos que corroem grãos minerais, que são liberados ao meio sob a forma iônica. A pequena área abrangida pela anomalia de alta resistividade é produto da concentração de contaminantes pouco degradados, caracterizados por elevada resistividade em relação à água. O TEM se mostrou aplicável no estudo de áreas contaminadas e o processo de Atenuação Natural está sendo eficaz na remediação da área.

Palavras-chave: TEM, Eletrorresistividade, Atenuação Natural, NAPL, Biodegradação

ABSTRACT

This work discusses the applicability of the Transient Electromagnetic Method (TEM) from comparative analysis with the Electrical Method, in an industrial area contaminated by oil derived and currently under processes of Natural Attenuation. Amongst the contaminants present in the soil and groundwater they are Benzene, Toluene, Xylene, 1,2 Dichloroethene, Sodium, Chloride and Sulphate. A remediation of the area is carried through exclusively by Natural Attenuation, or either, action of physical, chemical and biological processes responsible for the degradation, dispersion and dilution of contaminants. The techniques of electromagnetic sounding of central loop, electromagnetic tomography, vertical electric sounding and electric tomography had been used. The results present an anomaly of low adjacent resistivity to the injection wells, and anomalies of high resistivity under these wells. The great area enclosed for the anomaly of low resistivity is fruit mainly of the biodegradation of the contaminants of light non-aqueous phase liquid - LNAPL, whose successive breakings in simpler composites for action of microorganisms result in acid organic that corrode mineral grains, that are set free to the way under the ionic form. The small area enclosed for the anomaly of high resistivity is product of the concentration of contaminants little degraded, characterized for raised resistivity in relation a water. The TEM if it showed applicable in the study of contaminated areas and the process of Natural Attenuation is being efficient in the remediation of the area.

Word-key: TEM, Electrical Resistivity, Natural Attenuation, NAPL, Biodegradation

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

O descarte de resíduos ou efluentes resultantes de processos industriais é um dos principais problemas enfrentados tanto por seus produtores quanto pela sociedade. O elevado custo para o armazenamento de efluentes em locais adequados, muitas vezes, aliado à ausência de técnicas de recuperação ou reutilização, induz muitas indústrias ao emprego de ações danosas a qualidade do solo ou das águas em superfície e em subsuperfície.

A utilização de infiltração ou deposição de resíduos no solo sem qualquer tipo de tratamento foi uma alternativa adotada ao longo de décadas, face ao desconhecimento de suas conseqüências, associado ao conceito de depuração ou absorção por parte do solo, atualmente reconhecido como altamente nocivo ao meio ambiente.

É cada vez maior a preocupação quanto à qualidade do solo e das águas subterrâneas, devido ao comprometimento da maioria dos rios, pelo lançamento de esgotos, efluentes indústrias e outros poluentes, aliado a crescente demanda por parte da sociedade, a preservação dos recursos hídricos de subsuperfície torna-se extremamente importante não somente para utilização imediata deste potencial, mas para que a qualidade e a quantidade se mantenham para uso das gerações futuras.

Em contrapartida, é necessário o desenvolvimento de novos métodos e técnicas para o diagnóstico de áreas previamente contaminadas, visto que uma vez estabelecido o problema, é necessário saná-lo da forma mais eficiente e com o menor custo possível.

Ao mesmo tempo, também é importante compreender os processos responsáveis pela degradação natural de contaminantes no solo e água subterrânea, por se tratar de uma técnica aplicável e eficaz em alguns casos.

1.2 - OBJETIVOS

Este trabalho visa determinar a aplicabilidade do Método Eletromagnético Transiente (TEM) em estudos de detecção e caracterização plumas de contaminação, e por meio da análise do comportamento atual dos contaminantes, avaliar a eficácia do processo de Atenuação Natural na área de estudos.

Atenuação Natural representa um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no ambiente, que atuam num meio contaminado com objetivo de diluir, dispersar ou degradar compostos presentes.

A aplicabilidade do TEM é aferida pela aplicação conjunta do método de Eletrorresistividade, especificamente a partir das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, por meio da análise comparativa de ambos os métodos.

A análise comparativa dos resultados pode definir o grau de eficiência do TEM em relação ao Método de Eletrorresistividade, amplamente aplicado no diagnóstico de áreas contaminadas e determinar as vantagens e desvantagens de sua aplicação.

A análise conjunta dos resultados pode fornecer indícios dos principais mecanismos e processos responsáveis pela degradação dos compostos orgânicos presentes na área, e, desta forma, compreender quais as principais alterações resultantes dos produtos de degradação ao meio contaminado e sua influência no principal parâmetro físico avaliado pelos métodos geofísicos aplicados: a resistividade elétrica.

2 - METODOS GEOFÍSICOS

2.1 - PRINCÍPIOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS ELÉTRICOS

O comportamento da corrente elétrica em meios tridimensionais não homogêneos, como o meio geológico, é variável e extremamente complexo tanto do ponto de vista físico quanto matemático.

Para uma abordagem mais adequada do ponto de vista matemático e que ao mesmo tempo represente às condições mais próximas da realidade, o meio geológico pode ser representado como uma sucessão de estratos horizontais, com contatos perfeitamente planos com valores de resistividade constantes e distintos para cada estrato.

Desta forma, consideremos um estrato **S** de resistividade ρ , homogêneo e plano, separado por outro estrato com resistividade infinita representado pela atmosfera (Figura 2.1). Na interface entre os meios são posicionados dois eletrodos, dos quais um é responsável pela aplicação de corrente elétrica no estrato **S** a partir de uma fonte – bateria, e outro utilizado para captar a corrente elétrica propagada no estrato **S** e posterior leitura em um amperímetro **A**.

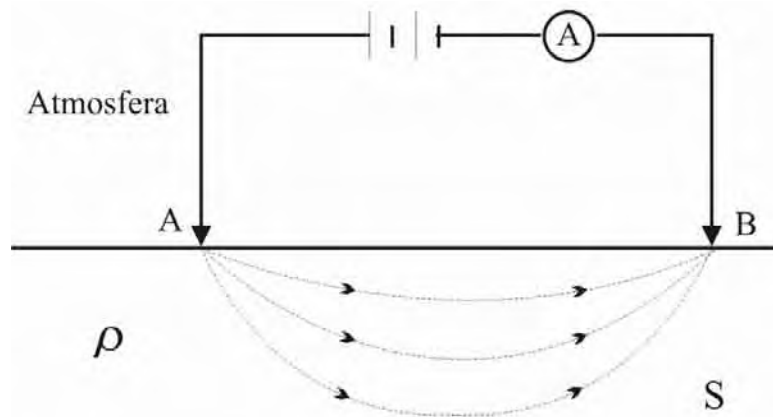


Figura 2.1 – Propagação de corrente elétrica em um meio homogêneo (Orellana, 1972)

A corrente elétrica se propaga por meio de linhas de fluxo de corrente do eletrodo **A** para o eletrodo **B**. O tamanho relativamente pequeno dos eletrodos permite considera-los como pontos e assim, desprezar a resistividade do material que os compõem.

Nestas condições, a intensidade de corrente aplicada por **A** e captada por **B** pode ser expressa como (equação 2.1):

$$\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B = \mathbf{0} \text{ (equação 2.1)}$$

Segundo Orellana (1972), as equações de Maxwell estabelecem as leis para descrição deste fenômeno em regime estacionário (equação 2.2):

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \text{ (equação 2.2)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \text{ (equação 2.3)}$$

onde **E** é o campo elétrico (V/m), **H** é a intensidade de campo magnético (A/m), **J** é a densidade de corrente de condução (A/m²).

A equação 2.2 descreve que o campo elétrico é conservativo em regime estacionário, pois deriva de um potencial escalar **U**:

$$\mathbf{E} = -\nabla \mathbf{U} \text{ (equação 2.4)}$$

Esta equação 2.4 demonstra que a geração de campo elétrico resulta da redução de potencial (**U**). Em termos práticos, um campo elétrico será gerado à medida que uma bateria perde sua carga, por exemplo.

Por outro lado, a lei de Ohm aplicada para meios homogêneos (equação 2.5)

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \text{ (equação 2.5)}$$

descreve que a densidade de corrente **J** em um ponto, tem a mesma direção e sentido do campo **E** sendo ambos proporcionais. O fator de proporcionalidade é a condutividade (σ), que é o inverso da resistividade (ρ).

Como em nenhum lugar do espaço pode haver aparição ou desaparecimento de cargas elétricas, exceto nos eletrodos **A** e **B**, ocorre que (equação 2.6)

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{0} \text{ (equação 2.6)}$$

A combinação das equações anteriores resulta em (equação 2.7)

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \mathbf{0} \text{ (equação 2.7)}$$

Esta é a equação mais geral para a prospecção geoelétrica (Orellana, 1972).

2.2 - PRINCÍPIOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Segundo Orellana (1973), Keller (1987) e West & Macne (1991), as equações de Maxwell são o ponto de partida para o entendimento de como os campos eletromagnéticos podem ser utilizados no estudo de estruturas da Terra e na determinação de propriedades elétricas e magnéticas:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (\text{equação 2.8}) \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{equação 2.10})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \quad (\text{equação 2.9}) \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (\text{equação 2.11})$$

onde \mathbf{E} é intensidade de campo elétrico (V/m), \mathbf{B} é intensidade campo magnético (Wb/m^2), \mathbf{H} é a intensidade de campo magnético (A/m), \mathbf{D} é a densidade de fluxo elétrico (C/m^2), \mathbf{J} é a densidade de corrente de condução (A/m^2) e q a densidade de carga livre.

A equação 2.8 é a Lei de indução de Faraday, representada com o auxílio de operador vetorial ∇ (nabla) para as variáveis x , y e z do espaço. Descreve o efeito elétrico de um campo magnético variável. O sinal negativo no segundo membro da equação demonstra o decréscimo de \mathbf{B} frente ao acréscimo de \mathbf{E} , cujos termos extremos resultam na ausência de \mathbf{B} em presença de \mathbf{E} máximo ou ausência de \mathbf{E} em presença de \mathbf{B} máximo.

A equação 2.9 é a Lei de Ampère. Descreve o efeito magnético de um campo elétrico variável ou de uma corrente elétrica. Demonstra a densidade de fluxo magnético em função da densidade de corrente elétrica, somado a derivada parcial da densidade de fluxo elétrico.

A equação 2.10 é a Lei de Gauss para o magnetismo, que descreve o campo elétrico pela carga elétrica. O segundo membro é igual a zero devido a inexistência de monopólos magnéticos.

A equação 2.11 é a Lei de Gauss para a eletricidade, a qual demonstra que a densidade de fluxo elétrico \mathbf{D} é igual à densidade de carga livre q , afirmação provada devido à existência de monopólos elétricos.

As equações de Maxwell descrevem a propagação da onda eletromagnética a partir da interação entre os campos elétrico e magnético. Por outro lado, tais equações não apresentam informações quanto às propriedades elétricas do meio onde atuam os campos elétrico e magnético (Ward & Hofmann, 1987).

Desta forma, a interação entre os campos eletromagnéticos e o meio de propagação é compreendida por meio das relações constitutivas, que relacionam o campo elétrico às propriedades elétricas e magnéticas do meio, ou seja, as suas propriedades físicas (Ward & Hofmann, 1987).

As relações constitutivas são obtidas por meio das expressões:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{equação 2.12})$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{equação 2.13})$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{equação 2.14})$$

As propriedades elétricas são representadas pela condutividade elétrica (σ) (S/m) e permissividade dielétrica (ϵ) (F/m) do meio, enquanto que as propriedades magnéticas são avaliadas pela permeabilidade magnética (μ) (H/m).

A equação 2.12 é a Lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente de condução ao campo elétrico por meio da condutividade elétrica. A condutividade elétrica (σ) (S/m) quantifica a capacidade de trânsito de corrente elétrica através de um meio, enquanto a resistividade elétrica (ρ) (Ohm.m) quantifica a resistência de um meio a passagem de corrente elétrica. Portanto, condutividade e resistividade elétrica são propriedades inversas.

A condutividade elétrica em rochas e minerais não é constante, podendo variar com o tempo, temperatura, pressão e diversos outros fatores ambientais (Keller, 1987).

A equação 2.13 relaciona a densidade de fluxo elétrico ao campo elétrico por meio da permissividade dielétrica.

A equação 2.14 descreve a relação entre o campo magnético e a densidade de fluxo magnético por meio da permeabilidade magnética, a qual influi pouco na aplicação dos métodos eletromagnéticos em áreas com baixo teor de minerais metálicos ou ausentes de estruturas metálicas enterradas, como tambores.

A permissividade dielétrica no vácuo (ϵ_0), que corresponde a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, é relacionada a permissividade dielétrica no meio (ϵ), analisado a partir da expressão (equação 2.15):

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{equação 2.15})$$

para obtenção da constante dielétrica (K), usualmente aplicada em lugar da permissividade dielétrica do meio.

A aplicação das relações constitutivas assume algumas premissas que resultam em uma análise simplificada da propagação da onda eletromagnética no meio geológico (Ward & Hofmann, 1987):

- O meio é linear, isotrópico, homogêneo e suas propriedades elétricas são independentes do tempo, temperatura ou pressão.

- É assumido o valor de permeabilidade magnética do vácuo (μ_0), ou seja, $\mu = \mu_0$.

Estas simplificações facilitam a aplicação dos métodos eletromagnéticos, mas, por outro lado, representam um fator limitante em determinadas situações:

- Estudos crustais são afetados por efeitos de pressão e temperatura e devem ser considerados.

- Análise de áreas que apresentam minerais ou estruturas altamente condutivas, como minérios ferrosos, tambores ou tubos metálicos, devem considerar a permeabilidade magnética típica do meio.

Fatores como porosidade, quantidade de sais dissolvidos, quantidade de água, conteúdo de argilominerais e a presença de minerais metálicos, alteram drasticamente a condutividade elétrica do meio.

Desta forma, a condutividade elétrica é um fator importante na propagação de ondas eletromagnéticas no meio geológico, principalmente para os métodos que utilizam ondas de baixa frequência – escala de Hz, como o caso no método Eletromagnético Transiente.

Em contrapartida, a permissividade dielétrica é um fator dominante na aplicação de métodos geofísicos que utilizam altas frequências de onda - escala de MHz, como no caso do Radar de Penetração no Solo (Keller, 1987).

2.3 - MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE

O método de eletrorresistividade está baseado na introdução de corrente elétrica no terreno, a partir de um arranjo denominado dispositivo eletródico. Em geral, este dispositivo é constituído de quatro eletrodos (Figura 2.2).

Os eletrodos A e B são convencionados como circuito de corrente ou eletrodos de corrente, a partir dos quais é aplicada uma corrente elétrica em subsuperfície. Este circuito é conectado a um amperímetro, por meio de cabos elétricos.

Os eletrodos M e N são convencionados como circuito de potencial ou eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial criada pelo circuito de corrente. Este circuito, por sua vez, é conectado a um voltímetro capaz de medir a diferença de potencial entre eles.

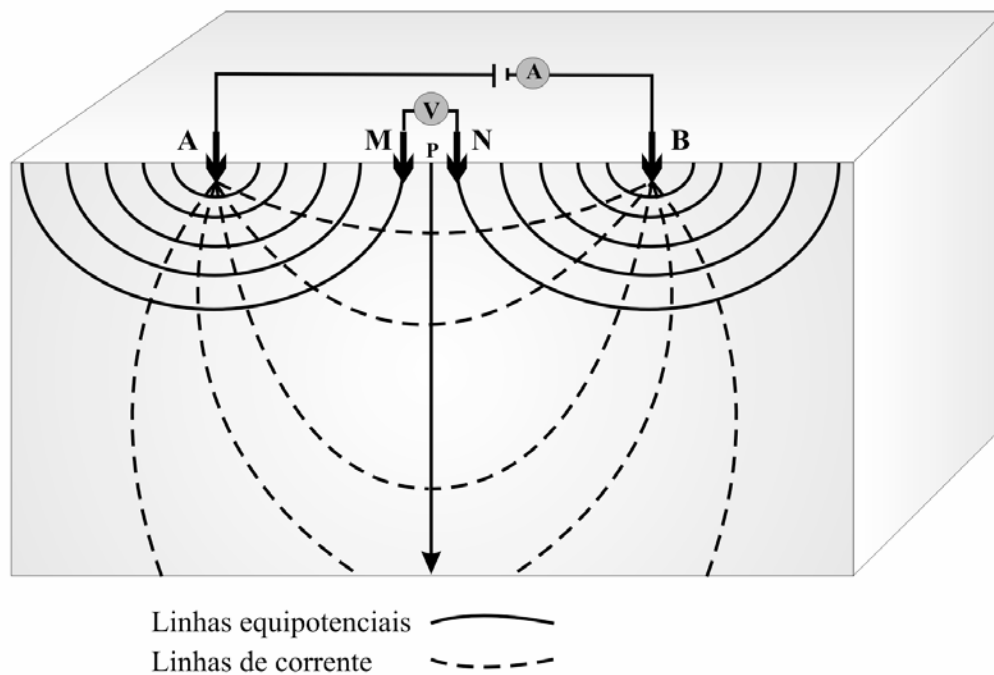


Figura 2.2 – Arranjo Schlumberger para medidas de resistividade (Modificado de Braga, 1999)

No caso de medidas de resistividade em meios homogêneos, o valor obtido representará a resistividade verdadeira do meio. Entretanto, o meio geológico é constituído de heterogeneidades intrínsecas e, portanto, as medidas de resistividade

neste caso representam uma média ponderada das resistividades verdadeiras, cujo produto calculado é denominado resistividade aparente (ρ_a).

Caso seja conhecida a distância entre os eletrodos, a intensidade de corrente (I) fornecida pelo circuito de corrente e a diferença de potencial (ΔV) obtida nos eletrodos de potencial, é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a) (equação 2.16).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{equação 2.16})$$

onde K é um fator que depende exclusivamente da disposição geométrica dos eletrodos, que pode ser obtido da seguinte maneira (equação 2.17)

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{equação 2.17})$$

Quanto às unidades empregadas, a resistividade aparente é medida em ohm.m, a diferença de potencial é medida em milivolts - mV, a intensidade de corrente é medida em miliampère – mA, e o coeficiente K é um valor adimensional.

O parâmetro resistividade depende da natureza e do estado físico do material analisado. A resistividade e a condutividade elétrica estão relacionadas aos mecanismos de propagação de corrente elétrica dos materiais.

A condutividade elétrica em solo ou rocha está condicionada aos processos de condutividade eletrônica ou eletrolítica. O primeiro ocorre devido à presença de minerais metálicos ou condutores. E o segundo, devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida em poros ou fissuras.

O processo de condutividade eletrolítica é predominante, pois frequentemente a água subterrânea contém íons dissolvidos, em contrapartida, é rara a presença de minerais condutores em quantidade suficiente para elevar a condutividade do meio.

2.3.1 - PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL - SEV

No âmbito dos métodos Geométricos, é denominado Sondagem Elétrica Vertical (SEV) uma série de determinações de resistividade aparente, efetuadas com o mesmo arranjo de eletrodos, separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção ou

separação crescente apenas dos eletrodos de emissão, segundo uma mesma direção (Orellana, 1972).

Os arranjos de campo mais utilizados na realização de uma SEV compreendem a disposição simétrica de quatro eletrodos em relação a um ponto central **P** (Figura 2.2). Este ensaio permite leituras pontuais de resistividade em diversas profundidades a medida em que os eletrodos são espaçados de forma crescente.

Os valores de resistividade aparente obtidos em cada SEV são plotados em um gráfico bi-logaritmico, em relação à distância $AB/2$ de cada medida, cujo resultado é a curva de resistividade aparente.

Este trabalho utiliza o arranjo Schlumberger nas leituras de resistividade aparente por meio de SEVs. Esta escolha foi baseada nas vantagens deste, em relação ao arranjo Wenner.

O arranjo Schlumberger apresenta versatilidade na execução dos trabalhos de campo, por ser necessário o deslocamento de apenas um par de eletrodos e as leituras estarem menos sujeitas a interferências indesejáveis, como potenciais produzidos por fios de alta tensão e transformadores elétricos.

A qualidade da curva de resistividade aparente obtida por meio do arranjo Schlumberger é superior a obtida pelo arranjo Wenner, devido ao fato dos eletrodos de potencial permanecerem fixos no caso do primeiro arranjo. Desta forma, os efeitos da zona superficial onde estão fixos os eletrodos permanecem o mesmo por toda a curva, até a próxima mudança de posição de M e N (Orellana, 1972).

A principal característica do arranjo Schlumberger é a curta distância dos eletrodos de potencial em relação aos eletrodos de corrente, sempre próximo da relação MN menor ou igual a $AB/5$ (Figura 2.2). Na prática, a distância MN é aumentada quando o sinal medido (ΔV) fica muito fraco, procedimento denominado de embreagem, e novamente são realizadas uma série de medidas com variação apenas dos eletrodos de corrente.

No caso do arranjo Schlumberger, o coeficiente geométrico **K** pode ser obtido de forma simplificada (equação 2.18)

$$K = \pi \left(\frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \right) \text{ (equação 2.18)}$$

enquanto que a resistividade é obtida pela aplicação da formula de resistividade aparente (equação 2.16)

2.3.2 - PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO - CE

A técnica de Caminhamento Elétrico está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade.

Dentre os diversos tipos de arranjos de campo disponíveis para a técnica do caminhamento elétrico, o presente trabalho utiliza o arranjo Dipolo-dipolo (Figura 2.3), devido a sua precisão e rapidez na aquisição de dados.

O arranjo Dipolo-dipolo é caracterizado por utilizar espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao longo da linha. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode ser variado a partir do uso simultâneo de vários dipolos MN ao longo da linha (Figura 2.3).

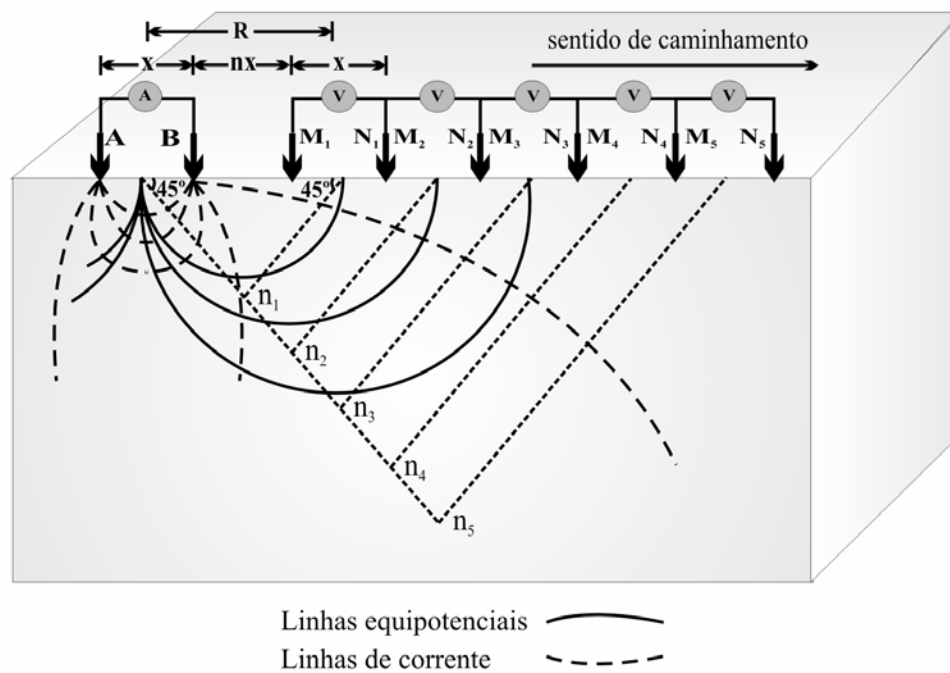


Figura 2.3 – Técnica de Caminhamento Elétrico com arranjo Dipolo-dipolo
(Modificado de Braga, 1999)

A profundidade de investigação cresce com o espaçamento entre os centros de AB e MN, que, em teoria, corresponde a $R/2$ ou ao cruzamento de duas retas com ângulo de 45° , ou seja, uma reta que parte do centro de AB e outra que parte do centro de MN (Figura 2.3). Desta maneira, a leitura de resistividade feita a partir do par de

eletrodos de potencial M_1N_1 , que correspondem à profundidade teórica n_1 e assim sucessivamente.

O fator geométrico K para o arranjo dipolo-dipolo pode ser calculado pela fórmula (equação 2.19)

$$K = 2\pi G X \quad (\text{equação 2.19})$$

sendo (equação 2.20)

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+1}} \quad (\text{equação 2.20})$$

x representa o espaçamento entre os dipolos AB e MN e n é o nível teórico de investigação correspondente.

As seções obtidas a partir deste ensaio permitem uma interpretação qualitativa das variações laterais de resistividade, que, por sua vez, podem estar relacionadas à falhas, contato entre litofácies, plumas de contaminação, entre outros.

2.4 - MÉTODO ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE

Segundo Nabighian & Macne (1991), os métodos eletromagnéticos de baixa frequência ou baixo número de induções podem ser divididos em duas classes: métodos de domínio da frequência (FEM) e métodos de domínio do tempo (TEM).

O FEM é tradicionalmente utilizado na prospecção mineral, cujo princípio consiste na passagem de corrente elétrica alternada (AC) por uma bobina que pode estar situada acima ou abaixo da superfície. Esta passagem produz um campo magnético que se propaga em subsuperfície. Quando este campo interage com corpos ou camadas condutoras, induz a geração de corrente elétrica, denominada corrente *eddy*.

As correntes *eddy* induzem a criação de um campo magnético secundário, captado por uma bobina receptora, juntamente com o campo magnético primário. Desta forma, os valores do campo magnético secundário refletem diretamente as propriedades elétricas e a geometria do corpo ou camada condutora em subsuperfície.

Contudo, este campo é apenas uma fração do campo magnético total captado pela bobina receptora e sua separação é difícil.

Esta deficiência do FEM motivou o desenvolvimento de uma técnica que permita a exclusão do campo magnético primário e a captação somente do campo magnético secundário. O resultado foi o método eletromagnético transiente (TEM).

O método TEM consiste na passagem de elevada corrente elétrica contínua (DC), em uma bobina transmissora. Esta corrente induz um campo magnético que por sua vez induz a geração de correntes *eddy*, da mesma forma como no princípio do FEM. Em um tempo $t = 0$, a corrente DC é abruptamente interrompida. Desta maneira, o campo magnético secundário gerado pelas correntes *eddy* é captado por uma bobina receptora na ausência do campo primário.

Este dispositivo permite a determinação das propriedades elétricas de corpos ou camadas condutivas de forma muito mais precisa, em comparação com os valores de campo magnético total obtido pelo método FEM.

2.4.1 - PRINCÍPIO DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE

Em todas as técnicas elétricas ou eletromagnéticas utilizadas para medidas de resistividade elétrica, este parâmetro é obtido a partir da determinação da resistência ao fluxo de corrente elétrica.

Uma importante diferença entre estas técnicas é a forma como ocorre a propagação do fluxo de corrente. O método eletromagnético transiente (TEM) envolve uma bobina transmissora pela qual circula uma corrente periódica que induz um campo magnético, o qual induz uma voltagem periódica e que, por sua vez, produz um campo magnético secundário, captado por uma bobina receptora (Figura 2.4).

O transmissor é configurado sob a forma de um quadrado, com uma bobina receptora que pode ser fixada dentro ou fora dos limites do transmissor. As dimensões do transmissor variam conforme a necessidade de exploração em maiores profundidades, ou seja, quanto maior suas dimensões, maiores serão as profundidades de investigação.

Segundo a equação de Maxwell, a passagem corrente elétrica por meio de um condutor, neste caso representado pela bobina transmissora, resulta na geração de um campo magnético (equação 2.21):

$$\oint \mathbf{B} \, d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 \mathbf{i} \quad (\text{equação 2.21})$$

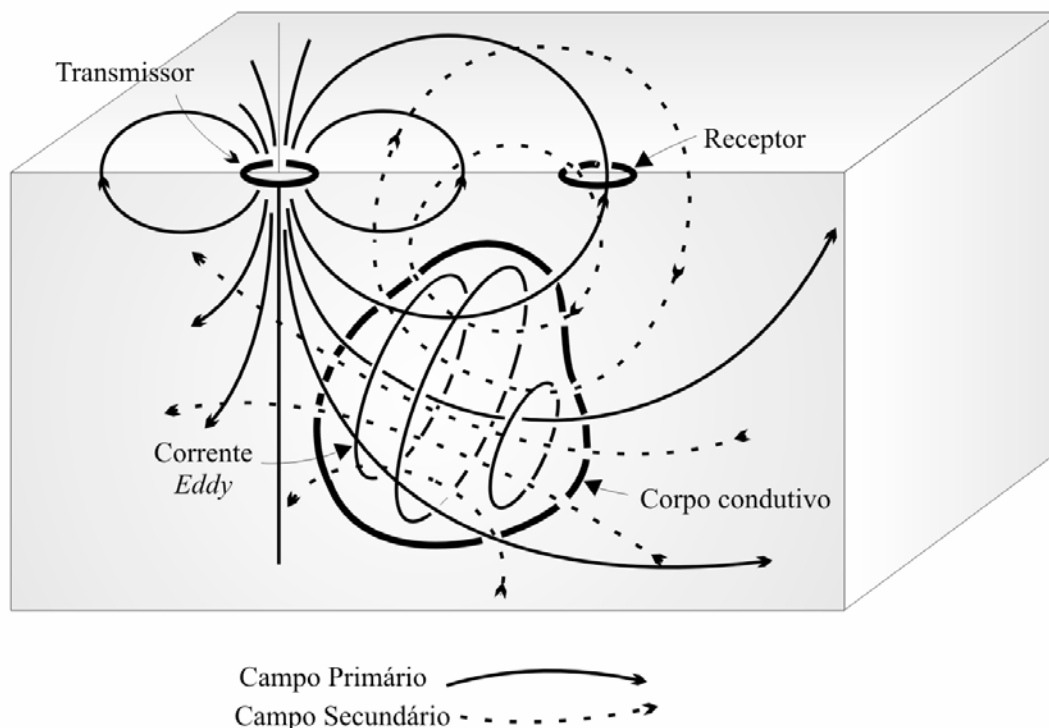


Figura 2.4 – Esquema de propagação dos campos magnéticos (Sheriff, 1989)

Esta equação descreve a produção de campo magnético (\mathbf{B}) em um condutor (\mathbf{l}) como produto da densidade de campo elétrico ($d\Phi_E$) num dado tempo (\mathbf{t}) somado ao fluxo de corrente elétrica contínua (\mathbf{i}), a partir da integral curvelínea (em circuito fechado). Esta equação é importante para entendimento do fenômeno Eletromagnético Transiente, pois descreve a geração de campo magnético a partir de um campo elétrico variável em função do tempo (Figura 2.5A), e resulta de extensão da Lei de Ampère atribuída a James Clerk Maxwell (Resnick et al., 2003).

Este produto é denominado campo magnético primário, e quando gerado na superfície de um terreno, se propaga pelas camadas em subsuperfície.

Contudo, a lei de Faraday descreve a geração de um campo elétrico a partir de um campo magnético variável (equação 2.22):

$$\oint \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{equação 2.22})$$

onde \mathbf{E} é o campo elétrico, \mathbf{l} um condutor, $d\Phi_B$ a densidade de campo magnético e \mathbf{t} é o tempo.

Um detalhe presente nesta lei representa um fenômeno extremamente importante no princípio de método eletromagnético transiente. O sinal negativo no segundo membro da equação descreve que a densidade de campo magnético em função do tempo é inversamente proporcional ao fluxo de corrente, ou seja, sob presença um campo elétrico máximo, o campo magnético será igual a zero (Resnick et al., 2003).

Desta forma, o corte da corrente elétrica no transmissor gera um campo magnético máximo – campo primário, que se propaga pelo meio. A interação deste campo magnético com um condutor em subsuperfície também pode ser descrita pela equação de Maxwell, ou seja, ocorre a geração de um campo elétrico por indução (Figura 2.5B).

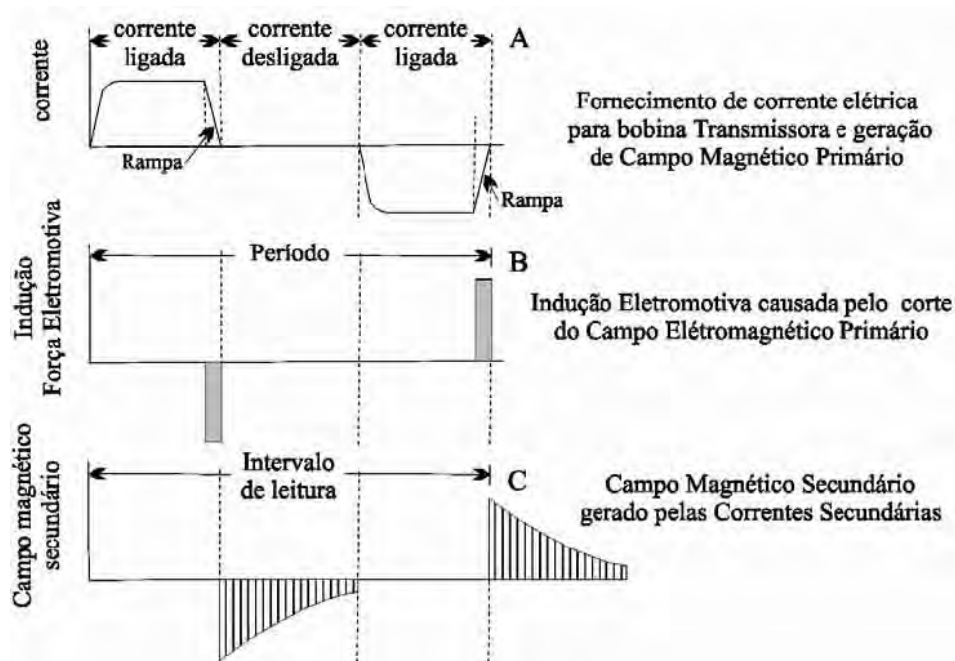


Figura 2.5 - Princípio físico do método eletromagnético transiente: Campo primário (A). Indução eletromotiva (B). Campo secundário (C). (modificado de McNeill, 1980)

Esta corrente de indução, denominada força eletromotiva (emf), dura um espaço de tempo muito curto, sua extinção gera de forma imediata um campo magnético, a partir do princípio estabelecido pela lei de Faraday.

A propagação desta corrente sob a forma de turbilhão recebe o nome de corrente eddy (Figura 2.4), ou sob a forma de anéis concêntricos ao redor do transmissor, em camadas horizontais (Figura 2.6). Imediatamente após o corte de corrente no transmissor, as correntes *eddy* se concentram próximo à superfície (Figura 2.6A). Com

o passar do tempo, os anéis de corrente se propagam em profundidades cada vez maiores, que tendem a se dissipar (Figura 2.6B).

O fluxo e a intensidade das correntes *eddy* estão condicionados à resistividade, comprimento e largura do corpo condutor induzido. A existência desta corrente gera um campo magnético secundário proporcional.

Uma outra forma de apresentação para entendimento do comportamento das correntes *eddy* em função do tempo são os anéis de densidade de corrente (Nabighian, 1979). Os anéis são contornos de densidade de corrente, gerados após o corte de corrente primária, que variam no espaço e no tempo (Figura 2.7). As porções de elevada densidade de corrente podem migrar para grandes profundidades com o passar do tempo, chegando a grandes distâncias do transmissor (Figura 2.7).

Desta forma, as medidas iniciais refletem a resistividade elétrica das camadas situadas próximas a superfície. Com o passar do tempo e propagação das correntes, a grandes profundidades, as medidas são cada vez mais influenciadas pelas propriedades das camadas mais profundas. Outro fator que limita a profundidade de exploração pelo método eletromagnético transiente é o tempo de medida após o corte de corrente do transmissor (McNeill, 1980).

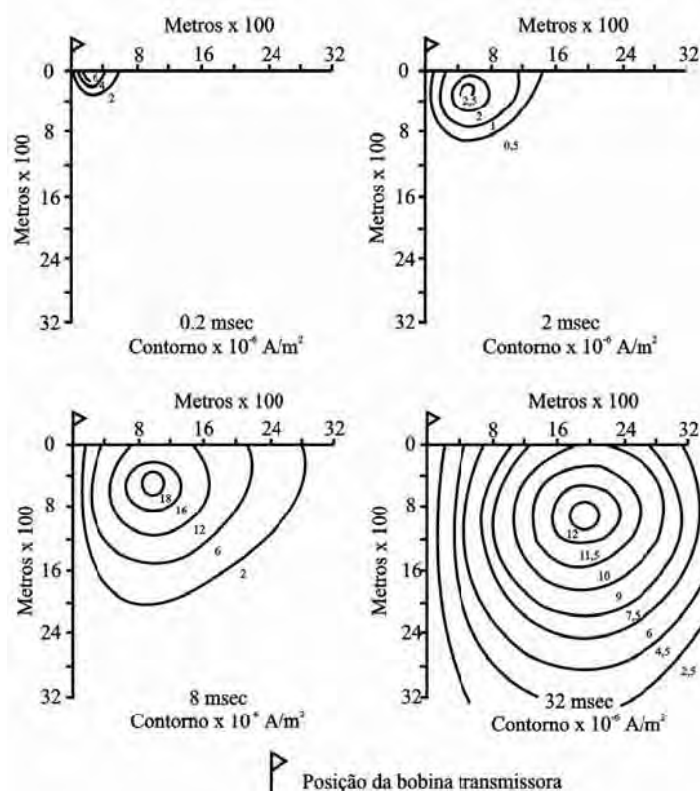


Figura 2.6 – Densidade de correntes *eddy* em diferentes períodos (McNeill, 1980)

A corrente *eddy* é obtida a partir da intensidade do campo magnético secundário (H_s) medida pela bobina receptora. Na prática, são comparados os valores de H_s com a intensidade do campo magnético primário (H_p). Devido à posição da bobina transmissora e o valor de corrente transmitido serem conhecidos, o valor de H_p pode ser calculado.

A profundidade máxima de exploração é função das dimensões do transmissor, da seção geométrica e da razão sinal/ruído recuperada das camadas mais profundas pelo receptor. Para um determinado tamanho de transmissor, o tempo de medida e a resistividade elétrica das camadas em profundidade são fatores determinantes na profundidade de aquisição (Figura 2.8).

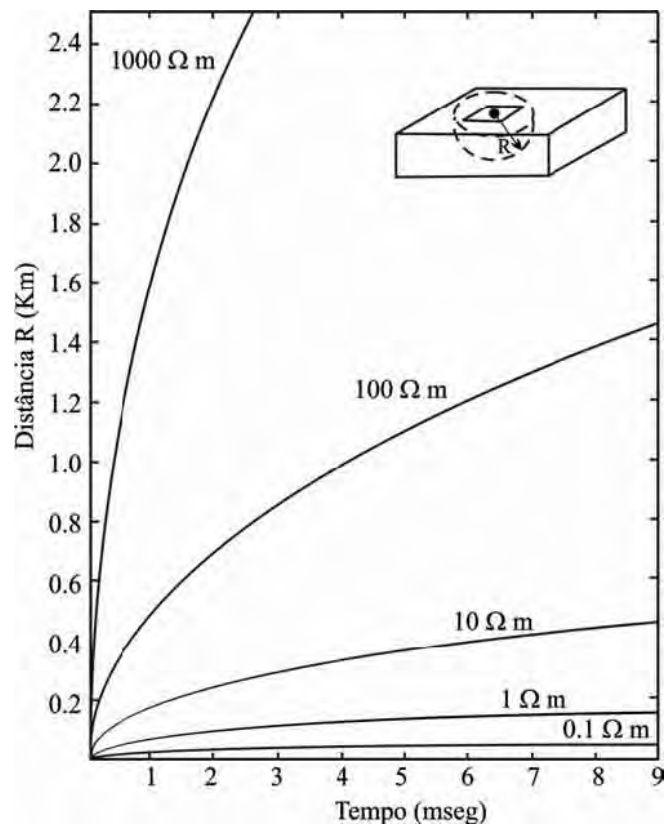


Figura 2.7 – Razão de difusão máxima de intensidade de corrente *eddy* para diferentes níveis uniformes de resistividade (modificado de McNeill (1980) e Mills (1988))

A partir de um mesmo período de tempo, a propagação das correntes induzidas varia com a resistividade do meio. Desta forma, camadas com resistividade elevada permitem uma maior penetração de correntes e em contrapartida, quanto menor a resistividade aparente, menor será a profundidade de leitura e aquisição de dados.

O resultado da sondagem TEM é uma seção geoeétrica, obtida pela medida do campo magnético em função do tempo (Figura 2.9). A emf decai rapidamente após um período inicial, denominado estágio inicial. O decaimento transiente ocorre em poucas dezenas de milissegundos e apresenta informações sobre a resistividade de camadas situadas a significativas profundidades.

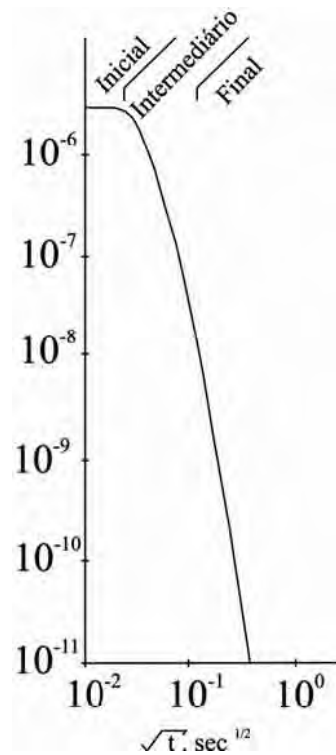


Figura 2.8 – Exemplo de curva de decaimento transiente (Mills et al, 1988)

Este curto intervalo de tempo para aquisição possibilita medidas em ambientes com ruídos naturais ou artificiais, como tempestades geomagnéticas, linhas de transmissão de energia, entre outros. A calibração do equipamento realiza centenas de decaimentos transientes, para determinação da razão sinal/ruído adequado, utilizando apenas poucos segundos para aquisição.

2.4.2 - PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE SONDADEM ELETROMAGNÉTICA

A aquisição dos dados com o equipamento TEM foi realizada por meio da técnica de sondagem eletromagnética, que consiste da disposição de uma bobina transmissora para geração de ondas eletromagnéticas, em conjunto com uma bobina receptora, para leituras do campo secundário gerado no meio estudado.

Foi utilizado o arranjo de *loop* central para aquisição de dados em campo (Figura 2.10), o qual consiste na disposição da bobina transmissora sob a forma de um quadrado, em cuja porção central é colocada a bobina receptora.

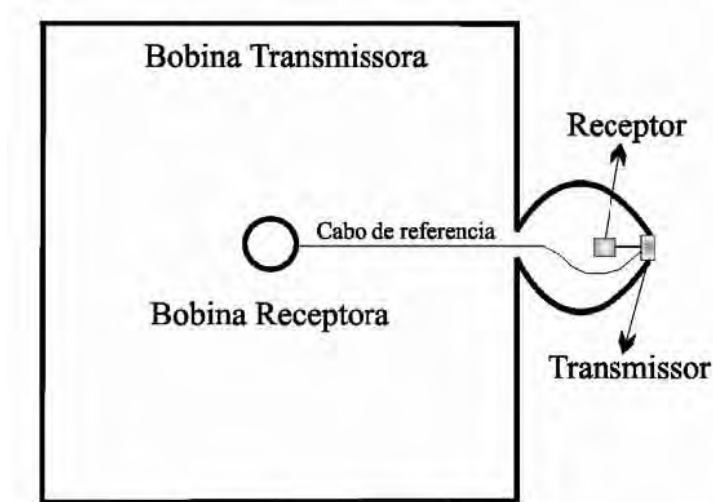


Figura 2.9 – Arranjo de *loop* central

A vantagem deste em relação a outros arranjos está no fato da bobina receptora estar disposta dentro da área da bobina transmissora, o que reduz sua interação de campos eletromagnéticos naturais ou artificiais .

2.5 – APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS EM ESTUDOS AMBIENTAIS

Os métodos elétricos e eletromagnéticos são utilizados com sucesso na resolução de diversos problemas ambientais, por meio do mapeamento lateral e vertical do meio contaminado (Vogelsang, 1995).

A grande aplicabilidade dos métodos elétricos e eletromagnéticos está baseada no elevado contraste de condutividade elétrica entre o ambiente e o alvo contaminado (Swift, 1987). Contudo, este contraste depende do tipo de contaminante presente, tempo de residência no ambiente, teor de umidade em subsuperfície, entre outros aspectos, pois em diversos casos, este contraste não ocorre e uma área contaminada pode não ser detectada a partir destes métodos.

ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE (TEM)

A aplicação dos métodos Eletromagnético Transiente e Radiomagnetotelúrico de forma combinada na caracterização de um depósito de materiais de demolição, por Tezkan et al (1996), permitiu a delimitação vertical e lateral da área com rejeitos, a partir de dados de condutividade elétrica que alcançaram 100 metros de profundidade.

Testes de aplicação do TEM demonstraram sua aplicabilidade em aquíferos contaminados por compostos inorgânicos. Buselli et al. (1990) obtiveram sucesso no mapeamento da extensão lateral e a profundidade de uma pluma de contaminação com o método TEM, com o objetivo de complementar dados de análises químicas de água subterrânea que acusaram a contaminação no local.

O TEM apresenta grande potencial de aplicação no mapeamento e caracterização de sistemas aquíferos rasos.

Sondagens TEM foram utilizadas por Mill et al. (1988) na caracterização estratigráfica de níveis aquíferos e aquíferos na costa oeste dos Estados Unidos, ameaçados por incursões de água do mar. Os resultados permitiram o estabelecimento de dois níveis de aquíferos, que separam três intervalos de aquíferos, determinar e as concentrações relativas de cloreto a partir da resistividade aparente e dados químicos.

Em conjunto com descrições de furos de sondagens, Meju et al. (2000) aplicaram o TEM no mapeamento do topo do arenito Sherwood, um importante aquífero situado no Vale de York – Inglaterra, para subsidiar estudos de planejamento ambiental e uso racional da água subterrânea.

A aplicação do TEM combinado a linhas sísmicas, por Shtivelman & Goldman (2000), permitiu a caracterização estrutural e delimitação de cunhas salinas em processo de avanço no aquífero da costa de Israel. Os dados geofísicos permitiram o detalhamento do reservatório e sua divisão em subaquíferos separados por unidades impermeabilizantes, que revelou também, o avançado processo de salinização deste sistema aquífero frente ao progressivo aumento no número de poços de captação.

Em conjunto com levantamentos sísmicos, Sandersen & Jorgensen (2003) utilizaram o método de TEM no mapeamento e caracterização de depósitos quaternários em vales escavados, devido a íntima relação deste vales com o padrão de fluxo da água subterrânea na costa oeste da Dinamarca. A campanha geofísica em conjunto com dados de furos de sondagem revelou a complexidade deste sistema aquífero e sua baixa

vulnerabilidade devido à detecção de extensas camadas de argila sobre os níveis de maior porosidade.

ELETRORRESISTIVIDADE (SEV E CE)

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE) foram aplicadas por Lima et al. (1995) na detecção de plumas de contaminação provenientes de um aterro de resíduos líquidos derivados de petróleo, no pólo petroquímico de Camaçari – Brasil. Os mapas e pseudo-seções de resistividade aparente em conjunto com um número muito reduzido de poços de monitoramento, permitiram a identificação de intervalos com baixa resistividade, associados a concentrações de contaminantes.

Por meio da instalação de uma rede interligada de eletrodos sob mantas de impermeabilização em uma área de estudos em Budmerice - Eslováquia, Frangos (1997) obteve sucesso na identificação de pequenas fissuras na impermeabilização do aterro, associadas à redução na resistividade aparente destes pontos, resultante do vazamento de líquidos enriquecidos em íons.

A técnica de SEV, em conjunto com os métodos de Polarização Induzida (IP), Potencial Espontâneo (SP) e TEM, utilizadas de forma combinada por Buselli & Lu (2001), permitiram o monitoramento de contaminantes inorgânicos presentes na água subterrânea de uma mina de urânio no norte da Austrália, com o dimensionamento da pluma de contaminação, caracterização do meio geológico e determinação dos fatores que controlam o fluxo d'água subterrânea.

O uso combinado das técnicas de SEV e caminhamento elétrico (CE), em conjunto com o método de IP, por Aristodemou & Thomas-Betts (2000), na identificação de plumas de contaminação nas imediações de um aterro sanitário em East Anglia – Reino Unido, permitiu a identificação de anomalias em termos de resistividade e cargabilidade, associadas a acumulações de líquidos contaminantes provenientes do aterro sanitário.

Adepelumi et al. (2001) aplicaram a técnica de SEV na detecção de contaminações por metais pesados em aquífero fraturado, provenientes de aterros sanitários em Ile-Ife – Nigéria. O uso conjunto de análises químicas e resistividade aparente permitiu a análise estratigráfica do meio geológico, definição dos caminhos

preferenciais de percolação dos líquidos contaminantes e a definição da superfície potenciométrica local.

O uso da técnica de SEV no estudo do aquífero raso na costa de Rhode Island (EUA), por Frohlich & Urish (2002), na determinação de intervalos contaminados por compostos orgânicos e inorgânicos, permitiu a delimitação de um intervalo de baixa resistividade, que pode estar associado a incursões salinas ou a elevadas concentrações de íons metálicos, ambos detectados em análises químicas.

A aplicação das técnicas de CE, SEV e indução eletromagnética de frequência muito baixa (VLF) de forma combinada, por Benson et al. (1997), no mapeamento de uma pluma de contaminação de benzeno, tolueno, xileno e etil-benzeno (BTEX) e com elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos (TDS), em Utah – Estados Unidos, resultou na detecção de uma anomalia de alta resistividade, associada a elevadas concentrações de hidrocarbonetos sob a forma de fase livre e predomínio em relação à quantidade de TDS.

A combinação das técnicas de SEV e sísmica de refração rasa por Choudhury et al. (2001) no estudo de contaminação por incursões salinas em aquífero costeiro e seleção de áreas apropriadas para exploração deste aquífero, em Bengal Oeste – Índia, permitiu delinear diversas formações geológicas em subsuperfície e estabelecer áreas sob influência de cunhas salinas e áreas adequadas para instalação de poços de bombeamento.

A extração excessiva e descontrolada em aquíferos costeiros pode causar intrusão de cunhas salinas nos aquíferos de água doce. Nowroozi et al. (1999) utilizaram a técnica de SEV na delimitação de intrusões salinas e análise estratigráfica do sistema aquífero na costa leste da Virgínia – Estados Unidos. Os mapas de resistividade aparente para vários níveis de profundidade indicam a presença de zonas com elevado conteúdo em sais tanto próximo a superfície – associado a planícies de maré, quanto em profundidade – associado a cunhas salinas.

3 - ATENUAÇÃO NATURAL

3.1 - DEFINIÇÃO

O processo de atenuação natural compreende uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no meio ambiente, que dentro de condições favoráveis permitem a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações de contaminantes no solo ou água subterrânea sem intervenção humana (EPA, 1999a).

Os processos de degradação “*in-situ*” incluem: dispersão, diluição, sorção, volatilização, decaimento radioativo, estabilização biológica e química, transformação ou destruição de contaminantes.

O processo de atenuação natural ocorre naturalmente em qualquer área contaminada, com variável grau de eficiência, dependendo dos tipos e concentrações de contaminantes presentes e dos processos físicos, químicos e biológicos característicos do solo e da água subterrânea. Segundo EPA (1999a), o processo atenuação natural pode reduzir o risco em potencial de áreas contaminadas de três maneiras:

- Transformação dos contaminantes em formas menos tóxicas a partir de processos como a biodegradação ou transformações abióticas.
- Redução das concentrações de contaminantes e
- Redução na mobilidade dos contaminantes por sorção no solo ou matriz rochosa

3.2 - EFICIÊNCIA DO PROCESSO

Em muitos casos de contaminação, áreas são afetadas por misturas de contaminantes, dentre os quais estão compostos passíveis de remediação por atenuação natural, e outros que não possibilitam remedição somente por meio da atenuação natural.

Áreas contaminadas por compostos como Benzeno, Tolueno, Xileno e Etilbenzeno (BTEX), caracterizados por serem compostos de fase líquida leve não aquosa – LNAPL (Newell et al, 1995), apresentam efetiva remediação sob processo de atenuação natural. Entretanto, aditivos presentes na gasolina como o metil terci-butil

éter (MTBE) e o 1,4 dioxano, não são degradados com rapidez em subsuperfície, sob condições naturais.

Processos geoquímicos específicos de algumas áreas permitem que a biodegradação de solventes clorados e hidrocarbonetos resulte em minerais de ocorrência na natureza, como minerais de arsênio e manganês, que uma vez incorporados a matriz do aquífero, podem se tornar mais tóxicos e com maior mobilidade que os compostos originais (EPA, 1998).

Compostos derivados de petróleo como BTEX, sob condições apropriadas, são naturalmente degradados por ação de microorganismos, cujo resultado são produtos não tóxicos como dióxido de carbono e água. Situações nas quais a atividade microbiológica é suficientemente rápida, a mobilidade da pluma de contaminação pode cessar, com posterior redução nos níveis de contaminação.

Solventes clorados, como o 1,2 dicloroetano, caracterizados por serem mais densos que a água, são classificados como compostos de fase líquida densa não-aquosa (DNAPL) (Huling & Weaver, 1991). Estes compostos tendem a uma acentuada migração vertical através do aquífero, que podem eventualmente carrear compostos de menor densidade. Devido à distribuição variável em subsuperfície, os solventes clorados são freqüentemente muito difíceis de serem localizados e delimitados, constituindo uma fonte contínua de contaminação por vários anos. A remediação de solventes clorados é ainda mais complicada pelo fato de freqüentemente estarem presentes outros tipos de contaminantes (EPA, 1995).

Compostos inorgânicos presentes no solo ou água subterrânea podem ter suas concentrações e toxicidade efetivamente reduzida por ação da atenuação natural. Elementos do grupo dos metais ou não-metais, inclusive radionuclídeos, podem ser atenuados por reação de sorção, precipitação, adsorção por minerais presentes no solo, adsorção pela matriz do solo ou matéria orgânica. Reações de oxidação/redução também podem reduzir a mobilidade e toxicidade de compostos inorgânicos, a partir da alteração nos estados de valência para estados menos solúveis, menos móveis ou menos tóxicos, como urânio hexavalente para urânio tetravalente ou cromo hexavalente para cromo trivalente (EPA, 2004).

3.3 - VANTAGENS E DESVANTAGENS

As principais vantagens na aplicação do processo de Atenuação Natural, segundo EPA (2004), são:

- Produção de menor quantidade de resíduos dentre as formas de remediação “*in-situ*”, com potencial redução da taxa de permeabilidade dos contaminantes e conseqüente diminuição dos riscos de contaminação de seres vivos.
- Alguns processos de atenuação natural podem resultar na destruição “*in-situ*” de contaminantes.
- Potencial de aplicação em parte ou em toda área contaminada, a depender das condições da área e dos objetivos de remediação.
- Processo com menor custo em relação aos demais disponíveis para remediação de áreas contaminadas.

As principais desvantagens na aplicação do processo de Atenuação Natural, segundo EPA (2004), são:

- A requisição de longos períodos de aplicação para atingir os objetivos de remediação.
- A caracterização da área exige mais recursos devido a sua maior complexidade.
- O grau de toxicidade e a mobilidade dos produtos de transformação podem exceder aos dos compostos iniciais.
- Potencial risco de contínua migração da contaminação.
- Monitoramento contínuo e eventualmente por muitos anos.
- Requer um programa de conscientização da população acerca de processo.

3.4 - MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA ATENUAÇÃO NATURAL

A compreensão do processo de atenuação natural para recuperação de áreas contaminadas passa pelo entendimento dos mecanismos responsáveis pela degradação dos derivados de petróleo no solo e na água subterrânea.

Estes mecanismos podem ser classificados em destrutivos e não destrutivos. Os mecanismos destrutivos resultam no decréscimo na massa contaminante, enquanto que os mecanismos não destrutivos resultam no decréscimo nas concentrações e não no decréscimo da massa (EPA, 2004).

Os mecanismos não destrutivos são essencialmente processos que envolvem processos físicos, que em alguns casos podem ser destrutivos. Por sua vez, os processos biológicos resultam na destruição de hidrocarbonetos.

Os principais processos físicos são a volatilização, dispersão e sorção, enquanto que os processos biológicos envolvem a degradação aeróbica e anaeróbica (Tabela 3.1).

Quadro 3.1 – Mecanismos responsáveis pela Atenuação Natural (EPA, 2004)

Mecanismo	Descrição
<u>Físico</u>	
Volatilização	Transferência para fase gasosa
Dispersão	Processos de mistura e difusão molecular
Sorção	Partição do contaminante em fase gasosa e a matriz do aquífero
<u>Biológico</u>	
Degradação Aeróbica	Uso de O ₂ como receptor de elétrons
Degradação Anaeróbica	
- Metanogênese	Utiliza receptores de elétrons alternativos
- Redução de Sulfato	como NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe ₃ ⁺ , Mn ₄ ⁺
- Redução de Ferro (III)	
- Redução de Manganês (IV)	
- Redução de Nitrato	

3.4.1 - PROCESSOS FÍSICOS

O processo de volatilização remove contaminantes presentes na água subterrânea e no solo por transferência para fase gasosa (Figura 3.1). Entre 5 e 10% da massa total de benzeno presente em uma área contaminada é removida por volatilização (McAllister, 1994).

A tendência de escape das moléculas de soluto – contaminante, é proporcional à concentração em água. Outro fator que controla a volatilização é a constante de Henry's Law, que descreve o fracionamento de compostos orgânicos entre fase aquosa e fase gasosa (Figura 3.1).

A dissolução ou solubilização de compostos orgânicos ocorre quando há o contato físico com a água. A solubilidade representa a máxima concentração de um

determinado composto em água, para uma pressão e temperatura específica (Tabela 3.2).

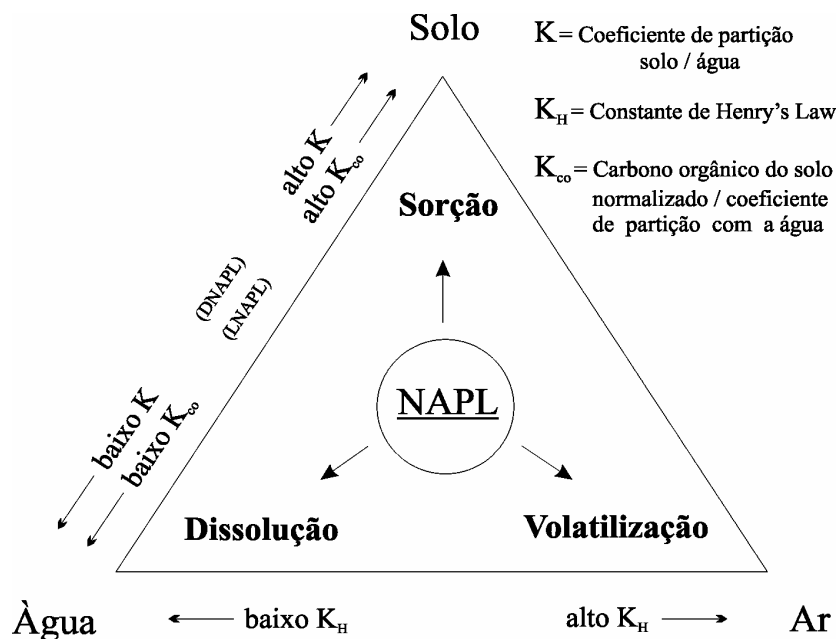


Figura 3.1 – Partição de compostos de Fase Líquida Não Aquosa (NAPL) no solo, água e ar (Huling & Weaver, 1991; Newell et al, 1995; EPA, 2004)

Quadro 3.2 – Propriedades dos compostos que constituem a pluma contaminante na área da antiga industria Sulfabrás (valores obtidos a 20°C) (extraído de Newell et al, 1995)

Composto	Densidade (g/cm ³)	Solubilidade (mg/L)	Constante de Henry's Law (atm·m ³ /mol)	Viscosidade Dinâmica (centipoise*)
Benzeno	0,8765	1.78x10 ³	5.43x10 ⁻³ ⁽¹⁾	0.6468
Etilbenzeno	0.867	1.52x10 ²	7.9x10 ⁻³ ⁽¹⁾	0.8670
Tolueno	0.8669	5.15x10 ²	6.61x10 ³ ⁽¹⁾	0.8669
m-xileno	0.8642 ⁽¹⁾	2.00x10 ²	6,91x10 ³ ⁽¹⁾	0.8642
o-xileno	0880 ⁽¹⁾	1.70x10 ²	4.94x10 ³ ⁽¹⁾	0.8800
p-xileno	0.8610 ⁽¹⁾	1,98x10 ²	7.01x10 ³ ⁽¹⁾	0.8610
1,2 dicloroetano	1.2530	8,69x10 ³	6.37x10 ¹	0.8400
Clorofórmio	1.4850	8.22x10 ³	1.60x10 ²	0.5630
Tricloroetileno	1.4620	1,00x10 ³	5.87x10 ¹	0.5700
Tetracloroetileno	1.6250	1,50x10 ²	1.40x10 ¹	0.8900

1 centipoise (cp) equivale a viscosidade dinâmica da água a 20°C

⁽¹⁾ Valores a 25°C

3.4.2 - PROCESSOS BIOLÓGICOS

Os microorganismos que vivem naturalmente em subsuperfície, sob condições ideais de pH, temperatura, disponibilidade de nutrientes, entre outros, podem degradar e reduzir a toxicidade de eventuais contaminações, num processo chamado de bioremediação “*in situ*” (EPA, 1999b)

A habilidade de degradação de hidrocarbonetos por parte de microorganismos é conhecida há muito tempo. Zobel (1946) in Borden et al. (1995) identificou mais de 100 espécies de micróbios em 30 gêneros capazes de degradarem algum tipo de hidrocarboneto. Estes organismos estão disseminados em rios, lagos, mares, água subterrânea e solo.

A capacidade de degradação por microorganismos dependerá do tipo de hidrocarboneto presente no meio. Cadeias de hidrocarboneto de baixo a moderado peso, ou seja, alcanos aromáticos de cadeia simples (C_{10} a C_{24}), podem ser facilmente degradados (Azadpour-Keeley et al., 1999)

A biodegradação de hidrocarbonetos é essencialmente uma reação de oxidação-redução em que o hidrocarboneto é oxidado – doa elétrons – e um receptor elétrico (O_2) é reduzido – recebe elétrons. Diferentes compostos que podem funcionar como receptores elétricos, como oxigênio (O_2), nitrato (NO_3^{-1}), óxidos de ferro (Fe_2O_3), sulfato (SO_4^{-2}), água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2).

Bactérias aeróbicas utilizam oxigênio molecular como receptor de elétrons. Este elemento químico é o receptor elétrico preferido pelos microorganismos devido ao ganho maior de energia em reações aeróbicas. Por outro lado, água e dióxido de carbono são os receptores elétricos menos utilizados por proporcionarem um baixo ganho energético em suas reações.

Entretanto, a quantidade de oxigênio dissolvido na água subterrânea é baixa e a taxa de oxigenação a partir da zona não saturada por processo de difusão também é baixa. Processos que utilizam a adição de oxigênio na zona saturada são muito comprometidas, pois este elemento apresenta baixa solubilidade em água.

Em geral, as porções mais contaminadas de um aquífero apresentam uma queda acentuada no teor de oxigênio em um curto espaço de tempo. Os níveis de oxigênio se mantêm constantes apenas nas zonas de franja da contaminação (Figura 3.2).

A atividade enzimática a partir do oxigênio, reconhecido como um forte oxidante, tem sido utilizada por várias décadas no processo de degradação de

hidrocarbonetos. Processos como este favoreceram a idéia de que hidrocarbonetos não poderiam ser biodegradados sob condições anóxicas.

A partir dos anos 80, entretanto, aumentou a descoberta de microorganismos capazes de degradarem hidrocarbonetos aromáticos e saturados, sob condições estritamente anaeróbicas (Widdel & Rabus, 2001). Estes microorganismos utilizam compostos como NO_3^{-1} , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e SO_4^{-2} como receptores elétricos.

Desta forma, degradação de hidrocarbonetos sob condições anaeróbicas e provou ser um processo bastante eficaz, ao menos em escala laboratorial. Estudos recentes, como os trabalhos de Beller et al. (1992), Lovley et al. (1995), Weiner & Lovley (1998), Burland & Edwards (1999), apresentam elevadas taxas de degradação de hidrocarbonetos sob ausência de O_2 .

Contudo, este processo natural pode ser limitado pela falta de nutrientes, receptores de elétrons ou ausência de ambos (Thomas & Ward, 1989). Em muitos locais, o processo de bioremediação fica limitado as zonas periféricas da pluma contaminante, pois a presença de contaminante em elevadas concentrações torna o ambiente extremamente hostil a proliferação de microorganismos (Wilson & Bower, 1997).

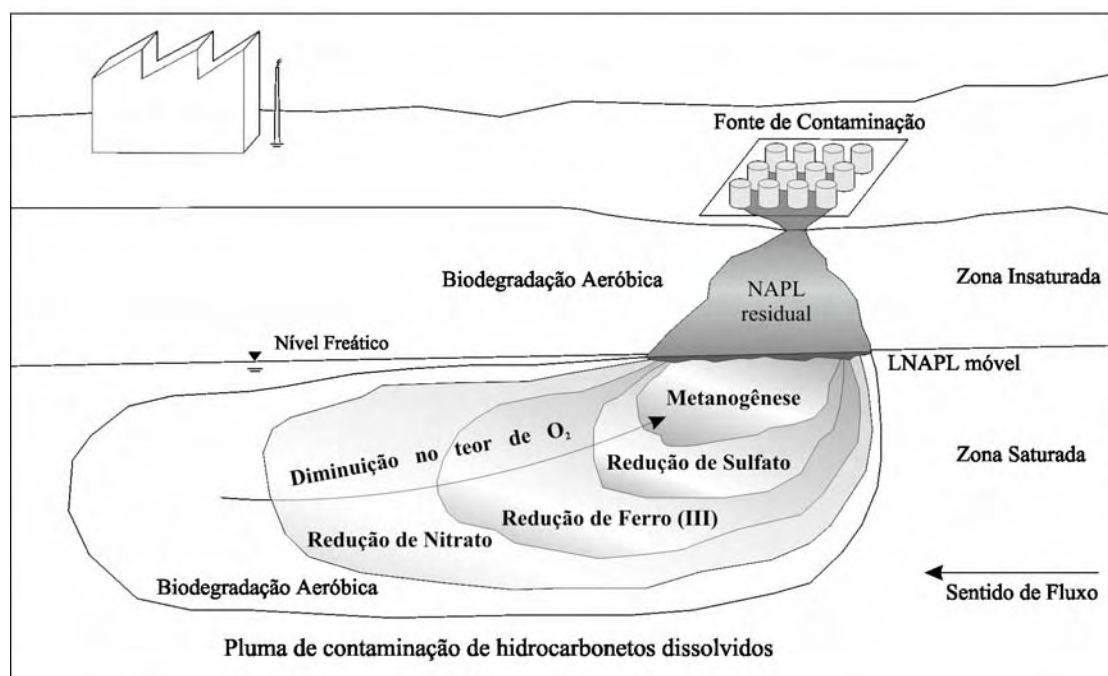


Figura 3.2 – Zonas de degradação de hidrocarbonetos (Adap. de Rabus e Heider, 1998)

3.4.2.1 - BIODEGRADAÇÃO AERÓBICA

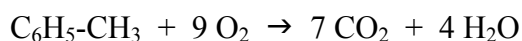
Quase todos os tipos de hidrocarbonetos podem ser degradados sob condições aeróbicas. O oxigênio é utilizado na fase inicial de metabolismo de hidrocarbonetos e posteriormente como receptor elétrico para a geração de energia (Borden et al., 1995).

As taxas de biodegradação de compostos alifáticos, alicíclicos e aromáticos de baixo a moderado peso molecular pode ser elevada, sob condições ideais de pH, Eh, temperatura, entre outros fatores (Sovik et al., 2002)

Dentre as limitações da biodegradação aeróbica estão a baixa solubilidade do oxigênio em água - em torno de 10 mg/L⁻¹ a 15°C - frente ao rápido consumo por processos bióticos e abióticos na zona saturada e a tendência de precipitar óxidos pode resultar na diminuição da permeabilidade do aquífero (Wilson & Bouwer, 1997).

A extensão da biodegradação aeróbica pode ser controlada por fatores como a quantidade de contaminação liberada, taxa de transferência de oxigênio para o meio contaminado e o teor de oxigênio natural presente no aquífero (Borden, 1995)

Segundo Borden et al. (1995) a mineralização aeróbica do tolueno (C₆H₅-CH₃) pode ser representada pela seguinte reação:



Segundo Cerniglia (1984) e Juhasz & Naidu (2000), as bactérias inicialmente oxidam os hidrocarbonetos aromáticos, cujo produto são *cis-dihidrodiols*. Este processo envolve a incorporação enzimática de oxigênio atmosférico. A oxidação de *cis-dihidrodiols* resulta na formação de *catechols*, que, por sua vez, podem ser oxidados segundo o padrão *orto* ou *meta*.

O padrão *orto* envolve a clivagem da camada entre os átomos de carbono e os dois grupos de hidroxilas, com a produção de *cis, cis*-ácido mucônico. Por outro lado, o padrão *meta* envolve a clivagem da camada entre os átomos de carbono com os grupos de hidroxilas e os átomos de carbono adjacentes com seu respectivo grupo de hidroxila.

A quebra das cadeias resulta na produção de ácido pirúvico, ácido succínico, ácido fumárico, ácido acético e aldeídos, todos utilizados por microorganismos na síntese de constituintes celulares e produção de energia (Wilson & Jones, 1993). Em conjunto, estas reações produzem dióxido de carbono e água (Figura 3.3).

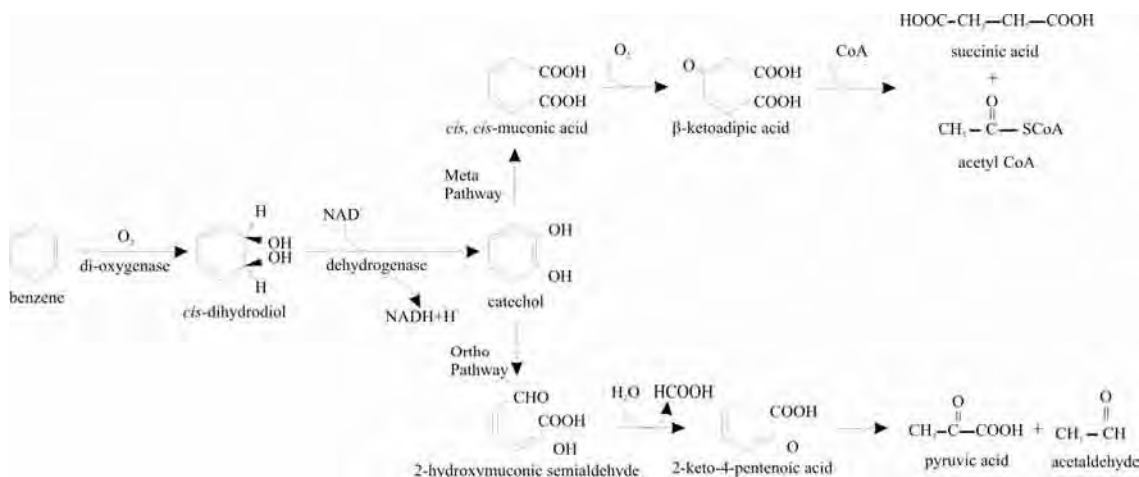


Figura 3.3 - Metabolismo de microorganismos em cadeias aromáticas segundo o padrão de clivagem *orto* ou *meta* (adaptado de Juhasz & Naidu, 2000)

3.4.2.2 - BIODEGRADAÇÃO ANAERÓBICA

METANOGENÉSE

A transformação anaeróbica de tolueno e benzeno por metanogênese pode ser caracterizada por uma fermentação em meio parcialmente oxidante e parcialmente redutor.

A oxidação pode ser feita a partir da oxidação de grupos metil ou oxidação de anéis benzênicos, com a produção inicial de benzilalcool e geração final de ácidos alifáticos, possivelmente gerados pela degradação do ácido benzóico (Figura 3.4).

A degradação parcial dos ácidos alifáticos por ação de bactérias acetogênicas resulta na produção de metano e dióxido de carbono (Figura 3.4).

O creosol é provavelmente resultante da oxidação de anéis benzênicos, enquanto que a formação de *p*-creosol ou *o*-creosol está condicionada aos tipos de bactérias metanogênicas, inclusive microorganismos facultativos anaeróbicos (Figura 3.4).

As bactérias metanogênicas são as únicas conhecidas capazes de produzir metano. Estes microorganismos podem metabolizar exclusivamente compostos simples de um ou dois carbonos e hidrogênio.

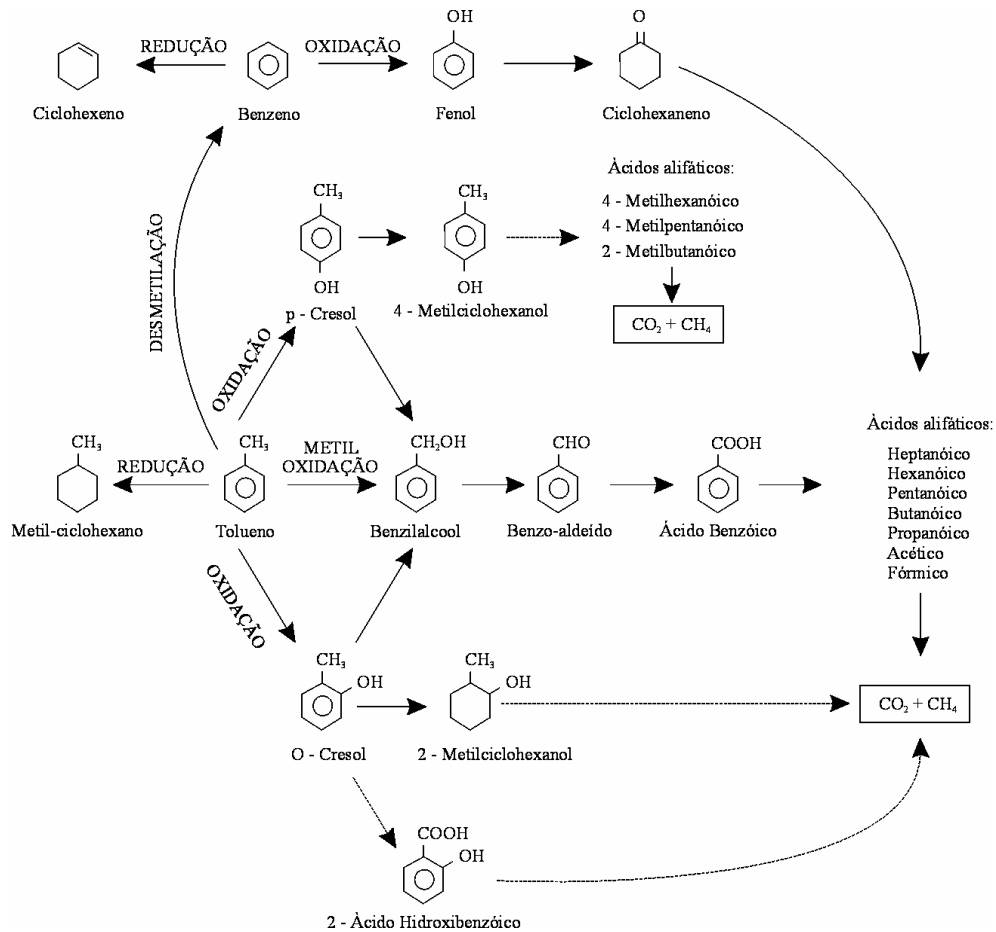
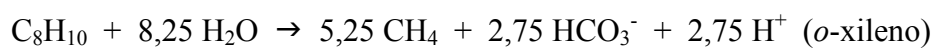
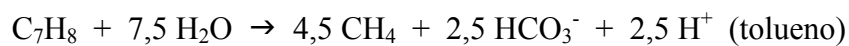


Figura 3.4 – Tentativa de sequenciação da degradação de tolueno por culturas metanogênicas (adaptado de Grbic-Galic & Vogel, 1986)

Diversos compostos aromáticos podem ser parcialmente metabolizados em ambientes metanogênicos, com o auxílio de intermediários extracelulares como fenol, propianato e acetato, cujos produtos são metano e ácidos orgânicos.

O benzeno, tolueno e o xileno podem ser convertidos em dióxido de carbono e metano por ação de microorganismos fermentativos (Weiner & Lovley, 1998; Edwards & Grbic-Galic, 1994), a partir dos seguintes processos:



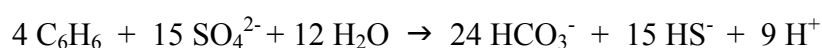
Embora tais compostos sejam estruturalmente semelhantes, o tolueno e o *o*-xileno são os primeiros a sofrerem fermentação, enquanto que o benzeno requer períodos maiores para degradação.

Alguns estudos indicam que as populações de microorganismos presentes em aquíferos sedimentares são capazes de se adaptarem para degradação anaeróbica do benzeno (Lovley et al., 1995).

Longos períodos de adaptação podem ser requeridos para que sejam detectados indícios de biodegradação, sendo este fator uma das desvantagens desta processo. Entretanto, a quantidade e a heterogeneidade na distribuição dos microorganismos presentes no meio contaminado são fatores que controlam o período de adaptação (Edwards & Grbic-Galic, 1994).

REDUÇÃO DE SULFATO

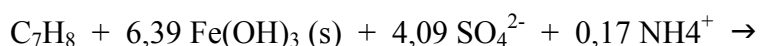
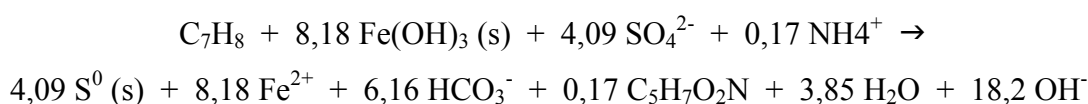
O benzeno pode ser completamente oxidado em dióxido de carbono por cultura de microorganismos que utilizam o sulfato como receptor de elétrons (Lovley et al., 1995), a partir da seguinte reação:

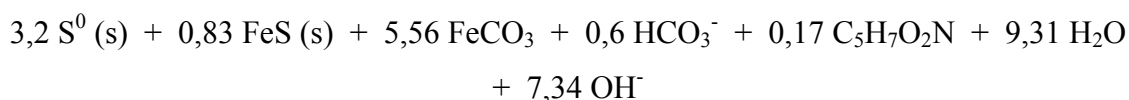


Embora seja um processo estritamente anaeróbico, redução por sulfato pode ser acompanhada pela redução de sulfetos, com o consumo de pequenas quantidades de oxigênio. Contudo, este processo é limitado pela disponibilidade destes elementos ou minerais, que por sua vez é condicionada à composição mineralógica no meio.

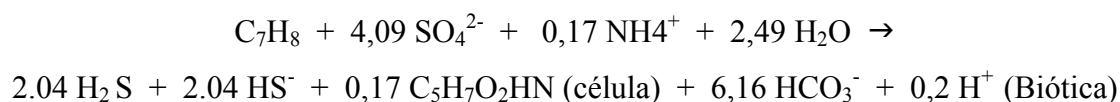
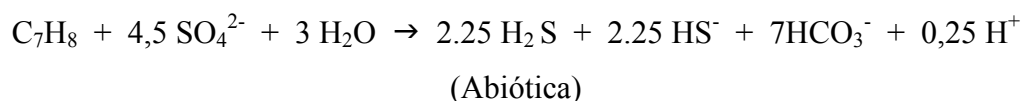
A oxidação de tolueno por redução de sulfato também é acompanhada pelo processo de redução de Fe^3 . Segundo Beller et al. (1992), duas hipóteses podem explicar este processo concomitante:

- Oxidação direta, em que o íon Fe_3^+ serve de receptor de elétrons do tolueno:





- Redução concomitante a redução de sulfato, em que íon Fe_3^+ é utilizado como receptor de elétrons em processos de oxidação abiótica ou oxidação biogênica com sulfetos hidrogenados:



Os experimentos de Beller et al. (1992) sugerem que a completa oxidação do tolueno em bicarbonato é acompanhada da redução de sulfato em sulfeto de hidrogênio. A degradação do tolueno cessa com a depleção do sulfato e, ao contrário, a redução do sulfato cessa com a depleção do tolueno.

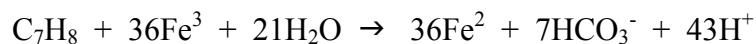
REDUÇÃO DE FERRO (Fe^3) E MANGANÊS (Mn^4)

A redução de Fe^3 e Mn^4 pode ser definida como o uso destes íons como receptor de elétrons no processo de metabolismo. O objetivo é a obtenção de energia a partir a oxidação de compostos orgânicos, cujo produto estão os íons Fe^2 , Mn^2 e compostos como CO^2 .

Sob condições anaeróbicas, o Fe^3 é um abundante receptor de elétrons em potencial para a degradação de matéria orgânica em diversos ambientes em subsuperfície. A acumulação de elevadas concentrações de Fe^2 e Mn^2 dissolvidos em aquíferos contaminados por compostos orgânicos foram identificados em diversos estudos (Cozzarelli et al., 1988; Lovley et al., 1989; Lovley & Phillips, 1989).

São poucos os grupos de microorganismos capazes de reduzir Fe^3 e Mn^4 em ambientes sedimentares. A bactéria GS-15 é um dos poucos organismos conhecidos capazes de degradarem compostos como o Tolueno sob condições anaeróbicas (Lovley et al., 1989).

Experimentos em laboratório com Tolueno no papel de doador de elétrons e Fe^3 como receptor de elétrons, sob metabolismo de culturas de bactérias GS-15 resultam na seguinte reação:

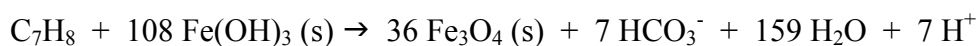


Evidências geoquímicas sugerem que compostos recalcitrantes como Benzeno e Xilenos podem ser degradados a partir da redução de Fe^3 em sedimentos (Lovley et al., 1989). Contudo, tentativas de estabelecimento de culturas que utilizem estes compostos como doadores de elétrons e o Fe^3 como receptor de elétrons não obtiveram sucesso (Lovley, 1991).

A redução de Fe^3 em Fe^2 pode resultar na geração de minerais como a magnetita (Bazylnski, 1996). Este mineral pode ser formado em condições anaeróbicas sem o auxílio de microorganismos, sob determinadas condições de pH e Eh. Contudo, metabolismo de microorganismos redutores de Fe^3 pode resultar em locais com grandes quantidades de Fe^2 e pH elevado (Lovley, 1990).

Formações de magnetita aparecem associadas com biodegradação de hidrocarbonetos em locais sob estritas condições anaeróbicas e produção contínua de CO_2 , com redução de Fe^3 em cristais que variam desde ultrafinos a grandes agregados (Elmore et al., (1987); McCabe et al., (1987), Lovley, 1990). Anomalias magnéticas ao redor de acumulações de petróleo são utilizadas na localização de jazidas, atribuídas a acumulações de magnetita (Donovan et al., 1978).

A biodegradação de tolueno com hidróxidos de ferro e produção de magnetita, segundo Beller et al (1992), pode suceder da seguinte forma:



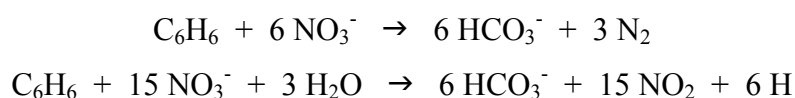
Os experimentos de Beller et al. (1992) afirmam que a biodegradação de tolueno por redução de sulfato, acompanhada pela redução de Fe^3 , são processos concomitantes e altamente correlacionáveis. Estes autores concluíram que a presença de hidróxidos de ferro permite o início e/ou aceleração do processo de biodegradação de tolueno por redução de sulfato. Contudo, a degradação de compostos como benzeno ou etilbenzeno não foi observada.

REDUÇÃO DE NITRATOS

O nitrato pode ser utilizado como receptor de elétrons alternativo em casos nos quais a taxa de solubilidade do oxigênio seja baixa, como em intervalos contaminados. Devido a sua elevada solubilidade – em torno de 660 g/L^{-1} a 15°C , a restauração de aquíferos sob condições denitrificadoras pode, em alguns casos, ser tão rápida quanto a degradação sob condições aeróbicas (Hutchins, 1991a e b).

Outras vantagens são a ausência de precipitação de óxidos e a não toxicidade aos microorganismos quando utilizado sob concentrações abaixo de 500 mg/L^{-1} (Hutchins, 1991). As principais desvantagens estão no fato da adição de nitratos na água subterrânea em excesso poder causar problemas de potabilidade e contribuir para um potencial eutrofização deste ambiente (Wilson & Bouwer, 1997).

O produto inicialmente gerado a partir do metabolismo de bactérias por redução de nitrato pode ser o nitrito (NO_2^-) ou a amônia (NH_3). Também pode ser produzido o gás nitrogênio (N_2) a partir de processos intermediários (Burland & Edwards, 1999; Evans et al, 1991):



A degradação de benzeno por ação de microorganismos sob condições denitrificantes é controversa: alguns estudos indicam que o benzeno apresenta comportamento recalcitrante, ou seja, praticamente não sofre degradação (Zeyer et al., 1986; Kuhn et al., 1988), enquanto outros trabalhos reportam que o benzeno é rapidamente degradado (Burland & Edwards, 1999; Hutchins, 1991).

Experimentos em áreas contaminadas demonstram que a biodegradação de BTEX na zona saturada por redução de nitrato pode ser limitada na ausência de oxigênio, por outro lado, a abundância de oxigênio pode limitar a biodegradação por nitrato (Figura 3.5) (Parkin & Tiedje, 1984).

Dentre as hipóteses que explicam a inibição na degradação por nitratos sob elevadas concentrações de oxigênio estão: competição por elétrons, impedimento de síntese por bactérias denitrificadoras e a inibição do transporte de nitratos em áreas contaminadas sob efeito de *reductase* (Figura 3.6).

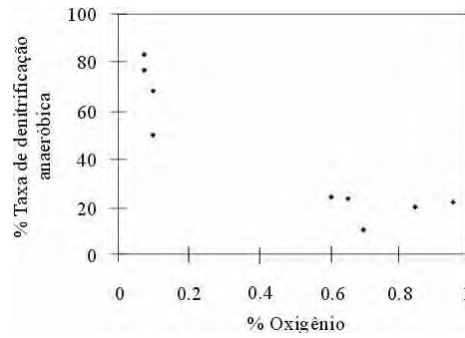


Figura 3.5 – Efeitos da concentração de oxigênio no processo de denitrificação (adaptado de Parkin & Tiedje, 1984)

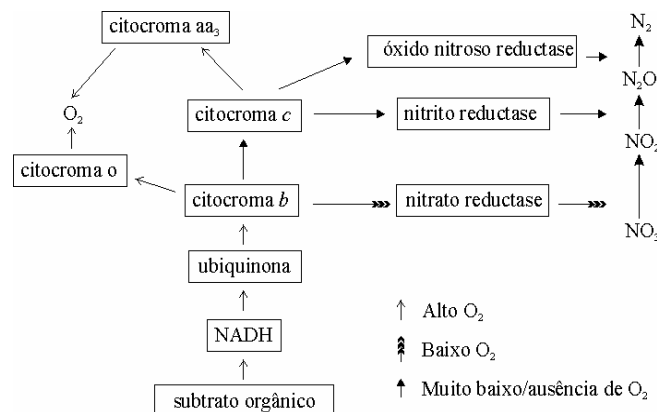


Figura 3.6 – Esquema de ramificação de transporte de elétrons (Lloyd, 1993)

Bactérias anaeróbicas facultativas, como as denitríferas, utilizam o oxigênio para a transferência inicial de elétrons de cadeias benzênicas e para obtenção de energia. Sob ausência de oxigênio, o nitrato serve de receptor de elétrons no processo de *reductase* por nitrato, enquanto o *citocroma b* e *ubiquinona* agem como doadores (Figura 3.6).

Sob baixas concentrações de oxigênio, a redução por *citocroma b* pode resultar em transferência de elétrons para *citocroma c*, com redução de nitreto ou óxido nitroso. Sob elevadas concentrações de oxigênio, o *citocroma b* resulta de *citocroma o* tendo o oxigênio como receptor de elétrons (Figura 3.6).

A presença de oxigênio permite, inicialmente, o aumento na população de bactérias denitrificadoras facultativas e, ao mesmo tempo, a degradação de hidrocarbonetos por processos aeróbicos. Na etapa seguinte, tais populações degradam os hidrocarbonetos presentes quando a taxa de oxigênio é reduzida.

A mistura de receptores de elétrons como nitrato, nitrito e óxido nitroso, podem ser uma alternativa na remoção de compostos recalcitrantes (Wilson & Bouwer, 1997).

3.5 – DISSOLUÇÃO MINERAL POR AÇÃO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS

As bactérias são os seres vivos com maior capacidade de reciclagem na natureza, pois ocorrem naturalmente em diversos ambientes e sobrevivem de ganhos energéticos com transformação metabólica de complexas moléculas orgânicas em CO₂, metano e água.

A degradação de derivados de petróleo por metabolismo microbial produz uma variedade de subprodutos reativos, muitos dos quais interagem diretamente com solutos inorgânicos dissolvidos e minerais presentes. Estes subprodutos podem acelerar reações de dissolução e precipitação, complexação de íons metálicos em solução, alterações no estado de valência de íons metálicos e mobilização de metais solúveis (Harter, 1977).

Os processos que resultam na mobilização de solutos inorgânicos em ambientes contaminados por compostos orgânicos podem ser entendidos como uma imitação dos processos que ocorrem em grandes sistemas naturais. A interação água-rocha relacionada a biodegradação de matéria vegetal em aterros sanitários é similar ao que ocorre em planícies de maré, ricas em matéria orgânica (Baedecker & Back, 1979). Similarmente, as alterações geoquímicas associadas a aquíferos contaminados por compostos orgânicos podem ser análogas as alterações que ocorrem em sistemas geológicos ricos em carbono, tais como campos de petróleo e turfeiras (Surdam & McGowan, 1987; Bennett et al., 1991).

O papel dos ácidos orgânicos na dissolução de minerais tem recebido considerável atenção, em especial nas águas subterrâneas adjacentes a campos de petróleo, com o objetivo de compreender os mecanismos e prever a ocorrência de porosidade secundária em reservatórios. (Barts & Riis, 1992; Surdam & McGowan, 1987; Stoessell & Pittman, 1990).

Entretanto, poucos trabalhos abordam a dissolução mineral por ação de ácidos orgânicos e sistemas aquíferos rasos, provenientes da degradação de contaminantes derivados de petróleo (McMahon et al., 1995; Hiebert & Bennett, 1992).

A dissolução mineral pode desencadear processos como:

- Geração de porosidade intragranular, que inibe a recuperação de íons metálicos e derivados de petróleo em aquíferos de elevada porosidade.
- Dissolução de óxidos de ferro, que pode resultar na liberação de íons metálicos em determinados ambientes.

- Neoformação mineral, com fechamento de espaços porosos previamente estabelecidos e modificação no padrão de circulação da água subterrânea, que dificultam os esforços de remediação.

Evidências de campo indicam que águas subterrâneas ricas em acetato promovem dissolução mineral. Bennett & Siegel (1987) observaram grãos de quartzo e feldspato coletados em porções ricas em acetato, apresentavam escavações e escamas em maior quantidade, em comparação a minerais coletados em outros locais.

A habilidade dos ácidos orgânicos em promoverem a dissolução mineral dentro de condições de campo resulta em acumulações de ácidos concentrados, nas proximidades das células de microorganismos, com supersaturação da fase mineral dissolvida nos poros adjacentes (Ehrlich, 1996; McMahon & Chapelle, 1991). O acúmulo de ácidos orgânicos com elevadas concentrações é manifestado também, pelo ataque das próprias estruturas celulares.

O transporte de soluto na água subterrânea é governado por processos de difusão e advecção (Wood et al., 1990). Em muitos sistemas aquíferos, a velocidade de movimentação de soluto por advecção por ser até quatro vezes maior em relação à difusão. O processo de difusão, por sua vez, é predominante em meio ricos em silte ou argila e em aquíferos fraturados.

A porosidade intragranular ou microporosidade tem influência significativa nas razões de transporte de soluto. A movimentação de derivados de hidrocarbonetos por espaços porosos intragranulares é potencialmente importante devido à redução na eficiência de processos de remediação “*in-situ*” que requeiram o transporte de receptores elétricos dissolvidos em água (McMahon et al., 1995; Bennett et al., 1993).

O trabalho de McMahon et al. (1995) apresenta uma correlação positiva entre elevadas concentrações de íons dissolvidos e concentrações de ácidos orgânicos em aquífero contaminado por hidrocarbonetos. Cálcio, magnésio e ferro total exibem elevadas concentrações nas áreas com maiores concentrações de ácidos orgânicos. Esta correlação sugere a dissolução dos minerais do aquífero por ataque de ácidos orgânicos.

4 - ÁREA DE ESTUDOS

4.1 - LOCALIZAÇÃO

A área de estudos está localizada no município de Araras, Estado de São Paulo, distante 177 Km à noroeste da capital (Figura 4.1).

O local pode ser acessado no Km 51,2 da rodovia SP 191, que liga as cidades de Araras e Rio Claro. A partir da cidade de São Paulo, o acesso pode ser feito pela rodovia SP 330, até o cruzamento com a rodovia SP 191, o local de estudos está distante cerca de 1400m sentido Rio Claro.

4.2 - HISTÓRICO DO PASSIVO AMBIENTAL

O local foi inicialmente ocupado pela Redistil Indústria Química Ltda, no ano de 1981. Os produtos fabricados eram piridina anidra, dieloxalato, acetato de etila, 4-amino-N-2-tiozolil-benzeno-sulfonamida e solventes regenerados por destilação (CETESB, 1997).

No ano de 1985, a indústria química Sulfabrás S/A foi instalada no mesmo local. Passou a produzir acetopiruvato de metila, 5-metil-3-carboxiamidoxazol (carboxiamido), 3-amino-5-metil-isoxazol (3-amino) e dentre os solventes utilizados durante o processo, estão o 1,2 dicloroetano e o tolueno (Aquino, 2000).

Os solventes utilizados por ambas as indústrias eram reutilizados após passarem por colunas de destilação. As águas residuais deste processo passavam por um tacho de evaporação com objetivo de concentrar os efluentes. Em seguida, os efluentes gerados eram infiltrados em dois poços presentes no local (CETESB, 1997).

Em novembro de 1985 foram detectados odores em poços de abastecimento nos arredores da área de infiltração. Análises químicas realizadas em amostras coletadas em poços próximos a indústria indicaram contaminação da água subterrânea. Posteriormente, foram efetuadas análises químicas nos resíduos infiltrados com vistas à caracterização de sua composição química, cujos resultados permitiram a correlação com as substâncias contaminantes presentes nas águas subterrâneas (CETESB, 1997).

Em fevereiro de 1988, foi encerrado o processo de infiltração de resíduos por meio de poços de infiltração. O saldo deste processo foi a contaminação das águas

subterrâneas tanto nas dependências da empresa quanto nos arredores e do solo no entorno dos poços de infiltração (ANEXO III) (CETESB, 1997).

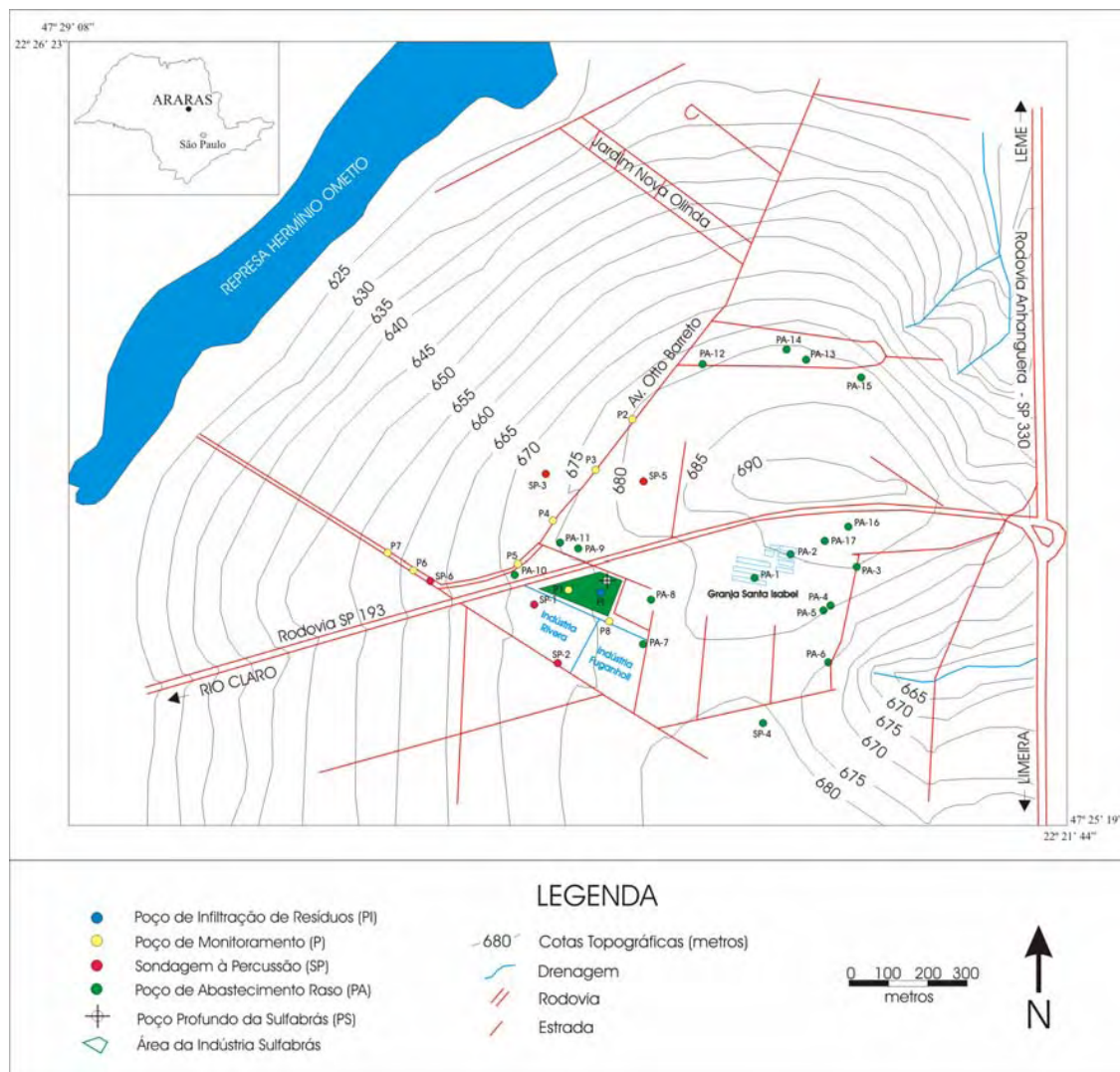


Figura 4.1 – Mapa de localização

Após constatação de abandono da área por parte dos responsáveis, em junho de 1990, a CETESB passou a estudar a área por meio de análises químicas de amostras coletadas em poços de monitoramento instalados pela Sulfabrás e medições do nível da água subterrânea (ANEXO 2). Neste período foram iniciados levantamentos de campo por meio de métodos geofísicos, posteriormente retomados em 1998 para nova avaliação da área (Aquino, 2000).

Atualmente, os prédios em condições de uso estão sendo habitados por famílias, que armazenam sucatas e materiais recicláveis na área (Foto 4.1).



Foto 4.1 – Vista parcial da área da antiga Industria Sulfabrás

4.3 - FISIOGRAFIA

O município de Araras está localizado na bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, sendo a drenagem mais próxima localizada a 1400m sentido NW.

A região possui basicamente duas formas de relevo:

- Colinas amplas com topos extensos a aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Possui baixa densidade de drenagens, de padrão subdentriticó, encaixadas em vales abertos, com planícies aluvionares interiores restritas e presença eventual de lagoas perenes e intermitentes (IPT, 1981).
- Morrotes alongados e espigões com predomínio de interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados e vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Densidade de drenagens média a alta em vales fechados e com padrão dendrítico (IPT, 1981).

O clima da região é do tipo Cwa, subtropical, seco no inverno e chuvoso no verão, segundo a classificação de Koppen,. Apresenta temperatura anual média de 20°C, sendo que no mês de janeiro a esta temperatura é de 22,5°C e no mês de julho a média é de 16,5°C (Brino, 1973).

A pluviosidade média anual para a região de Araras está entre 1400 e 1350mm. No verão, é de 560mm, no outono, entre 170 e 180mm, no inverno, é de 136mm e na primavera, a média está entre 500 e 520mm. (Zavatini & Cano, 1993).

4.4 - PEDOLOGIA

Os solos presentes na área de estudos são produto de alteração de siltitos pertencentes à Formação Tatuí. A descrição geológica de sondagens à percussão realizadas na área de estudos e adjacências indica um solo argiloso, que varia de argilo-arenoso nos níveis superiores e silto-argiloso nos níveis inferiores (ANEXO I).

Segundo Oliveira et. al., (1981), a área de estudos está situada sobre Latossolo Vermelho Escuro álico A moderado, com textura argilosa, predominantemente distrófico ou álico. Este solo apresenta horizonte A moderado, estrutura granular pequena fraca a moderada, consistência friável ou muito friável quando úmido, ligeiramente plástica a ligeiramente pegajosa quando molhado. O horizonte B apresenta textura média argilosa ou muito argilosa, estrutura subangular média fraca, consistência friável a muito friável quando úmido, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso quando molhado.

Durante os trabalhos de campo, foram executados 6 furos de trado com profundidade de 4m, ao redor da área de estudos. As descrições feitas a partir destes furos indicam a presença de dois tipos de solo:

- Latossolo Vermelho Escuro álico A antrópico, textura média argilosa. Caracterizado por horizonte A antrópico, estrutura granular e de forma subordinada prismas e blocos, consistência macia quando seco e muito friável quando úmido, não plástico quando molhado, ligeiramente pegajoso a pegajoso quando molhado e com faixa de transição clara. O horizonte B apresenta textura argilosa, estrutura em blocos, consistência macia a dura quando seco e friável a muito friável quando úmido, plástico quando molhado, pegajoso quando molhado, com faixa de transição abrupta a gradual.
- Cambissolo Vermelho Escuro álico, A antrópico, textura média argilosa. Caracterizado por horizonte A antrópico, estrutura granular e de forma subordinada prismas, consistência dura quando seco e firme quando úmido, plástico quando molhado, ligeiramente pegajoso quando molhado, com faixa de transição clara. Apresenta horizonte de transição A/B com presença de cútans,

com faixa de transição abrupta. A porção superior do horizonte B apresenta concreções ferruginosas e muitos cútans. O horizonte B apresenta textura argilosa, estrutura em primas no topo e em blocos sentido a base, consistência macia quando seco e muito friável quando úmida, muito plástico quando molhado, pegajoso quando molhado.

4.5 – GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está localizada na parte nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, situada na porção centro-leste da Plataforma Sul-Americana (Almeida *et al.*, 1977). Composta por rochas Paleozóicas (Grupo Itararé, Formações Tatuí, Irati e Corumbataí), Mesozóicas (Formações Pirambóia) e Cenozóicas (Formação Rio Claro e depósitos atuais) constituídas por sedimentos, derrames e intrusões básicas (Figura 4.2).

O Grupo Itararé é uma seqüência depositada no Permo-Carbonífero, sendo a base da coluna estratigráfica na região de Araras. Em conjunto com a Formação Tatuí, constituem o Supergrupo Tubarão.

Este grupo é constituído por sedimentos arenosos, com granulometria desde muito fina a conglomerática, contém grandes pacotes de diamictitos, siltitos, folhelhos e ritmitos e, por vezes, seixos e blocos aleatórios. Camadas delgadas de carvão ocorrem de forma subordinada (França & Potter, 1988).

Seus registros representam processos glaciais, com sedimentos de caráter continental, ambiente marinho de fácies pelíticas e lobos deltaícos, com turbiditos e fluxos de massa associados (França & Potter, 1988).

A Formação Tatuí possui contato basal sob a forma de discordância erosiva com o Grupo Itararé, depositado durante o Permiano. Corresponde às Formações Rio Bonito e Palermo, pertencentes ao Grupo Guatá, nos estados do sul da Bacia do Paraná. É constituída por siltitos e lamitos de cor verde, creme e marrom, maciços e bioturbados. De forma subordinada, ocorrem camadas de calcário ou sílex, arenitos sílticos ou argilosos com estratificação plano-paralela, e conglomerados.

As evidências indicam que o ambiente de formação destas rochas foi de plataforma marinha, em um sistema costeiro com leques deltáicos localizados.

A Formação Irati apresenta contato basal discordante com a Formação Tatuí, marcado por um nível conglomerático que corresponde à Fácies Ibicatu (Souza, 1997),

depositado durante o Permiano superior. Em conjunto com a Formação Corumbataí, constitui o Grupo Passa Dois, no estado de São Paulo (Schneider *et al.*, 1974).

Esta formação é dividida em dois membros: seqüência inferior, denominada Membro Taquaral, constituída de folhelhos cinza-claro a cinza-escuro e siltitos de cor cinza; seqüência superior, denominada Membro Assistência, constituído de folhelhos cinza-escuros a pretos, pirobetuminosos, associados a calcários, em geral dolomíticos.

A deposição do Membro Taquaral ocorreu em ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas, enquanto que o Membro Assistência teve deposição em ambiente marinho de águas rasas, preferencialmente áreas de plataforma (Schneider *et al.*, 1974)

A Formação Corumbataí apresenta contato basal direto com a Formação Iratí, depositada durante o Permiano superior (Daemon & Quadros, 1970).

Esta formação é constituída por espessos pacotes de argilitos, siltitos e folhelhos marrom-avermelhados a roxos, por vezes, esverdeados, com grande continuidade lateral, intercalados por arenitos, leitos carbonáticos e coquinas.

As feições descritas nesta formação indicam ambiente deposicional em planície de maré, interposto, por vezes, com depósitos de mar aberto, com evidências de condições mais continentais para o topo (Gama Jr., 1979).

A Formação Pirambóia possui contato discordante com a Formação Corumbataí e contato direto com a Formação Botucatu. Sua deposição teria ocorrido entre o Triássico médio e o Jurássico inferior (Landim *et al.*, 1980).

É constituída por arenitos brancos a amarelo avermelhados, granulometria fina a média e grãos arredondados, sob a forma de corpos espessos. Apresenta níveis pouco de argilitos e siltitos e localmente níveis conglomeráticos. Caracterizada por estratificações de médio a grande porte (Schneider *et al.*, 1974).

Segundo Brighetti (1994), o ambiente deposicional seria desértico, sob a forma de dunas eólicas, com predomínio deste ambiente em direção ao topo da Formação. Soares (1973) atribui sedimentação em sistemas fluviais para os níveis conglomeráticos.

As intrusivas básicas são atribuídas ao evento vulcânico responsável pelos derrames da Formação Serra Geral, de idade Cretácica (Nardy, 1995). Ocorrem sob a forma de “sills”, diques, soleiras, lacótilos entre outras, presentes tanto na área de estudo como em toda extensão da Bacia do Paraná.

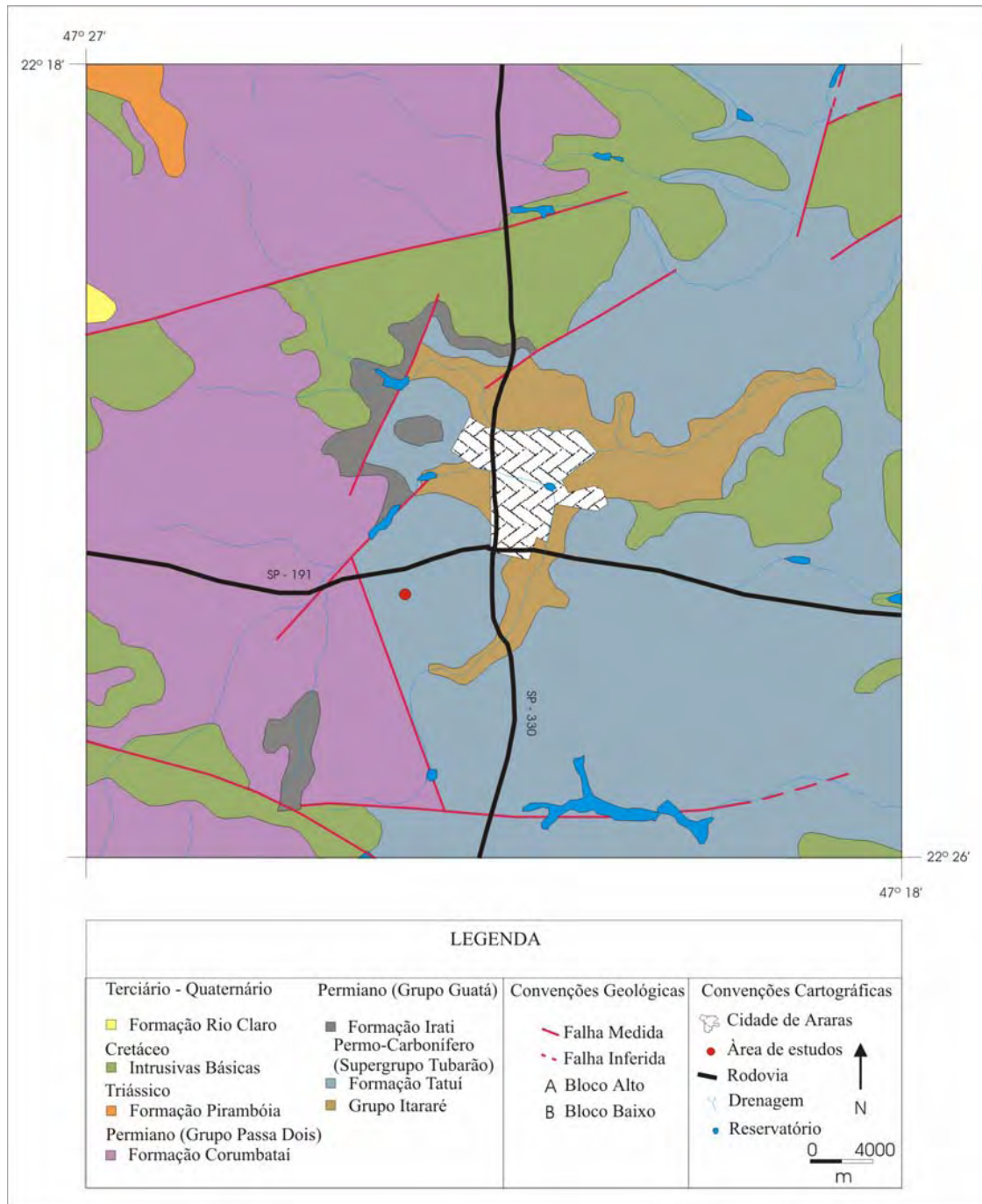


Figura 4.2 - Mapa Geológico da região de Araras (Modificado de CPRM, 1985)

A Formação Rio Claro apresenta contato basal discordante, cuja deposição teria ocorrido durante o Plioceno/Pleistoceno. Presente na porção centro-leste paulista, em superfícies de relevo suave a aplainado (Zaine, 1994).

Composta por sedimentos arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos, mal consolidados. Também são comuns intercalações de lentes argilosas e níveis

conglomeráticos. Depositado em ambiente continental, sob condições climáticas semi-áridas (Schneider *et al*, 1970).

4.6 - GEOLOGIA LOCAL

Nas proximidades da área de estudos, são descritas as seguintes unidades: Grupo Itararé, Formações Tatuí, Irati, Corumbataí e intrusivas básicas (Figura 4.3).

O Grupo Itararé é representado por arenitos de granulação fina a média, cinza-claro, com níveis decimétricos de silexitos fraturado, cinza-escuro. Apresenta contato discordante erosivo com a Formação Tatuí, com a ocorrência de uma camada de arenito médio a grosso, marrom-claro, com espessura em torno de 4 metros. Encontrado à porção leste/nordeste da área, onde ocorrem as cotas topográficas mais baixas da região.

A Formação Tatuí é representada por espessas camadas de siltito com diversos tons de amarelo, muito fraturado, e arenito fino, verde-claro. Seus litotipos estão presentes em grande parte da área, inclusive no local de estudos. Na porção centro-oeste da área apresenta exposições de um arenito médio, marrom-amarelado, maciço, interpretado como um litotipo pertencente ao Fácies Ibicatu.

A Formação Irati é representada por folhelho cinza escuro muito alterado, localmente com camadas centimétricas de silexito cinza escuro. Ocorrem nas porções centro-norte, centro-oeste e centro-sul da área, em uma faixa com direção norte/sul. Apresenta contato ora discordante erosivo ora por falha, tanto com a Formação Tatuí, quanto com a Formação Corumbataí.

A Formação Corumbataí é representada por folhelho argilo-siltoso roxo. Ocorre nas porções noroeste e oeste da área e apresenta contatos direto e por falhas com a Formação Irati.

As rochas intrusivas básicas são representadas por diabásios extremamente alterados, com formato sub-circular em planta, definido por fotointerpretação.

Os principais falhamentos e fraturamentos estão orientados segundo as direções N/S, NE/SW, NW/SE e E/W.

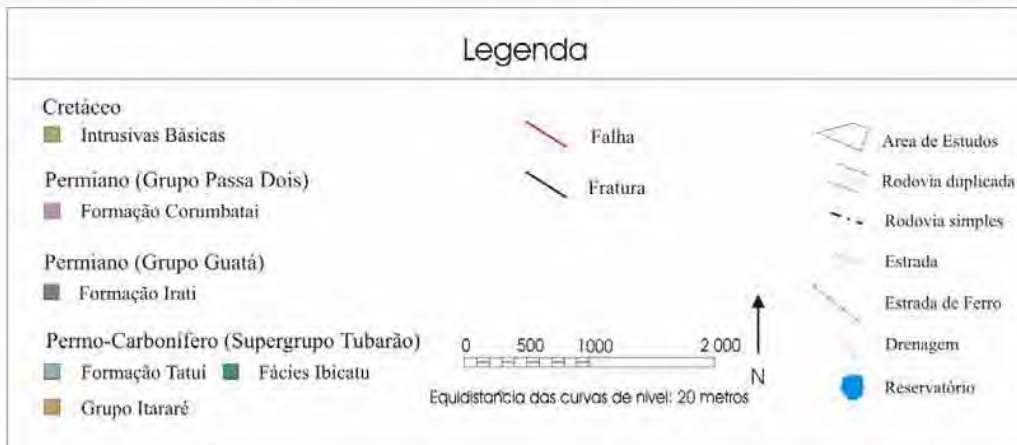
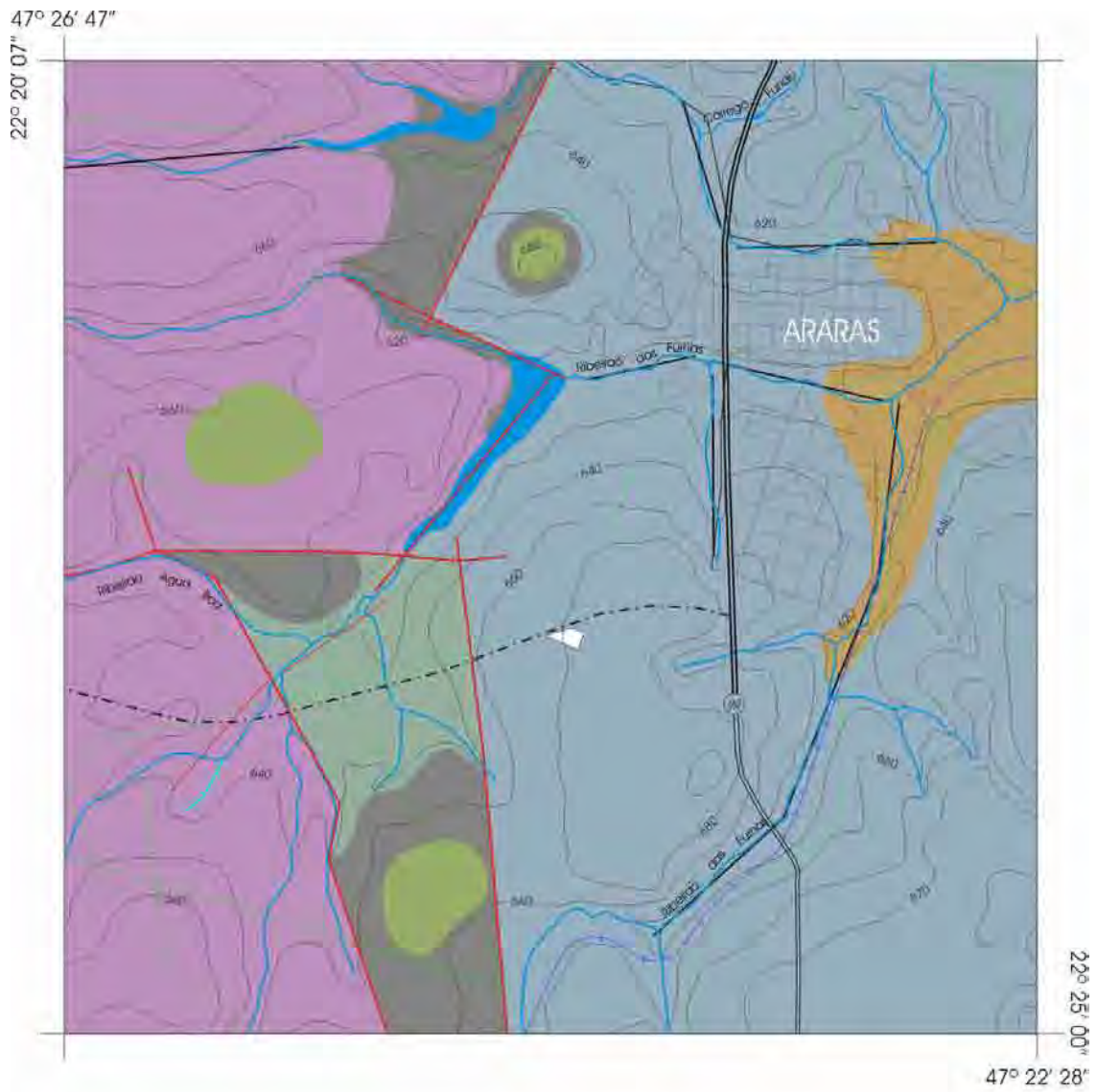


Figura 4.3 – Mapa Geológico Local (Moreira, 2003)

4.7 - HIDROGEOLOGIA REGIONAL

A área de estudos está localizada sobre o Sistema Aquífero Tubarão (Figura 4.4). Este aquífero é descontínuo em escala regional, devido à presença de intrusões de diabásio. Está assentado em rochas do embasamento cristalino e, em grande parte, é recoberto por sedimentos cenozóicos de espessura variada. No sentido oeste do estado, passa a ser confinado por seqüências sedimentares do Grupo Passa Dois (DAEE, 1981). Possui espessura saturada variável, com progressivo aumento no sentido oeste do estado e espessura máxima de 1300m. Nas proximidades da área de estudos, apresenta espessura superior à 400m (Tonetto, 2001).

A circulação e o armazenamento de água ocorrem nos interstícios de arenitos, conglomerados e diamectitos. Níveis constituídos por siltitos e folhelhos dificultam o escoamento vertical da água subterrânea, pois atuam como camadas impermeabilizantes que, pontualmente, possui caráter fissurado (DAAE, 1981). Apresenta vazões médias entre 3 a 30 m³/h (CETESB, 1997).

A oeste da área, este aquífero é recoberto pelo Grupo Passa Dois, considerado um aquícluíde que separa os Aquíferos Tubarão e Botucatu. Devido à presença de litotipos como lamitos, folhelhos e calcários, apresenta dificuldade para a migração vertical da água (Tonetto, 2001).

De forma localizada, possui características de aquífero fissurado nas proximidades de lineamentos estruturais. Em presença de pacotes ou lentes de arenitos carbonatados, possui caráter de aquífero sedimentar, com circulação das águas segundo movimentação intersticial (DAAE, 1981). As vazões médias deste aquífero estão entre 3 a 10 m³/h (CETESB, 1997).

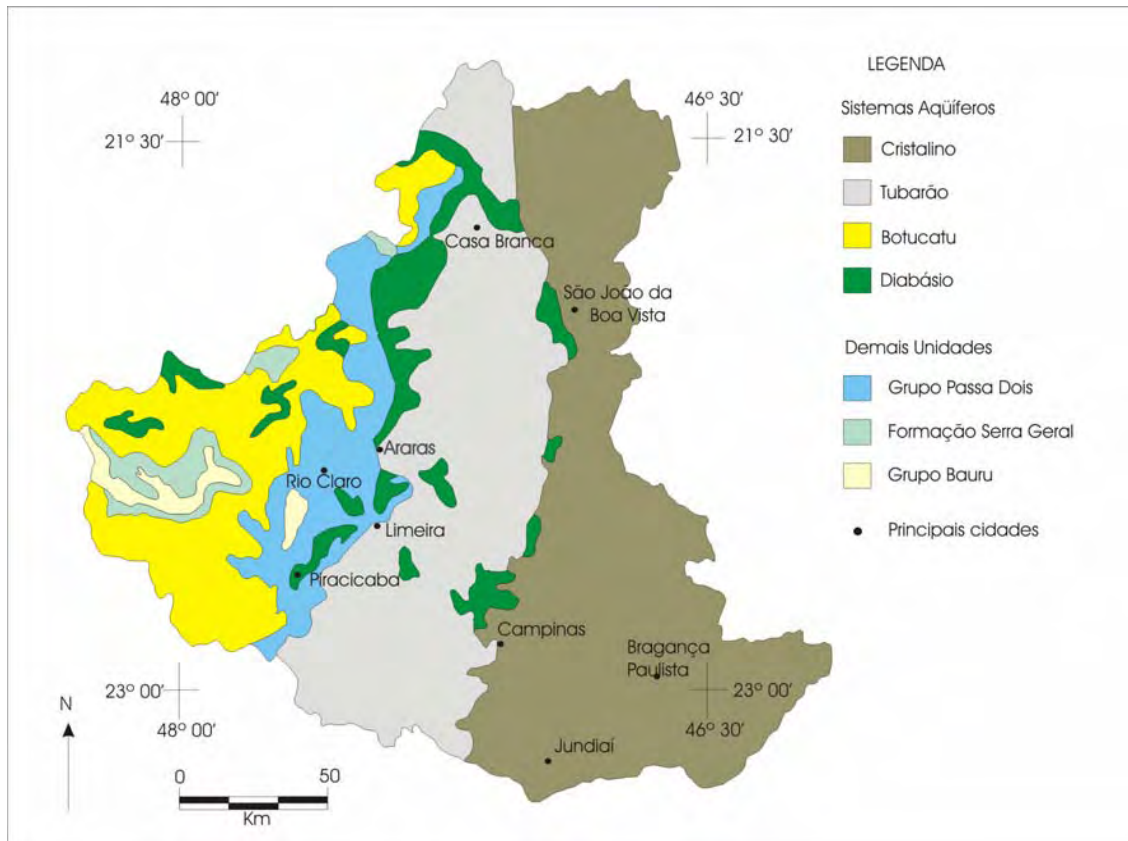


Figura 4.4 – Sistemas Aquíferos da região de Araras (Modificado de DAAE, 1981)

4.8 - HIDROGEOLOGIA LOCAL

Medições em poços de monitoramento indicam que o nível freático varia de 10,4 a 14,7 metros (ANEXO II). As variações do nível freático nos poços da área chegam a até 7,8 metros, sendo que para um mesmo poço, a variação sazonal máxima foi de 3,7 metros durante o ano de 1992 (Aquino, 2000; CETESB, 1997). O coeficiente de condutividade hidráulica, obtido para a área varia de $4,4 \times 10^{-7}$ a $7,0 \times 10^{-7}$ cm/s. (CETESB, 1997).

A partir da comparação de seções de GPR realizadas nos anos de 1998 e 2003, obtidas segundo a direção N335, foi definido um valor médio de $7,82 \times 10^{-6}$ cm/s de migração da pluma contaminante (Moreira & Dourado, 2003).

O mapa potenciométrico local indica que as direções de fluxo da água subterrânea seguem o gradiente topográfico e que a área da indústria está localizada nas proximidades da área de recarga do aquífero (Figura 4.5). Os sentidos principais de fluxo da água subterrânea são para NW, E, e SW.

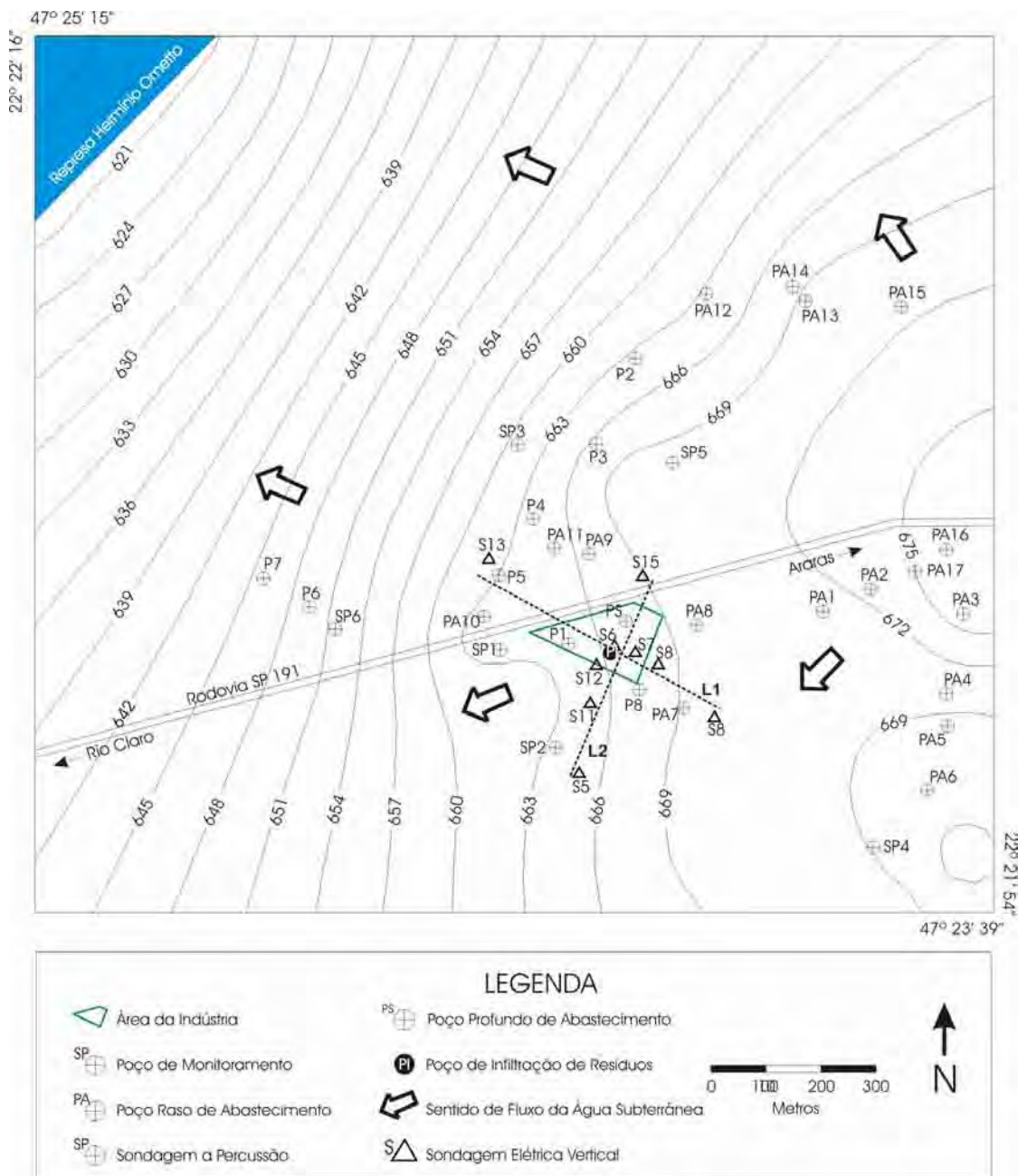


Figura 4.5 – Mapa Potenciométrico Local (Modificado de CETESB, 1997)

5 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

5.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda as técnicas e procedimentos de campo para aquisição dos dados na área da indústria Sulfabrás. As linhas de aquisição de dados foram definidas com base nos acessos disponíveis, a partir de informações como análises químicas da água subterrânea e levantamentos geofísicos preliminares.

Desta forma, foi possível o estabelecimento de 6 linhas de aquisição de dados, das quais 4 foram locadas nas ruas ao redor da área da indústria Sulfabrás e 2 locadas dentro da área da contaminada (Figuras IV.1, V.1 e VI.1).

5.2 - EQUIPAMENTOS

O equipamento TEM utilizado no presente trabalho é o sistema PROTEM 47, fabricado pela Geonics (Canadá) (Foto 5.1).

Este sistema compreende uma unidade transmissora, denominada transmissor TEM47, responsável pelo fornecimento de corrente elétrica para a bobina transmissora (Tx). Em uma unidade receptora, denominada receptor PROTEM-D, são programados os parâmetros de aquisição de dados e realizadas leituras do decaimento do campo magnético secundário, obtidos a partir de leituras realizadas por meio de uma bobina receptora, denominada PROTEM HF. O receptor PROTEM-D também é responsável pelo armazenamento dos dados adquiridos.

O equipamento utilizado neste trabalho para medidas diretas de resistividade é o resistímetro Bison, fabricado por Bison Instruments (Estados Unidos) (Foto 5.2).

Este equipamento consiste em dois módulos: um transmissor ou de corrente e um receptor ou de potencial. O transmissor produz corrente elétrica, medida por um miliamperímetro e transmitida ao solo por meio de cabos e eletrodos de corrente. O receptor mede a diferença de potencial gerada pela injeção de corrente elétrica o solo, na escala de milivolts, a partir de eletrodos e cabos de potencial.

Desta forma, a partir dos valores de corrente elétrica, da diferença de potencial e da geometria do arranjo, é possível o cálculo da resistividade aparente.



Foto 5.1 – Equipamento TEM



Foto 5.2 – Resistivímetro Bison, módulos de potencial (esq.) e módulo de corrente (dir.)

5.3 - AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) foi utilizado o arranjo Schlumberger com espaçamento $AB/2$ máximo de 50 metros. As medidas intermediárias de $AB/2$ foram 1,5 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 8 , 10 , 13 , 16 , 20 , 25 , 30 , 40 e 50 metros (Foto 5.1). Os respectivos valores de $MN/2$ foram 0,3 , 2 , 5 e 10 metros.

Para a técnica de Caminhamento Elétrico (CE) foi adotado o arranjo Dipolo-Dipolo (Foto 5.2). O espaçamento entre eletrodos foi de 10 metros, com cálculo de resistividade aparente para 5 níveis de profundidade teórica: 5, 10, 15, 20 e 25 metros.

A aquisição de dados a partir do equipamento TEM utilizou um arranjo de *loop* central da bobina receptora e disposição quadrática de 5 x 5 m para bobina transmissora (Foto 5.3). O espaçamento utilizado entre sondagens foi de 15 metros.



Foto 5.3 - Aquisição de dados com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical em arranjo Schlumberger



Foto 5.4 - Aquisição de dados com a técnica de Caminhamento Elétrico em arranjo Dipolo-dipolo



Foto 5.5 – Aquisição de dados com a técnica de Caminhamento Eletromagnético em arranjo de *loop* central (sondagem LB-19)

5.4 - PROCESSAMENTO DOS DADOS DE SEV E CE

O equipamento utilizado não permite armazenamento dos dados, portanto, os valores de resistividade foram anotados em tabelas durante a realização do ensaio.

Os dados Sondagem Elétrica Vertical anotados em campo foram tabelados e processados no programa RESIXIP, versão 2.13, desenvolvido pela Interpex Limited (Estados Unidos).

O erro atingido durante o processamento varia entre 3 a 12%. A área de estudos está localizada em um distrito industrial, desta forma, este erro é justificado devido á presença de linhas de alta tensão, transformadores elétricos, estruturas metálicas e outras instalações que influenciam na qualidade do dado de campo.

Os dados de CE anotados em campo foram posteriormente tabelados sob a forma de arquivos .DAT, por meio do programa SURFER, versão 8. Os arquivos .DAT foram processados no programa Res2Dinv, da Geotomo Software (Malásia).

As pseudo-seções geradas apresentam erros de ajustes bastante acentuados, atribuídos ás diferenças entre os valores máximos e mínimos, com níveis de alta resistividade próximos a superfície e níveis extremamente condutivos em profundidade.

Para efetuar o ajuste da seção modelada com o dado de campo, o programa parte de um modelo inicial que corresponde à média das resistividades observadas a partir dos dados de campo. Deste modo, com acentuado contraste de valores, o modelo inicial não é suficientemente adequado, o que resulta em seções com erro elevado.

5.5 - PROCESSAMENTO DOS DADOS TEM

O processamento dos dados de TEM envolve, preliminarmente, a retirada dos dados armazenados no receptor PROTEM-D, por meio de um cabo de conexão entre o receptor e um microcomputador. O programa PROTEM foi utilizado para extração dos dados contidos no receptor e os converte em arquivos de extensão .RED, que contém até 13 sondagens por arquivo.

O programa TEMIX XL v4, desenvolvido pela Interpex Limited (Estados Unidos), foi utilizado para processamento dos dados TEM.

O procedimento inicial foi à criação de pastas com os arquivos .RED, nomeadas com as respectivas linhas de aquisição de dados. Em seguida, uma pasta de arquivos é

aberta dentro do programa e são selecionados os parâmetros de processamento com base nos parâmetros utilizados para calibração do equipamento.

Posteriormente, o arquivo RED selecionado é aberto para seleção de 7 sub-arquivos, que compreendem os dados de apenas uma sondagem eletromagnética. Estes dados são apresentados sob a forma de uma curva de resistividade por tempo.

Foram gerados gráficos de resistividade para as profundidades de 5, 10, 15 e 20m de profundidade para as respectivas linhas de caminhamento, a partir do agrupamento das sondagens eletromagnéticas processadas.

Durante o desenvolvimento dos gráficos de resistividade, foram excluídas algumas sondagens eletromagnéticas, por apresentarem erro superior 6%. Este elevado erro foi causado pela presença de dispositivos como transformadores elétricos ou cruzamento de linhas de alta tensão destes pontos.

6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados obtidos a partir da aplicação do método eletromagnético transiente são apresentados sob a forma de curvas de sondagem eletromagnética e de gráficos com valores de resistividade para profundidades de 5, 10, 15 e 20 metros.

As sondagens eletromagnéticas são apresentadas por meio de gráfico bi-logarítmico e compreendem a curva de campo e a curva resultante de processo de inversão (APÊNDICE I).

O resultado da aplicação da técnica de sondagem elétrica vertical é apresentado com a curva de campo, modelo resultante do processamento e tabela com valores de resistividade. Cada curva de campo é acompanhada por tabela com espessura e resistividade dos respectivos níveis geoeletricos, seguida de descrição e interpretação dos níveis quanto a litologia e grau relativo de contaminação (APÊNDICE II).

Os dados obtidos a partir da aplicação da técnica de caminhamento elétrico são apresentados por pseudo-seções de resistividade aparente, obtidos nas mesmas linhas de aquisição de dados com o método eletromagnético transiente. As pseudo-seções são acompanhadas pelo respectivo modelo calculado e modelo de inversão (APÊNDICE III).

Desta forma, os resultados são discutidos em duas etapas. A primeira etapa compreende uma análise comparativa entre sondagens eletromagnéticas e sondagens elétricas verticais. A segunda etapa apresenta uma análise comparativa entre os gráficos de resistividade e os modelos de inversão, com ênfase na identificação e discussão dos intervalos anômalos de resistividade e suas possíveis associações com a fonte de contaminação.

6.1 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA E SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL

A análise comparativa entre os valores de resistividade obtidos por ambas as técnicas revelam grandes diferenças. Em termos gerais, a resistividade obtida por meio da técnica de sondagem eletromagnética chega a ser centenas de vezes menor em comparação aos valores obtidos a partir da técnica de sondagem elétrica vertical, com relação ao mesmo ponto de medição (Tabela 6.1).

Sondagem Eletromagnética					Sondagem Elétrica Vertical				
Sondagem	1º nível	2º nível	3º nível	4º nível	Sondagem	1º nível	2º nível	3º nível	3º nível
LB-10	30,52	0,949	0.149	-----	SEV-9	343.4	1.18	11.18	-----
LB-15	21.90	4,95	0.253	0.0308	SEV-8	70.75	2542.2	37.16	7.6
LB-18	31.76	20.22	0.211	0.0277	SEV-7	980.0	4.96	12.59	-----
LC-4	11.23	0.0383	0.00284	-----	SEV-2	452.4	95.4	0.12	-----
LC-8	8.62	0.451	0.0591	-----	SEV-10	248.5	1035.0	219.4	7.5
LD-1	24.73	0.166	1.14	-----	SEV-6	2253.8	394.0	59.6	-----
LD-6	23.95	0.115	0.0371	-----	SEV-5	624.4	1464.6	4.3	-----
LF-5	6.06	1.86	0.275	0.00046	SEV-1	109.5	436.2	35.3	232.5
LF-10	7.26	1.96	0.136	0.0119	SEV-6	2253.8	394.0	59.6	-----
LG-3	2.01	0.153	0.0135	-----	SEV-3	179.5	18.3	2.8	13.8
LH-1	4.74	3.50	0.709	-----	SEV-3	179.5	18.3	2.8	13.8
LH-4	5.83	0.830	0.105	-----	SEV-4	281.1	2.0	47.3	-----

Tabela 6.1 – Comparação dos valores de resistividade dos níveis geoeletricos definidos por Sondagem Eletromagnética e Sondagem Elétrica Vertical (em ohm.m)

Os valores de resistividade para o primeiro nível geoeletrico definido por sondagens eletromagnéticas variam entre 2 a 31 ohm.m, enquanto que para o mesmo nível, os valores obtidos por meio de sondagens elétricas variam entre 70 e 2253 ohm.m (Tabela 6.1). Diferenças nesta ordem de grandeza também ocorrem para os demais níveis geoeletricos, até valores extremos como entre o 4º nível da sondagem LF-05 e a SEV-1, respectivamente 0.00046 Ohms.m e 232.5 Ohms.m (Figura 6.1).

Uma hipótese para explicar tamanha diferença de valores é a ocorrência de um fenômeno raro, mas que pode ocorrer em meios argilosos. Este fenômeno, denominado efeito de polarização induzida (IP) de membrana, resulta do corte repentino de corrente elétrica induzida pela bobina transmissora (U.S. Army Corps of Engineers, 1995) (Figura 6.2 e 6.3). Neste processo, os argilominerais funcionam como uma membrana, cuja interface age como capacitores que são polarizados pela passagem de corrente elétrica. Com a seção da corrente elétrica induzida, ocorre a descarga destes capacitores, que geram um fluxo de corrente elétrica similar ao induzido pela bobina transmissora.

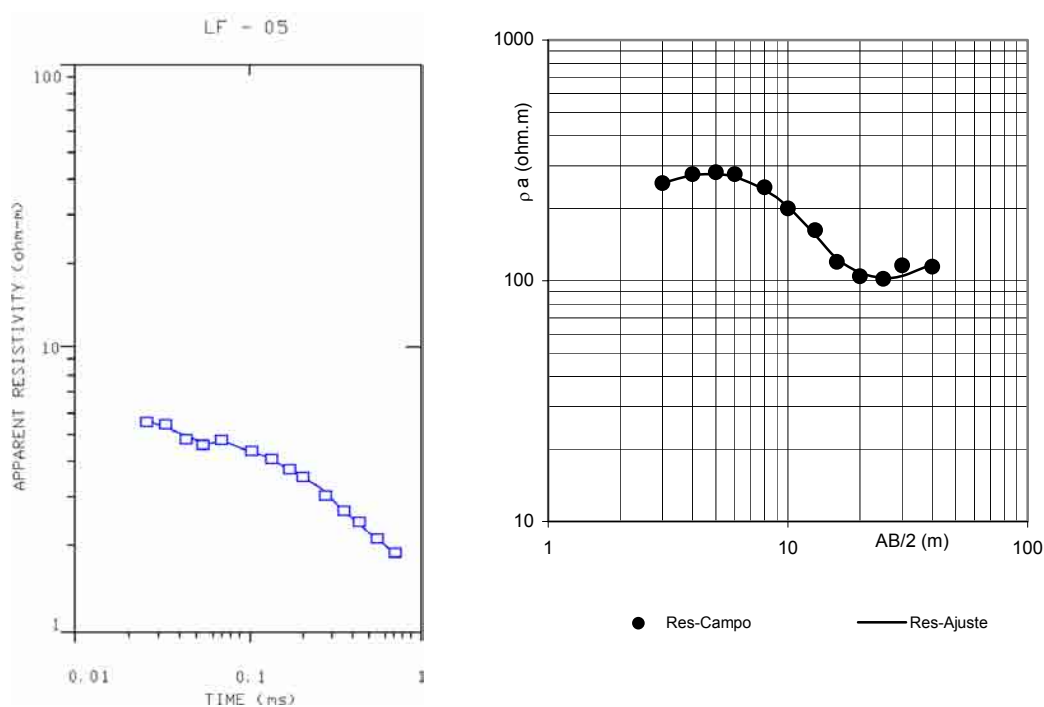


Figura 6.1 – Sondagem Eletromagnética LF-05 (esquerda) e Sondagem Elétrica Vertical SEV-1 (direita). Note a diferença nos valores de resistividade num mesmo ponto.

Contudo, o fluxo de corrente produzido pelo efeito IP flui em sentido oposto ao da corrente induzida. A interação de ambas as correntes resulta na redução da amplitude de resposta transiente, pois a corrente resultante desta interação é atenuada. O campo eletromagnético produzido pela corrente de indução é captado pela bobina receptora, a partir do qual é possível estimar o potencial gerado pelo trânsito da corrente de indução.

Devido ao efeito de atenuação do sinal, o potencial obtido é reduzido, o que culmina em valores de resistividade reduzidos. As sondagens eletromagnéticas realizadas fora da área contaminada apresentam valores de resistividade reduzidos, cuja tendência é acentuada nas porções contaminadas do terreno.

Desta forma, é possível afirmar que a área, predominantemente argilosa, apresenta elevado potencial de polarização mesmo ausente de contaminantes, cuja presença apenas potencializa este efeito.

O efeito IP de membrana age como redutor de intensidade da resposta transiente, mas sem alterar os valores reais de resistividade. As sondagens LG-3, LH-1 e LH-4 (APÊNDICE I) apresentam os menores valores de resistividade para o 1º nível geolétrico, cuja tendência também é apresentada pelas sondagens elétricas SEV-3 e SEV-4 (APÊNDICE II), realizadas no mesmo local.

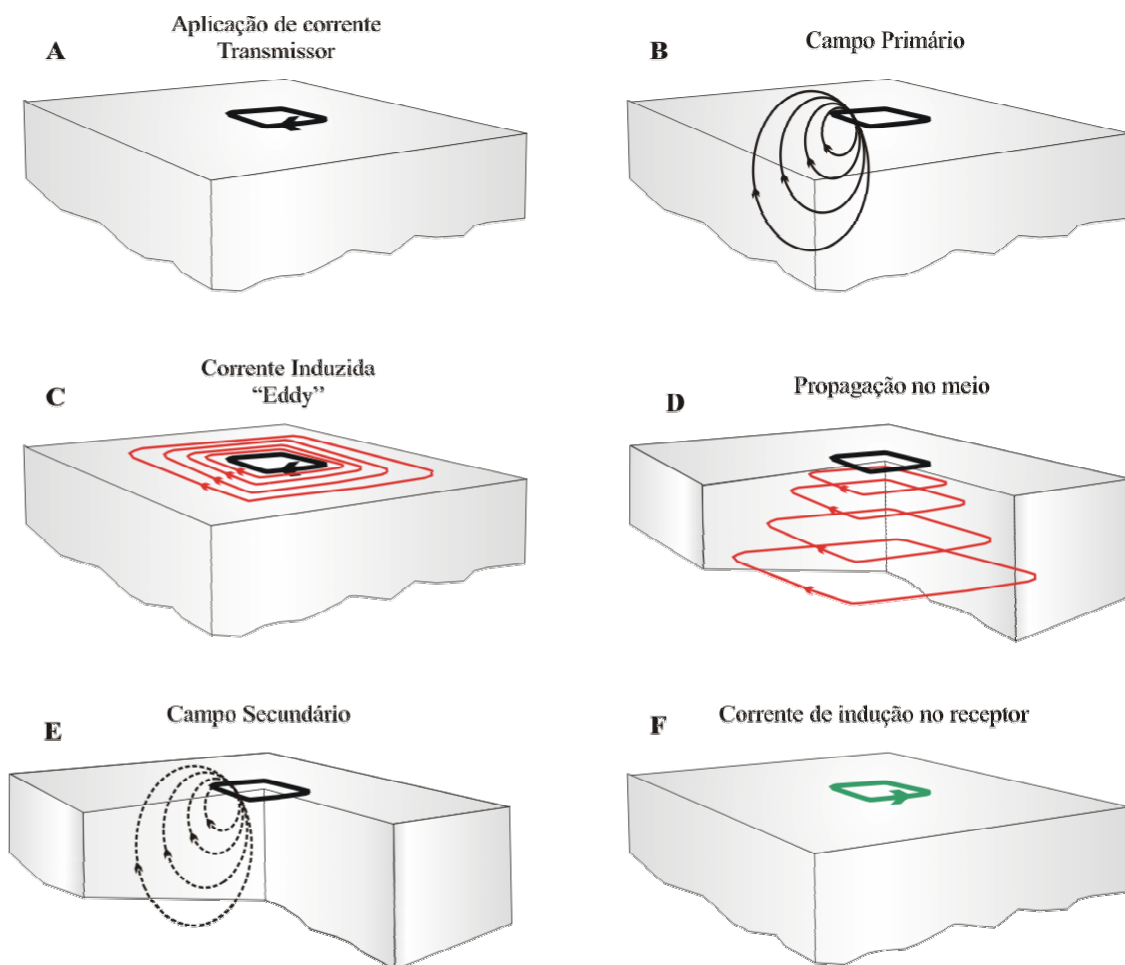


Figura 6.2 – Resposta transiente em meio com baixa polarizabilidade

Este conjunto de sondagens foi locado em pontos com maior grau de contaminação da área (Figura 6.4). O modelo geológico obtido nas sondagens elétricas apresenta quatro níveis, cujos três primeiros apresentam sucessiva redução nos valores de resistividade, seguidos pelo quarto nível, caracterizado por pequeno aumento de resistividade.

A sucessiva redução nos valores de resistividade, atribuídas ao aumento na quantidade de íons no meio, é acompanhada, em contrapartida, pelo aumento de cargabilidade, ou seja, capacidade de polarização. Esta constatação é confirmada nos reduzidos valores de resistividade que se sucedem nos três níveis definidos pelas sondagens eletromagnéticas respectivas (Tabela 6.1).

A cargabilidade do 3º nível geológico no local da SEV-3 é elevada ao ponto de não ser possível definir o 4º nível geológico por meio das sondagens eletromagnéticas LG-3 e LH-1, devido ao enfraquecimento da resposta transiente (Tabela 6.1).

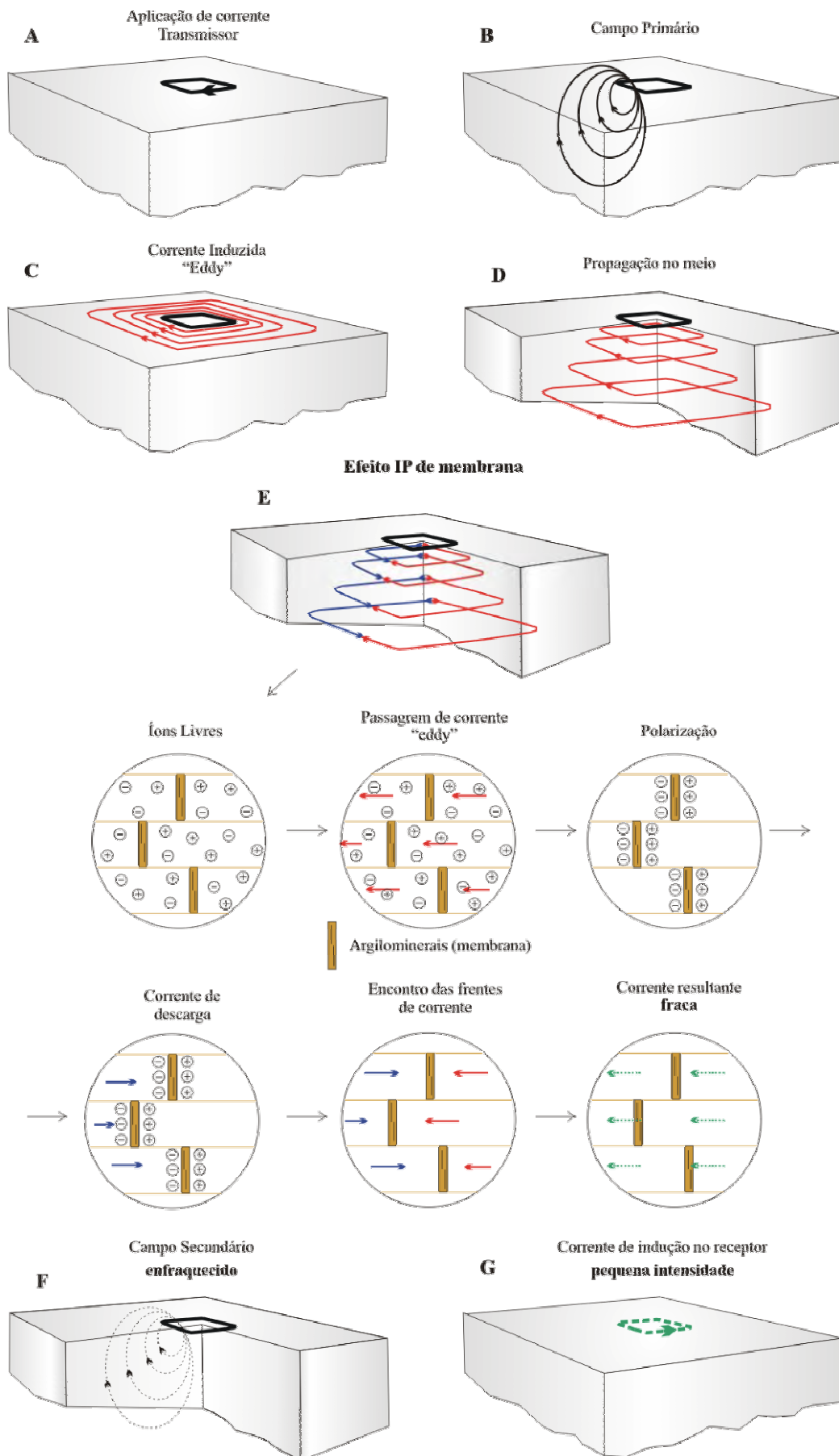


Figura 6.3 – Resposta transiente em meio com elevada polarizabilidade

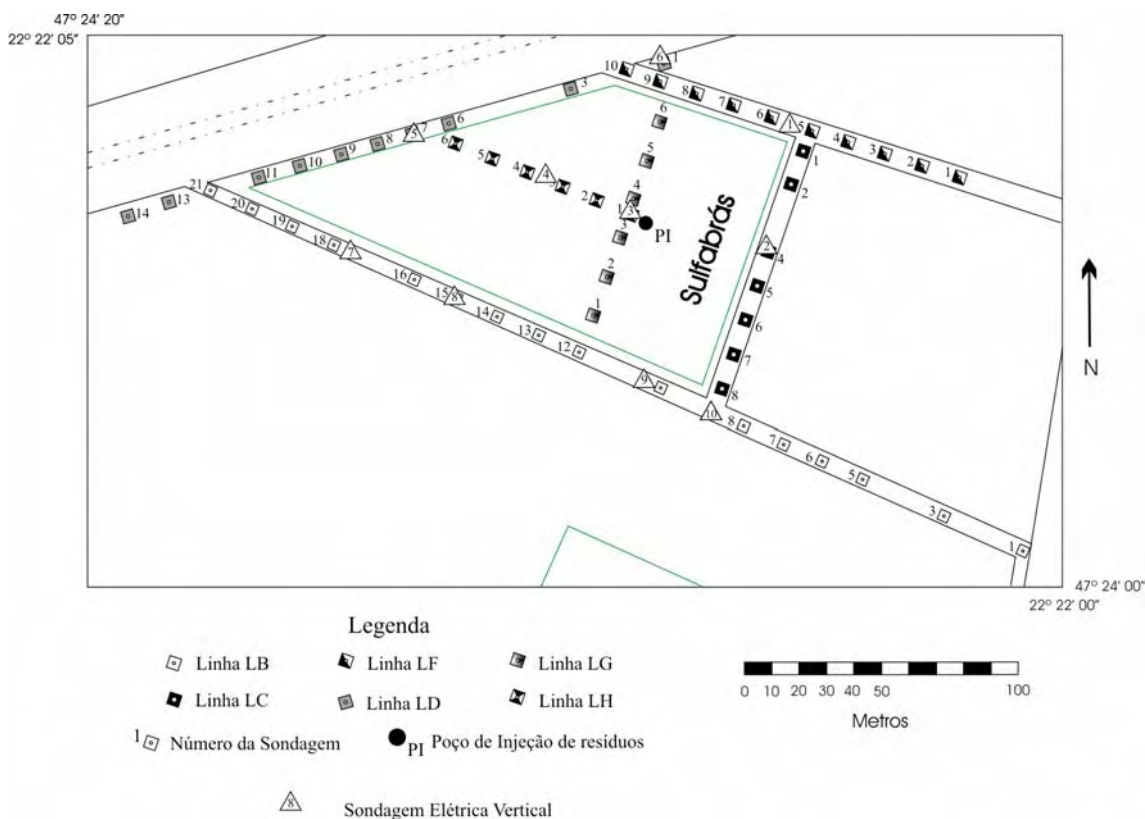


Figura 6.4 – Localização das Sondagens Eletromagnéticas e Sondagens Elétricas Verticais

6.2 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GRÁFICOS DE RESISTIVIDADE E MODELOS DE INVERSÃO

A análise das informações contidas nos gráficos gerados a partir das sondagens eletromagnéticas, revela a existência de uma mesma tendência de valores quando comparados aos modelos de inversão do caminhamento elétrico, apesar de diferenças nos valores resistividade discutido anteriormente.

Para a linha LB foram gerados gráficos de resistividade para 5, 10 e 15m de profundidade (Figuras VI.2, VI.3 e VI.4). No nível 5m há redução da resistividade entre as sondagens LB-3 e LB-16 (Figura VI.2). No nível 10m há redução da resistividade entre as sondagens LB-12 e LB-7 (Figura VI.3). Quanto ao nível -15m, há um intervalo entre as sondagens LB-8 e LB-7 com baixa resistividade (Figura VI.3).

O modelo de inversão para a linha LB (Figura VI.5) apresenta um intervalo de baixa resistividade, entre 160 e 250m do início da linha. Esta anomalia apresenta formato próximo ao de um trapézio, com base maior na profundidade de 13,5m e base entre as sondagens LB-15 e LB-16 e entre LB-9 e LB-10, com pequeno aumento entre

ambos os intervalos. Já em 15m, há redução na resistividade entre LB-14 e LB-8 com aumento em LB-10. Lateralmente esta anomalia apresenta aumento gradual da resistividade no sentido da rodovia (Figura 6.5).

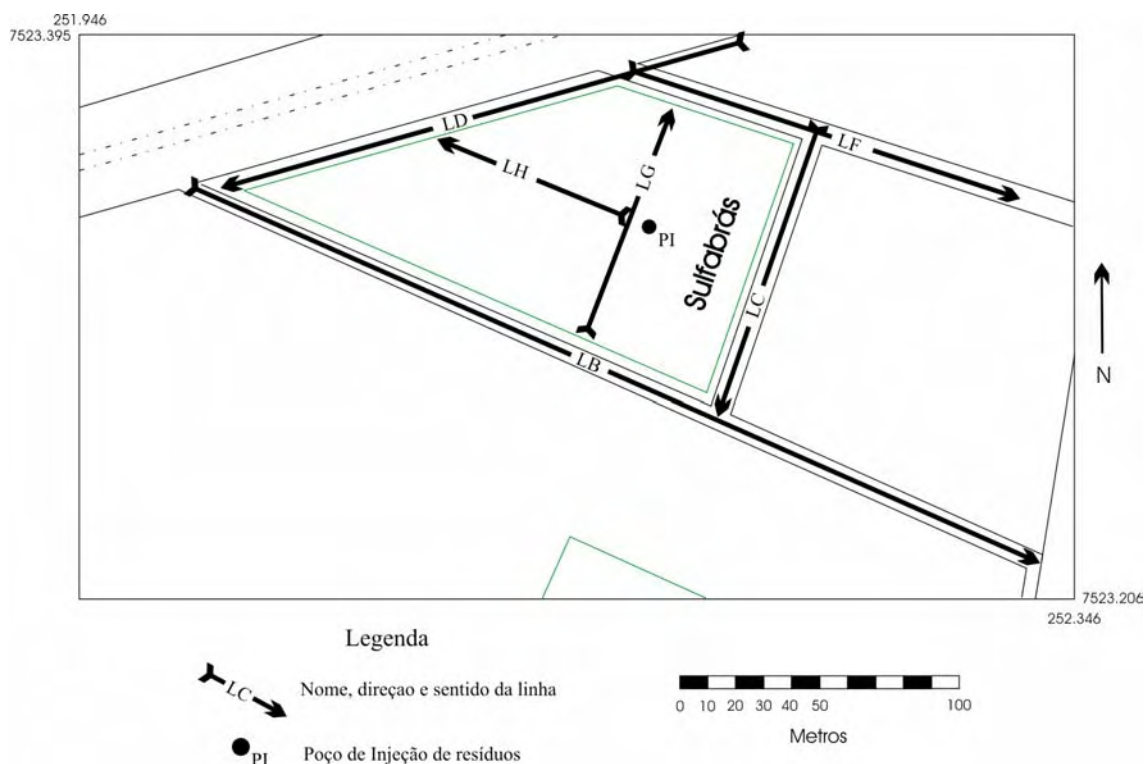


Figura 6.5 – Linhas de Caminhamento Elétrico

Para a linha LC foram gerados gráficos de resistividade para as profundidades de 5, 10 e 15 metros (Figuras VI.6, VI.7, VI.8). No nível 5m há uma redução acentuada da resistividade entre as sondagens LC-01 e LC-04 e valores mínimos entre LC-05 e LC-07 (Figuras VI.6). Nos níveis 10 e 15m há um corpo de baixa resistividade entre LC-01 e LC-05, com aumento entre LC-05 e LC-07 e nova redução nos valores em LC-08 (Figuras VI.7, VI.8).

O modelo de inversão para a linha LC (Figura VI.9) apresenta um intervalo de resistividade moderada a baixa, com início no ponto 50m e continuidade sentido ao final da linha. Este intervalo configura um corpo de baixa resistividade com tendência de redução nos valores de resistividade sentido ao final da linha - SW, cujo pontos de menor valor – 55m e 85m, coincidem com as sondagens LC-04 e LC-08.

Para a linha LD foram gerados mapas de resistividade para as profundidades de 5, 10, e 15 metros (Figuras VI.10, VI.11, VI.12).

Esta linha é ladeada por uma linha de alta tensão, a partir da qual saem ramais para abastecimento das indústrias presentes da área. A aquisição nas proximidades desta linha resultou em dados pouco confiáveis, pois a indução de campo magnético na linha de alta tensão a partir do equipamento TEM, resultou em um campo magnético indesejável, que é captado pela bobina receptora em conjunto com o campo magnético secundário induzido no meio geológico, cujo resultado são curvas de resistividade aparente irreais.

Desta forma, os intervalos de baixa resistividade presentes no gráfico do nível 5m, precisamente entre as sondagens LD-7 e LD-11 (Figura VI.10), em conjunto com os intervalos entre as sondagens LD-4 e LD-6 nos gráficos para os níveis 10 e 15m (Figuras VI.10, VI.11) resultam do processo descrito acima, justamente por ambos os intervalos estarem sob ligações para ramais elétricos.

O modelo de inversão resultante dos dados de caminhamento elétrico para a linha LD (Figura VI.13) apresenta um intervalo de baixa resistividade entre 80 a 130m do início da linha, sobreposto por níveis bastante resistivos a partir de 8,50m de profundidade. Lateralmente tende a uma mudança gradual de resistividade para o início da linha e levemente mais acentuado no sentido da final da linha. Assim, os dados do caminhamento elétrico para a linha LD não foram afetados pela linha de alta tensão, e define uma anomalia de baixa resistividade.

Para a linha LF foram gerados mapas de resistividade para as profundidades de 5, 10 e 15 metros (Figuras VI.14, VI.15, VI.16).

Os gráficos de resistividade apresentam intervalos de alta e de baixa resistividade erráticos e sem relação com a área contaminada. Esta linha apresenta transformador elétrico em seu início, cruza uma linha de alta tensão, passa próximo de um segundo transformador elétrico – cruzamento com linha LC, e ladeia uma fundição abandonada repleta de sucatas, estruturas metálicas e pilhas de areia de fundição usada.

Desta forma, os intervalos anômalos descritos nos mapas de resistividade para a linha LF também são fruto da interação do campo magnético produzido pelo equipamento TEM com a rede elétrica e outras estruturas descritas no local. Portanto, os resultados não refletem os valores reais de resistividade da linha LF.

O modelo de inversão para a linha LF (Figura VI.17) apresenta um intervalo de alta resistividade entre 40 e 55m em contato lateral com níveis bem menos resistivos, sobrepostos por um intervalo de alta resistividade a partir do nível 11m de profundidade. Em superfície, este intervalo coincide com um transformador elétrico

que, aparentemente não influenciou nos resultados e devido à ausência de evidências que relacionem esta anomalia a pluma de contaminação da área da indústria Sulfabrás ou outros indícios que corroborem em esclarecer sua proveniência, esta seção também é desconsiderada na análise do comportamento dos contaminantes.

Para a linha LG foram gerados gráficos de resistividade para as profundidades de 5, 10 e 15m (Figuras VI.18, VI.19, VI.20). A semelhança nos gráficos para as profundidades de 5 e 10m indicam um comportamento homogêneo neste intervalo, com baixos valores de resistividade na porção inicial, intermediário na porção central e elevados valores na porção final da linha (Figuras VI.18, VI.19). O gráfico de resistividade para 15m apresenta valores mais elevados na porção central, que decrescem sentido as extremidades (Figuras VI.20).

O modelo de inversão para a linha LG (Figura VI.21) apresenta anomalias de alta e baixa resistividade totalmente distintas as descritas nos demais modelos, pois ambas apresentam conexão com a superfície do terreno. O intervalo de alta resistividade é limitado em sua base entre 45 e 60m do início da linha, com anomalia acentuadamente resistiva no centro com formato próximo a um triângulo de base horizontal e vértice superior sobreposto pelo poço de injeção. A anomalia de baixa resistividade começa entre 50 e 55m do início da linha, segue mergulho com gradativa redução nos valores de resistividade no sentido de início da linha. A anomalia de baixa resistividade descrita na linha LB é uma continuidade da anomalia na linha LG, ambas portanto, associadas ao poço de injeção de resíduos.

Para a linha LH foram gerados gráficos de resistividade para de 5, 10, 15 e 20m de profundidades (Figuras VI.23, VI.24, VI.25, VI.26). A semelhança nos gráficos para as profundidades de 5 e 10m indicam um comportamento homogêneo neste intervalo, com baixos valores de resistividade na porção inicial, intermediário na porção central e elevados valores na porção final da linha (Figuras VI.23, VI.24), semelhantemente ao descrito para a linha LG. O gráfico de para 15m de profundidade apresenta um amplo intervalo de elevada resistividade no centro e valores mais baixos nas extremidades, de forma mais acentuada na extremidade final da linha (Figuras VI.25). Quanto ao gráfico 20m de profundidade, também ocorre um contraste grande de resistividade, com um intervalo central com resistividade elevada, cujas extremidades apresentam valores resistividade reduzidos (Figuras VI.26).

O modelo de inversão para a linha LH (Figura VI.27) apresenta um intervalo central de alta resistividade, entre 45 e 60m limitado entre os níveis 8,5 e 13,5m por

camadas menos resistivas, que por sua vez são sobrepostas por um intervalo de elevada resistividade a partir no nível 8,5m. A tendência de aumento de resistividade entre 4 e 9m de profundidade no início da linha, está associado a uma anomalia com as mesmas características descritas na linha LG. A presença de um intervalo de alta resistividade limitado por zonas menos resistivas, na área centro-inferior da seção, aparentemente sem conexão com o poço de injeção definido na linha LG, indica a presença de um segundo ponto de injeção de resíduos, localizado em superfície entre 50 e 55m.

A anomalia de baixa resistividade descrita na linha LD (Figuras VI.10, VI.11, VI.12) pode estar associada a este segundo ponto de injeção de resíduos identificado.

6.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS NO ÂMBITO DOS PROCESSOS DE ATENUAÇÃO NATURAL

Por meio das técnicas geofísicas aplicadas na área da indústria Sulfabras, foi possível identificar anomalias de alta e baixa resistividade aparente, em relação a resistividade natural da área.

A anomalia de alta resistividade é caracterizada por valores semelhantes aos descritos em pontos ausentes de contaminação, cuja identificação é possível somente devido ao fato de estar limitada por intervalos com baixa resistividade. A identificação deste tipo de anomalia na linha LG, com seu posicionamento diretamente abaixo do ponto de injeção de resíduos, indica sua íntima associação aos compostos contaminantes.

A linha LH apresenta as mesmas características identificadas na linha LG. Portanto, é possível afirmar que ponto central imediatamente acima da anomalia de alta resistividade da linha LH foi o segundo ponto de injeção de resíduos, conforme descrito nos trabalhos de CETESB (1997) e AQUINO (2000). Os trabalhos que descrevem este segundo poço não apresentam claramente sua localização e devido à ausência de indícios de sua presença na área de estudos, este poço foi desconsiderado durante toda a execução das etapas de planejamento e aquisição dos dados.

O caráter de alta resistividade associado aos pontos de injeção de resíduos é resultado da presença de elevadas concentrações de compostos contaminantes, essencialmente orgânicos de fase líquida leve – Benzeno, Tolueno e Xileno, caracterizados por valores de resistividade aparente superiores ao da água. Estes compostos estão atualmente em fase residual - aderido aos grãos minerais do solo, e sua

permanência passados 15 anos do término de injeções é devido à imobilidade dos contaminantes nesta fase e da elevada toxicidade para ação efetiva dos processos de atenuação natural.

A anomalia de baixa resistividade ocorre basicamente em áreas periféricas aos poços de injeção de resíduos, como apresentado nas linhas LB, LC, e LF, diretamente ao redor da anomalia de alta resistividade. São caracterizadas pelo formato de trapézio em seção e por serem sobrepostas e limitadas lateralmente por intervalos com maior resistividade.

O caráter de baixa resistividade é resultados de dois processos principais. O primeiro, associado à anomalia de alta resistividade, devido à elevada mobilidade de compostos inorgânicos, representados por Cloreto, Sódio e Sulfato (ANEXO 3). De forma relativa, migração destes compostos enriquece as áreas adjacentes e empobrece a área ao redor dos poços de injeção.

O segundo e mais importante processo é produto da atenuação natural em curso na área contaminada. Os compostos orgânicos que foram injetados são divididos em fase residual e fase. A fase dissolvida apresenta alta mobilidade, pois migra quase concomitantemente ao fluxo da água subterrânea, enquanto que a fase residual representa o contaminante que impregna os grãos minerais.

Uma vez atingida a solubilidade máxima em água, a fase dissolvida tende a se dispersar e a reduzir seus teores. A partir deste momento, são criadas condições favoráveis para uma ação efetiva do processo de biodegradação, pois em teores reduzidos, os contaminantes orgânicos são pouco tóxicos aos microorganismos.

As sucessivas quebras de cadeias carbônicas resultam em cadeias menores que podem ser hidrocarbonetos como metano ou ácidos orgânicos, como o ácido carbônico ou acético (Capítulo 3). A produção sucessiva resulta no aumento das concentrações dos ácidos orgânicos no meio, que passam a corroer os minerais que constituem o meio.

A quebra de grãos minerais resulta na liberação de íons, cuja dissolução no meio aquoso possibilita o aumento da condutividade elétrica ou redução da resistividade elétrica. Por se tratarem de compostos iônicos, tais soluções apresentam alta mobilidade.

7 - CONCLUSÕES

Os dois principais objetivos propostos foram alcançados, ou seja, o estudo comparativo entre os métodos geofísicos Eletromagnético Transiente e Eletrorrestividade e a análise dos efeitos da Atenuação Natural no meio contaminado.

A análise comparativa entre os gráficos de sondagem elétrica vertical e sondagem eletromagnética revelam algumas semelhanças, como um intervalo com baixa resistividade em torno de 10 metros de profundidade. Dentre as diferenças, a mais importante diz respeito a um grande contraste nos valores de resistividade extremamente baixos obtidos em sondagens eletromagnéticas.

Este contraste pode ser explicado pelo fenômeno de polarização induzida em argilominerais (efeito IP de membrana) (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). À passagem de corrente elétrica induzida pelo trânsito do campo eletromagnético primário – corrente *eddy*, polariza grãos susceptíveis a este fenômeno – argilominerais, que, uma vez carregados eletricamente, agem como capacitores. Imediatamente, após o fluxo das correntes *eddy*, ocorre a descarga destes capacitores, por meio de correntes elétricas que fluem em sentido contrário ao das correntes *eddy*. A interação das correntes resulta numa corrente atenuada, que induz campo eletromagnético também atenuado. O potencial estimado a partir do campo eletromagnético secundário apresenta conseqüentemente valores bastante reduzidos em relação ao admitido para meios arenosos, ou seja, com baixa polarizabilidade.

Valores de potencial atenuados resultam necessariamente em valores de resistividade igualmente reduzidos, segundo demonstrado pela lei de Ohm. Contudo, em termos gerais, os valores de resistividade são proporcionais aos valores obtidos por meio dos métodos elétricos.

Quanto aos pontos com maior influência da pluma contaminante, ou seja, mais contaminados, os intervalos identificados a partir de sondagens eletromagnéticas abaixo de 10 metros estão condizentes com os dados de sondagem elétrica. Este fato pode estar associado à homogeneização da resistividade elétrica do meio devido à presença de contaminantes, que permitiu leitura para até 20 metros de profundidade (Linha LG – APÊNDICE IV).

A aplicação da técnica de sondagem eletromagnética se mostrou muito eficaz em termos gerais, pois os pontos caracterizados por reduzidos ou elevados valores de

resistividade por meio de sondagens elétricas, foram também identificados a partir de sondagens eletromagnéticas com as mesmas características, neste último a partir de valores de resistividade bastante reduzidos proporcionalmente.

A análise comparativa entre os gráficos de resistividade e os modelos de inversão de caminhamento elétricos apresentam muitas semelhanças.

Nas linhas de aquisição mais distantes dos poços de injeção foram identificadas anomalias de baixa resistividade por ambas as técnicas. Por outro lado, nas linhas próximas aos poços de injeção, foram identificadas anomalias de alta resistividade.

Entretanto, o estrato correspondente à zona não saturada definido a partir de sondagens elétricas, não está presente nas sondagens eletromagnéticas.

Segundo Geonics (1998) e Schmutz et al (2000), o sistema PROTEM 47 foi desenvolvido para investigações entre 3 a 150 metros de profundidade a partir de *loops* transmissores entre 5 x 5 e 100 x 100 metros. Desta forma, a ausência do estrato correspondente à zona não saturada nos gráficos de sondagem eletromagnética é atribuída a esta limitação de equipamento.

A aquisição de dados em campo pelo método Eletromagnético Transiente revelou vantagens e desvantagens em relação ao método de Eletrorresistividade.

A principal vantagem está no arranjo utilizado – loop 5 x 5m, que permite leituras de resistividade aparente em áreas onde seriam inviáveis aquisições com a técnica de sondagem elétrica vertical. A rapidez e versatilidade na montagem do arranjo e leitura do equipamento permitiram a realização do dobro sondagens para o mesmo período de trabalho em relação á técnica de sondagem elétrica vertical.

A principal desvantagem do método é sua susceptibilidade a interferências muito comuns no meio urbano, como linhas de alta tensão, transformadores e motores elétricos. Este fator resultou na exclusão de duas linhas de aquisição – linhas LD e LF (APÊNCIDE III), além de algumas sondagens nas demais linhas durante a etapa de processamento dos dados, devido a porcentagem elevada de erro.

Contudo, a grande maioria das sondagens eletromagnéticas apresentou erro médio de 3%, enfatizando a eficiência dos filtros do equipamento quando utilizado a uma distância segura de tais interferências. Este distanciamento, por sua vez, pode em alguns casos inviabilizar a utilização deste equipamento.

Portanto, a aplicação do método eletromagnético transiente é viável em meio urbano, conforme provado neste trabalho – realizado em um distrito industrial, mas

inviável em pontos que estejam próximos a linhas de alta tensão, transformadores e motores elétricos em funcionamento.

A vasta área de abrangência do corpo de baixa resistividade, em comparação aos corpos de alta resistividade associados aos poços de injeção de resíduos, é um indicativo da atuação dos processos de Atenuação Natural em curso na área contaminada.

O corpo de baixa resistividade é resultado da presença de íons dispersos principalmente na zona saturada do perfil de alteração, em quantidades superiores aos que ocorrem naturalmente na área, cujo contraste permitiu sua determinação a partir do parâmetro resistividade elétrica. Estes íons são produto da corrosão de grãos minerais que compõem o meio, por ataque de ácidos orgânicos, como o ácido carbônico, conforme apresentado no capítulo 3.

Estes ácidos, por sua vez, são fragmentos de cadeias de hidrocarbonetos produzidas por sucessivas quebras por ação de microorganismos, que utilizam receptores elétricos em processos de redução, para obtenção de energia. O principal receptor elétrico disponível na área é o Fe^{3+} , sob a forma de concreções ferruginosas, descritas em horizontes de solo da área.

O processo de redução de Fe^{3+} pode resultar em neoformação de minerais, como cristais de magnetita (FeO), descrita em diversos estudos em áreas contaminadas (Lovley, 1990; Elmore et al, 1987; McCabe et al, 1987), principalmente em locais sob estritas condições anaeróbicas. Desta forma, a presença de cristais de magnetita também contribui para redução nos valores de resistividade aparente nas áreas adjacentes aos poços de injeção de resíduos.

Por outro lado, a área de abrangências das anomalias de alta resistividade, praticamente associadas ao entorno dos poços de injeção, indica elevados teores de contaminação, pois a alta toxicidade não permite o ataque de microorganismo.

A caracterização das anomalias de alta resistividade foi possível devido à presença de anomalias de baixa resistividade em redor, pois o contraste de resistividade com o meio não contaminado é pequeno. A detecção de tais anomalias em ausência do meio condutivo em redor poderia ser dificultada.

Desta forma, por meio das técnicas geofísicas, foi possível identificar um segundo poço de injeção de resíduos, localizado nas proximidades do primeiro poço.

A conjunção de fatores necessários para a ação dos processos de Atenuação Natural, ou seja, disponibilidade de receptores elétricos, condições adequadas de Ph e

eH, contaminantes em baixos teores e principalmente, baixos valores condutividade hidráulica em meio poroso, presentes na área de estudos, permitiu redução nas dimensões da área contaminada após 15 anos de seção das infiltrações, com reflexo direto na resistividade elétrica do meio.

Os resultados deste trabalho servem de base para a realização de estudos futuros na área, referentes á análise dos tipos de compostos produzidos durante o processo de atenuação natural.

As condições geoquímicas e os processos de biodegradação de solventes clorados e hidrocarbonetos de petróleo em áreas onde ocorrem naturalmente elementos como manganês, arsênio, dentre outros, retidos em matéria orgânica ou argilominerais por exemplo, pode acentuar a mobilidade destes metais e/ou torná-los mais tóxicos que os produtos originais, principalmente por alterações no pH (EPA, 1998) Estes elementos apresentam elevado risco à saúde humana, como causadores de doenças neurológicas, cardíacas e tumores, revelando a necessidade do monitoramento também destes elementos a partir de análises químicas do solo e da água subterrânea.

Devem também, ser analisados os compostos orgânicos produzidos pela quebra dos contaminantes, pois, muitas vezes, estes podem ser tão ou mais tóxicos que os compostos originais. Diversos trabalhos descrevem o cloreto de vinila como subproduto da degradação de solventes clorados, representado na área por 1,2 dicloroetano (EPA, 1995, 1998, 2000). O cloreto de vinila é um produto altamente cancerígeno e representa um risco em potencial quando presentes no solo e águas subterrâneas.

Em resumo, deverão ser avaliados os verdadeiros benefícios do processo de atenuação natural e o grau atual de risco a saúde das populações residentes no entorno na área da indústria Sulfabrás.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; NEVES, B. B. de B.; FUCK, R. A. - **Províncias Estruturais e Brasileiras**. Atas do 8º Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande-PB, p. 363-391, 1977

ADEPELUMI, A. A.; AKO, B. D.; AJAYI, T. R. **Groundwater contamination in the basement-complex area of Ile-Ife, southwestern Nigeria: A case study using the electrical-resistivity geophysical method**. Hydrogeology Journal, nº 9, p. 611 – 622, 2001.

ALBOUY, Y.; ANDRIEUX, P.; RAKOTONDRA SOA, G.; RITZ, M.; DESCLOITRES, M.; JOIN, J. L.; RASOLOMANANA, E. **Mapping Coastal Aquifer by Joint Inersion of DC and TEM Soundings-Three Case Histories**. Ground Water, vol. 39, no. 1, p. 87 – 97, 2001.

AQUINO, W. F. **Métodos Geofísicos Eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação de Solo e das Águas Subterrâneas em área de Infiltração de Resíduos Industriais**. 2000, 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

ARISTODEMOU, E; THOMAS-BETTS, A. **DC resistivity and induced polarisation investigation at a waste disposal site and its environments**. Journal of Applied Geophysics, nº 44, p. 275 – 302, 2000.

AZADPOUR-KEELEY, A.; RUSSELL, H. H.; SEWELL, G. W. **Microbial processes affecting monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface**. Ground Water Issue, Ada, Oklahoma, EPA/540/S-99/001, 1999.

BAEDECKER, M. J. & BACK, W. **Modern marine sediments as a natural analog to the chemically stressed environment of a landfill**. Journal of Hidrogeology, vol. 43, p. 393-414, 1979.

BARTH, T & RIIS, M. **Interactions between organic acid anions in formation waters and reservoir mineral phases.** Organic Geochemistry, n° 19 , p 455-482, 1992.

BAZYLINSKI, D. A. **Controlled biomineralization of magnetic minerals by magnetotactic bacteria.** Chemical Geology, vol 132, p. 191 – 198, 1996.

BELLER, H. R.; GRBIC-GALIC, D.; REINHARD, M. **Microbial Degradation of Toluene under Sulfate-Reducing Conditions and the Influence of Iron on the Process.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 58, n° 3, p. 786 – 793, 1992.

BENNETT, P. & SIEGEL, D. I. **Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds.** Nature, vol. 326, p. 684 – 686, 1987.

BENNETT, P. C.; HIEBERT, F. K.; CHOI, W. J. **Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater.** Chemical Geology, vol 132, p. 45 – 53, 1996.

BENNETT, P. C.; SIEGEL, D. E.; BAEDECKER, M. J.; HULT, M. F. **Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer-I. Hydrogeology and inorganic geochemistry.** Applied Geochemistry, vol 8, p. 529 – 549, 1993.

BENNETT, P. C.; SIEGEL, D. E.; HILL, B. M.; GLASER, P. H. **The fate of silicate minerals in a peat bog.** Geology, vol. 19, 328-331, 1991.

BENSON, A. K.; PAYNE, K. L.; STUBBEN, M. A. **Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods – A case study.** Geophysics, vol. 62, no. 1, p. 80 – 86, 1997.

BORDEN, R. C.; GOMEZ, C. A.; BECKER, M. T. **Geochemical Indicators of Intrinsic Bioremediation.** Ground Water, vol. 33, n°2, 1995

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geométricos Aplicados**. Apostila do curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Rio Claro (SP), 1999.

BRIGHETTI, J. M. P. **Faciologia dos sedimentos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. 1994. 124 f.

BRINO, W. C. **Contribuição à definição climática da bacia do Corumbataí e adjacências (SP), dando ênfase à caracterização dos tipos de tempo**. Tese de Doutorado, FAFI – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Rio Claro – SP, 1973.

BUSELLI, G.; LU, K. **Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods**. *Journal of Applied Geophysics*, 48, p. 11 – 23, 2001.

BUSELLI, G., BARBER, C., DAVIS, G. B. & SALAMA, R. B. **Detection of Groundwater Contamination Near Waste Disposal Sites with Transient Electromagnetic and Electrical Methods**, in: S. H. Ward, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. II, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, p. 27-39. 1990

BURLAND, S. M. & EDWARDS, E. A. **Anaerobic Benzene Biodegradation Linked to Nitrate Reduction**. *Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology*, vol 65, nº 2, p. 529 – 533, 1999.

CERNIGLIA, C. E. **Microbial metabolic polycyclic aromatic hydrocarbons**, IN: *Advances in Applied Microbiology*, A. Laskin (ed.), New York: Academic Press, p. 31 – 71, 1984.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório do levantamento geofísico para diagnóstico da contaminação da indústria Sulfabrás**, São Paulo: CETESB, 91p., 1997.

CHOUDHURY, K.; SAHA, D. K.; CHAKRABORTY, P. **Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain**. Journal of Applied Geophysics, 46, p. 189 – 200, 2001.

COZZARELLI, I. M.; BAEDECKER, M. J.; HOPPLE, J. A.; FRANKS, J. B. **Significance of creosote degradation on the geochemistry of a surficial aquifer**. Abstract Geological Society American, abstract n° 629, 1988.

CPRM . **Mapa Geológico do Município de Araras, escala 1:100.000**. In: Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração Geológica e Avaliação Econômica. Relatório Final, volume II, anexos, 1986.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Diretoria de Planejamento e Controle. **Estudo das águas Subterrâneas – Região Administrativa 5 – Campinas**, São Paulo, 444 p, 1981.

DAEMON, R. F. & QUADROS, L. P.. **Bioestratigrafia do Neo-Paleozóico da Bacia do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34°. 1970. Anais, Brasília: Brasileiro de Geologia, Núcleo Brasília, v. 2, p. 335-412, 1970.

DAVIS, J. L. & ANANN, A. P. **Ground-penetration radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophys. Prospect. , n° 37, p. 531- 551, 1989.

DONOVAN, T. J.; FORGEY, R. L.; ROBERTS, A. A. **Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields**. Bulletins of American Association of Petrology Geology, vol 63, p. 245 – 248, 1978.

EDWARDS, E. A. & GRBIC-GALIC, D. **Anaerobic Degradation of Toluene and o-Xylene by a Methanogenic Consortium.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 60, nº 1, p. 313 – 322, 1994.

EHRlich, H. L. **How microbes influence mineral growth and dissolution.** Chemical Geology, vol 132, p. 5 – 9, 1996.

ELMORE, R. D.; ENGEL, M. H.; CRAWFORD, L.; NICK, K.; IMBUS, S.; SOFER, Z. **Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite.** Nature, vol. 325, p. 428 – 430, 1987.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1995. Chapter IX: **Natural attenuation. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers.** Washington DC, EPA/510/B-95/007. Acessado em <http://www.epa.gov> , em maio/2003.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1999a. **Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and Underground Storage Tank sites.** Office of Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200.4 - 17p. Acessado em <http://www.epa.gov> , em junho 2004.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1999b. **Microbial Processes Affecting Monitored Natural Attenuation of contaminants in the Subsurface.** Ada, Oklahoma, EPA/540/S-99/001. Acessado em <http://www.epa.gov> , em agosto/2003.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 1998. **Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water.** Washington DC, EPA/600/R-98/128. Acessado em <http://www.epa.gov>, em novembro/2003.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Primary Drink Water Standards.** Washington: EPA. June 2003. Disponível em: <http://www.epa.gov/safewater>. Acesso em 22/ set/ 2003.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 2004. **Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and Underground Storage Tank sites.** Office of Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200. p. 4 - 17, Chapter IX Monitored Natural Attenuation, final version. Acessado em <http://www.epa.gov> , em junho/2004.

EVANS, P. J.; MANG, D. T.; KIM, K. S.; YOUNG, L. Y. **Anaerobic Degradation of Toluene by a Denitrifying Bacterium.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 57, nº 4, p. 1139 – 1145, 1991.

FRANGOS, W. **Electrical detection of leaks in lined waste disposal ponds.** Geophysics, vol. 62, no. 6, p. 1737 – 1744, 1997.

FROHLICH, R. K.; URISH, D. W. **The use of geoelectrics and test wells for the assessment of groundwater quality of a coastal industrial site.** Journal of Applied Geophysics, 50, p. 261 – 278, 2002.

GAMA JR., E. G.. **A sedimentação do Grupo Passa Dois (inclusive Formação Irati) um modelo geomórfico.** Revista Brasileira de Geociências. 9(2): 1-16, 1979.

GEONICS. **Geonics PROTEM Time Domain Sistem.** Geonics Limited. p. 2, 1998.

GRBIC-GALIC, D. & VOGEL, T. M. **Transformation of Toluene and Benzene by Mixed Methanogenic Cultures.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 53, nº 2, p. 254 – 260, 1987.

HARTER, R. D. **Reactions of minerals with organic compounds in soil. Minerals in Soil Environments,** Soil Science Society of America, 1977.

HIEBERT, F. K. & BENNETT, P. C. **Microbial Control of Silicate Weathering in Organic-Rich Ground Water**. Science: American Association for the Advancement of Science, vol. 258, p. 278 – 281, 1992.

HULING, S. G. & WEAVER, J. W. **Dense Nonaqueous Phase Liquids**. Ground Water Issue. Environmental Protection Agency, EPA/540/4-91-002, p. 21, 1991

HUTCHINS, S. R. **Optimizing BTEX Biodegradation under denitrifying conditions**. Environmental Toxicology Chemistry, vol 10, p. 1437 – 1448, 1991.

HUTCHINS, S.R. **Biodegradation of Monoaromatic Hydrocarbons by Aquifer Microorganisms Using Oxygen, Nitrate, or Nitrous Oxide as the Terminal Electron Acceptor**. Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 57, nº 8, p. 2403 – 2407, 1991.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo. 94 pg., escala 1:500.000, 2v., 1981.

JUHASZ, A. L. & NAIDU R. **Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo[a]pirene**. International Biodeterioration & Biodegration, nº45, p 57-88, 2000.

KELLER, G. V. **Electromagnetic methods in applied geophysics**. Investigations in Geophysics, vol. 1, chapter 2, 1987.

KUHN, E. P.; ZEYER, J.; EICHER, P.; SCHWARZENBACH, R. P. **Anaerobic degradation of alkylated benzenes in denitrifying laboratory aquifer columns**. Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 54, p. 940 – 946, 1988.

LEAHY, J. G.; BYRNE, A. M.; OLSEN, R. H. **Comparison of Factors Influencing Trichloroethylene Degradation by Toluene-Oxidizing Bacteria.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 62, nº 3, p. 825 – 833, 1996.

LANDIM, P. M. B., SOARES, P. C., GAMA Jr., E.. **Estratigrafia do nordeste da Bacia do Paraná.** 1980. Rio Claro: IPT-UNESP. 45p. (Curso de Especialização).

LIMA, O. A.; SATO, H. K.; PORSANI, M. J. **Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques.** Journal Applied Geophysics,34, p. 93–108, 1995.

LLOYD, D. **Aerobic denitrification in soils and sediments: from fallacies to facts.** Trends Ecology Evolution, vol. 8, p. 352 – 356, 1993.

LOVLEY, D. R. **Anaerobes to the Rescue.** Science: American Association for the Advancement of Science, vol. 293, p. 1444 – 1446, agosto/2001. Acessado em <http://www.sciencemag.org>, em junho/2003.

LOVLEY, D. R.; BAEDECKER, M. J.; LONERGAN, D. J.; COZZARELLI, I. M.; PHILLIPS, E. J. P.; SIEGEL, D. I. **Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction.** Nature, vol. 339, p. 297 – 300, maio/1998.

LOVLEY, D. R.; COATES, J. D.; WOODWARD, J. C.; PHILLIPS, E. J. P. **Benzene Oxidation Coupled to Sulfate Reduction.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 61, nº 3, p. 953 – 958, 1995.

LOVLEY, D. R. **Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) Reduction.** Microbiological Reviews: American Society for Microbiology, vol 55, nº 2, p. 259 - 287, junho/1991.

LOVLEY, D. R. **Magnetite formation during microbial dissimilatory iron reduction.** P. 151 – 166, IN: R.B. Frankel and R. P. Blakemore (ed.), Iron biominerals.

LOVLEY, D. R. & PHILLIPS, E. J. P. **Requeriment for a Microbial Consortium to Completely Oxidize Glucose in Fe(III)-Reducing Sediments.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 55, n° 12, p. 3234 – 3236, 1989.

LOVLEY, D. R.; BAEDECKER, M. J.; LONERGAN, D. J.; COZZARELLI, I. M.; PHILLIPS, E. J. P.; SIEGEL, D. I. **Oxidation of aromatic contaminants coupled to micrococial iron reduction.** Nature, vol 339, p. 297 – 299, 1989.

McALLISTER, P. M.; CHIANG, C. Y. **A Practical approach to evaluating Natural Attenuation of Contaminants in Groundwater.** Groundwater Monitoring Rewiev, vol 14, n° 2, p. 161-173, 1994.

McCABE, C.; SASSEN, R.; SAFFER, B. **Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil.** Geology, vol 15, p. 7 – 10 , 1987.

McMAHON, P.B.; VROBLESKY, D. A.; BRADLEY, P. M.; CHAPELLE, F. H.; GULLETT, C. D. **Evidence for Enhanced Mineral Dissolution in Organic Acid-Rich Shallow Ground Water.** Ground Water , vol 33, n ° 2 , p. 207 – 216, 1995.

McMAHON, P.B. & CHAPELLE, F. H. **Microbial production of organic acids in aquitard sediments and its role uin aquifer geochemistry.** Nature, vol 349, p. 233 – 235, 1991.

McNEILL J. D. **Applications of Transient Eletromagnetic Techniques,** Geonics Limited, Technical Note n°7, pp. 17, 1980, Acessado em <http://www.geonics.com>, em março/2004.

MEJU, M. A.; FENNING, P. J.; HAWKINS, T. R. W. **Evaluation of small-loop transient electromagnetic sounding to locate the Sherwood Sandstone aquifer and confining formations at well sites in the Vale of York, England.** Journal of Applied Geophysics, 44, p. 217 – 236, 2000.

MILL, T.; HOESKSTRA, P.; BLOHM, M.; EVANS, L. **Time Domain Elettromagnetic Sounding for Mapping Sea-Water Intrusion in Monterey County, California,** Ground Water, vol. 26, nº6, p. 771-782, 1988.

MOREIRA, C. A. & DOURADO, J. C. **Análise Temporal de Pluma de Contaminação por meio de GPR,** In: SBGf, 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and 5th Latin American Geophysical Conference, Rio de Janeiro (RJ), 2003.

NABIGHIAN, N. M. **Quasi-static transient response of a conducting half-space – an approximate representation.** Geophysics, vol. 44, p. 1700-1706, 1979.

NABIGHIAN, N. M.; MACNE, J. C. **Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods.** IN: Electromagnetic methods in applied geophysics- Applications part A and part B. Investigations in Geophysics, chapter 6, 1991.

NARDY, A. J. R. **Geologia e Petrologia do Vulcanismo Básico Mesozóico da Região Central da Bacia do Paraná.** 1995. 316 f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.

NEWELL, C. J; ACREE, S. D.; ROSS, R. R.; HULING, S. G. **Light Nonaqueous Phase Liquids.** Ground Water Issue. Environmental Protection Agency, EPA/540/S-95/500, pp. 28, 1995.

NOWROOZI, A. A.; HORROCKS, S. B.; HENDERSON, P. **Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey.** Journal of Applied Geophysics, 42, p. 01 – 22, 1999.

OLIVEIRA, J.B., BARBIERI, J.L., ROTTA, C.L., TREMOICOLDI, W. A. **Levantamento Pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: quadrícula Araras**. Campinas: Convênio EMBRAPA/CPA/IA, escala 1:100.000, 1981.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**, Biblioteca Técnica Philips, Madrid: Paraninfo, 523 p, 1972.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica por Campos Variables**, Biblioteca Técnica Philips, Madrid: Paraninfo, 571p, 1973.

PARKIN, T. B. & TIEDJE, T. M. **Application of a soil core method to investigate the effect of oxigen concentration on denitrification**. Soil Biological and Biochemistry, vol 16, p. 331 – 334, 1984.

PIWONI M. D. & KEELEY, J. W. **Basic concepts of contaminant sorption at hazardous waste sites**. Ground Water Issue, EPA/540/4-90/053, U.S.EPA, R.S. Kerr Enviroment Resource Labor., Ada, OK, 7p, 1990.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. vol. 3, 6º ed., editora LTC, 2003.

RABUS, R. & HEIDER, J. **Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria**. Archives in Microbiology, vol 170, p. 377 – 394, 1998.

SANDERSEN, P. B. E. & JORGENSEN, F. **Buried Quaternary valleys in western Denmark – occurence and inferred implications for grounwater resources and vulnerability** . Journal of Applied Geophysics, 53, p. 229 – 248, 2003.

SCHNEIDER, R. L., MÜHLMANN, H., TOMMASI, E., MEDEIROS, R. A., DAEMON, R. F., NOGUEIRA, A. A.. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In:

Congresso Brasileiro De Geologia, 28°. Anais, Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Rio Grande do Sul, v. 1, p. 41-64. 1974.

SHERIFF, E. R. **Geophysical Methods**, Prentice Hall, p 192-200, 1989.

SCHMUTZ, M.; ALBOUY, Y.; GUÉRIN, R.; MAQUAIRE, O.; VASSAL, J.; SCHOTT, J. J.; DESCLOITRES, M. **Joint Electrical and Time Domain Elettromagnetism (TDEM) data inversion applied to the super sauze earthflow (France)**. Surveys in Geophysics, nº 21, pg 371-390, 2000.

SIMS, J. L.; SUFLITA, J. M.; RUSSELL, H. H. **Reductive Dehalogenation of Organic Contaminants in Soils and Ground Water**. EPA - United States Environmental Protection Agency. 1991. Ada, Oklahoma, EPA/540/4-90/054. Acessado em <http://www.epa.gov>, em agosto/2003.

SHTIVELMAN, V. & GOLDMAN, M. **Integration of shallow reflection seismics and time domain electromagnetics for detailed study of the coastal aquifer in the Nitzanim area of Israel**. Journal of Applied Geophysics, 44, p. 197 – 215, 2000.

SOARES, P. C. **O Mesozóico gondwânico no Estado de São Paulo**. 1973. 260f.. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.

SOUZA, M. O. L. **Caracterização estrutural do Domo de Pitanga-SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. 121 f.1997.

SOVIK, H.; ALFNES, E.; BREEDVELD, G. D.; FRENCH, H. K.; PEDERSEN, T. S.; AAGAARD, P. **Transport and degradation of Toluene and o-Xylene in an Unsaturated Soil with Dipping Sedimentary Layers**. Journal Environmental Quality, vol 31, p. 1809 – 1823, 2002.

STOESSEL R. K. & PITTMAN, E. D. **Secondary porosity resisited: The chemistry of feldspar dissolution by carboxylic acids and anions.** American Association of Petroleum Geology, vol. 74, p 1795-1805, 1990.

SURDAM , R. C. & MacGOWAN, D. B. **Oilfield waters and sandstone diagenesis.** Applied Geochemical, vol. 2, p 613-619, 1987.

SWIFT, C. M. Jr. Fundamentals of the Electromagnetic Method. IN: **Electromagnetic methods in applied geophysics.** Investigatiosn in Geophysics, vol. 1, chapter 1, 1987.

TEZKAN, B.; GOLDMAN, M.; GREINWALD, S.; HORDT, A.; MULLER, I.; NEUBAUER, F. M.; ZACHER, G. **A joint application of radiomagnetotellurics and transient electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany),** Journal of Applied Geophysics, 34, p 199-212, 1996.

TONETTO, E. M. **Hidroquímica em aquíferos de Rio Claro (SP) e adjacências.** 2001. 108 p. Tese (Doutorado) Pós-Graduação em Geociências Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

THOMAS, J. M. & WARD, C. H. **In situ biorestitution of organic contaminants in the subsurface.** Environ. Sci. Technol., nº 23, pg. 760-766, 1989.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations.** Engineers and Design. Department of the Army, USA, chapter 4, 1995. EM 1110-1-1802. Disponível em: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-1-1802/entire.pdf>
Acesso em 20/maio/ 2005.

VOGELSANG, D. **Environmental Geophysics,**Hannover,Spring-Verlag, , p.20-30, 1995

WARD, S. H. & HOFMANN, G. W. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. IN: **Electromagnetic methods in applied geophysics**. Investigations in Geophysics, vol. 1, chapter 4, 1987.

WEINER, J. M. & LOVLEY, D. R. **Rapid Benzene Degradation in Methanogenic Sediments from a Petroleum-Contaminated Aquifer**. Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology , vol 64 , n° 5, p. 1937 – 1939, 1998.

WEST, G. F.; MACNE, J. C. Physics of the Electromagnetic Induction Exploration Method. IN: **Electromagnetic methods in applied geophysics- Applications part A and part B**. Investigations in Geophysics, chapter 1, 1991.

WIDDEL, F. & RABUS, R. **Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons**. Current Opinion in Biotechnology, vol. 12, p. 259 – 276, 2001.

WILSON, L. P. & BOUWER, E. J. **Biodegradation of aromatic compounds under mixed oxygen/denitrifying conditions: a review**. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology: Society for Industrial Microbiology, vol. 18 , p. 116 – 130 , 1997.

WILSON, S. C. & JONES, K. C. **Bioremediation of soils contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review**. Environmental Pollution, vol. 81, p. 229-249, 1993.

WOOD, W. W.; KRAEMER, T. F.; HEARN Jr., P. P. **Intragranular Diffusion: An Important Mechanism Influencing Solute Transport in Clastic Aquifers?** Science: American Association for the Advancement of Science, vol 247, p. 1569 – 1572, 1990.

ZAINE, J. E. **Geologia de Formação Rio Claro na folha de Rio Claro (SP)**. 1994. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.

ZAVATINI, J. A. & CANO, H. **Variações do ritmo pluvial na bacia do rio Corumbataí – SP.** Boletim de Geografia Teorética, 23:215-240, 1993.

ZEYER, J.; KUHN, E. P.; SCHWARZENBACH, R. P. **Rapiting Microbial Mineralization of Toluene and 1,3-dimethylbenzene in the absence of molecular oxygen.** Applied and Environmental Microbiology: American Society for Microbiology, vol 52, p. 944 – 947, 1986.

ANEXO I

DESCRIÇÃO DE SONDAGENS A PERCUSSÃO

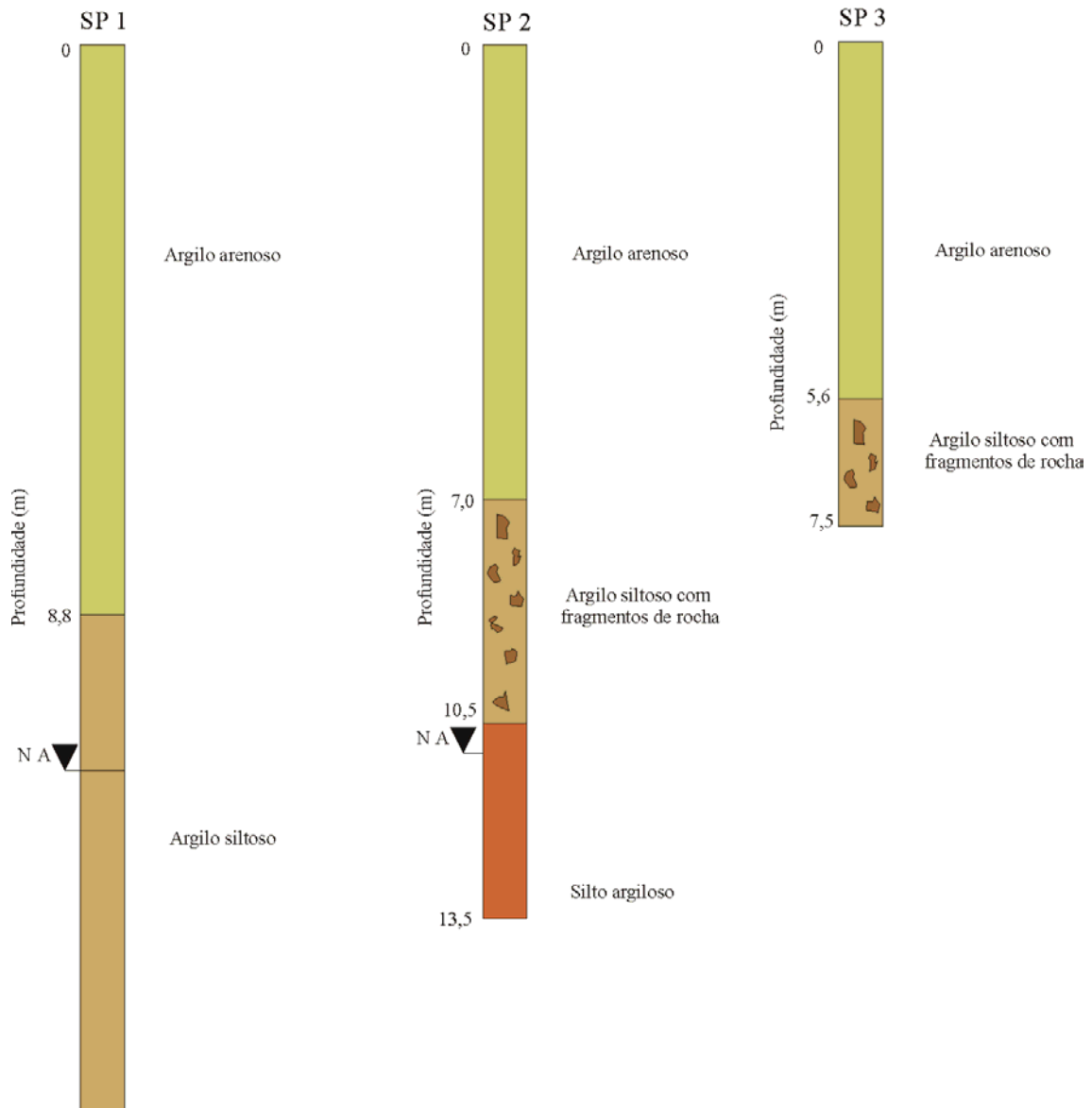


Figura I.1 – Descrição geológica das sondagens a percussão (CETESB, 1997)

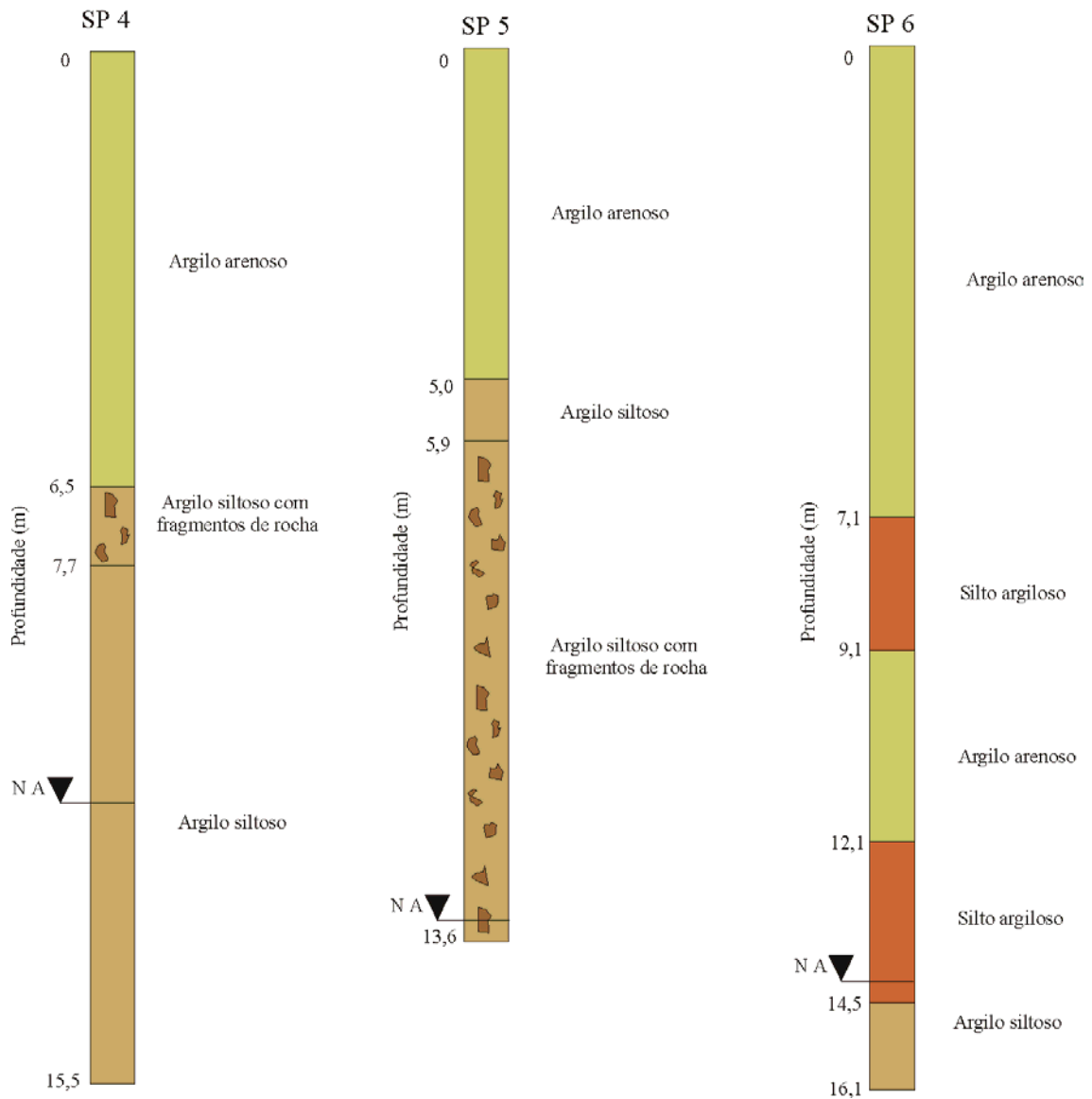


Figura I.2 – Descrição geológica das sondagens a percussão (CETESB, 1997)

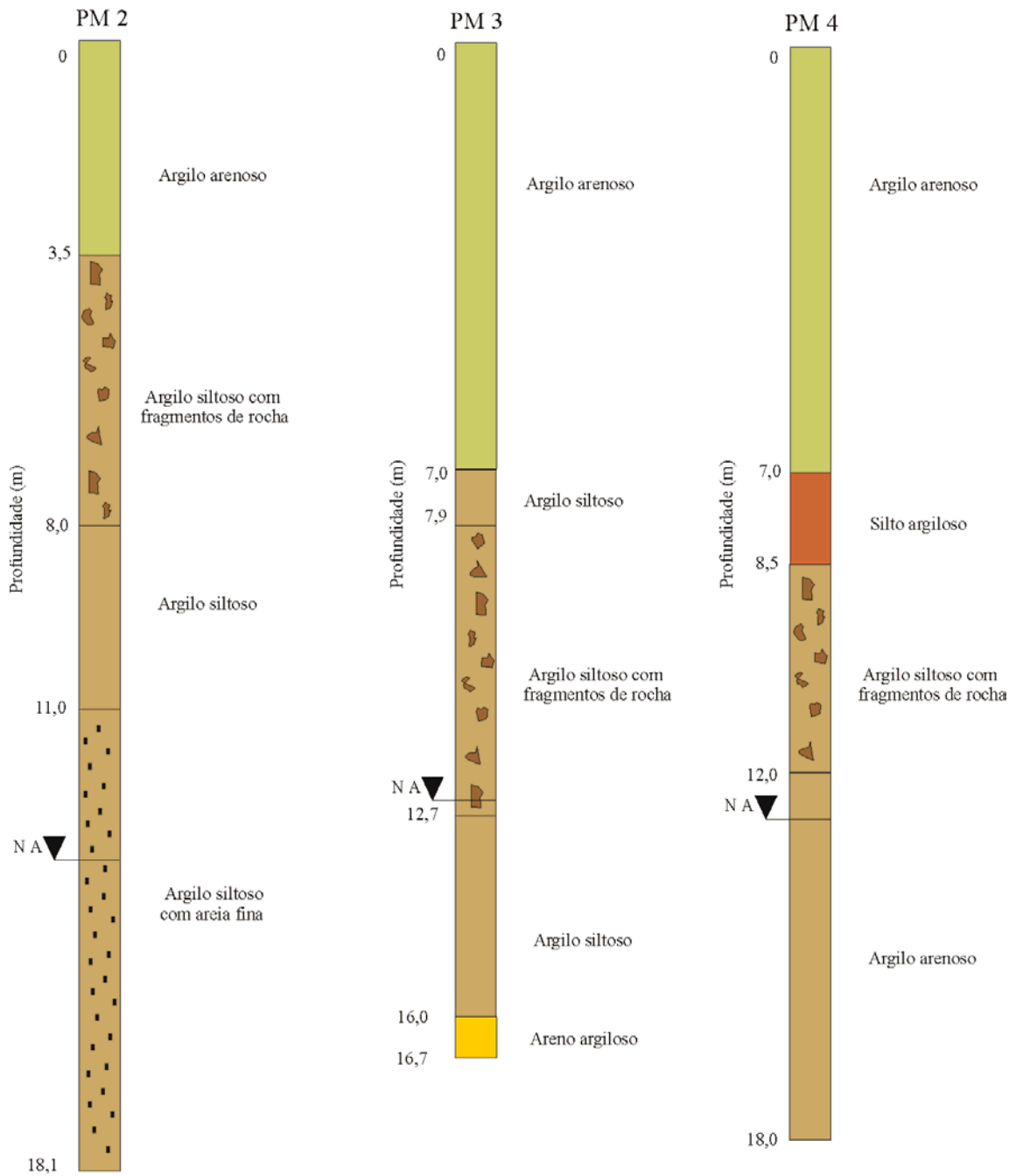


Figura I.3 – Descrição geológica dos poços de monitoramento (CETESB, 1997)

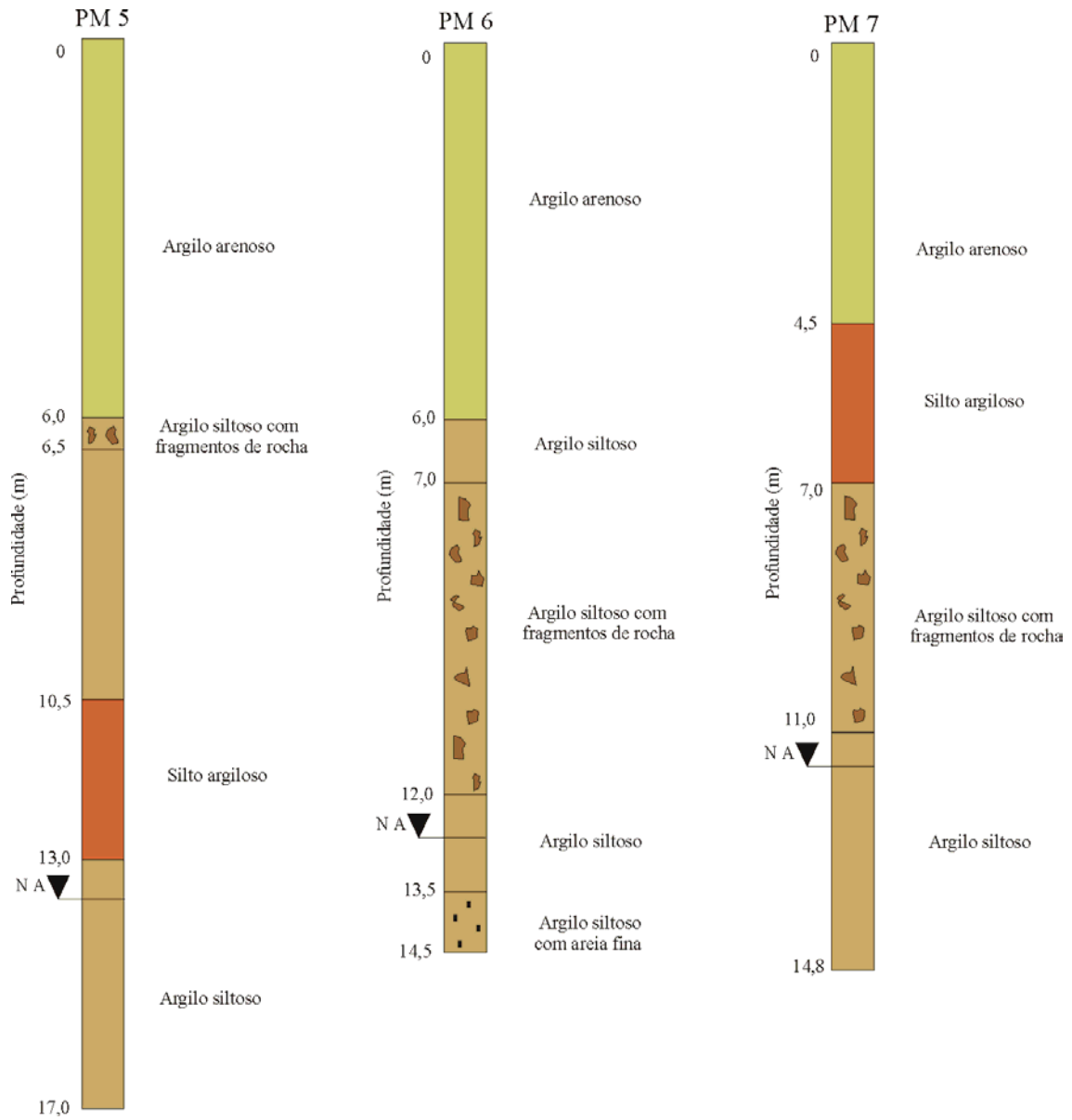


Figura I.4 – Descrição geológica dos poços de monitoramento (CETESB, 1997)

ANEXO II

MEDIDAS DO NÍVEL FREÁTICO

Tabela II.1 - Medidas de nível d'água obtidas em sondagens a percussão (em metros)
(CETESB, 1997)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
01/09/1988	12,40	11,90	-	-	-	-
02/09/1988	11,20	10,66	-	12,50	-	-
03/09/1988		-	-	11,30	-	-
05/09/1988	-	-	-	-	13,30	14,45
06/09/1988	-	-	-	-	13,00	14,10
COTA	672,802	674,796	672,599	681,634	683,539	664,759

Tabela II.2 - Medidas do nível freático nos poços de abastecimento (em metros)
(CETESB, 1997)

POÇO	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
06/09/1988	13,20	14,90	12,98	13,84	13,68	10,81
COTA	683,118	686,703	685,460	680,835	681,443	675,467

POÇO	PA7	PA8	PA9	PA10	PA11	PA12
06/09/1988	8,40	8,52	11,82	7,93	11,90	13,37
COTA	677,947	678,591	677,051	12,40	676,041	677,485

POÇO	PA13	PA14	PA15	PA16	PA17
06/09/1988	10,78	10,24	11,08	10,45	14,20
COTA	681,202	681,364	683,728	689,421	689,531

Tabela II.3 - Medidas do nível freático, obtidas nos poços de monitoramento (em metros) (CETESB, 1997)

POÇO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
06/12/1989	10,09	14,46	13,50	12,15	13,72	12,60	11,29	7,03
07/07/1990	-	12,54	12,04	-	-	12,00	10,88	-
15/01/1991	-	14,33	-	-	-	12,55	11,40	-
16/04/1991	-	-	11,10	-	-	12,70	11,10	-
20/01/1992	-	13,24	12,70	-	-	12,37	11,22	5,45
05/02/1992	10,21	12,77	12,63	12,54	13,21	12,31	-	6,10
27/08/1992	13,80	14,43	-	13,28	13,63	12,75	11,49	7,43
11/11/1999	-	-	-	11,9	-	-	-	6,1
COTA	676,448	680,324	677,962	674,291	672,021	662,951	659,501	676,648

Tabela II.4 - Medidas de Condutividade Hidráulica, obtidas por meio de ensaios de infiltração (em cm/s) (CETESB, 1997)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
K	-	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$6,8 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	-

ANEXO III

ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Tabela III.1 - Padrões de potabilidade de água para consumo humano
(CETESB 2001; EPA, 2003)

Parâmetros	Padrões
pH	6,5 a 8,5
Cloreto (mg/L)	250,0
Etilbenzeno (mg/L)	0,7**
Nitrogênio Nitrato (mg/L)	10,0
Sódio (mg/L)	200,0
Sulfato (mg/L)	400,0
Benzeno (µg/L)	10,0
Clorofórmio (µg/L)	30,0*
1,2 Dicloroetano (µg/L)	10,0
Tetracloroeto de Carbono (µg/L)	3,0
Tricloroetileno (µg/L)	30,0
Tetracloroetileno (µg/L)	10,0
Tolueno (mg/L)	1**
Xileno (mg/L)	10**
<p>* Padrão recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) ** Padrão da Environmental Protection Agency (EPA) - Estados Unidos</p>	

Tabela III.2 - Resultado de análises químicas em amostras de água do poço de infiltração reconhecido na indústria Sulfabrás (µg/L) (coleta em 19/08/1987) (CETESB, 1997)

Procedência	1,2 Dicloroetano	Benzeno	Tolueno	Xileno	Cloreto	pH
PI	$7,5 \times 10^4$	ND	$1,7 \times 10^4$	ND	$1,3 \times 10^7$	9,6

Tabela III.3 - Resultado de análises químicas em amostras de água do poço de infiltração reconhecido na indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 09/12/1988) (CETESB, 1997)

Procedência	1,2 Dicloroetano	Benzeno	Tolueno	Xileno	pH
PI	$10,6 \times 10^4$	ND	$13,2 \times 10^3$	ND	5,6

Tabela III.4 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 7/6/1990) (CETESB,1997)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloroetano	Tetracloroeto de Carbono	Tetracloro-etileno	Tricloro-etileno
PS	ND	ND	ND	ND	ND
P1	< 1,0	ND	ND	ND	ND
P2	12,0	ND	ND	ND	ND
P3	ND	ND	ND	ND	ND
P4	15,0	ND	ND	ND	ND
P5	3,0	36,0	ND	ND	ND
P6	6,0	31,0	ND	ND	ND
P7	9,0	49,0	ND	ND	ND
P8	10,0	12×10^3	ND	11,0	23,0

ND = Não Detectado

Tabela III.5 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 06/06/1990) (CETESB, 1997)

Procedência	Benzeno	Tolueno	Xileno
PS	< 1,0	< 1,0	ND
P1	135,0	121,5	< 1,0
P2	< 1,0	< 1,0	ND
P3	ND	ND	168
P4	46,5	< 1,0	< 1,0
P5	40,5	< 1,0	< 1,0
P6	ND	ND	ND
P7	1,1	< 1,0	ND
P8	$29,5 \times 10^3$	$24,5 \times 10^3$	ND

ND = Não Detectado

Tabela III.6 - Resultado de análises químicas para íons solúveis em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (mg/L) (coleta em 07/06/1990) (CETESB, 1997)

Procedência	Cloreto	N Amoniacal	N Nitrato	Sódio	Sulfato
PS	2,0	ND	0,10	7,3	ND
P1	1950,0	3,70	ND	505,0	30
P2	1080,0	ND	0,11	2,6	6
P3	0,5	0,02	0,08	0,7	ND
P4	24,0	0,02	0,04	12,0	9
P5	37,0	0,07	0,09	15,0	ND
P6	19,0	0,02	0,12	13,0	ND
P7	0,5	ND	0,07	1,4	ND
P8	200,0	388,0	0,03	$2,8 \times 10^3$	32

Tabela III.7 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 21/01/1992) (CETESB, 1997)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloroetano	Tetracloroeto de Carbono	Tetracloro-etileno	Tricloro-etileno
PS	ND	ND	ND	ND	ND
P1	ND	ND	ND	ND	ND
P2	ND	ND	ND	ND	ND
P3	ND	ND	ND	ND	ND
P4	1,5	ND	ND	ND	ND
P5	ND	ND	ND	ND	ND
P6	< 1,0	< 1,0	ND	ND	ND
P7	ND	ND	ND	ND	ND
P8	133,0	38,0	ND	12,0	6,8

ND = Não Detectado

Tabela III.8 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 21/01/1992) (CETESB, 1997)

Procedência	Benzeno	Tolueno	Xileno
PS	ND	ND	ND
P1	543,0	117,0	10,0
P2	ND	< 1,0	ND
P3	ND	31,0	21,0
P4	146,0	ND	ND
P5	77,0	ND	ND
P6	33,0	< 1,0	ND
P7	ND	ND	ND
P8	$6,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$	ND

ND = Não Detectado

Tabela III.9 - Resultado de análises químicas para íons solúveis em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (mg/L) (coleta em 21/01/1992) (CETESB, 1997)

Procedência	Cloreto	N Amoniacal	N Nitrato	Sódio	Sulfato
PS	< 0,5	0,12	0,02	6,7	2,0
P1	1,5x10 ³	12,0	0,03	690,0	30,0
P2	< 0,5	0,09	0,05	2,0	26,0
P3	< 0,5	0,01	0,02	0,1	20,0
P4	110,0	0,08	0,02	41,0	27,0
P5	65,0	0,07	0,12	15,0	25,0
P6	35,5	0,02	0,20	15,5	24,0
P7	1,0	0,02	0,22	0,4	24,0
P8	2,15x10 ³	240,0	0,05	1,8x10 ³	31,0

Tabela III.10 - Resultado de análises químicas em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)

Procedência	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	pH
P8	1,35x10 ³	< 10	7,4	7,7
PA 7	13,8	< 10	97,8	6,3
PA 8	45,7	< 10	390	5,3
PF	1,08	< 10	8,3	5,7

Tabela III.11 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás (µg/L) (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloroetano	Tetracloroeto de Carbono	Tetracloro-etileno	Tricloro-etileno
P8	1,12	15,9	ND	ND	ND
PA 7	< 1,0	ND	ND	ND	ND
PA 8	ND	2,87	ND	ND	ND
PF	ND	ND	ND	ND	ND

ND = Não Detectado

Tabela III.12 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 11/11/1999) (CETESB, 2001)

Procedência	Benzeno	Tolueno	Xileno
P8	$1,19 \times 10^4$	$1,39 \times 10^4$	ND
PA 7	ND	ND	ND
PA 8	ND	ND	ND
PF	ND	ND	ND

Tabela III.13 - Resultado de análises químicas para solventes halogenados em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 30/11/2000) (CETESB, 2001)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloroetano	Tetracloroeto de Carbono	Tetracloro-etileno	Tricloro-etileno
P5	ND	ND	ND	ND	ND
P8	ND	336	ND	ND	ND
PA 7	ND	10,1	ND	ND	ND
PA 8	ND	ND	ND	ND	ND
PF	ND	ND	ND	ND	ND

ND = Não Detectado

Tabela III.14 - Resultado de análises químicas para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água de poços próximos a indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (coleta em 30/11/2000) (CETESB, 2001)

Procedência	Benzeno	Etilbenzeno	Tolueno	Xileno
P5	ND	ND	ND	ND
P8	20,0	ND	ND	ND
PA 7	37,3	ND	ND	ND
PA 8	ND	ND	ND	ND
PF	ND	ND	ND	ND

APÊNDICE I

SONDAGENS ELETROMAGNÉTICAS

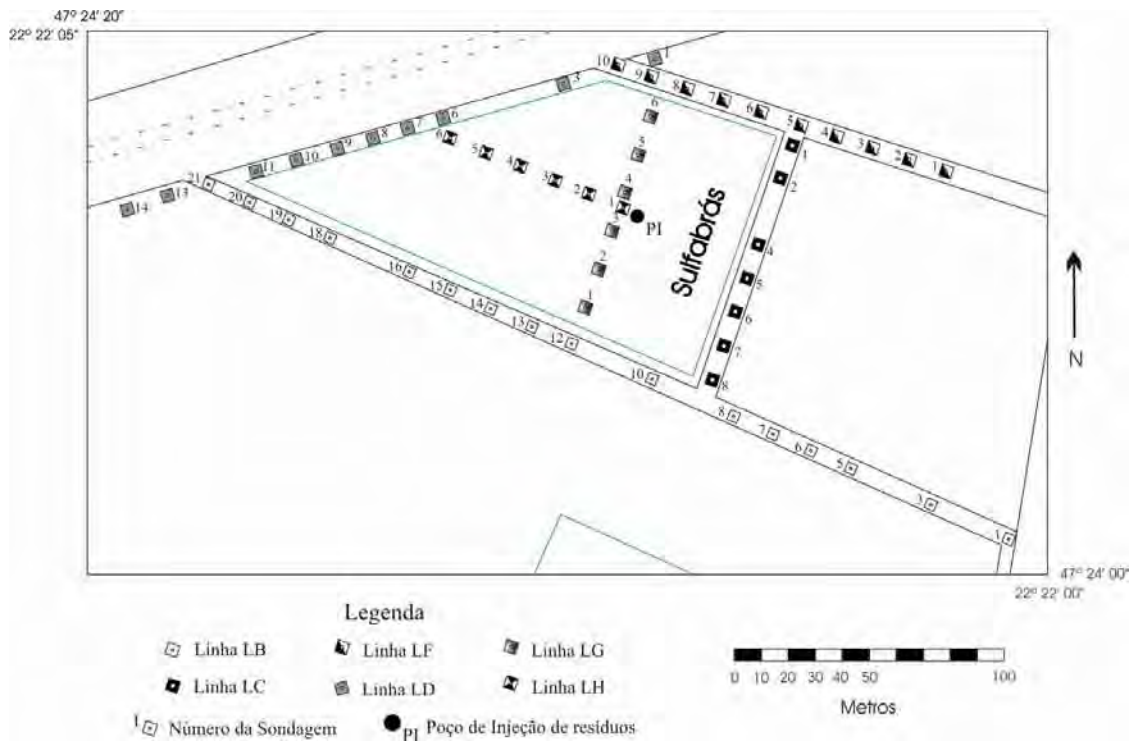


Figura IV.1 – Pontos de Sondagem Eletromagnética e respectivas Linhas de Caminhamento Eletromagnético

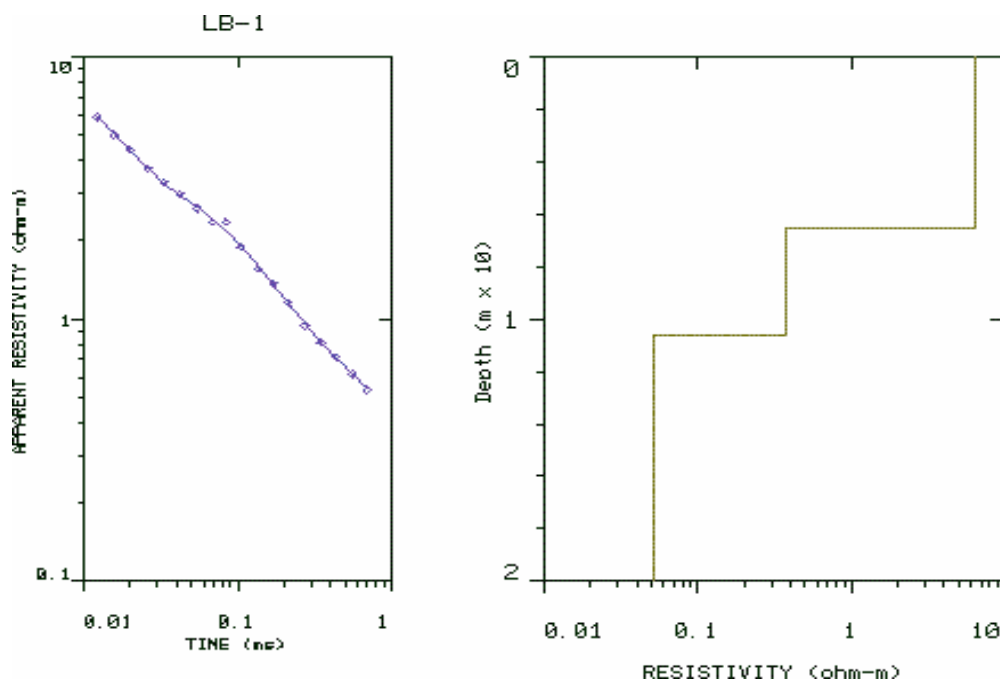


Figura IV.2 – Sondagens Eletromagnéticas LB-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

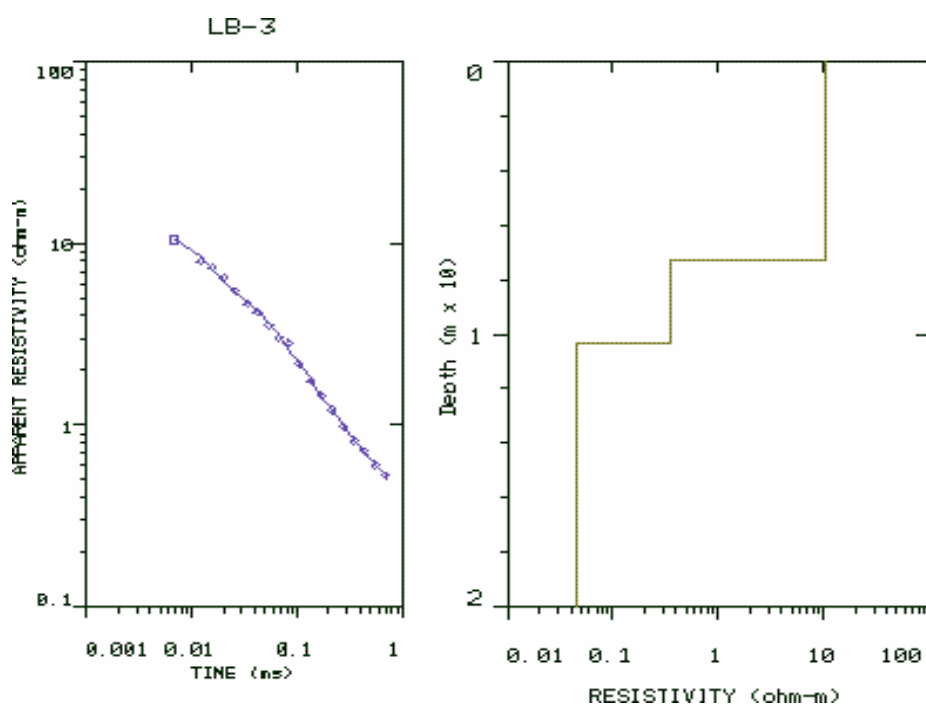


Figura IV.3 – Sondagens Eletromagnéticas LB-03, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

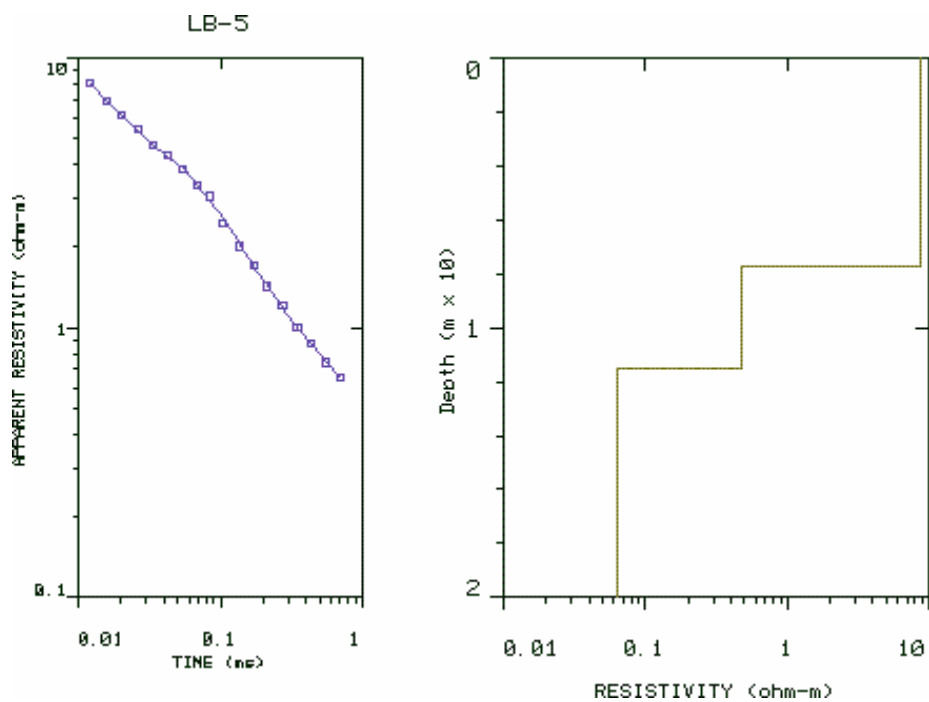


Figura IV.4 – Sondagens Eletromagnéticas LB-05, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

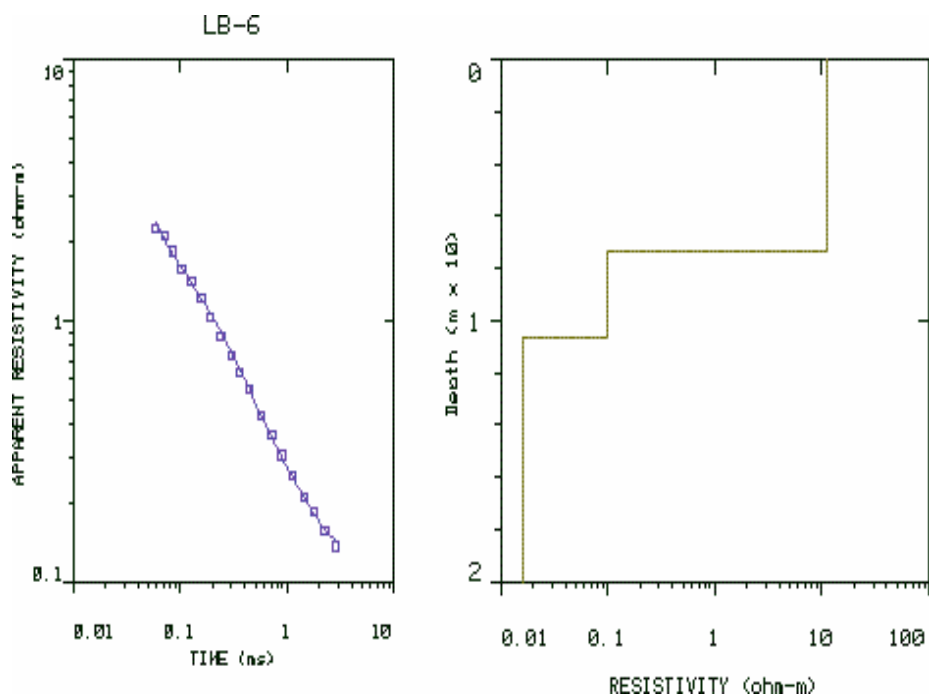


Figura IV.5 – Sondagens Eletromagnéticas LB-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

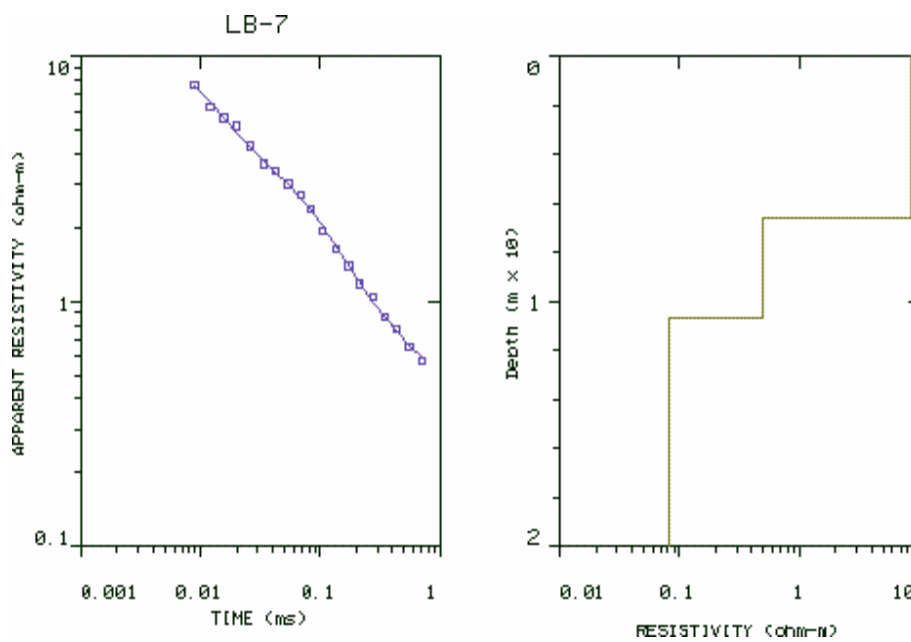


Figura IV.6 – Sondagens Eletromagnéticas LB-07, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

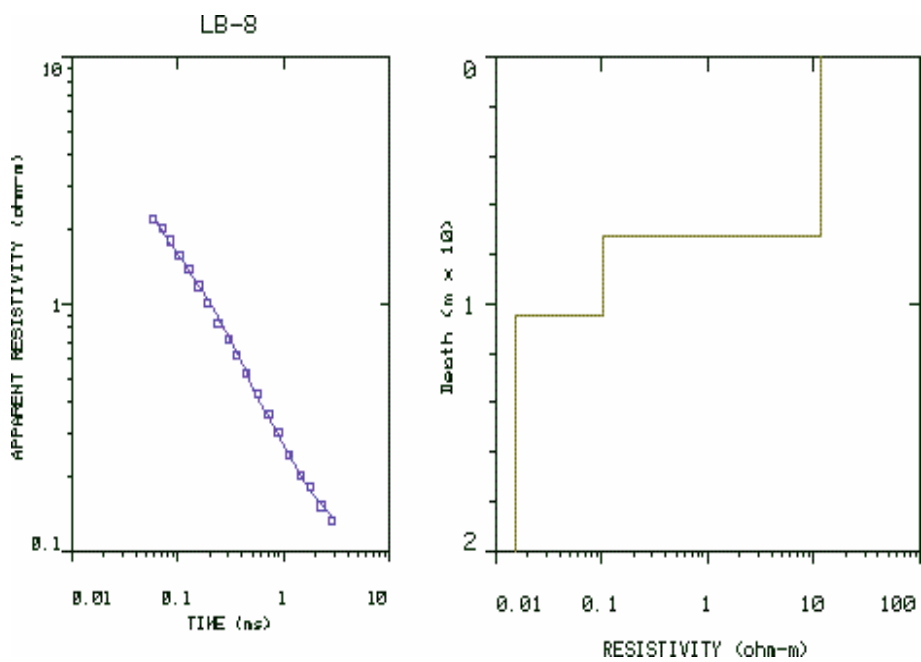


Figura IV.7 – Sondagens Eletromagnéticas LB-08, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

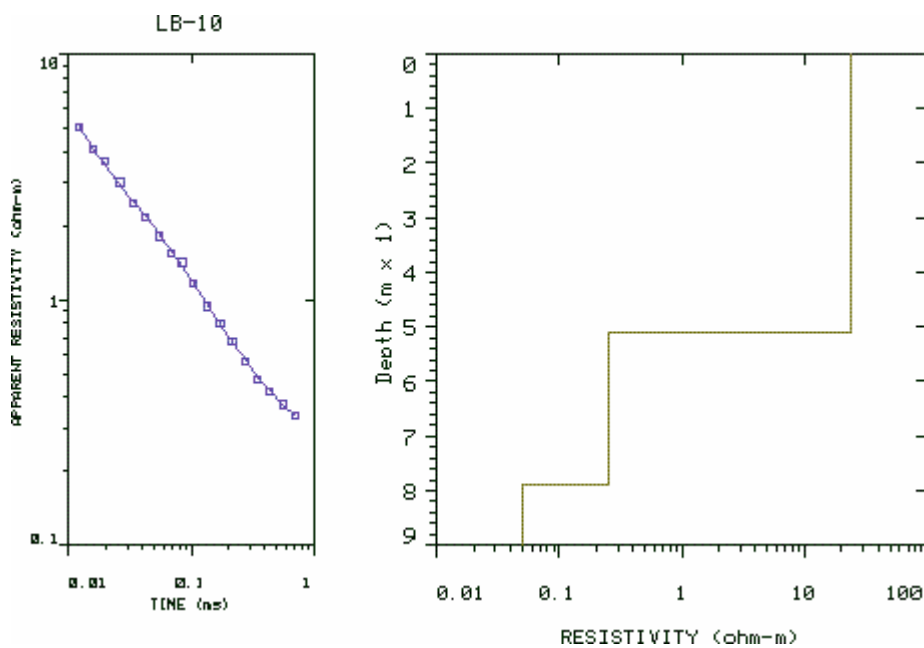


Figura IV.8 – Sondagens Eletromagnéticas LB-10, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

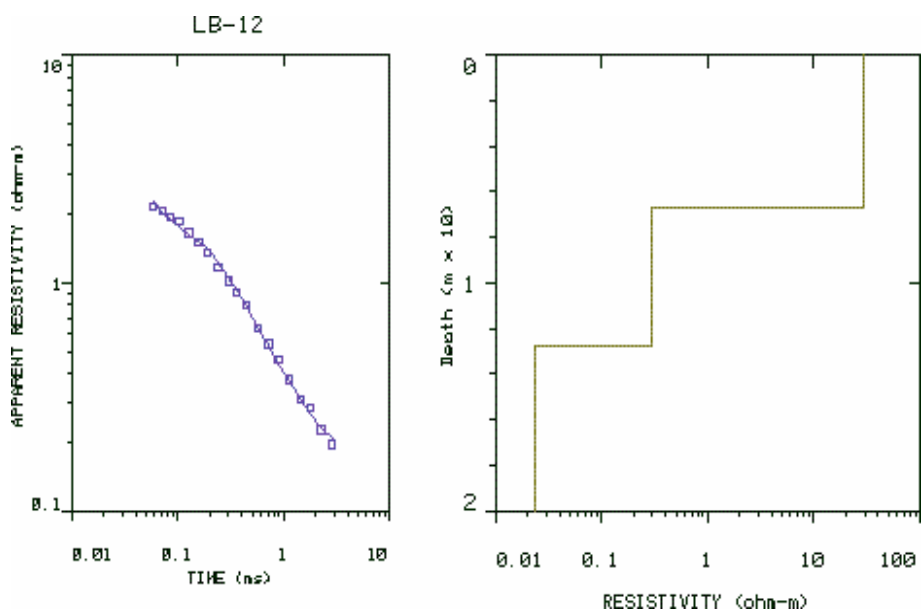


Figura IV.9 – Sondagens Eletromagnéticas LB-12, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

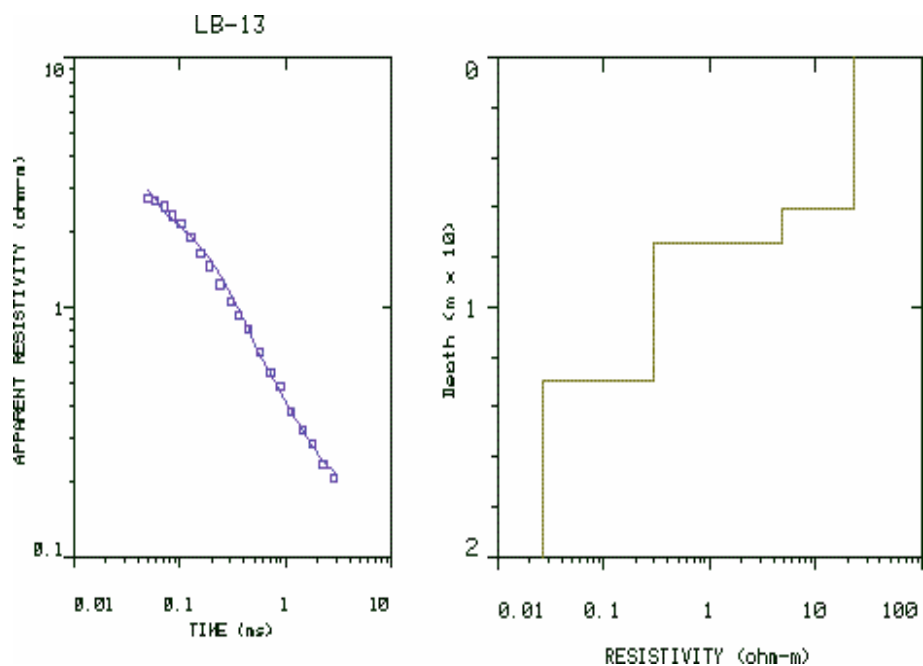


Figura IV.10 – Sondagens Eletromagnéticas LB-13, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

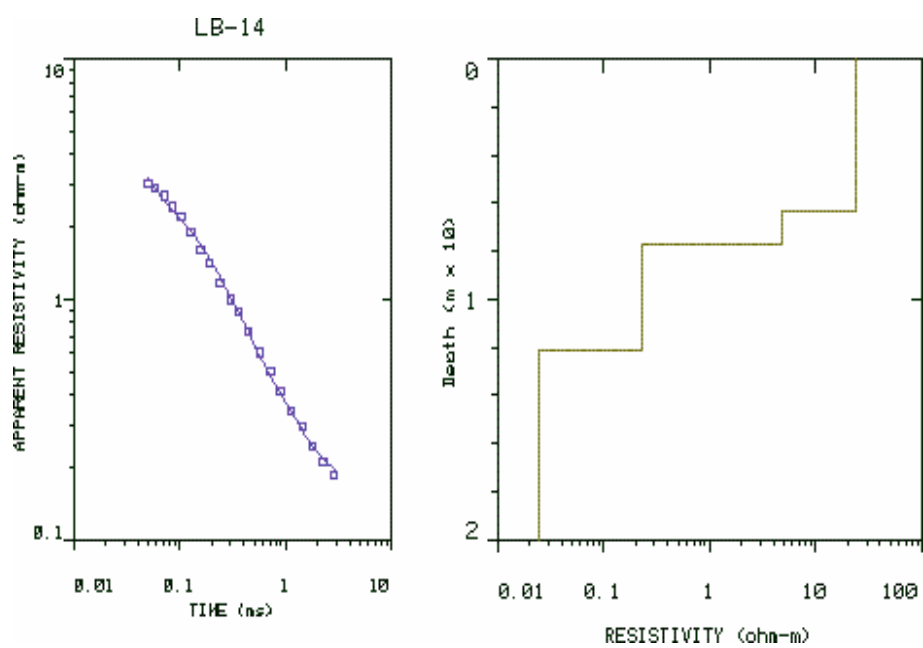


Figura IV.11 – Sondagens Eletromagnéticas LB-14, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

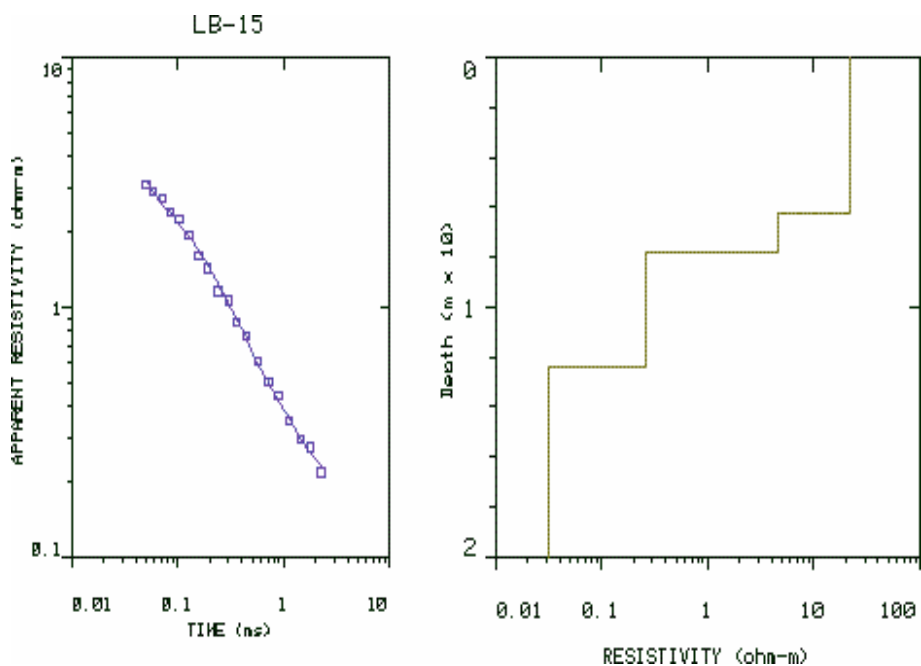


Figura IV.12 – Sondagens Eletromagnéticas LB-15, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

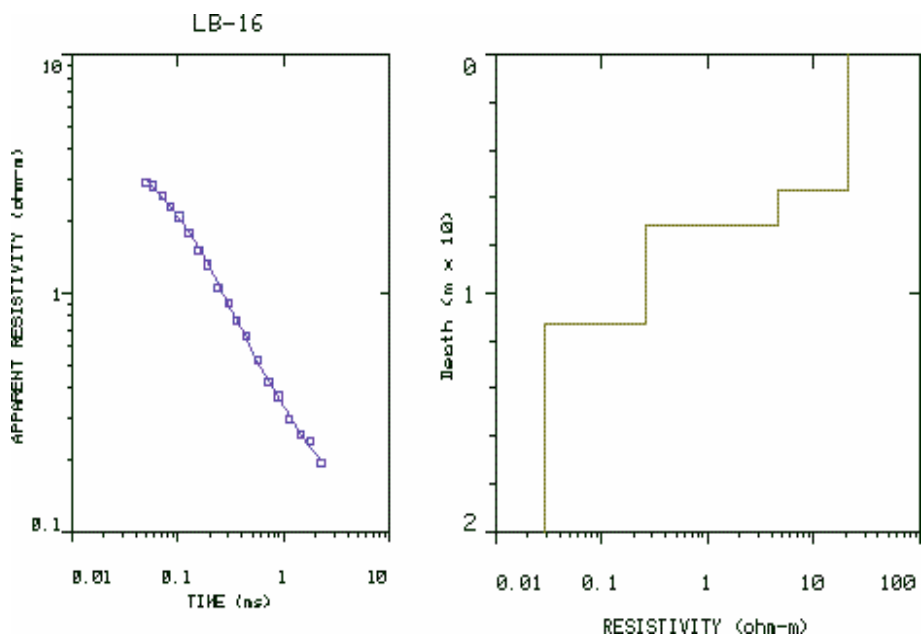


Figura IV.13 – Sondagens Eletromagnéticas LB-16, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

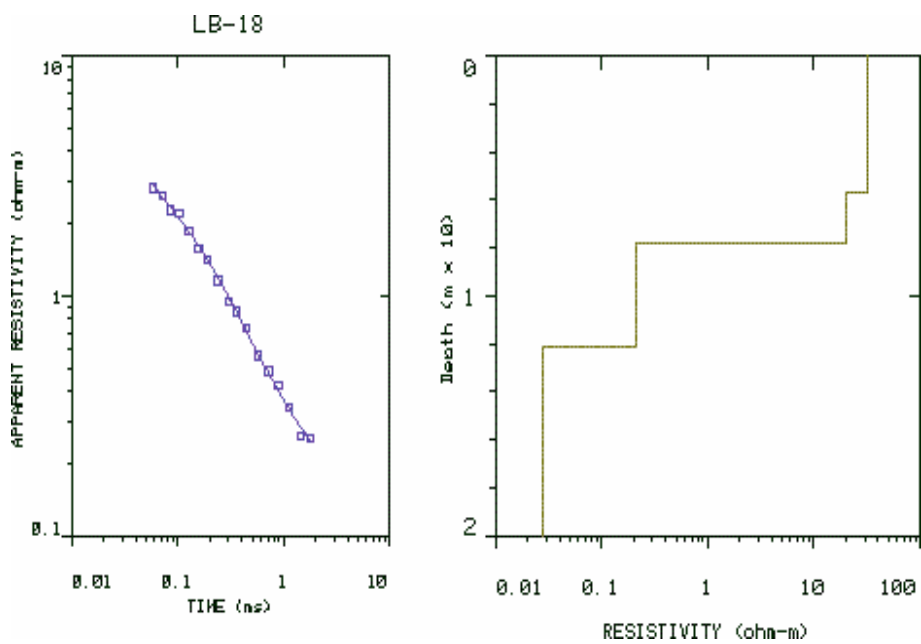


Figura IV.14 – Sondagens Eletromagnéticas LB-18, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

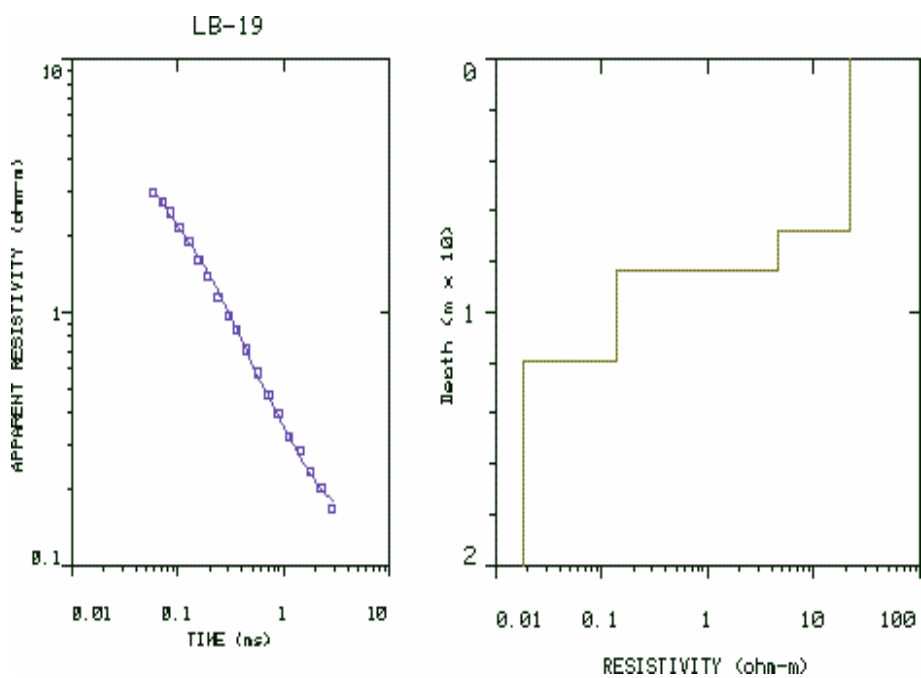


Figura IV.15 – Sondagens Eletromagnéticas LB-19, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

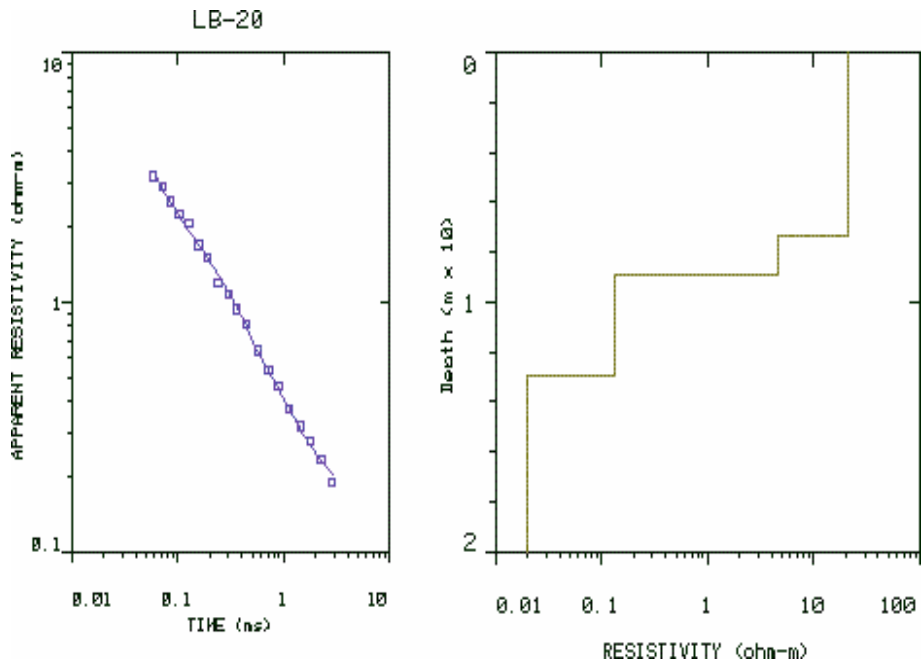


Figura IV.16 – Sondagens Eletromagnéticas LB-20, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

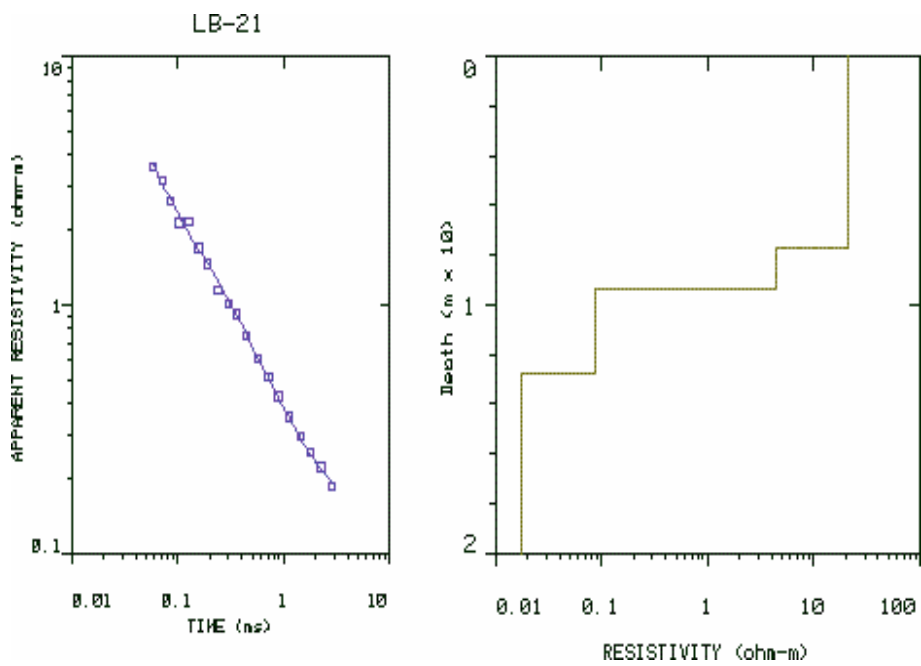


Figura IV.17 – Sondagens Eletromagnéticas LB-21, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

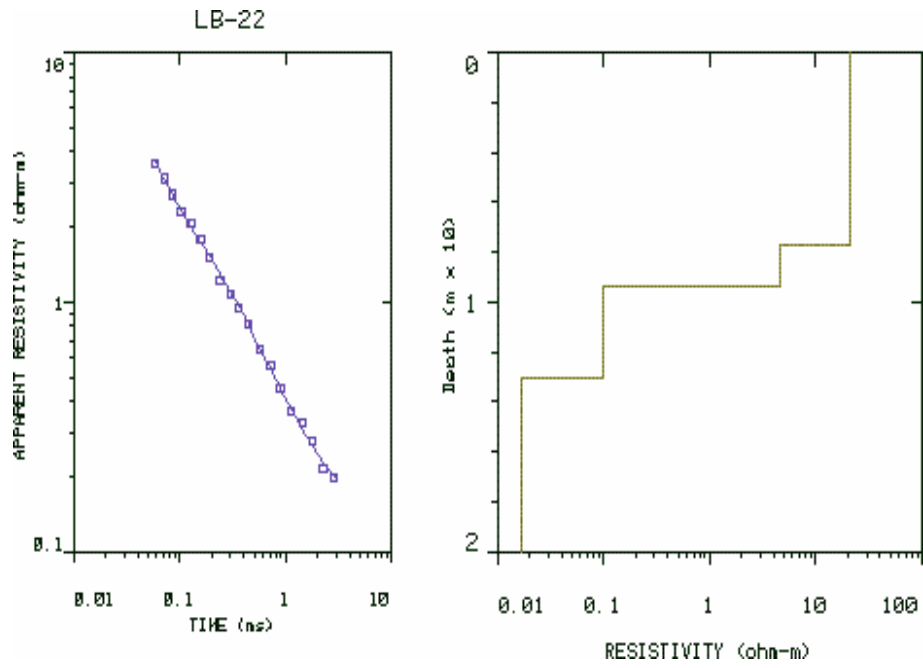


Figura IV.18 – Sondagens Eletromagnéticas LB-22, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

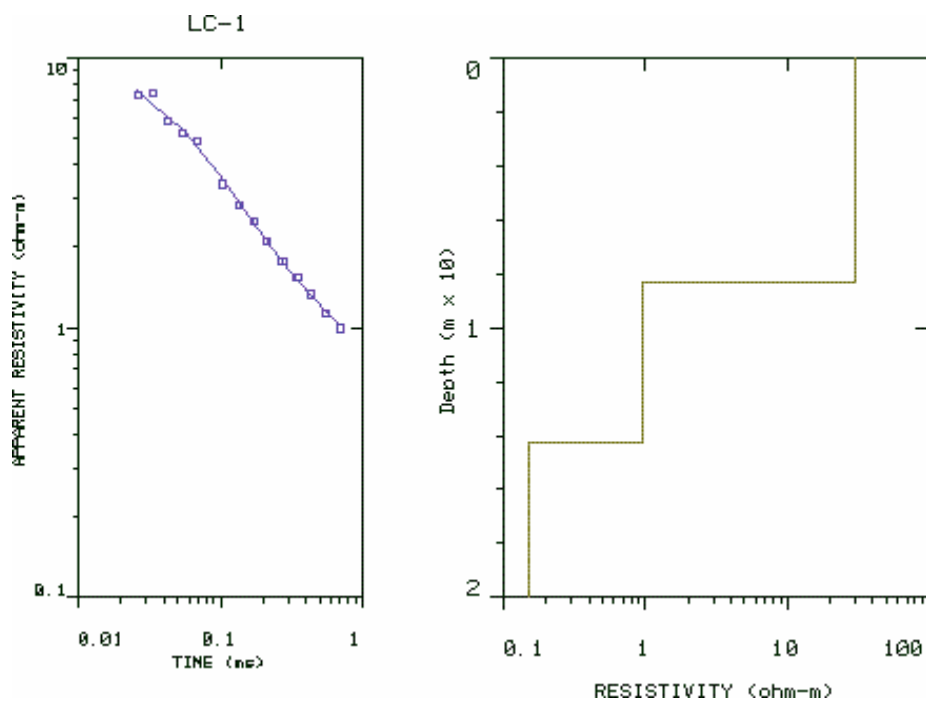


Figura IV.19 – Sondagens Eletromagnéticas LC-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

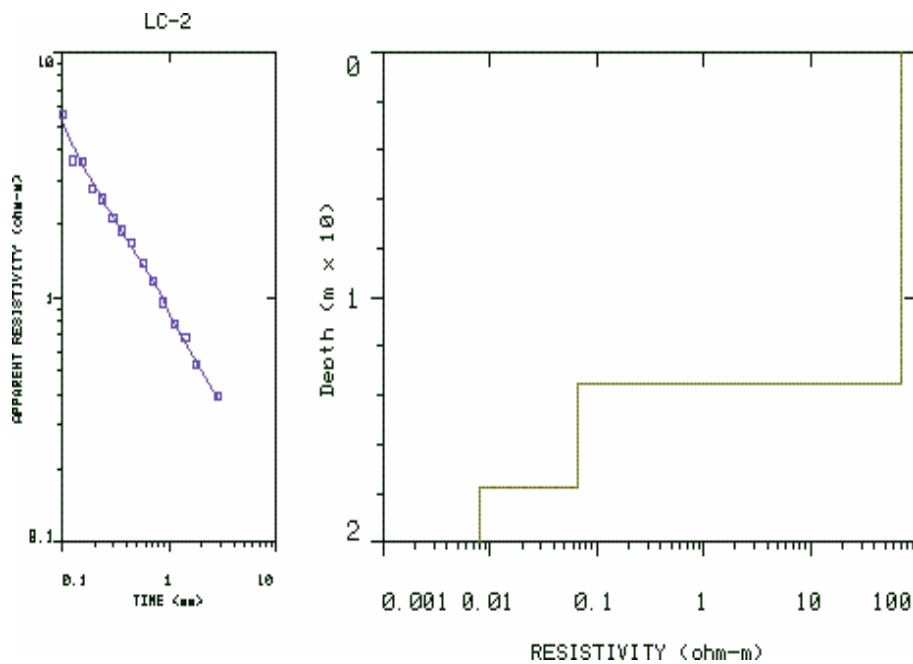


Figura IV.20 – Sondagens Eletromagnéticas LC-02, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

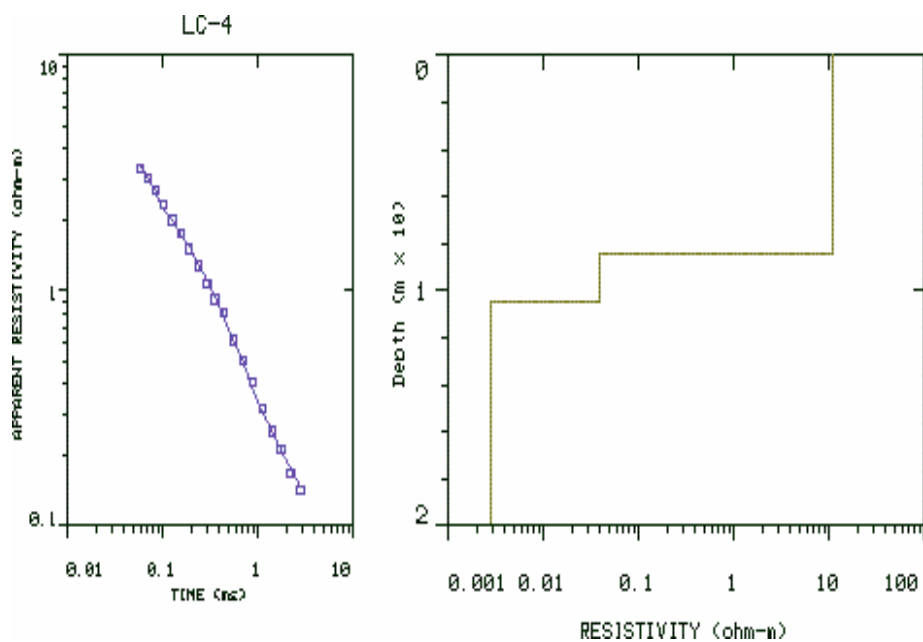


Figura IV.21 – Sondagens Eletromagnéticas LC-04, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

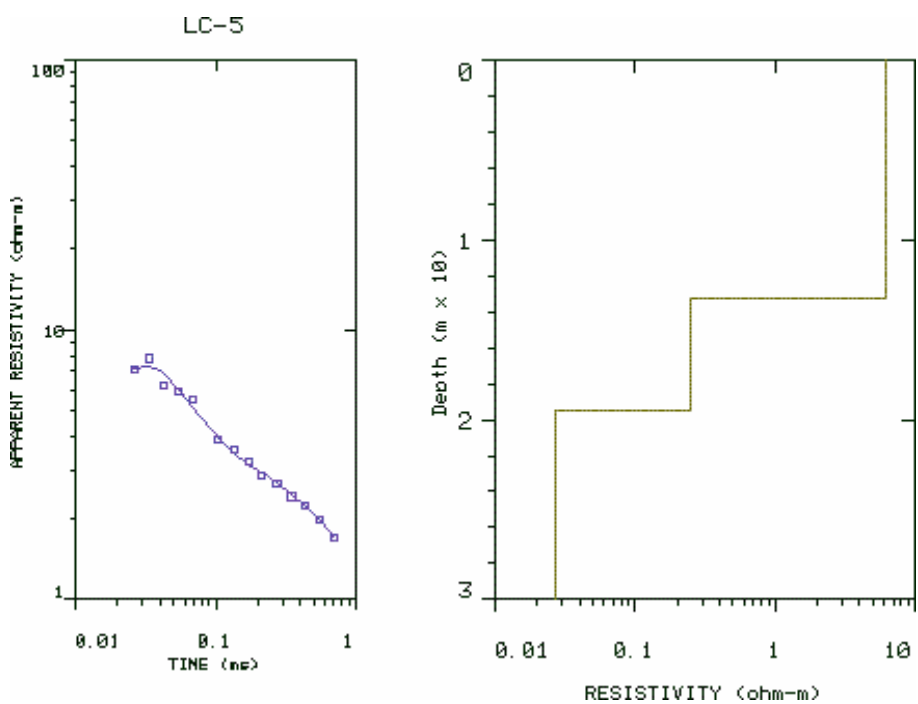


Figura IV.22 – Sondagens Eletromagnéticas LC-05, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

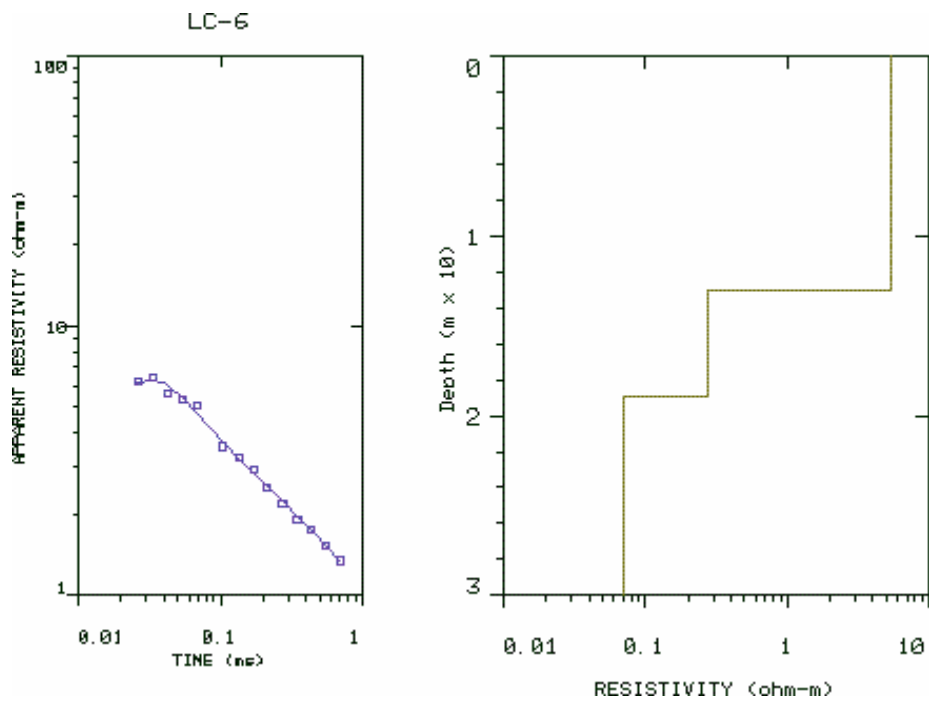


Figura IV.23 – Sondagens Eletromagnéticas LC-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

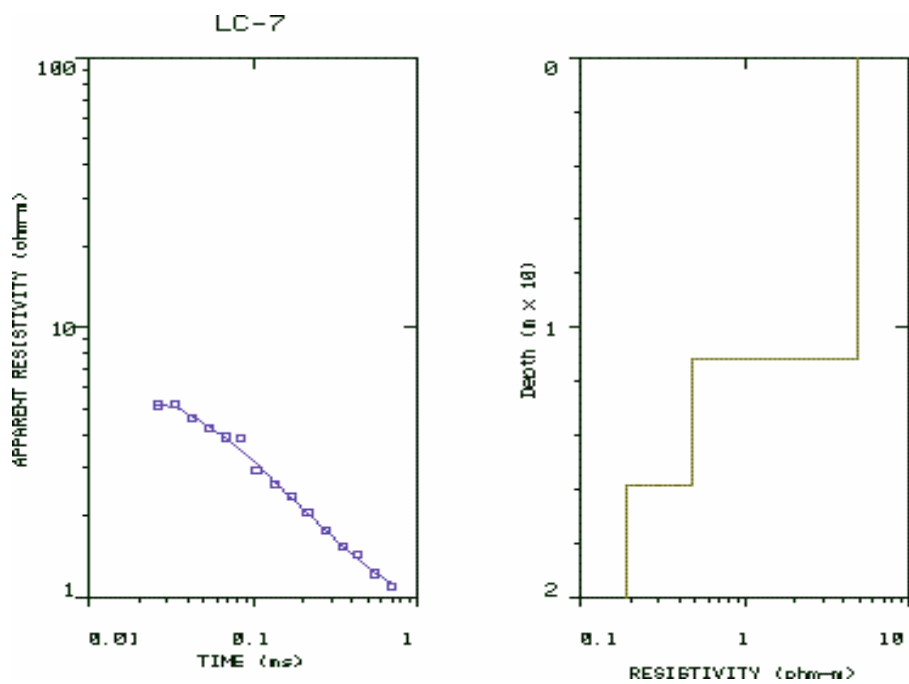


Figura IV.24 – Sondagens Eletromagnéticas LC-07, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

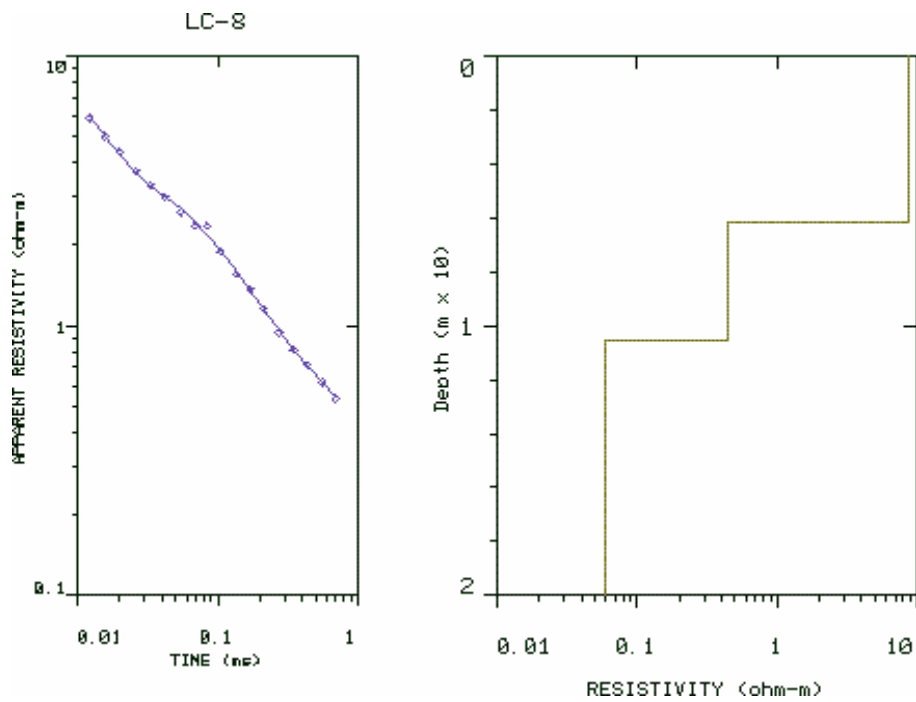


Figura IV.25 – Sondagens Eletromagnéticas LC-08, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

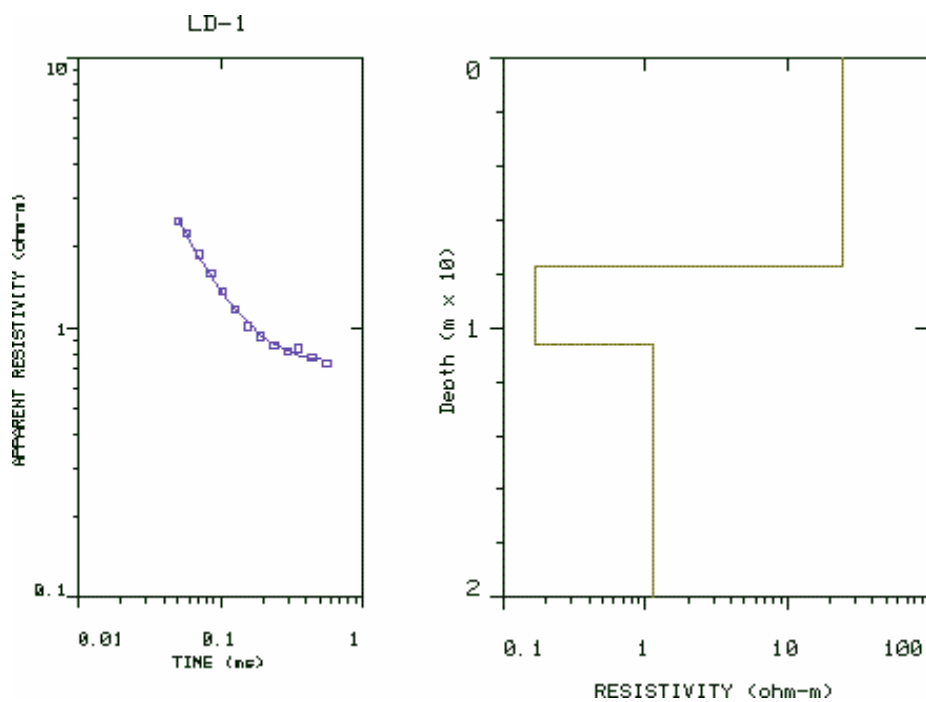


Figura IV.26 – Sondagens Eletromagnéticas LD-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

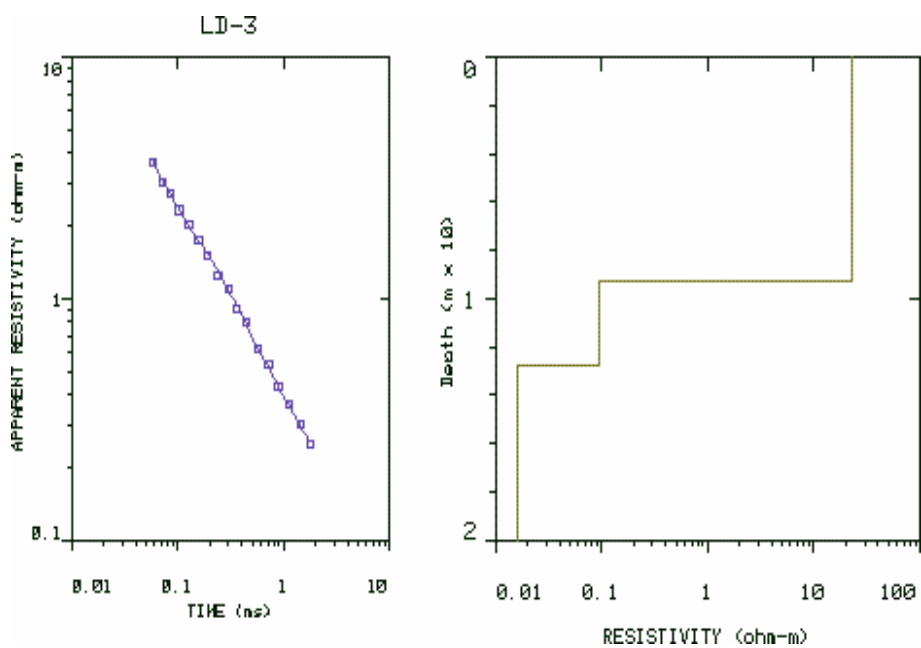


Figura IV.27 – Sondagens Eletromagnéticas LD-03, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

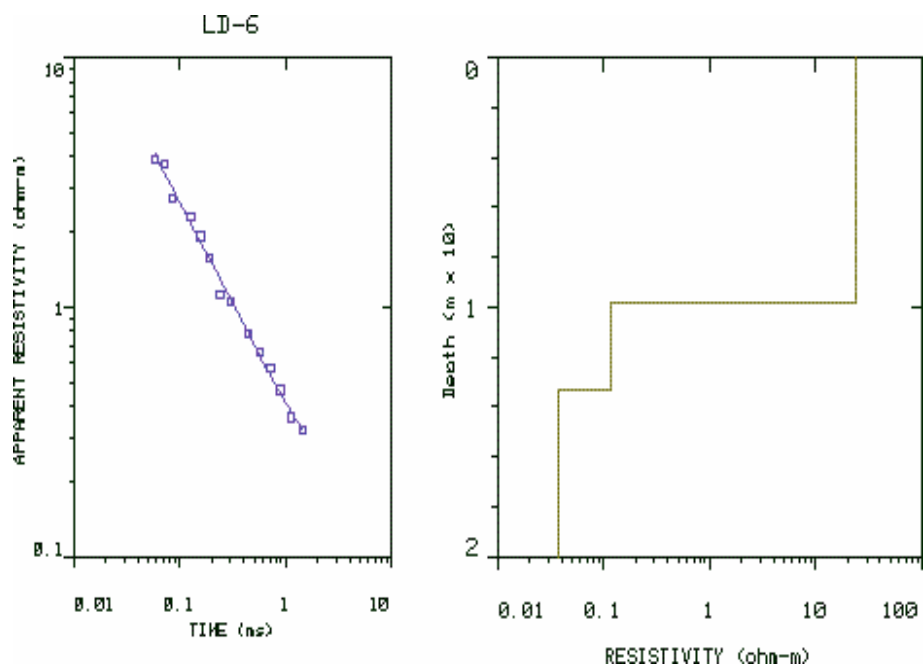


Figura IV.28 – Sondagens Eletromagnéticas LD-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

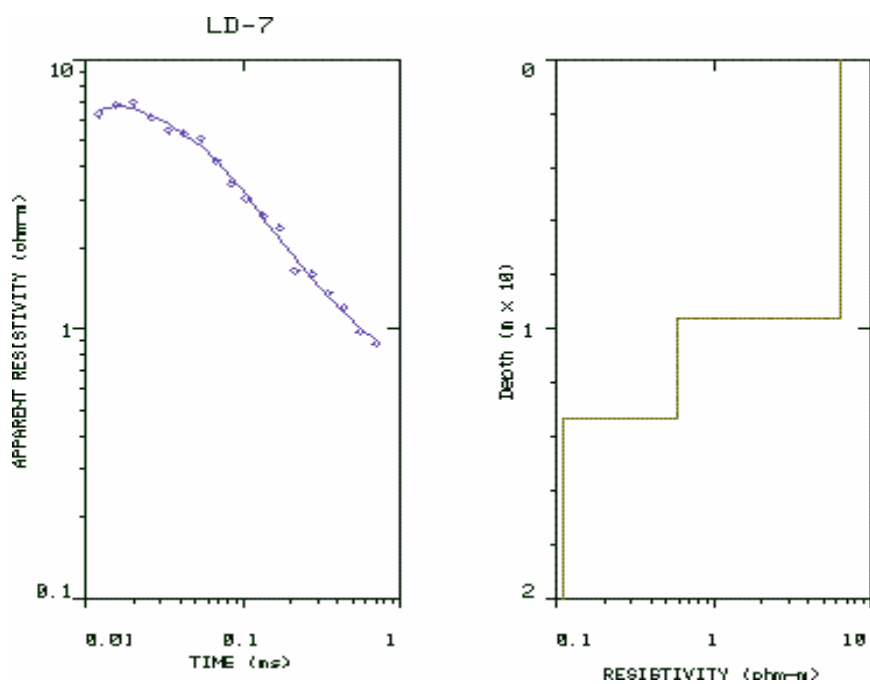


Figura IV.29 – Sondagens Eletromagnéticas LD-07, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

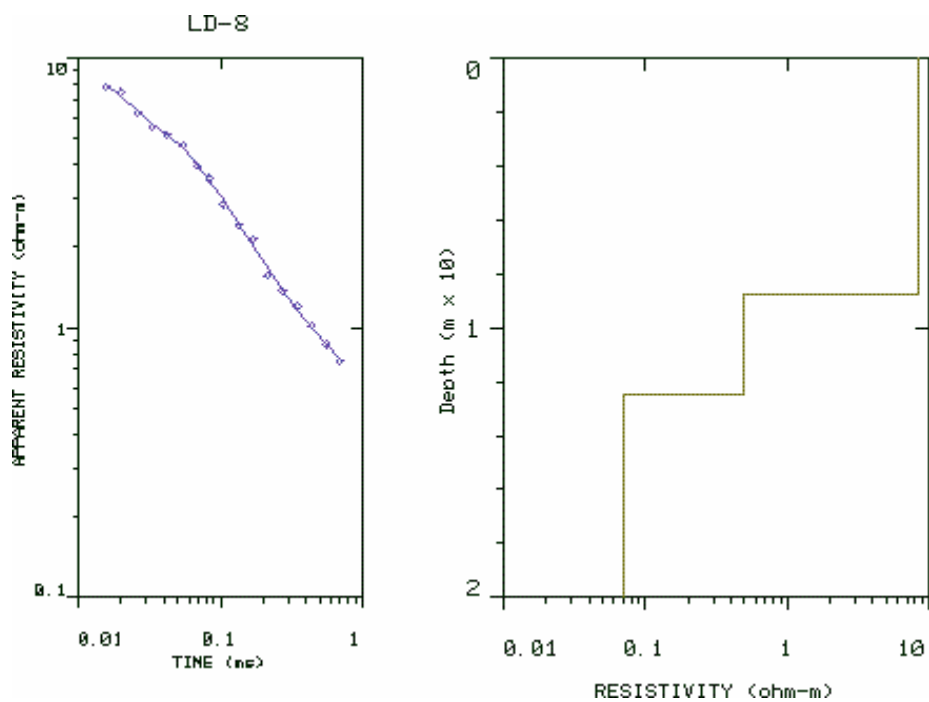


Figura IV.30 – Sondagens Eletromagnéticas LD-08, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

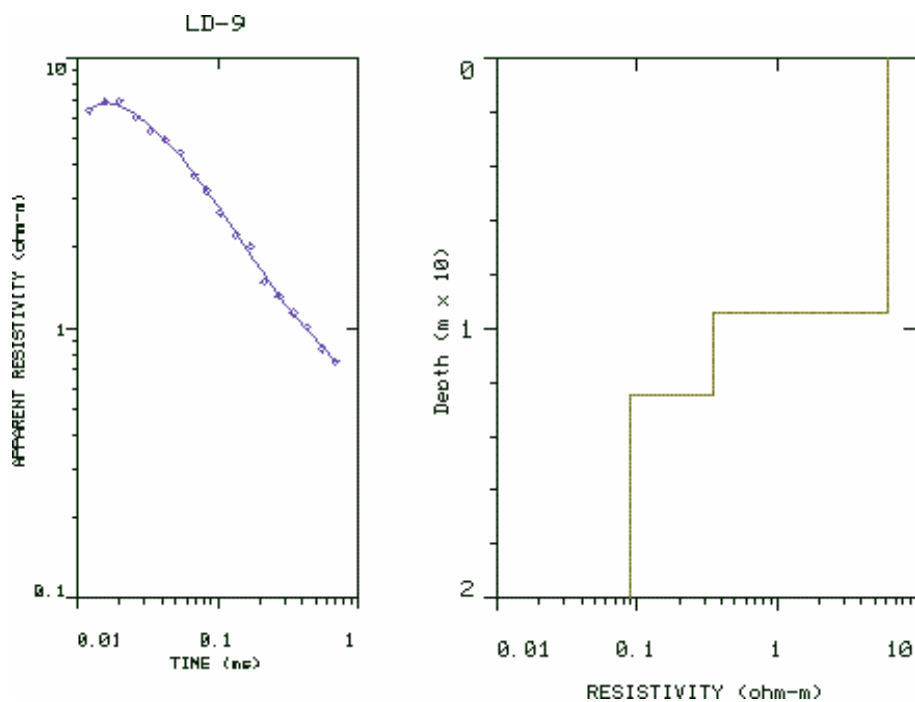


Figura IV.31 – Sondagens Eletromagnéticas LD-09, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

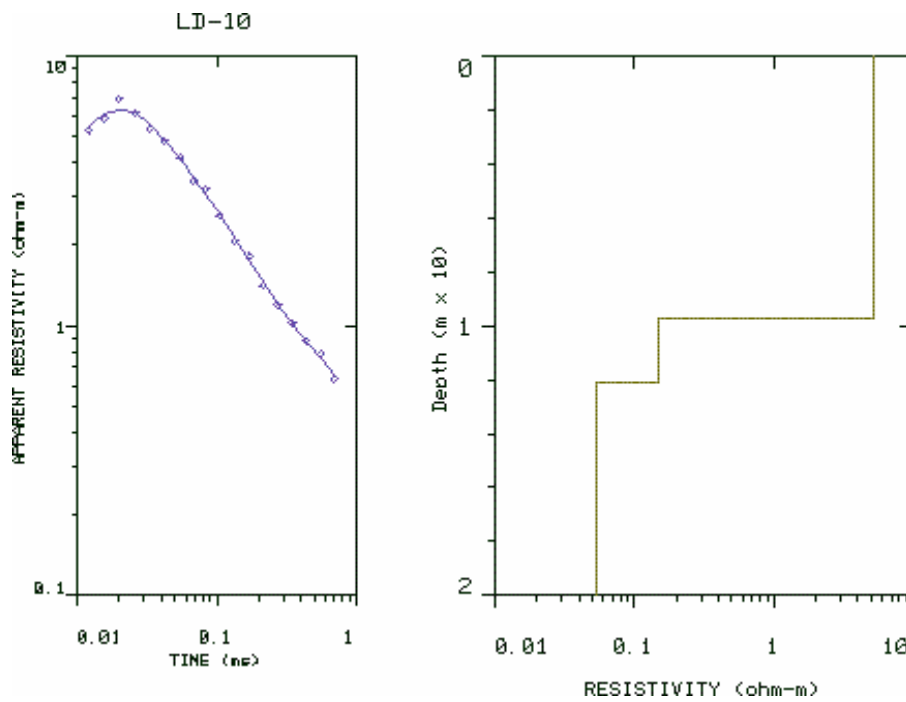


Figura IV.32 – Sondagens Eletromagnéticas LD-10, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

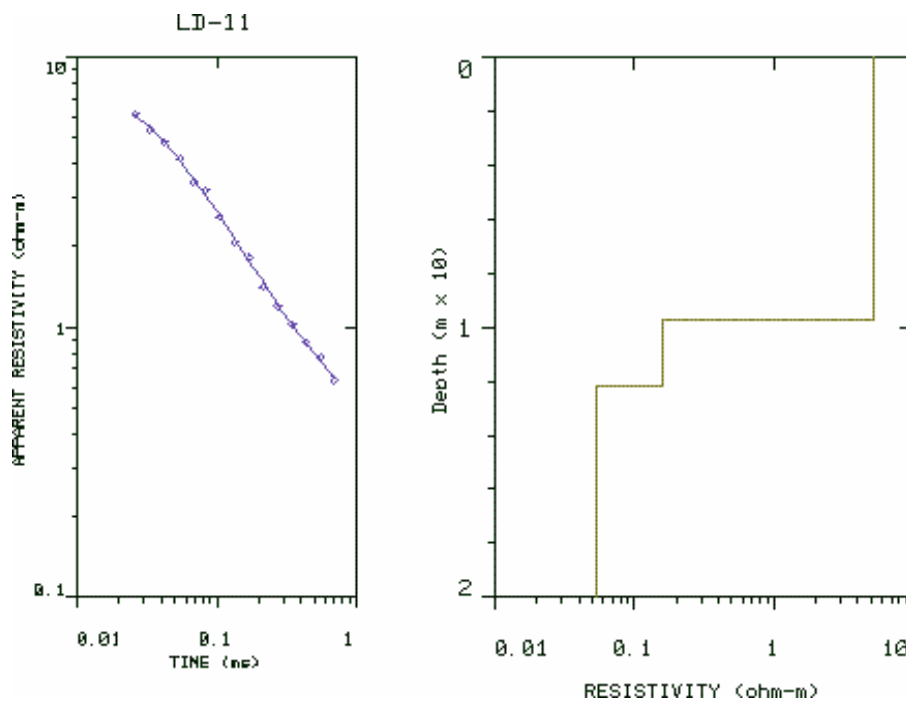


Figura IV.33 – Sondagens Eletromagnéticas LD-11, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

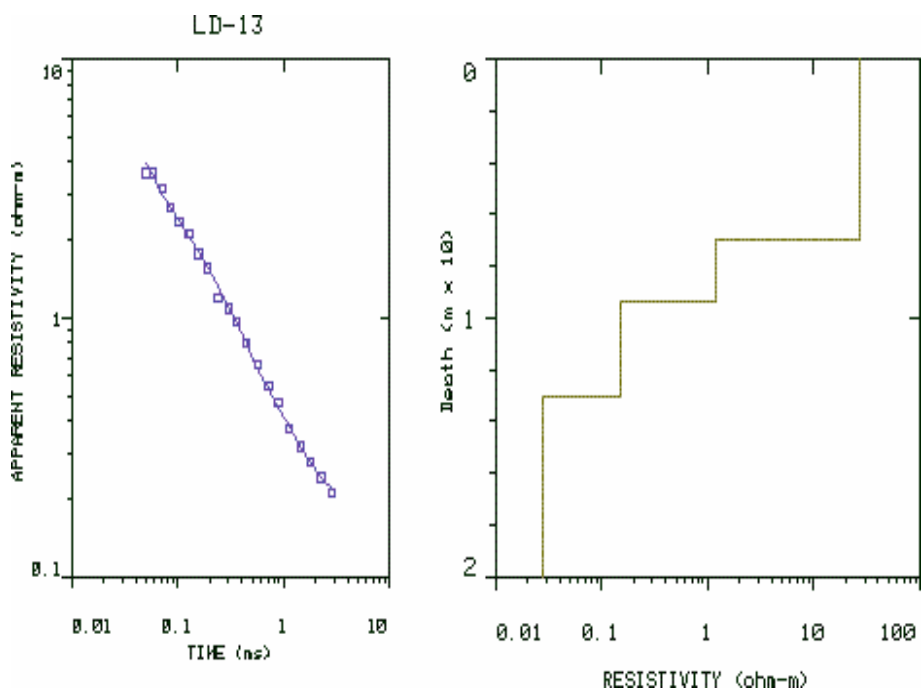


Figura IV.34 – Sondagens Eletromagnéticas LD-13, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

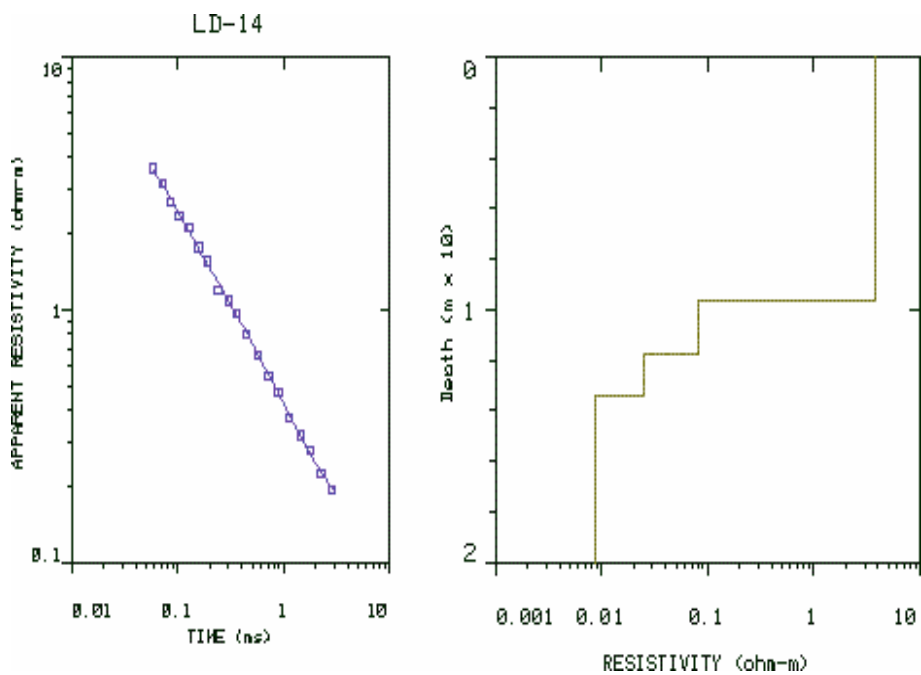


Figura IV.35 – Sondagens Eletromagnéticas LD-14, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

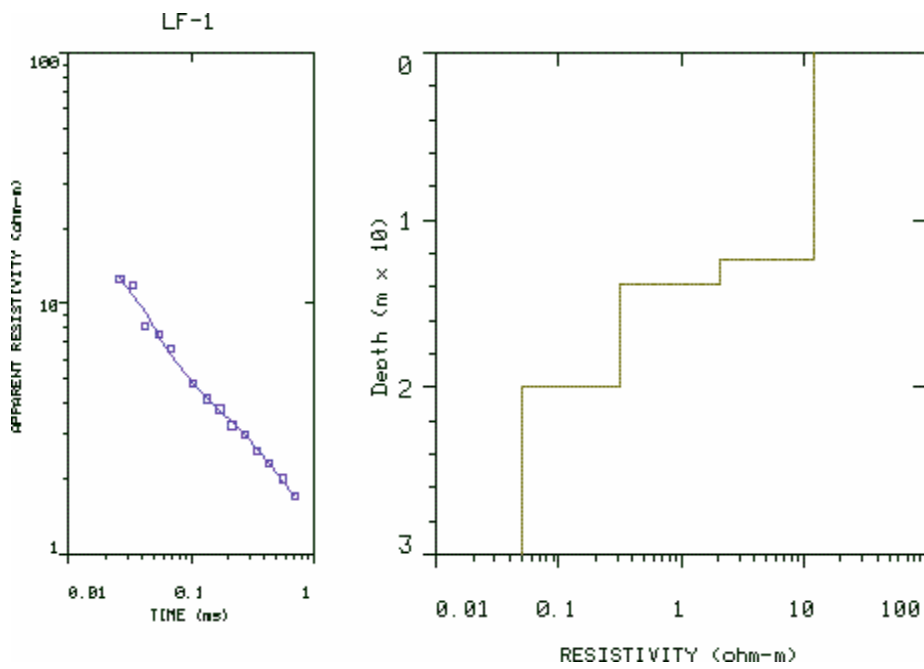


Figura IV.36 – Sondagens Eletromagnéticas LF-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

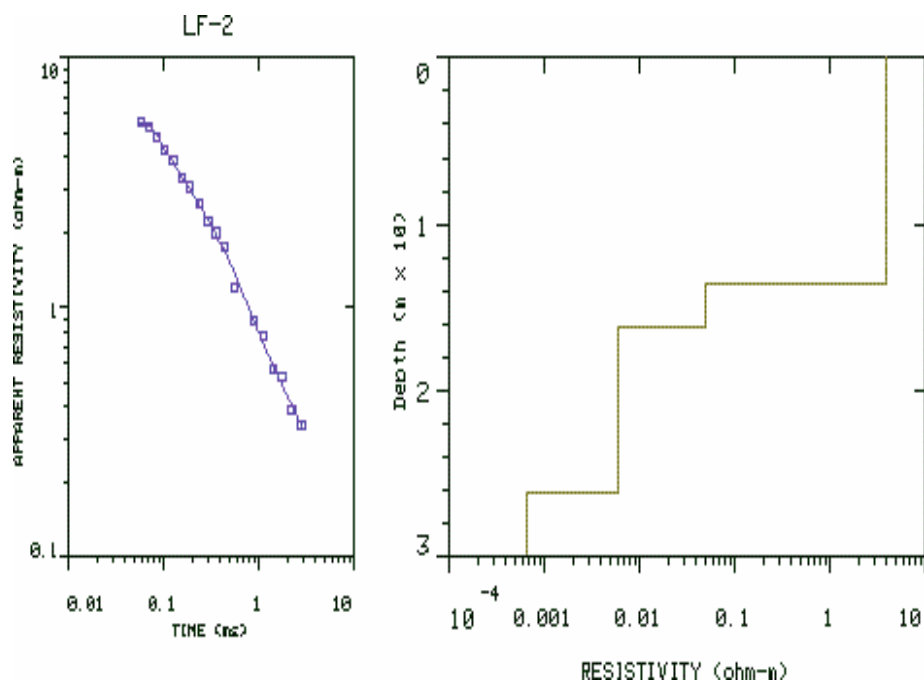


Figura IV.37 – Sondagens Eletromagnéticas LF-02, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

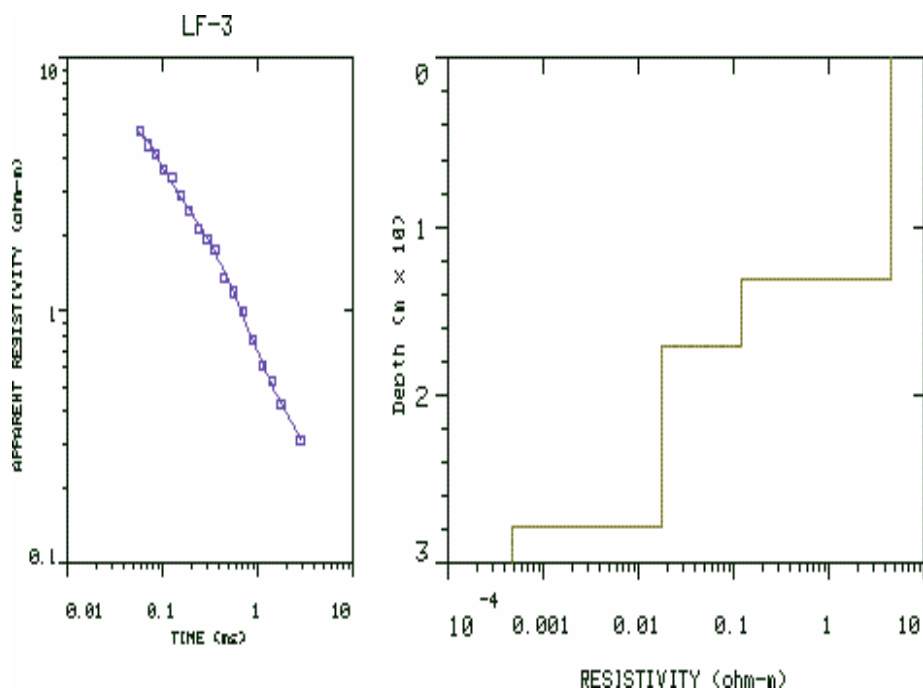


Figura IV.38 – Sondagens Eletromagnéticas LF-03, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

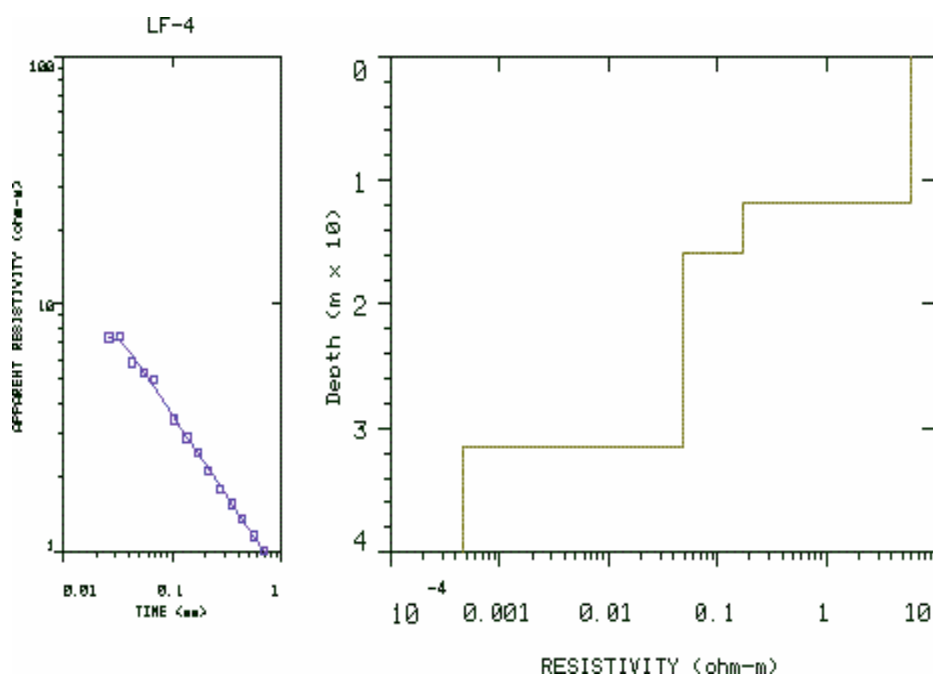


Figura IV.39 – Sondagens Eletromagnéticas LF-04, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

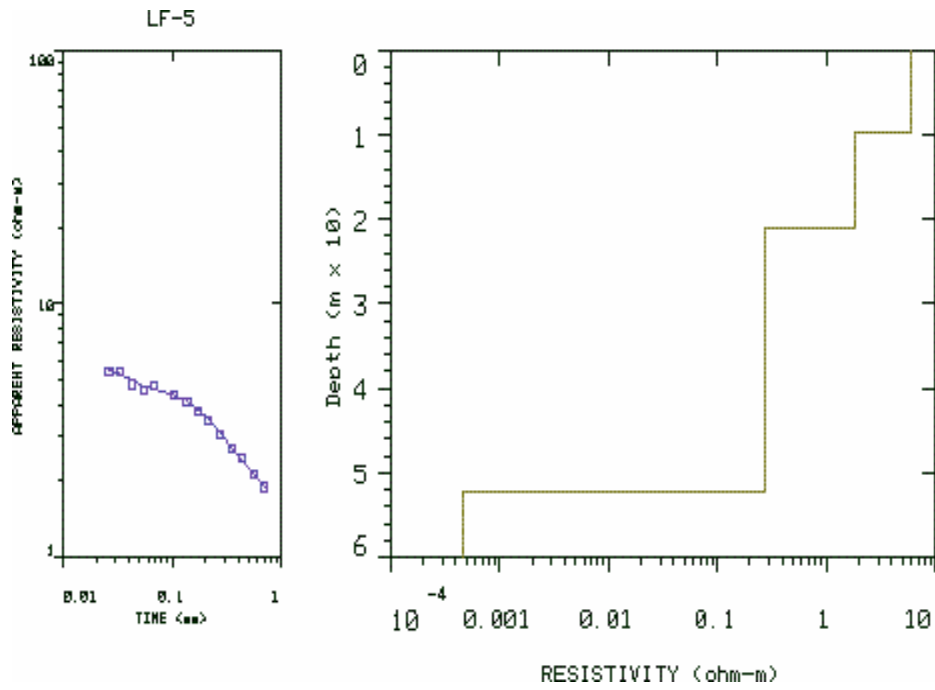


Figura IV.40 – Sondagens Eletromagnéticas LF-05, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

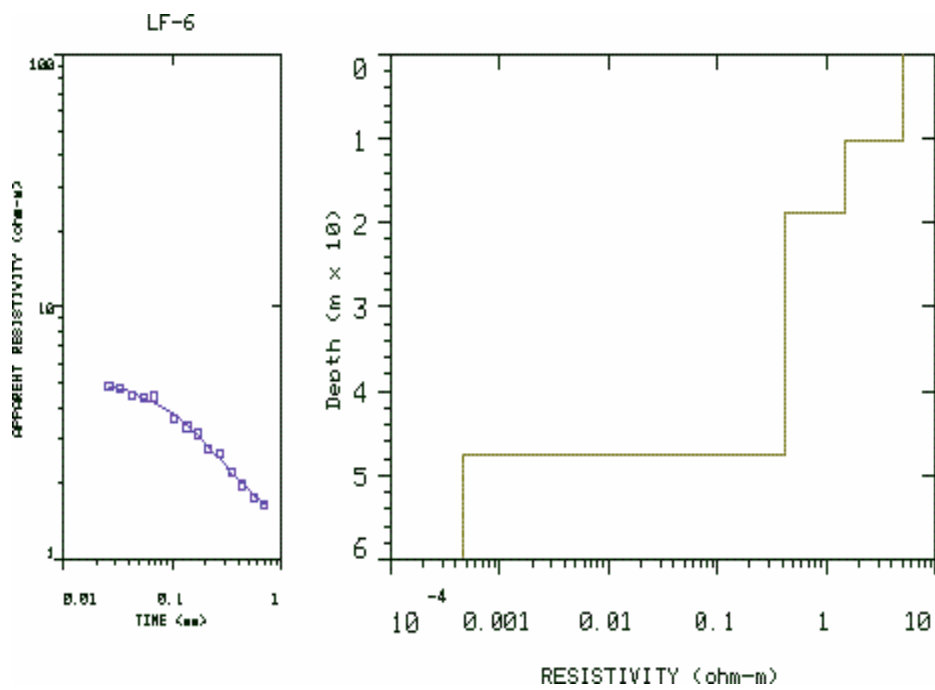


Figura IV.41 – Sondagens Eletromagnéticas LF-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

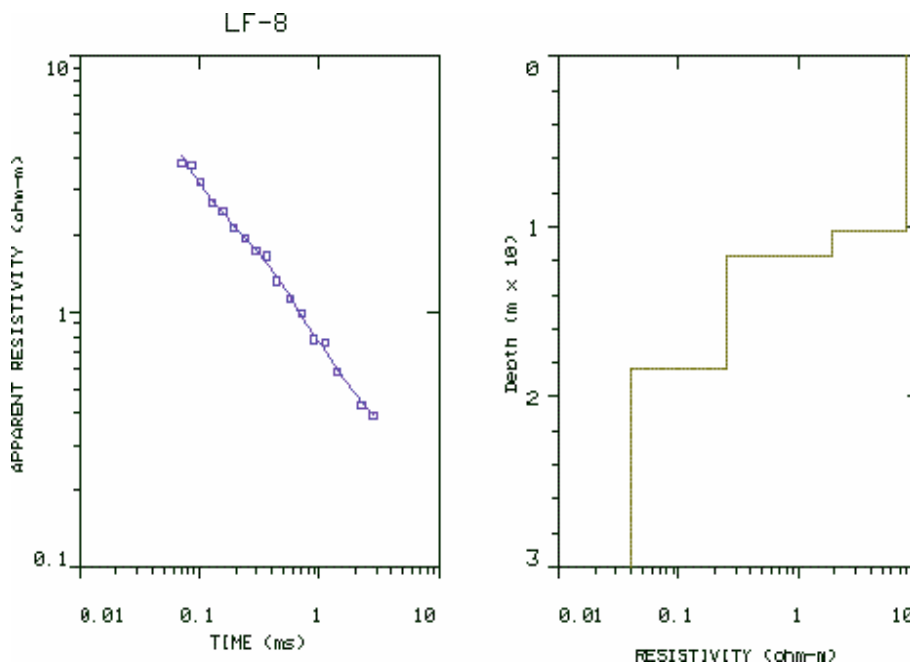


Figura IV.42 – Sondagens Eletromagnéticas LD-08, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

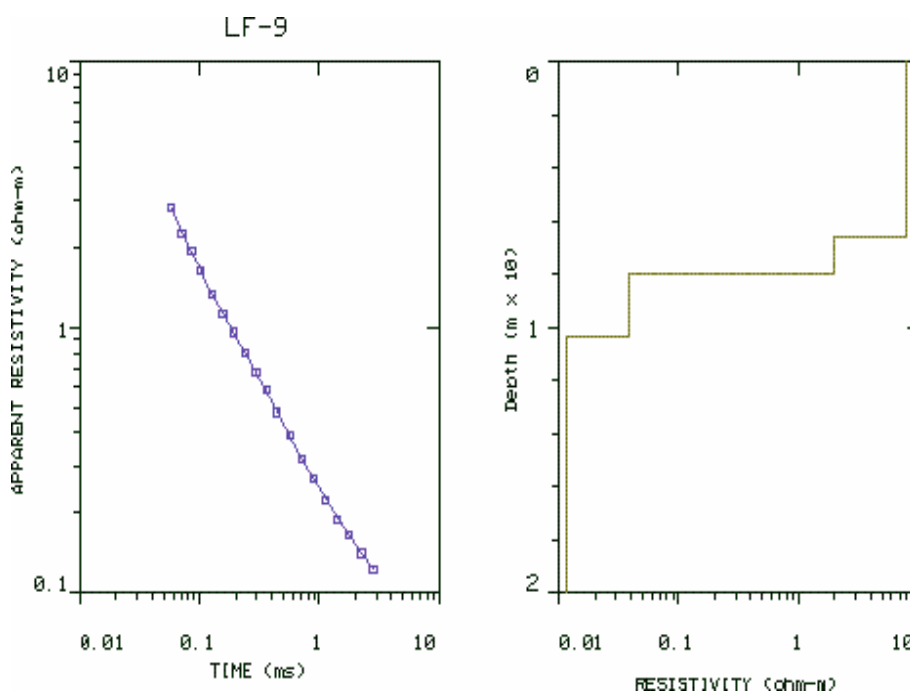


Figura IV.43 – Sondagens Eletromagnéticas LF-09, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

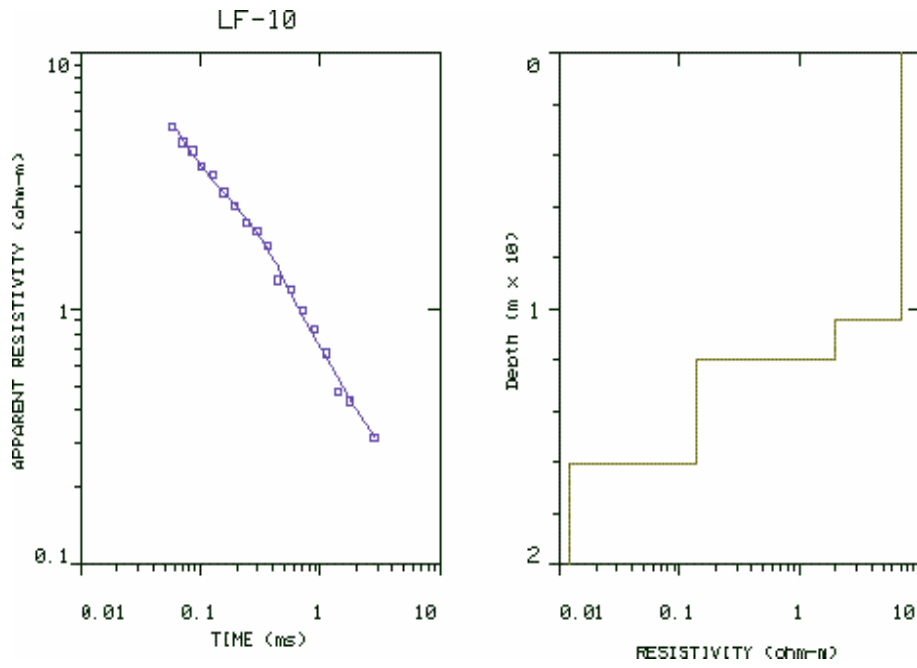


Figura IV.44 – Sondagens Eletromagnéticas LF-10, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

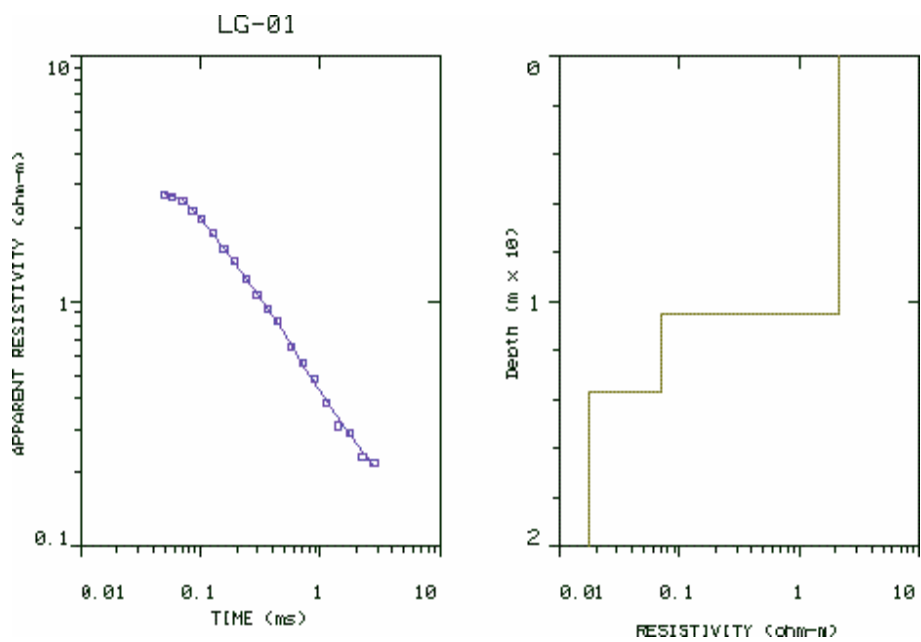


Figura IV.45 – Sondagens Eletromagnéticas LG-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

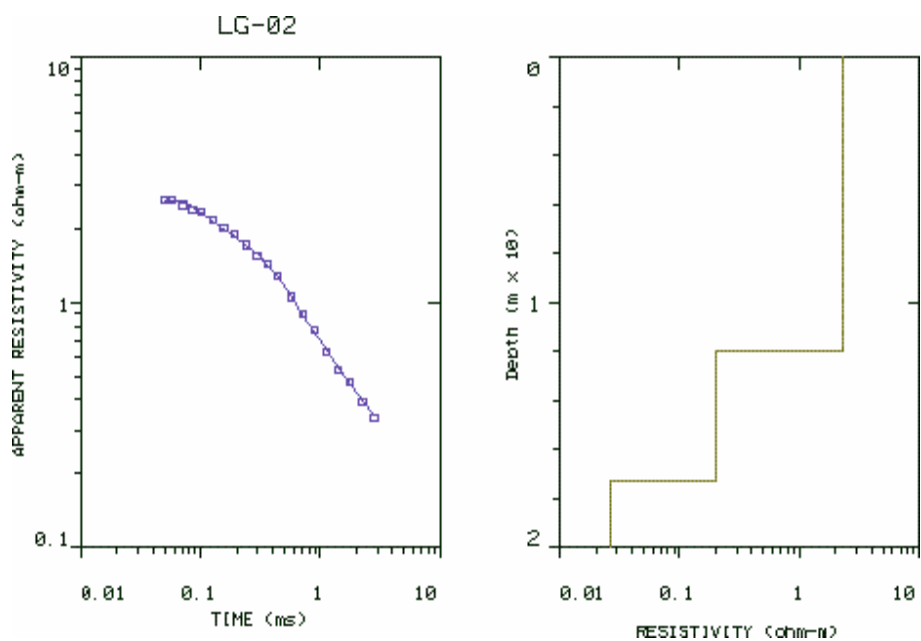


Figura IV.46 – Sondagens Eletromagnéticas LG-02, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

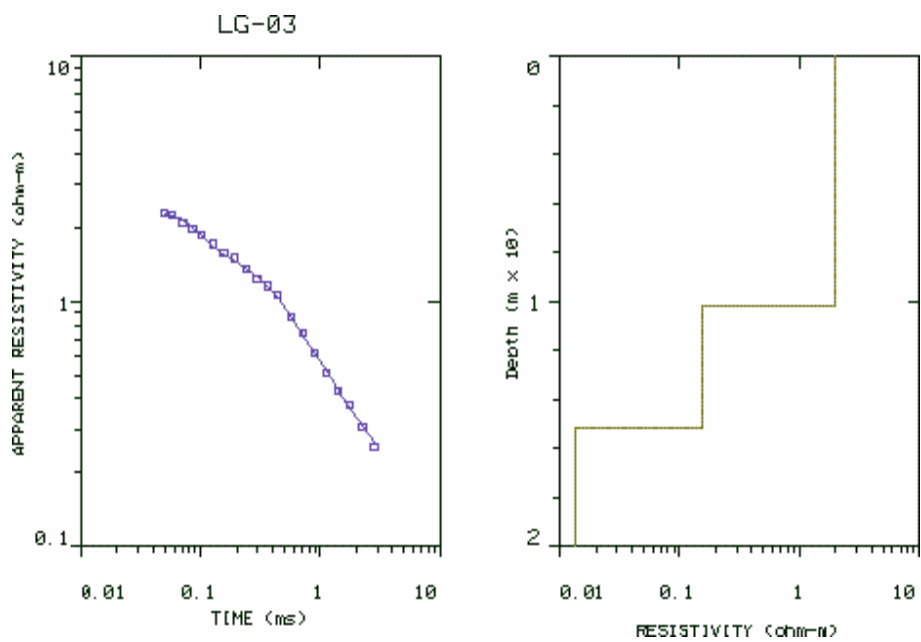


Figura IV.47 – Sondagens Eletromagnéticas LG-03, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

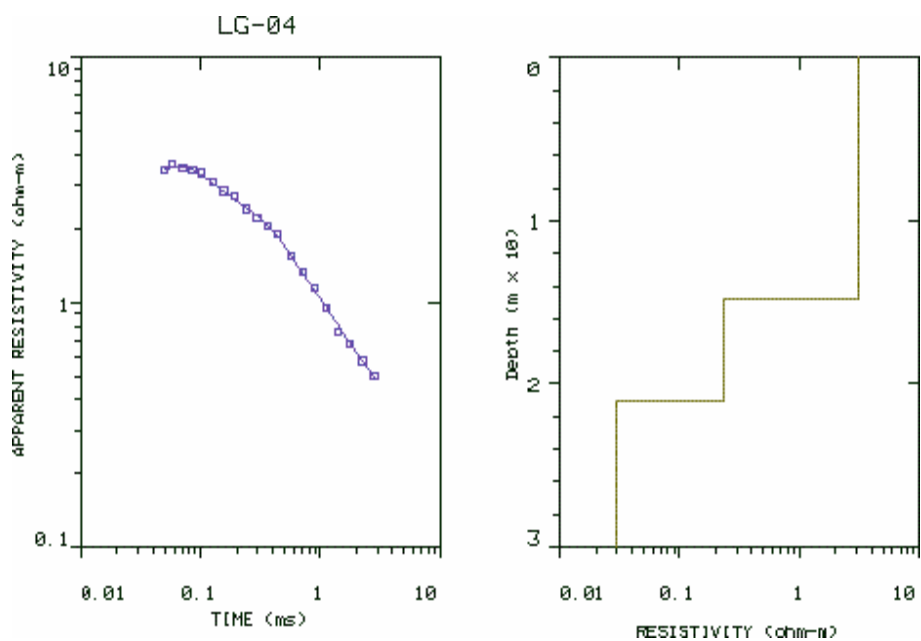


Figura IV.48 – Sondagens Eletromagnéticas LG-04, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

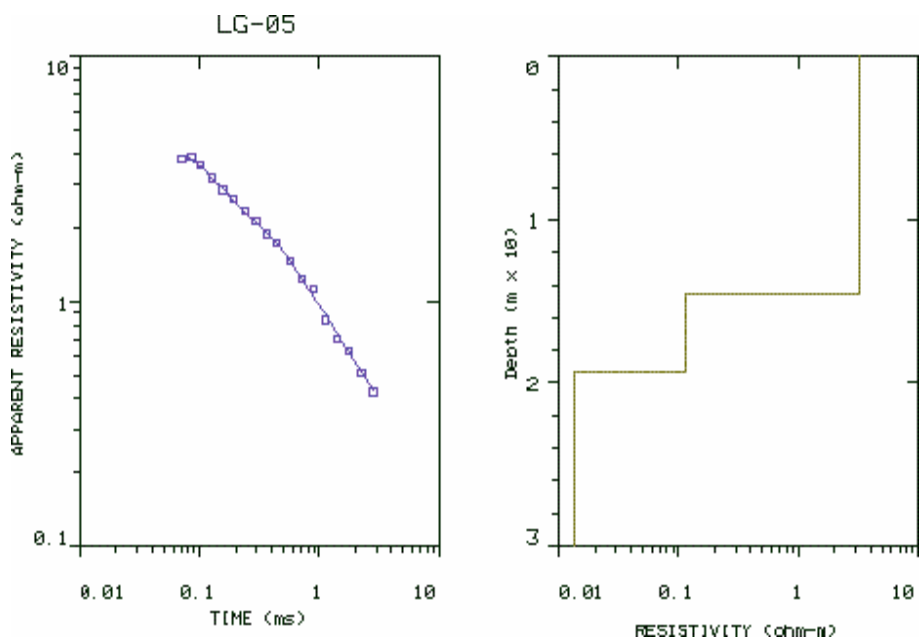


Figura IV.49 – Sondagens Eletromagnéticas LG-05, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

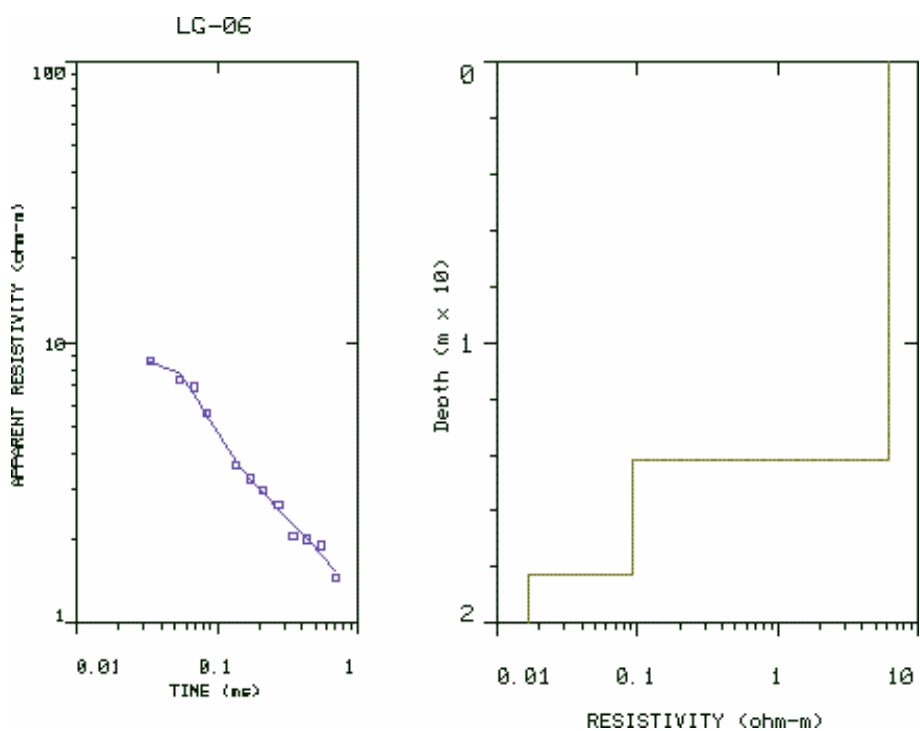


Figura IV.50 – Sondagens Eletromagnéticas LG-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

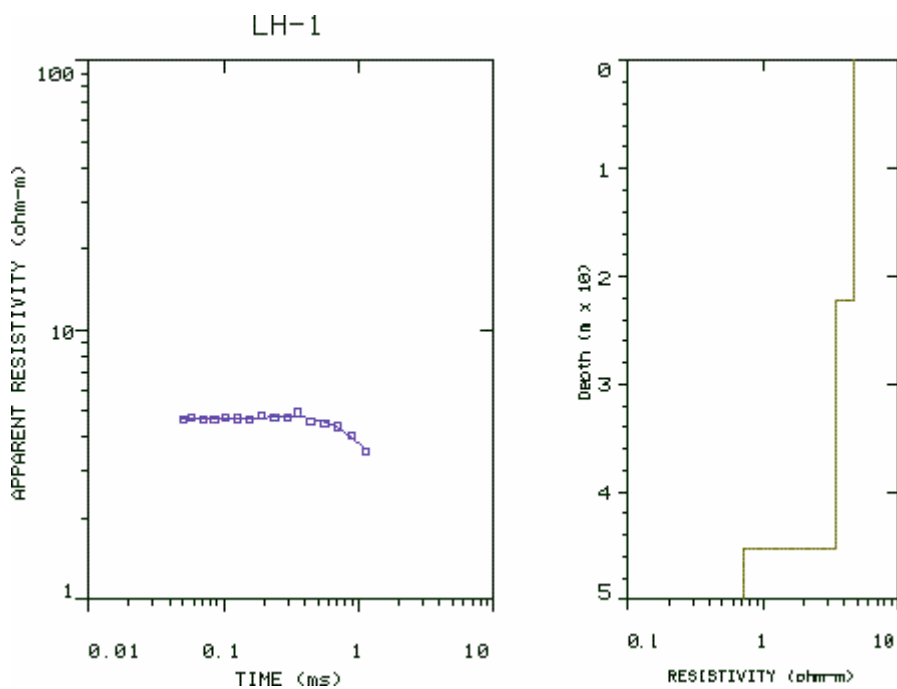


Figura IV.51 – Sondagens Eletromagnéticas LH-01, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

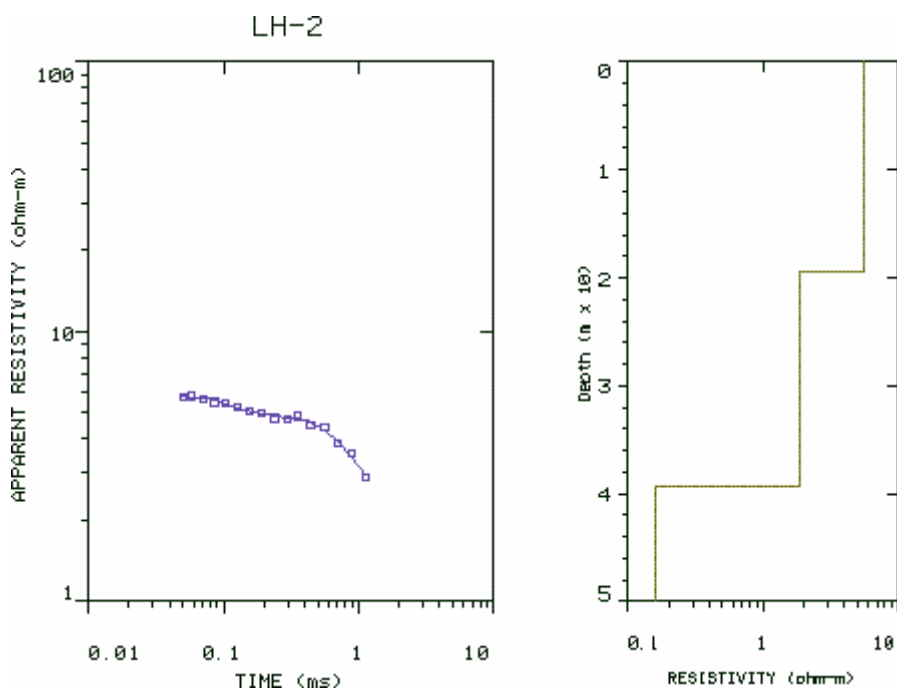


Figura IV.52 – Sondagens Eletromagnéticas LH-02, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

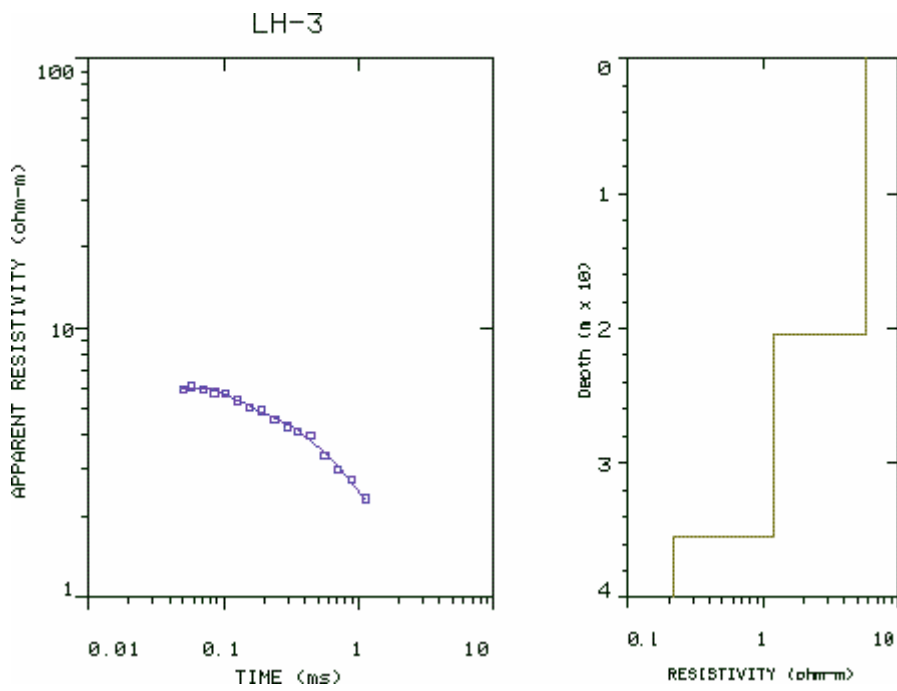


Figura IV.53 – Sondagens Eletromagnéticas LH-03, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

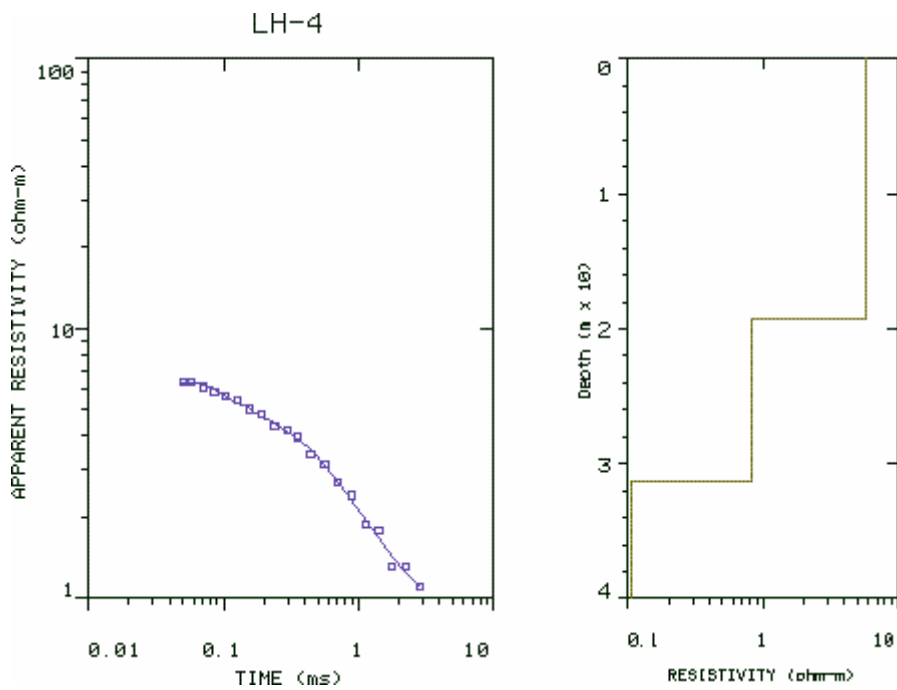


Figura IV.54 – Sondagens Eletromagnéticas LH-04, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

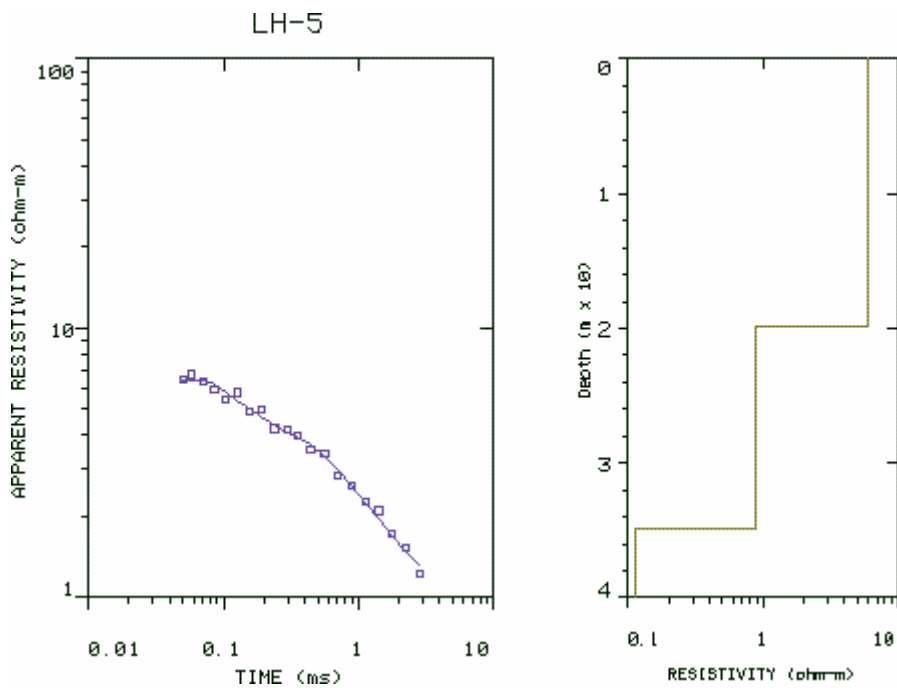


Figura IV.55 – Sondagens Eletromagnéticas LH-05, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

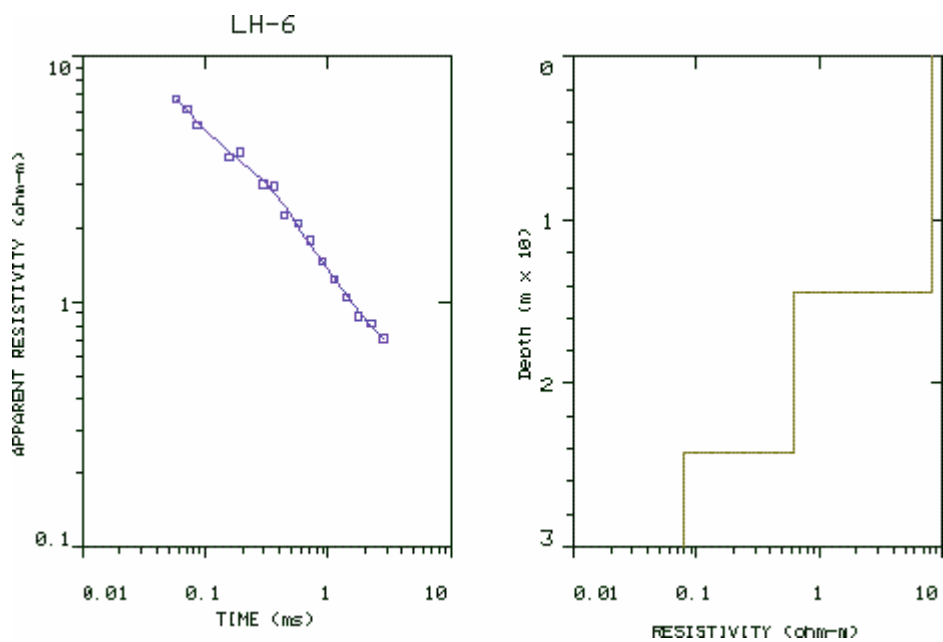


Figura IV.56 – Sondagens Eletromagnéticas LH-06, com a curva de campo à esquerda e o modelo processado a direita

APÊNDICE II

Sondagens Elétricas Verticais

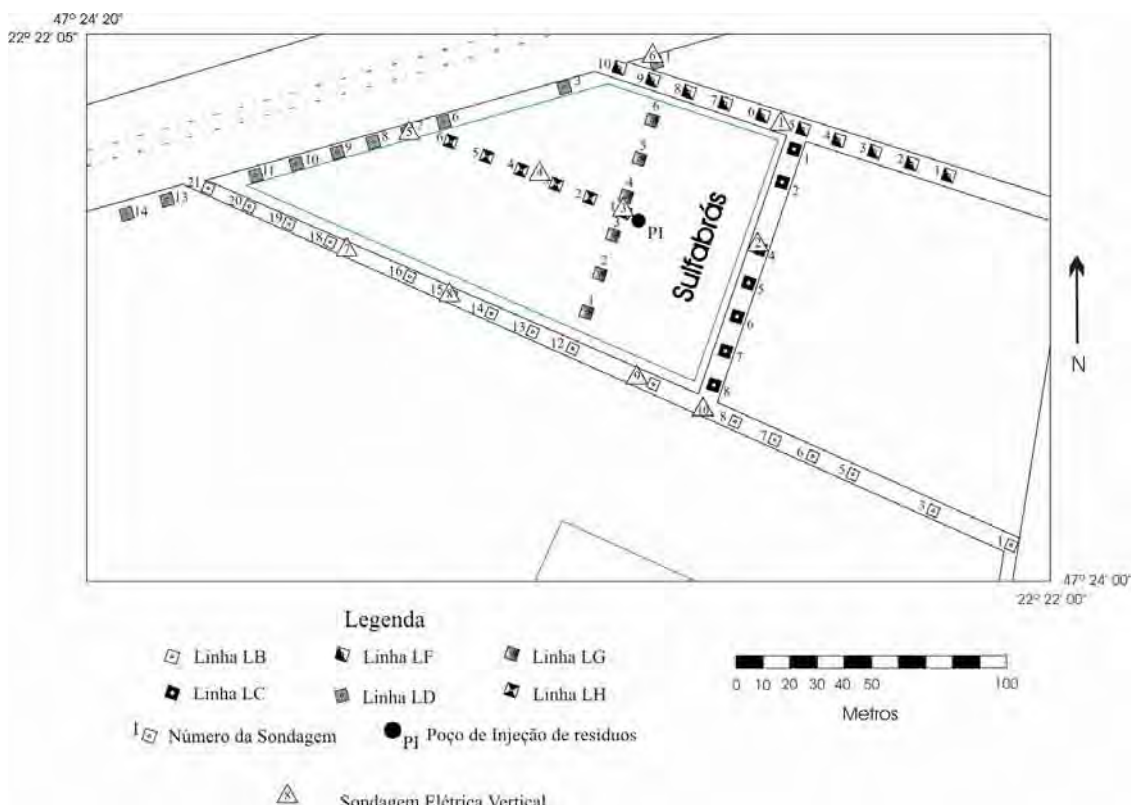
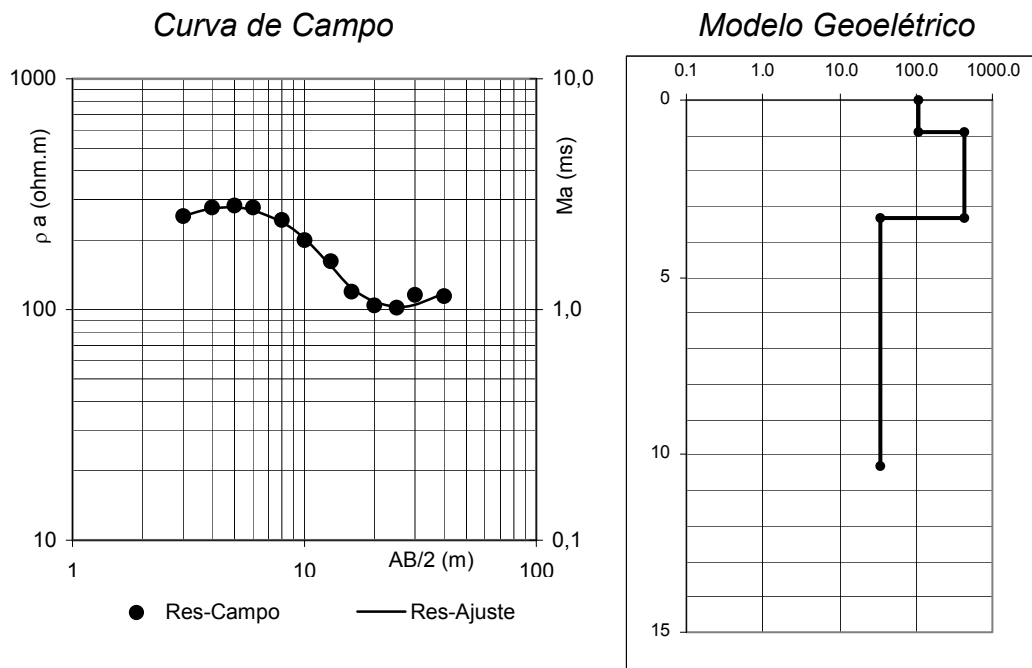


Figura V.1 – Pontos de Sondagem Elétrica Vertical, com respectivas linhas de Caminhamento Eletromagnético



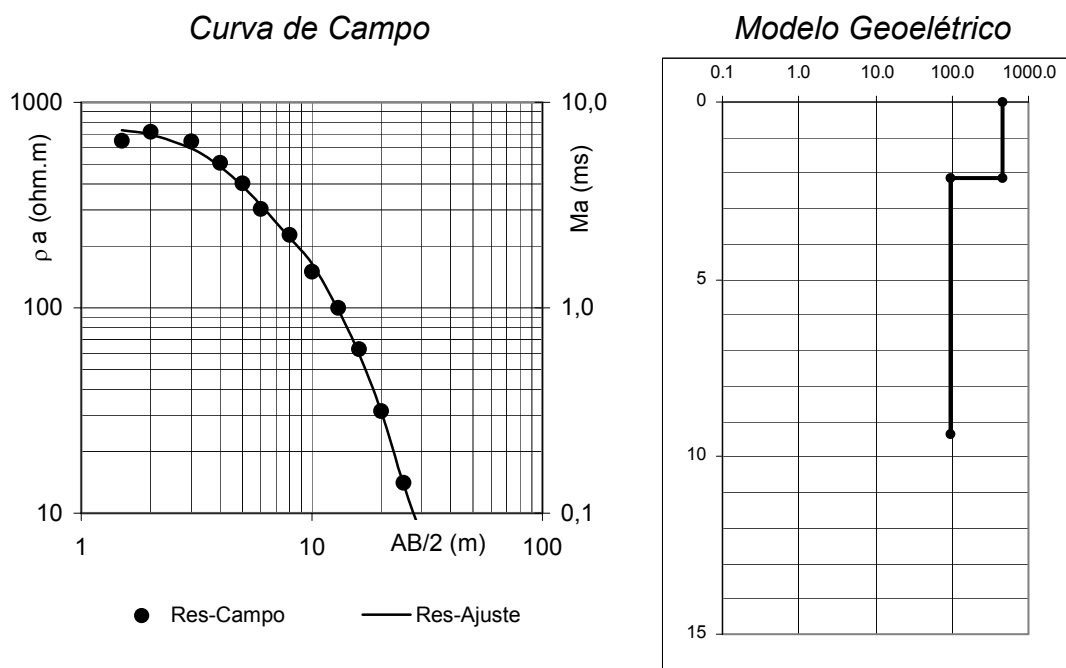
CAMPO	Resistividade		
	AB/2	campo	ajuste
3		254.2	255.2
4		277.3	273.9
5		282.3	277.0
6		277.3	269.5
8		244.3	238.8
10		200.0	203.0
13		162.2	155.1
16		119.7	123.7
20		104.3	108.3
25		101.9	102.9
30		115.8	104.8
40		114.4	117.3

MODELO	res	topo
1	109.50	0.00
2	109.50	0.91
3	436.20	0.91
4	436.20	3.33
5	35.30	3.33
6	35.30	10.32

SEV 1					
Cota: 676m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	109.5	0.88	0.00	676.00	Solo argiloso não saturado, bastante resistivo, não contaminado
2	436.2	2.45	0.88	675.12	
3	35.3	6.99	3.33	672.67	
4	232.5		10.32	665.68	Solo argiloso saturado, bastante resistivo, não contaminado
Profundidade do nível freático: 10.33m					

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.2 – SEV-01: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



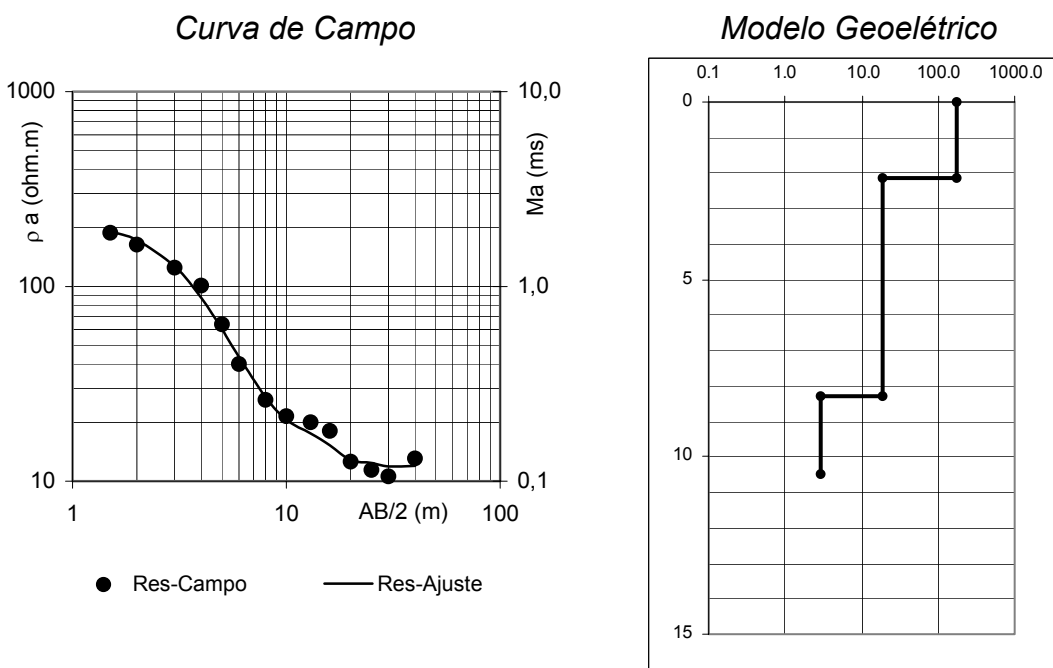
CAMPO	Resistividade	
	AB/2	campo
1.5	649.4	731.7
2	718.4	695.7
3	646.5	595.9
4	508.1	486.8
5	403	391.4
6	302.7	316.5
8	226.2	219.2
10	150.1	163.8
13	99.93	97.98
16	62.97	59.64
20	31.4	31.25
25	14.06	13.79
30	7.52	7.76

MODELO	res	topo
1	452.40	0.00
2	452.40	2.13
3	95.43	2.13
4	95.43	9.35

SEV 2						Cota: 676m			
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante				
1	452.4	2.13	0.00	676.00	Solo argiloso não saturado, com pouco resistivo, contaminado				
2	95.4	7.22	2.13	673.87					
3	0.12		9.35	666.65					
Profundidade do nível freático: 9.35m					Solo argiloso saturado, baixa resistividade, pouco contaminado				

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.3 – SEV-02: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



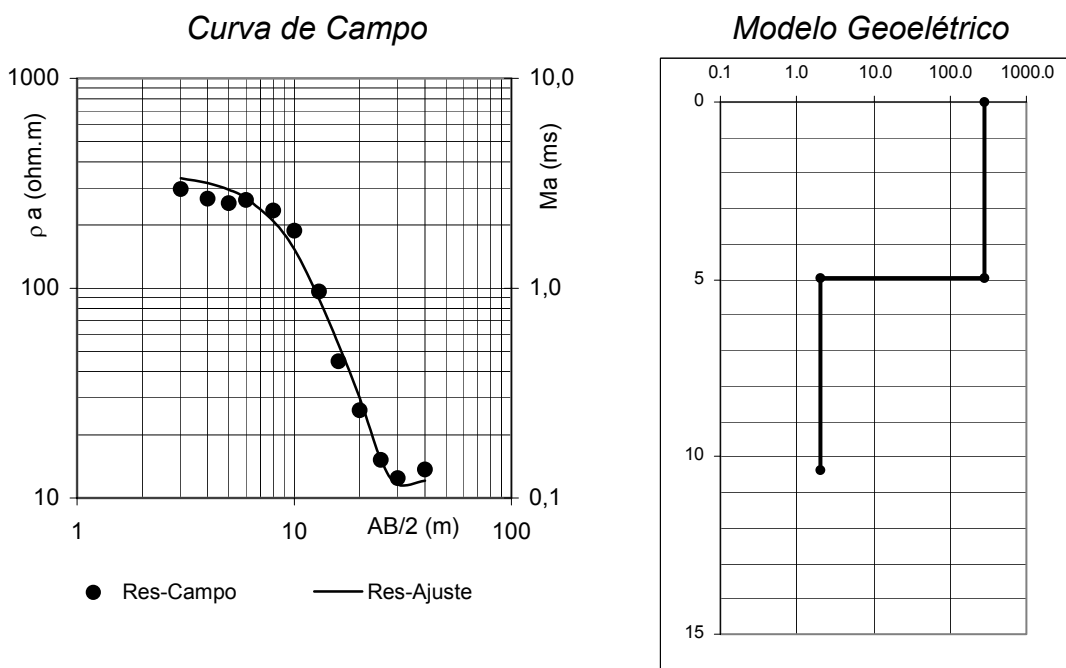
CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
1.5	188.8	192.3
2	163.9	172.5
3	124.9	126.6
4	101.1	87.4
5	63.9	60.3
6	39.9	43.4
8	26.1	27.1
10	21.6	20.7
13	20.1	17.6
16	18.1	15.3
20	12.6	12.9
25	11.4	12.4
30	10.6	11.9
40	13.1	12.0

MODELO	res	topo
1	179.50	0.00
2	179.50	2.15
3	18.32	2.15
4	18.32	8.3
5	2.84	8.3
6	2.84	10.48

SEV 3					
Cota: 675.5m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	179.5	1.68	0.00	675.50	Solo argiloso não saturado, com pouco resistivo, contaminado
2	18.3	6.15	1.68	673.82	
3	2.8	2.65	7.83	667.67	
4	13.8		10.48	665.02	
Profundidade do nível freático: 10,48m					Solo argiloso saturado, moderada resistividade, bastante contaminado

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.4 – SEV-03: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



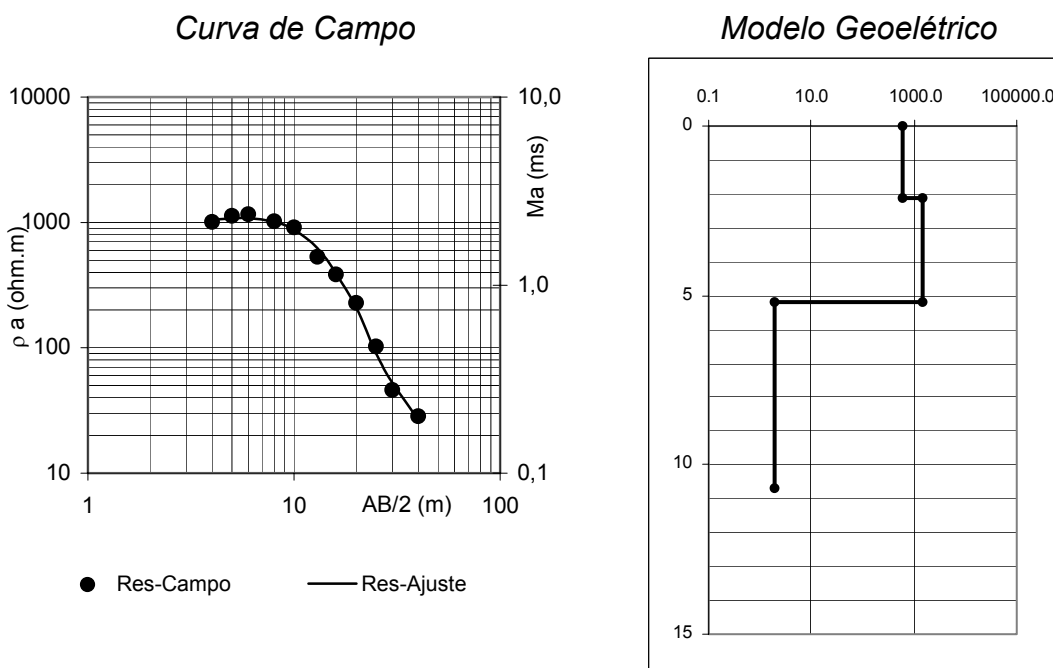
CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
3	296.2	334.2
4	266.5	317.6
5	254.3	295.0
6	263.2	268.1
8	234.2	209.0
10	188.0	153.5
13	96.3	88.8
16	44.9	53.8
20	26.2	30.0
25	15.2	15.3
30	12.4	11.6
40	13.7	12.1

MODELO	res	topo
1	281.10	0.00
2	281.10	4.97
3	2.00	4.97
4	2.00	10.38

SEV 4					
Cota: 675m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	281.1	4.97	0.00	675.00	Solo argiloso não saturado, com pouco resistivo, contaminado
2	2.0	5.41	4.97	670.03	
3	47.3		10.38	664.62	Solo argiloso saturado, moderada resistividade, bastante contaminado
Profundidade do nível freático: 10,38m					

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.5 – SEV-04: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



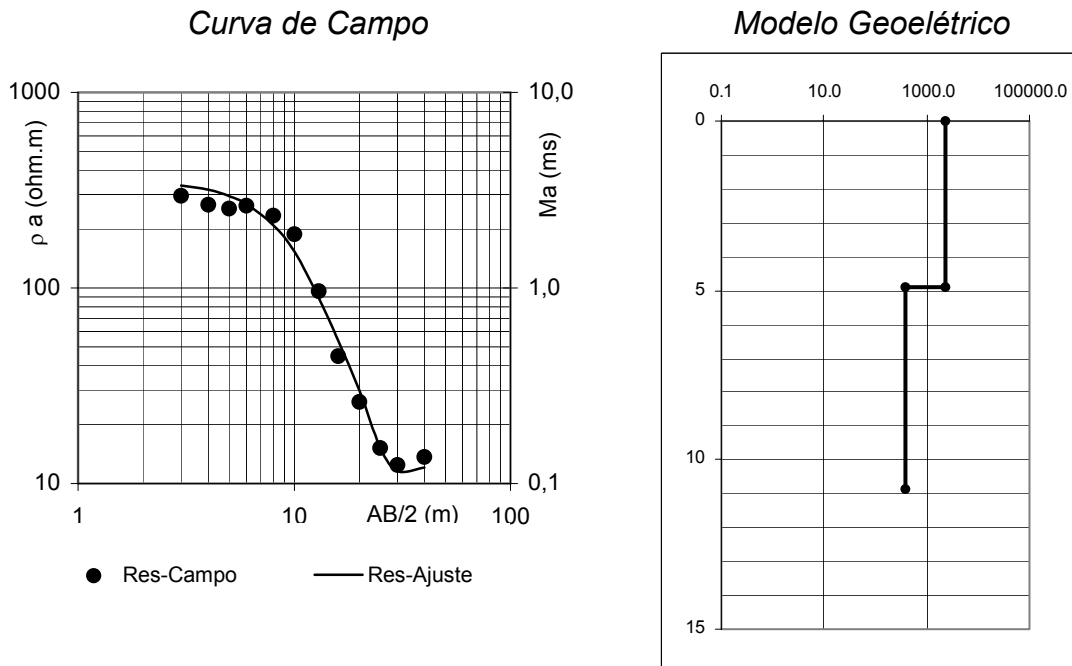
CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
4	1008.7	1049.6
5	1126.5	1080.2
6	1163.4	1081.7
8	1023.4	1010.0
10	915.4	878.4
13	530.5	625.2
16	385.0	392.3
20	228.7	210.2
25	102.7	90.7
30	46.2	52.8
40	28.5	26.8

MODELO	res	topo
1	624.40	0.00
2	624.40	2.13
3	1464.60	2.13
4	1464.60	5.18
3	2.00	5.18
4	2.00	10.71

SEV 5					
Cota: 673m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	624.4	2.13	0.00	675.00	Solo argiloso não saturado, resistividade contrastante, possível contaminação no 3º nível geométrico
2	1.464.6	3.05	2.13	672.87	
3	4.3	5.53	5.18	669.82	
3	30.0		10.71	662.16	Solo argiloso saturado, moderada resistividade, moderada contaminação
Profundidade do nível freático: 10,71m					

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.6 – SEV-05: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



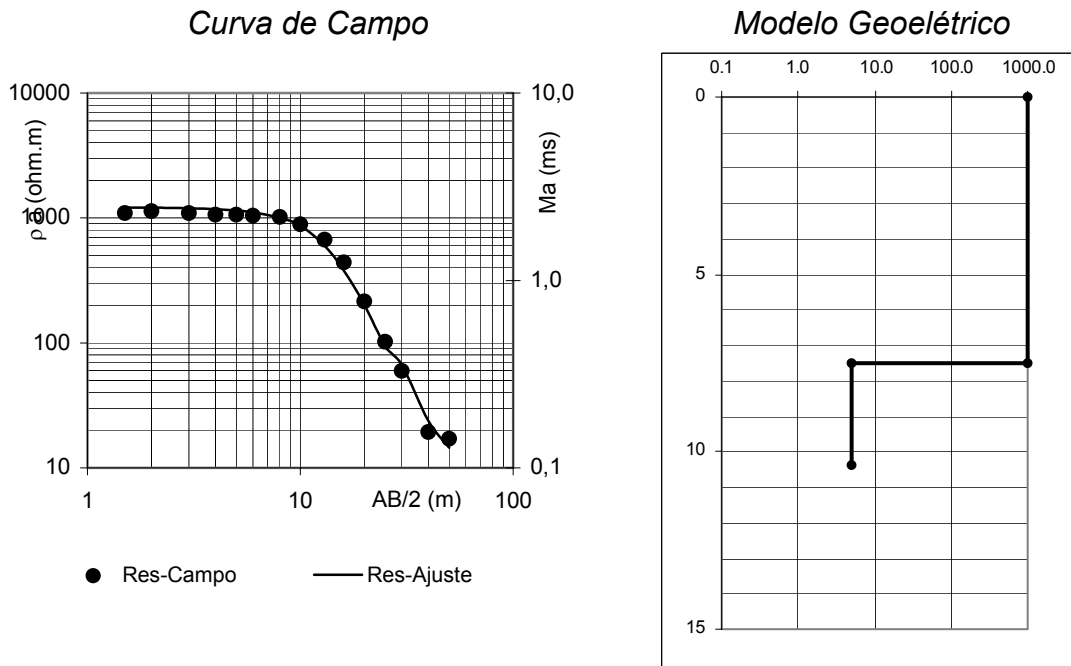
CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
4	1166.1	1296.8
5	1154.3	1225.1
6	1128.1	1138.6
8	1020.5	944.6
10	860.9	754.4
13	619.0	580.2
16	346.0	437.4
20	287.8	291.4
25	173.1	159.4
30	136.5	118.9
40	68.9	79.2
50	57.8	74.3
60	65.6	64.3

MODELO	res	topo
1	2253.80	0.00
2	2253.80	4.92
3	394.00	4.92
4	394.00	10.85

SEV 6					
Cota: 675.5m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	2.253.8	4.92	0.00	675.50	Solo argiloso não saturado, bastante resistivo, não contaminado
2	394.0	5.93	4.92	670.58	
3	59.6		10.85	664.65	Solo argiloso saturado, bastante resistivo, não contaminado
Profundidade do nível freático: 10.85m					

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.7 – SEV-06: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
1.5	1097.1	1212.5
2	1130.9	1209.7
3	1091.6	1198.6
4	1062	1178.4
5	1063.0	1148.1
6	1043.5	1107.5
8	1020.5	999.9
10	889.3	869.1
13	672.0	599.2
16	441.0	378.9
20	214.4	202.4
25	101.9	93.9
30	59.7	66.6
40	19.4	23.9
50	17.1	14.5

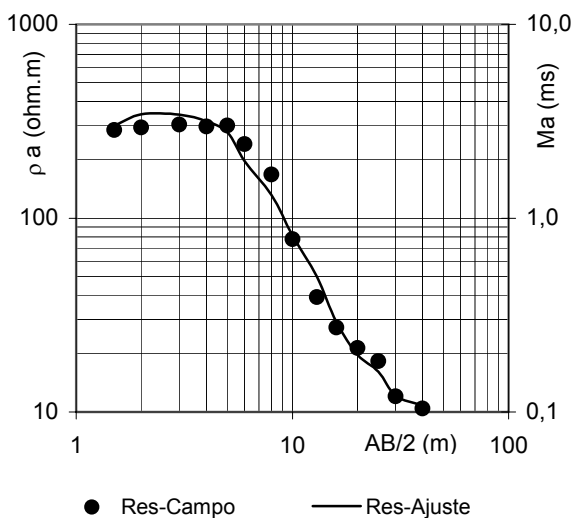
MODELO	res	topo
1	980.00	0.00
2	980.00	7.51
3	4.96	7.51
4	4.96	10.40

SEV 7					
Cota: 672.5m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	980.0	7.51	0.00	672.50	Solo argiloso não saturado, resistividade contrastante, possível contaminação no 2º nível geológico
2	4.96	2.89	7.51	664.99	
3	12.59		10.40	662.10	Solo argiloso saturado, resistividade moderada/baixa pouco contaminado
Profundidade do nível freático: 10.40m					

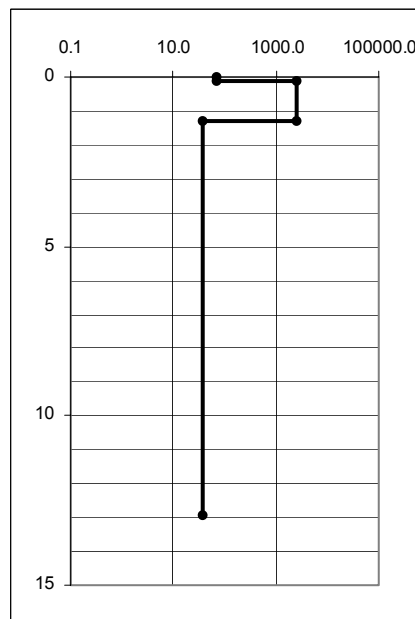
Obs.: Nível geológico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.8 – SEV-07: curva de campo, modelo geológico e interpretação dos níveis de saturação do solo

Curva de Campo



Modelo Geométrico



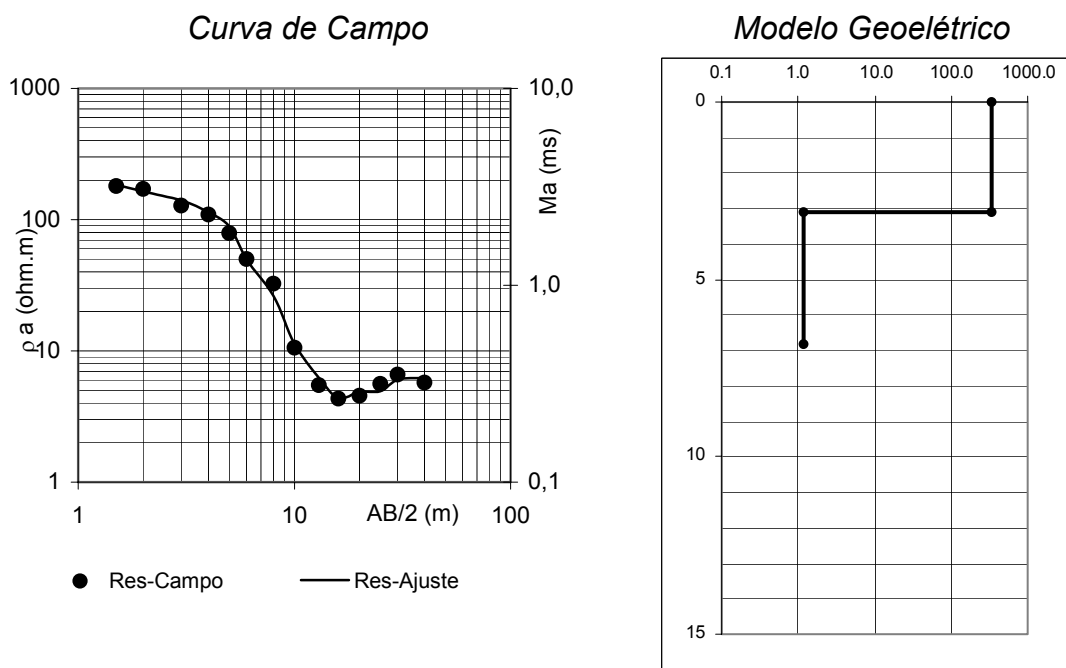
CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
1.5	257.1	254.2
2	284.8	299.5
3	293.7	342.9
4	304.7	341.9
5	297.2	315.6
6	300.7	277.6
8	240.8	197
10	168	131.5
13	78.03	81.22
16	39.11	49.87
20	27.34	29.07
25	21.4	19.77
30	18.29	16.16
40	12.03	12.12
50	10.43	10.78

MODELO	res	topo
1	70.75	0.00
2	70.75	0.14
3	2542.20	0.14
4	2542.20	1.29
5	37.16	1.29
6	37.16	12.93

SEV 8					
Cota: 673.3m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	70.75	0.14	0.00	673.30	Solo argiloso não saturado, grande intervalo com baixa resistividade, pouco contaminado
2	2542.2	1.15	0.14	673.16	
3	37.16	11.55	1.29	672.01	
4	7.6		12.93	660.23	Solo argiloso saturado, resistividade moderada/baixa pouco contaminado
Profundidade do nível freático obliterada pelo contaminação					

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.9 – SEV-08: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo



CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
1.5	180.2	187
2	180.5	184.7
3	171.6	164.3
4	128.2	140.2
5	109.5	113.8
6	78.96	88.84
8	50.1	49.79
10	32.48	26.2
13	10.58	11.31
16	5.47	6.24
20	4.34	4.38
25	4.55	4.86
30	5.62	4.92
40	6.59	6.04
50	5.75	6.25

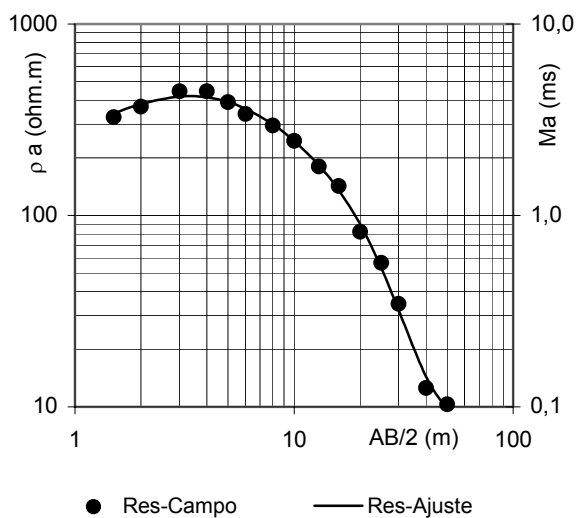
MODELO	res	topo
1	343.40	0.00
2	343.40	3.08
3	1.18	3.08
4	1.18	6.81

SEV 9					
Cota: 675.5m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	343.4	3.10	0.00	675.50	Solo argiloso não saturado, intervalo final com baixa resistividade, pouco contaminado
2	1.18	3.71	3.10	672.40	
3	11.18		6.81	668.69	
Profundidade do nível freático obliterada pela contaminação					Solo argiloso saturado, resistividade moderada/baixa pouco contaminado

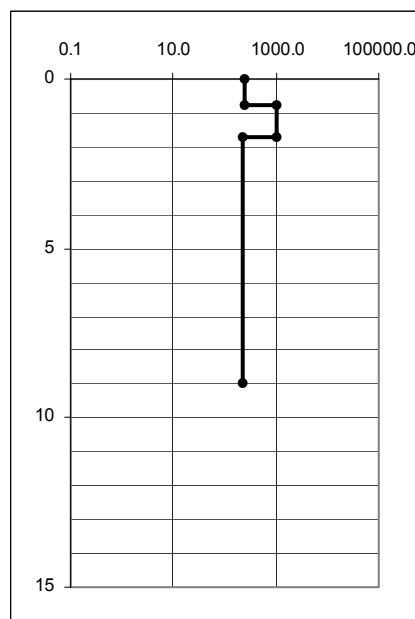
Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.10 – SEV-09: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo

Curva de Campo



Modelo Geométrico



CAMPO	Resistividade	
	campo	ajuste
AB/2		
1.5	326.7	341.6
2	370.5	381.6
3	445.5	418.8
4	445.5	414.8
5	391.2	391.4
6	338.3	360.0
8	295.1	300.0
10	245.0	244.6
13	180.1	182.7
16	142.5	135.8
20	82.1	90.0
25	56.5	53.1
30	34.5	32.0
40	12.6	14.4
50	10.3	9.7

MODELO	res	topo
1	248.50	0.00
2	248.50	0.79
3	1035.00	0.79
4	1035.00	1.69
5	219.40	1.69
6	219.40	8.99

SEV 10					
Cota: 675.8m					
Nível	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Profundidade ao topo (m)	Cota do topo (m)	Material predominante
1	248.5	0.79	0.00	675.80	Solo argiloso não saturado, bastante resistivo, não contaminado
2	1.035.0	0.90	0.79	675.01	
3	219.4	7.30	1.69	674.11	
4	7.5		8.99	666.81	
Profundidade do nível freático: 8,99m					Solo argiloso saturado, resistividade moderada/baixa pouco contaminado

Obs.: Nível geométrico descrito em termos de predominância do material geológico.

Figura V.11 – SEV-10: curva de campo, modelo geométrico e interpretação dos níveis de saturação do solo

APÊNDICE III

MAPAS E PSEUDO-SEÇÕES DE RESISTIVIDADE APARENTE

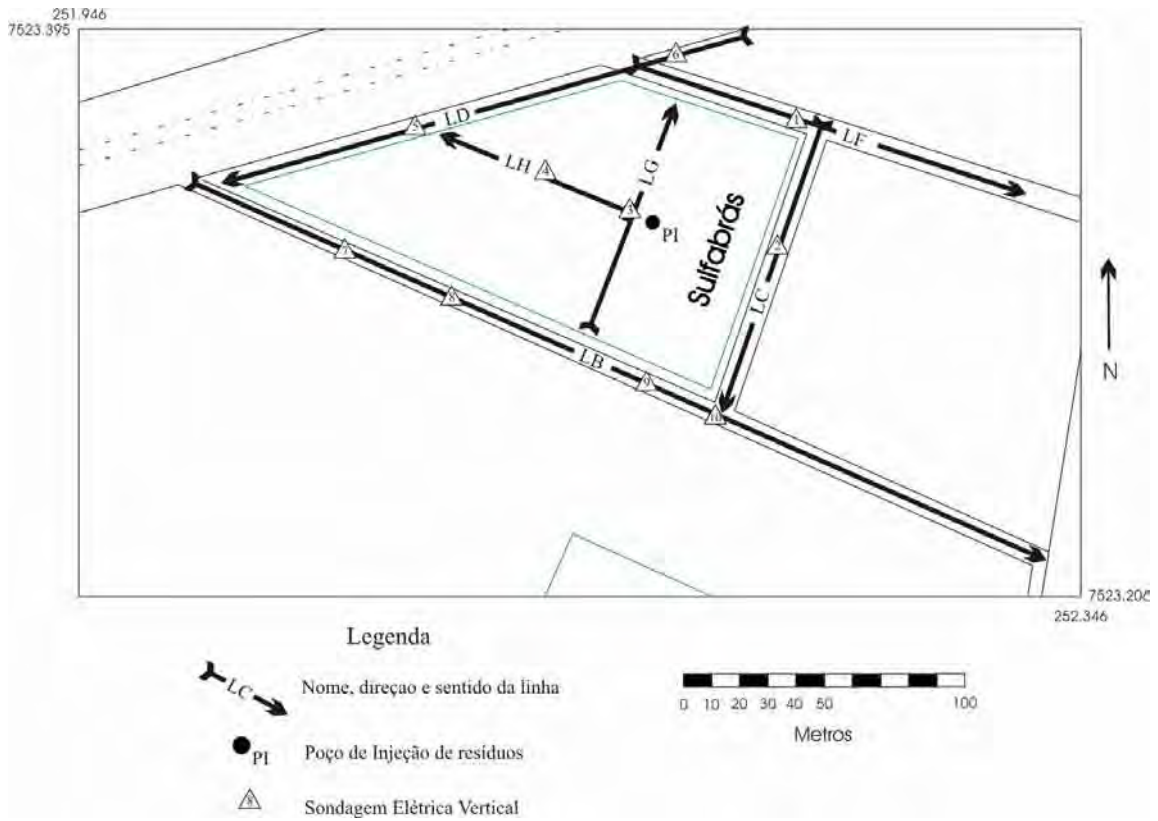


Figura VI.1 - Linhas de Caminhamento Elétrico e pontos de Sondagem Elétrica Vertical

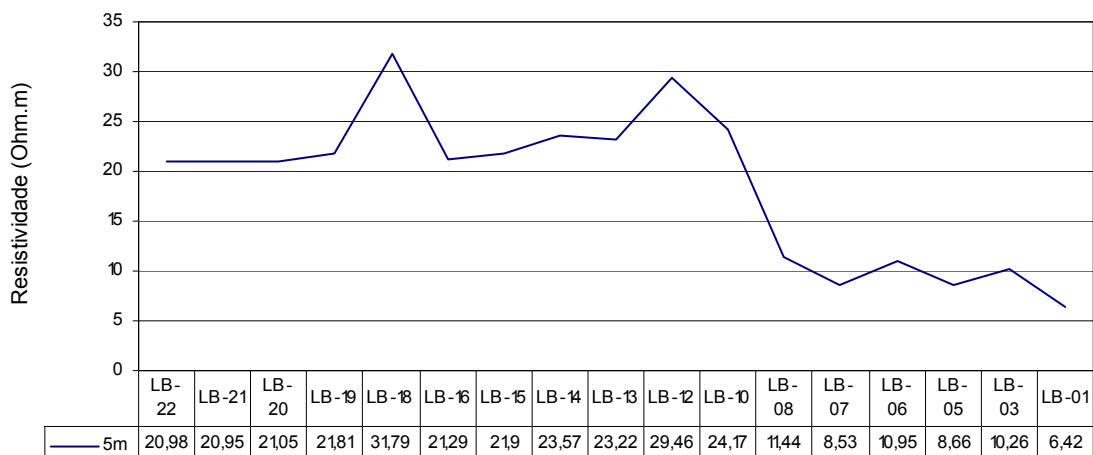


Figura VI.2 - Valores de resistividade da linha LB para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

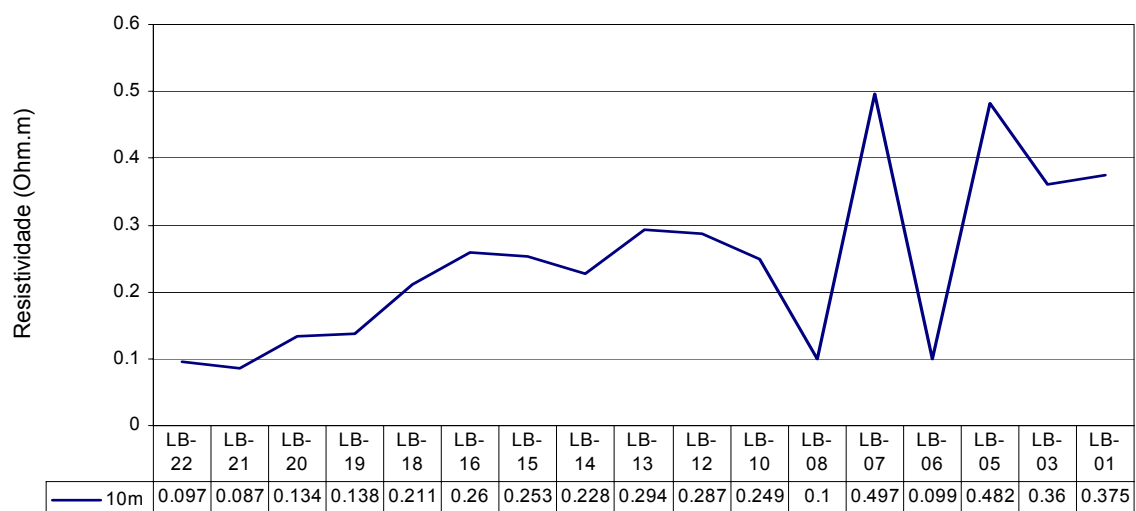


Figura VI.3 - Valores de resistividade da linha LB para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

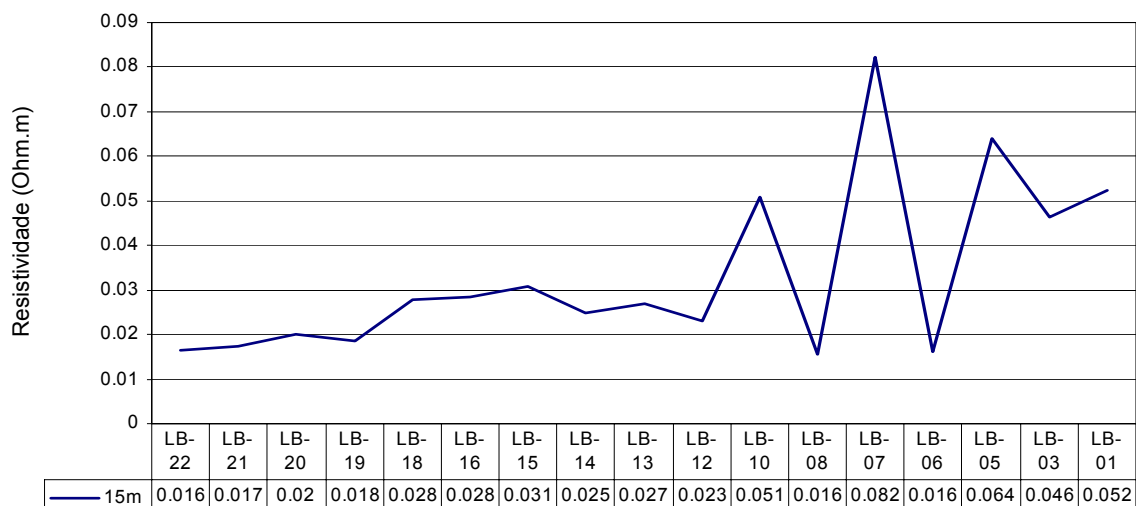


Figura VI.4 - Valores de resistividade da linha LB para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

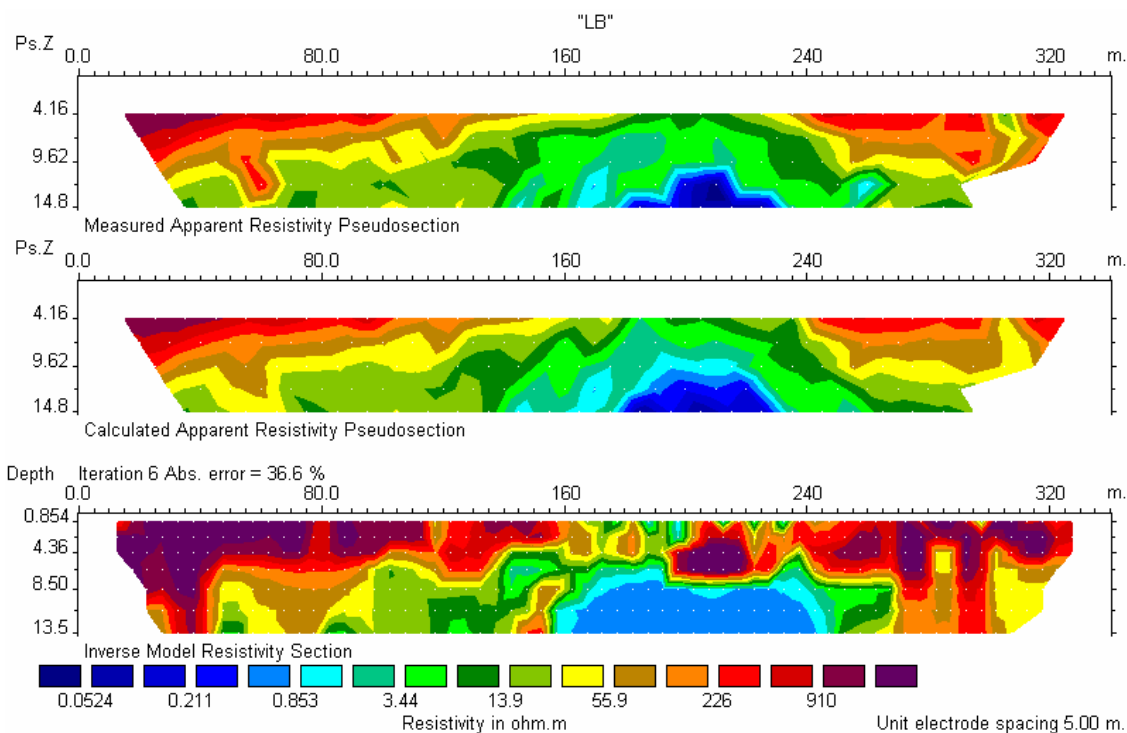


Figura VI.5 - Caminhamento elétrico da linha LB, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

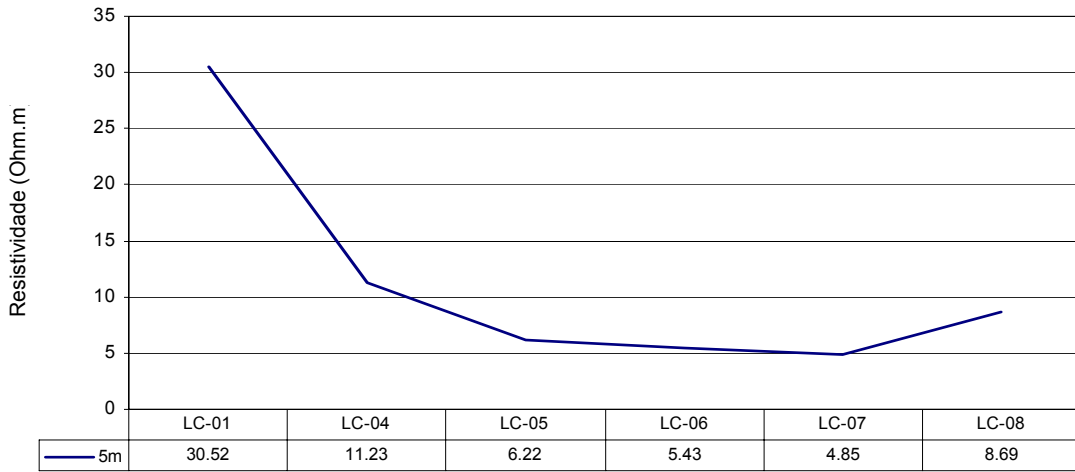


Figura VI.6 - Valores de resistividade da linha LC para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

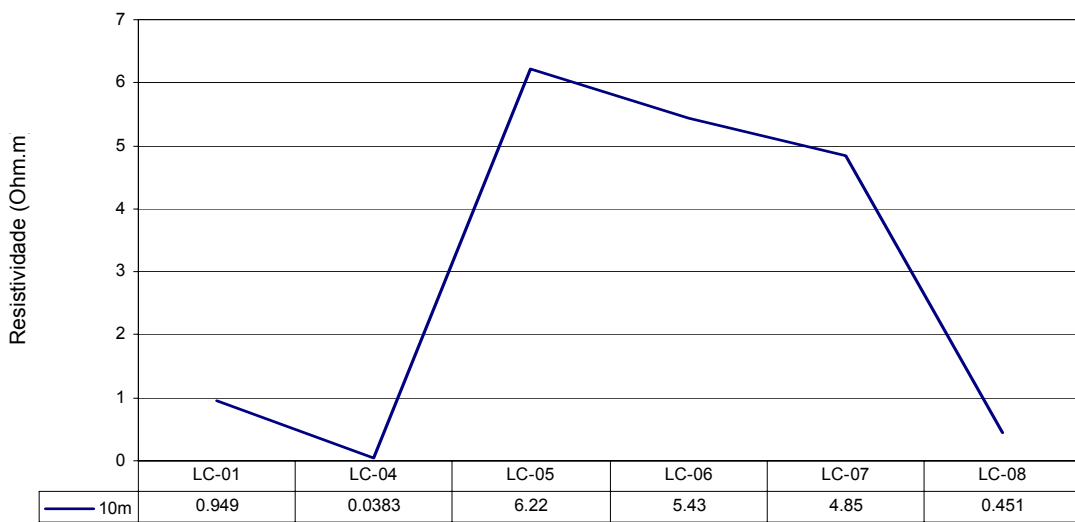


Figura VI.7 - Valores de resistividade da linha LC para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

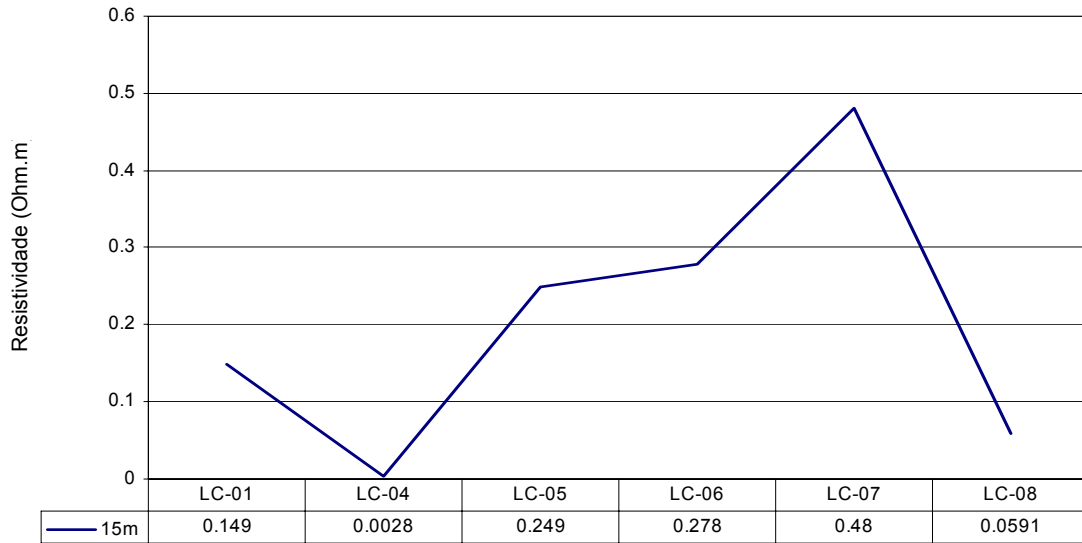


Figura VI.8 - Valores de resistividade da linha LC para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

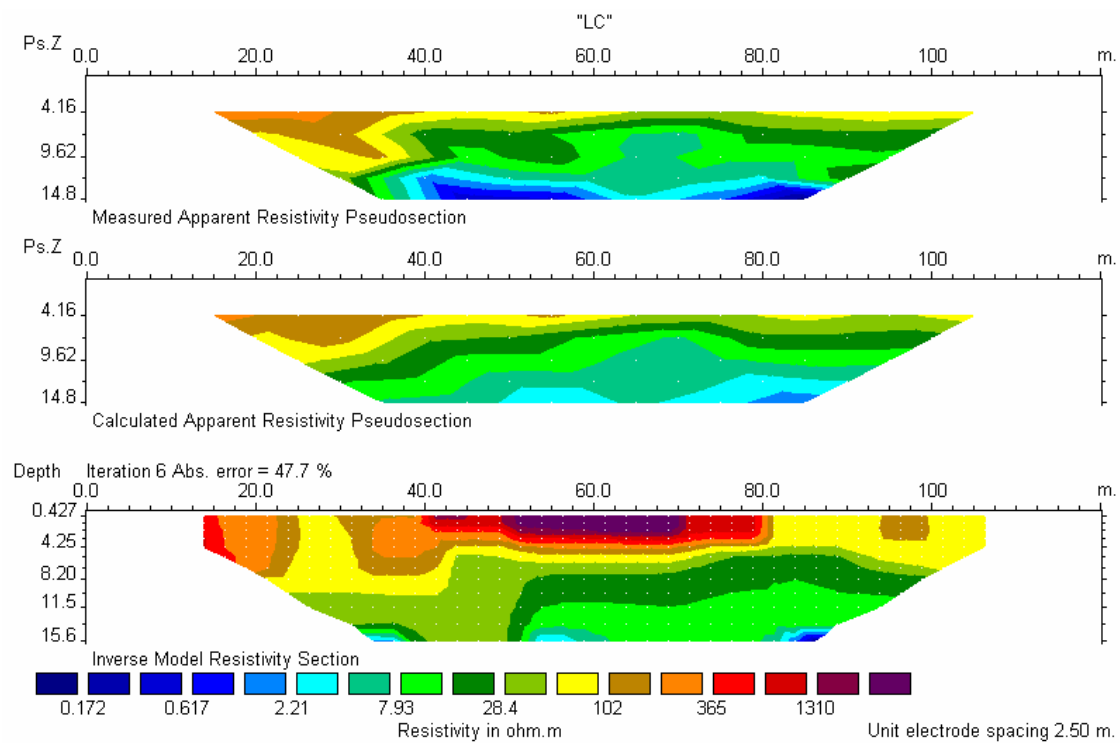


Figura VI.9 - Caminhamento elétrico da linha LC, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

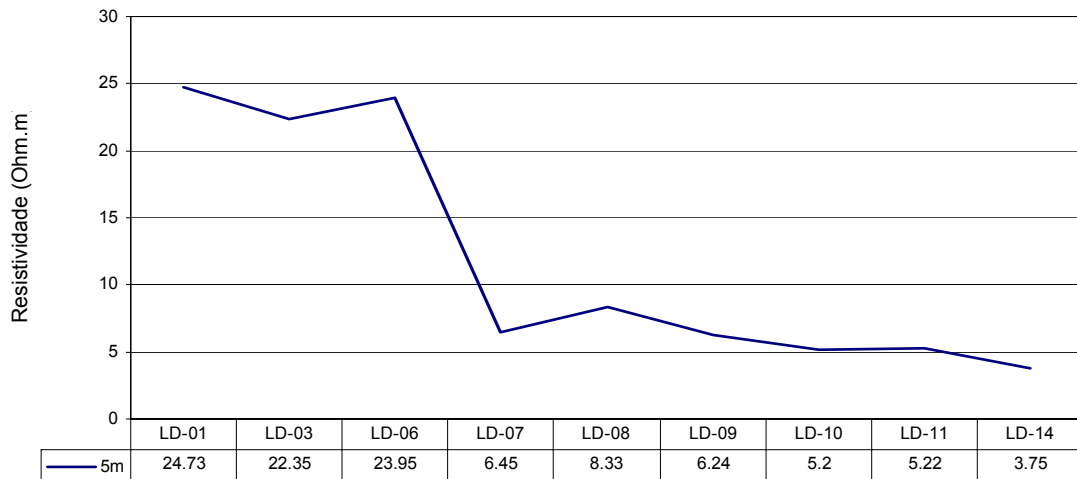


Figura VI.10 - Valores de resistividade da linha LD para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

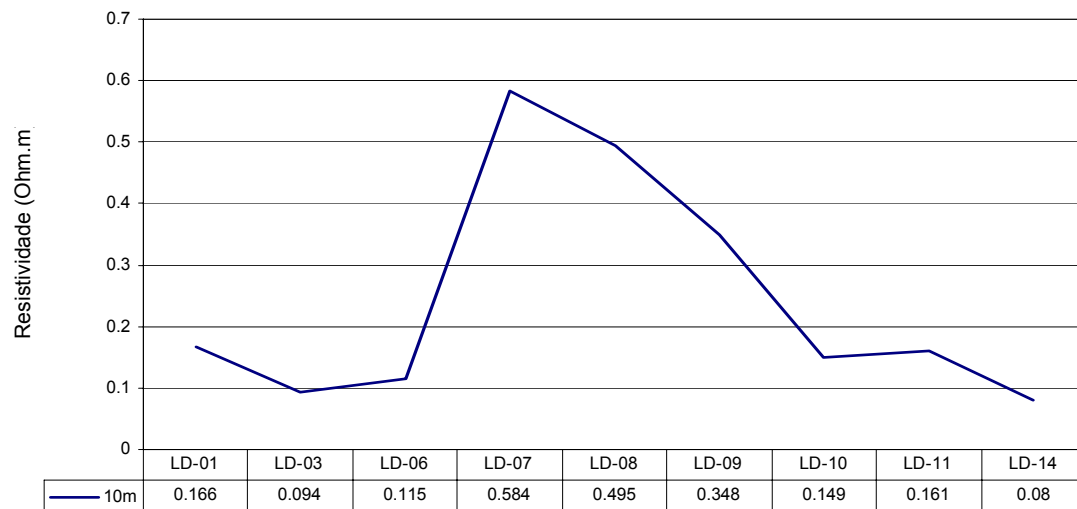


Figura VI.11 - Valores de resistividade da linha LD para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

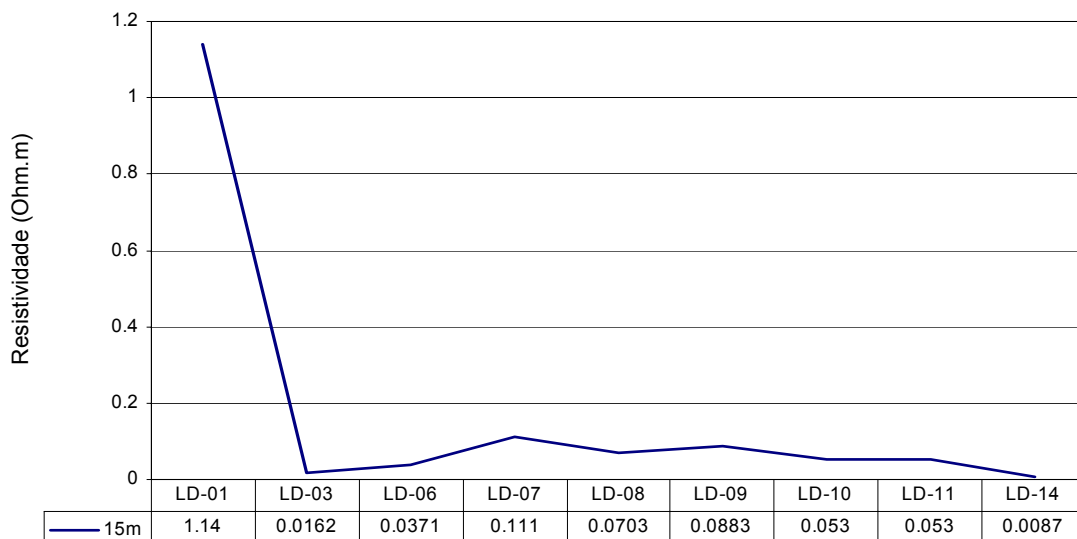


Figura VI.12 - Valores de resistividade da linha LD para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

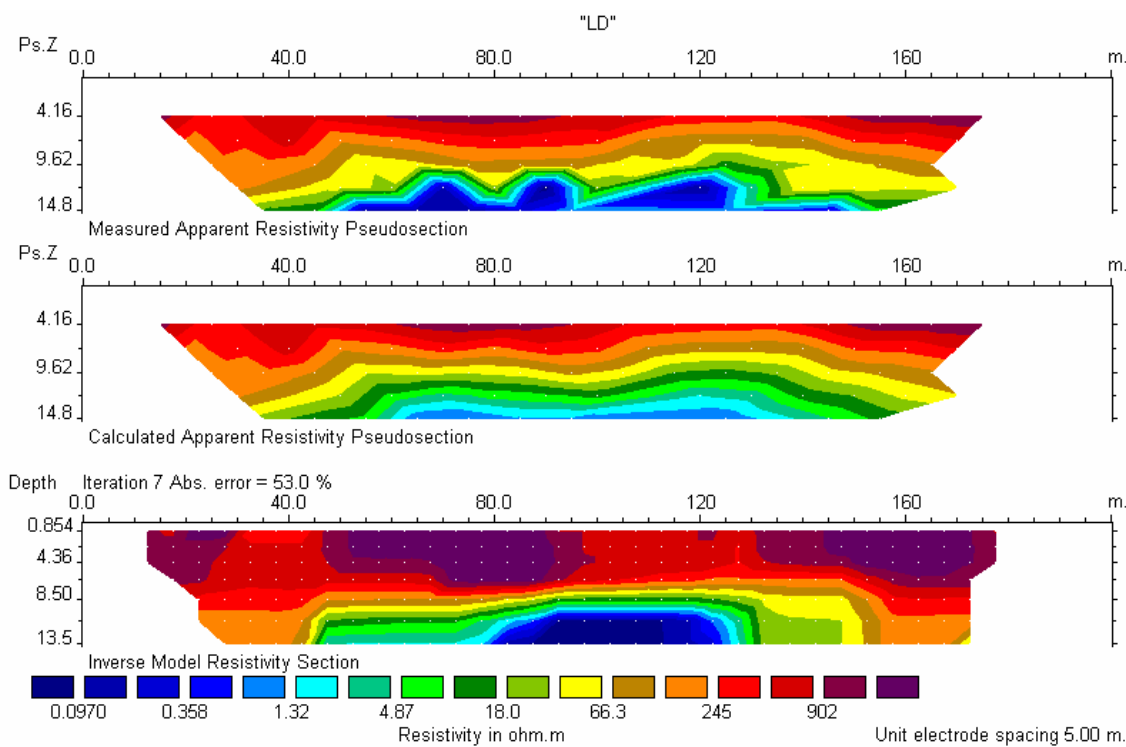


Figura VI.13 - Caminhamento elétrico da linha LD, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

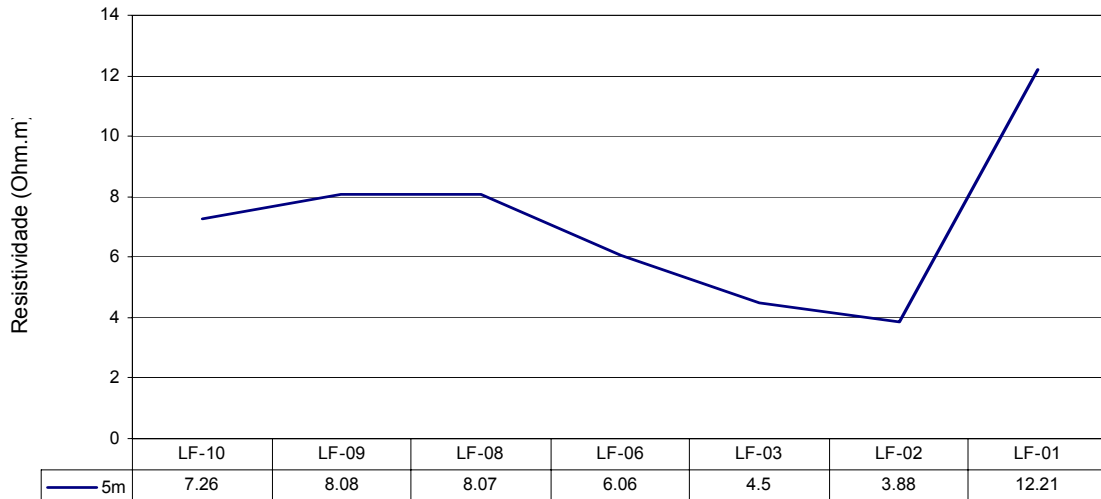


Figura VI.14 - Valores de resistividade da linha LF para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

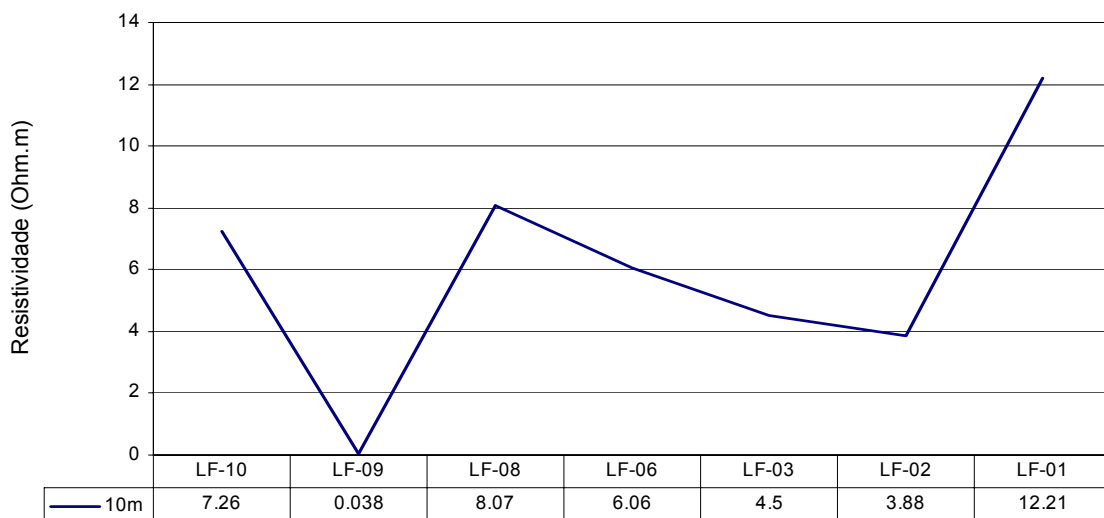


Figura VI.15 - Valores de resistividade da linha LF para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

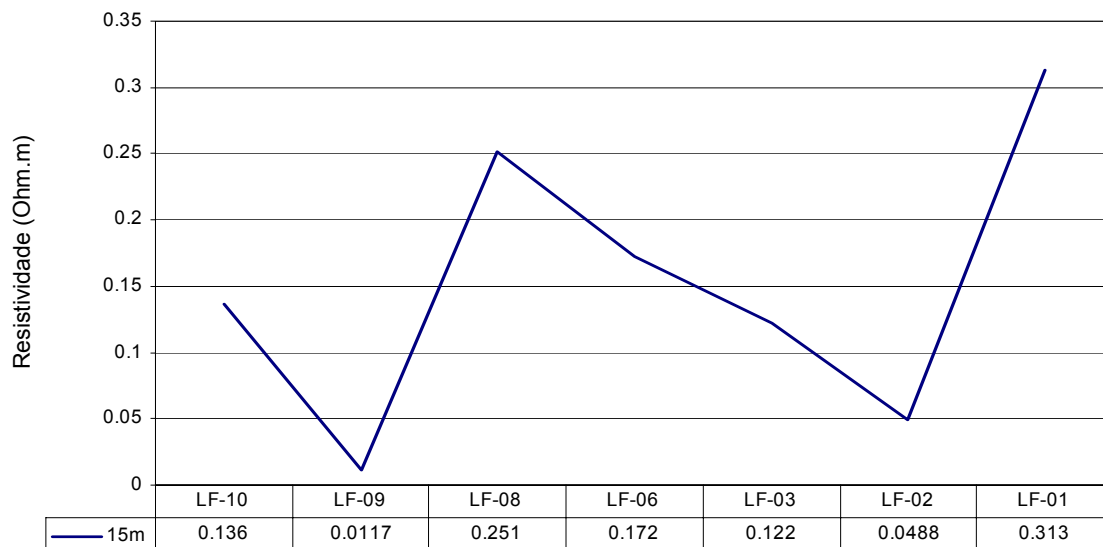


Figura VI.16 - Valores de resistividade da linha LF para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

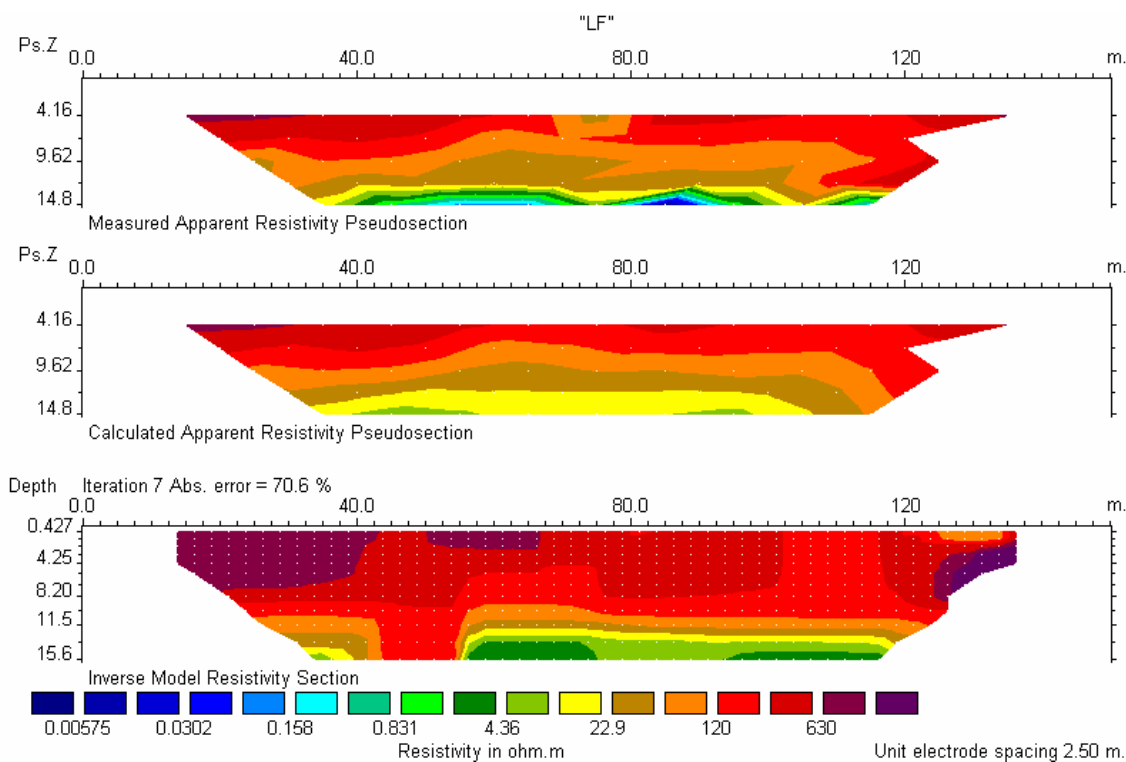


Figura VI.17 - Caminhamento elétrico da linha LF, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

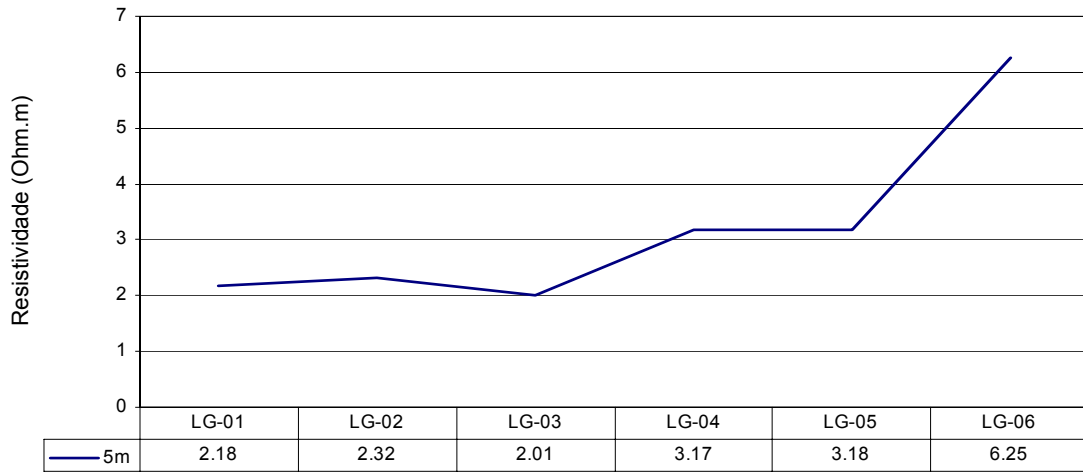


Figura VI.18 - Valores de resistividade da linha LG para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

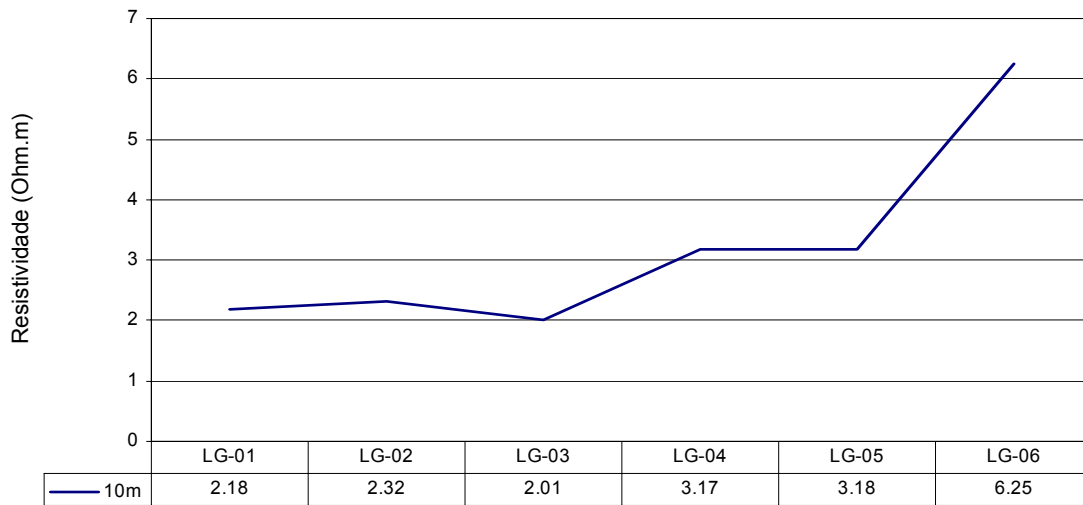


Figura VI.19 - Valores de resistividade da linha LG para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

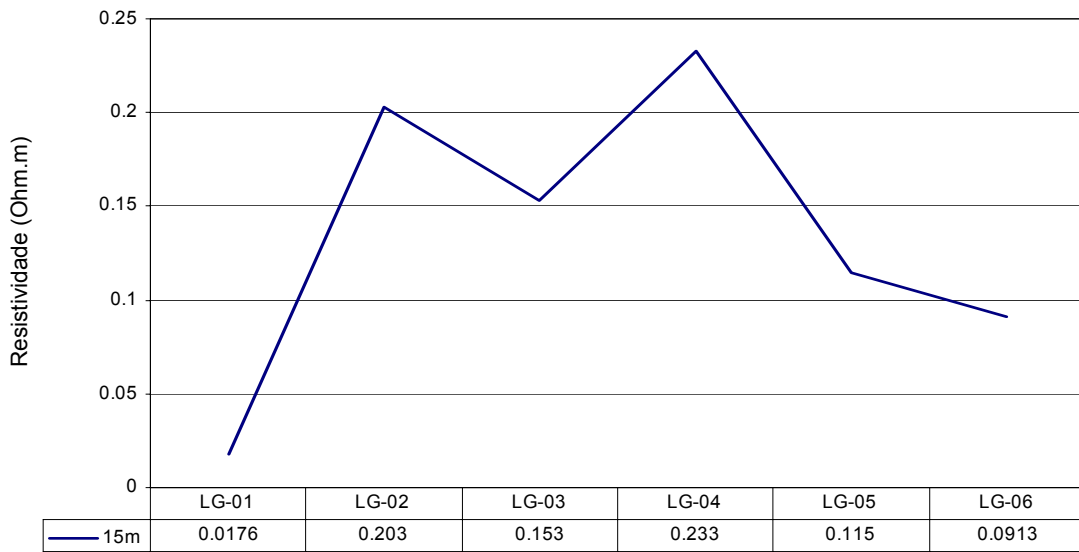


Figura VI.20 - Valores de resistividade da linha LG para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

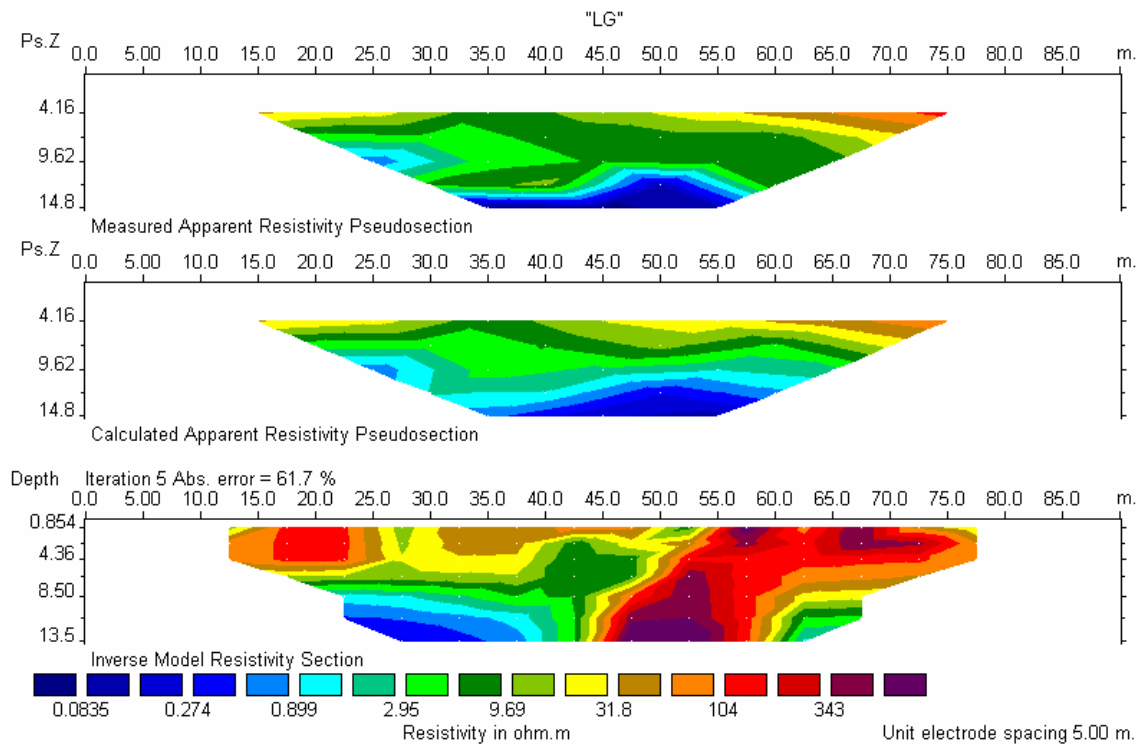


Figura VI.21 - Caminhamento elétrico da linha LG, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)

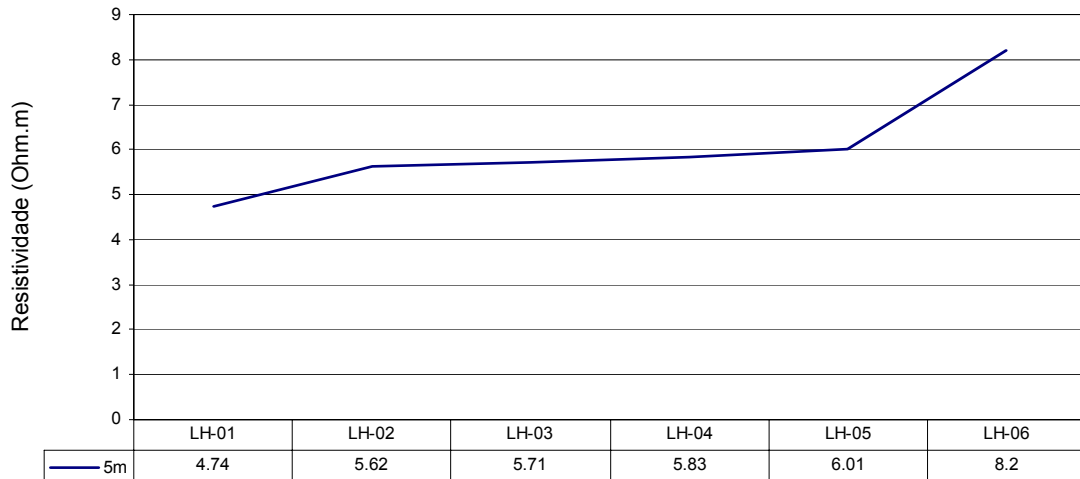


Figura VI.22 - Valores de resistividade da linha LH para 5m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

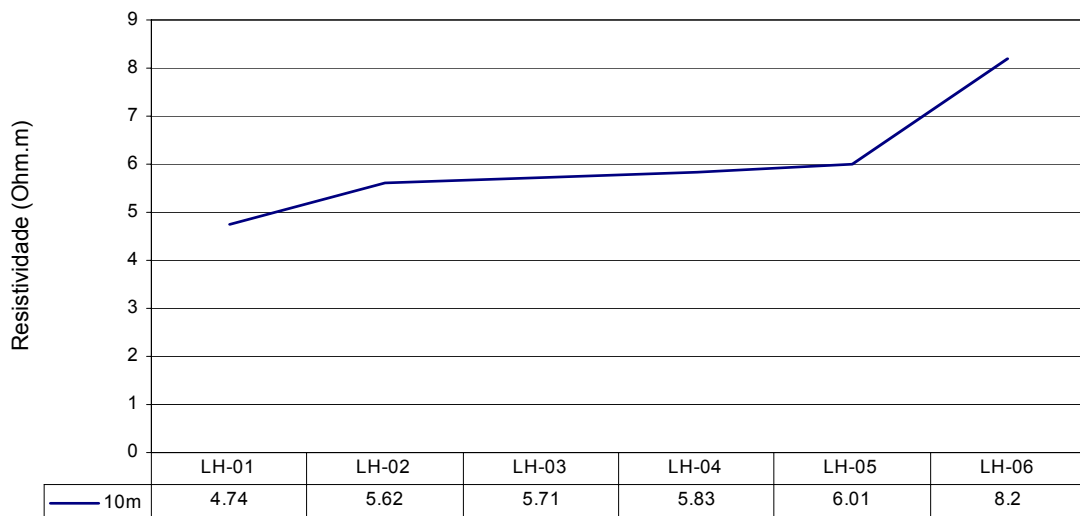


Figura VI.23 - Valores de resistividade da linha LH para 10m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

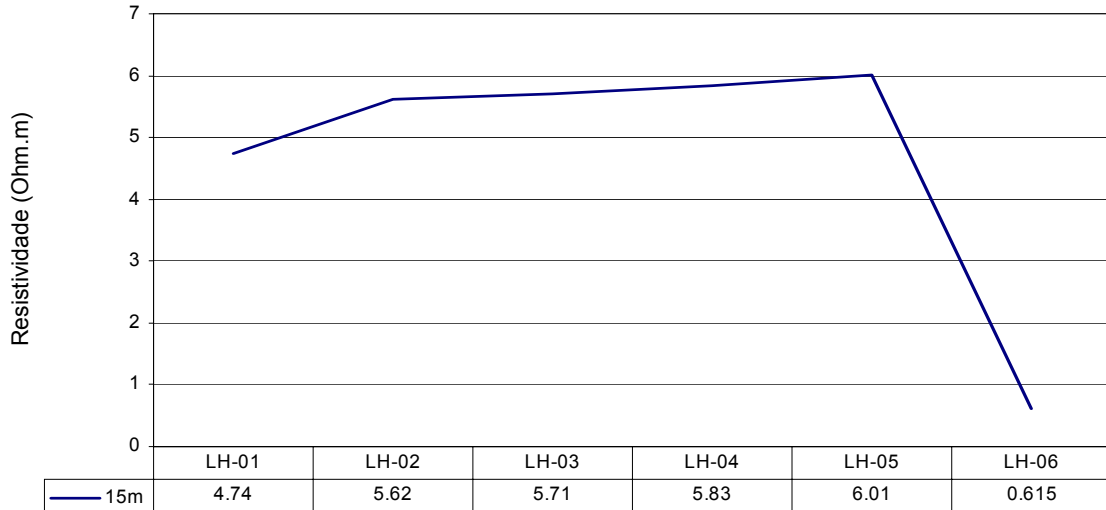


Figura VI.24 - Valores de resistividade da linha LH para 15m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

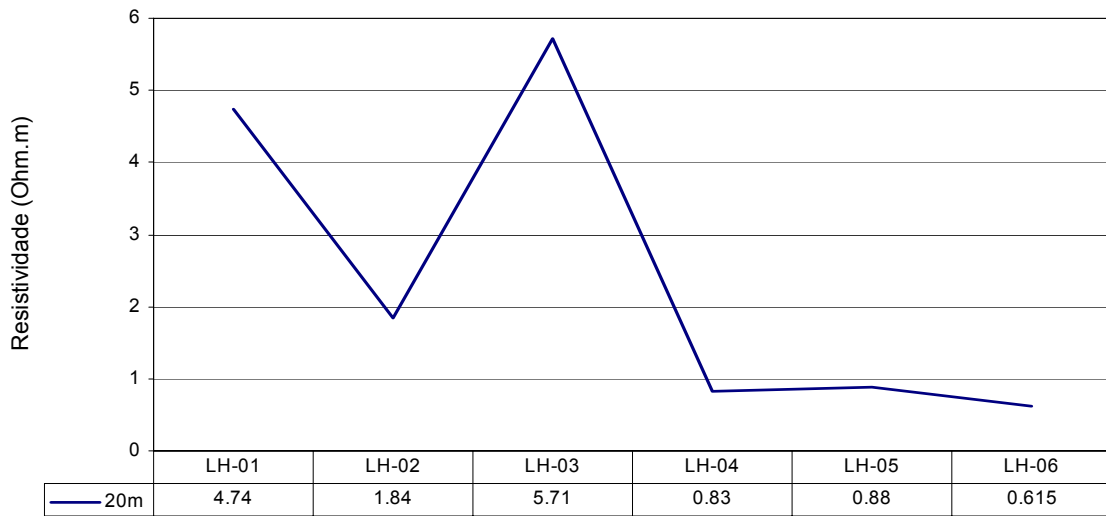


Figura VI.25 - Valores de resistividade da linha LH para 20m de profundidade, obtidos a partir de sondagens eletromagnéticas

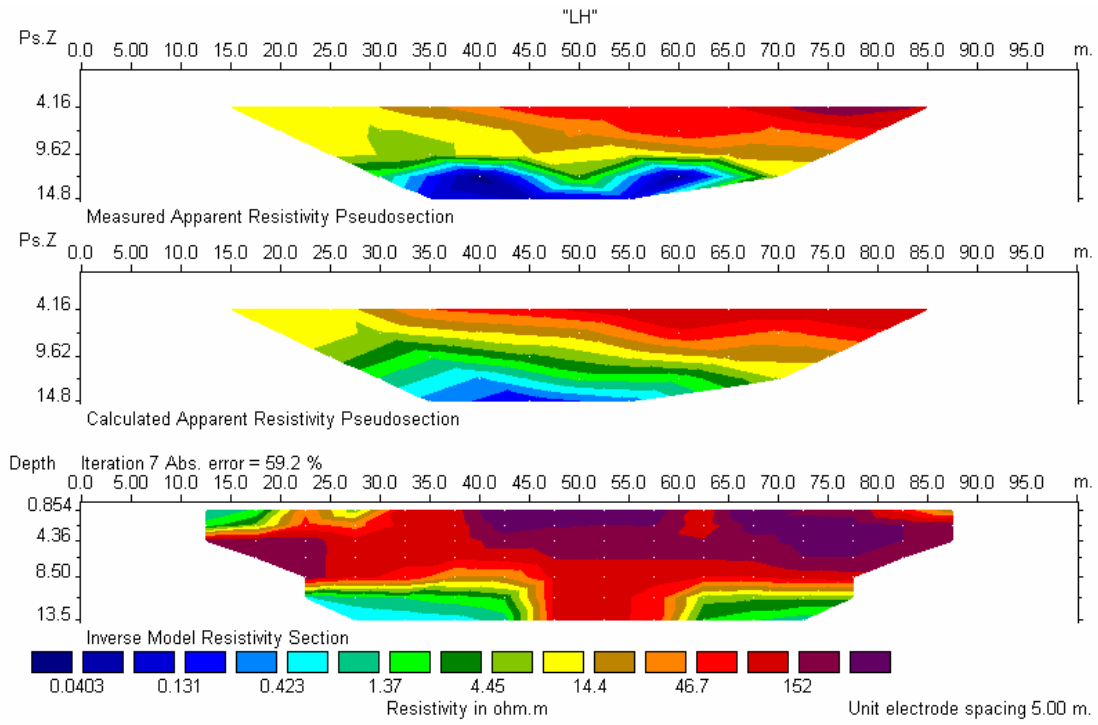


Figura VI.26 - Caminhamento elétrico da linha LH, com pseudo-seção (superior), pseudo-seção calculada e modelo de inversão (inferior)