

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MÉTODOS GEOFÍSICOS ELETROMAGNÉTICOS APLICADOS AO
DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO E DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS**

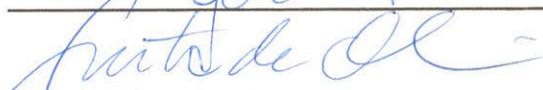
WAGNER FRANÇA AQUINO

Orientador: Prof. Dr. José Milton Benetti Mendes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA



	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Fabio Taioli	
Examinadores:	Dr. Everton de Oliveira	
	Prof. Dr. Walter Malagutti Filho	

SÃO PAULO
2000

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MÉTODOS GEOFÍSICOS ELETROMAGNÉTICOS
APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO
DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ÁREA
DE INFILTRAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Wagner França Aquino



Orientador: Prof. Dr. José Milton Benetti Mendes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2000

SECRETARIA

orientador

Prof. Dr. José Milton Benetti Mendes

Dedico esta dissertação aos meus pais, tendo a certeza que este trabalho é obra da luta empreendida por eles para a minha formação educacional e também como ser humano.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. José Milton, meu orientador, cujos esforços pioneiros para solidificar a geofísica ambiental gera mais um fruto através desta dissertação.

À Kátia pela compreensão e incentivo indispensáveis na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Odilon, Edna, Otávio e Juliano pela valiosa colaboração e participação.

Ao Hamilton e à Ana Cristina, pelo apoio e ajuda prestimosa em momentos decisivos.

Ao meu amigo, Carlos Maldonado, pelo incentivo ao longo desses anos.

Aos meus colegas da CETESB, Paulo Henrique, Walter, Darci, Mion, Elton, Álvaro, Hélio, Vicente, Rodrigo, Maria José, Marta e Ero Rocâmbolo, por contribuírem na realização deste estudo.

Aos meus amigos da USP, Jamile, Douglas, Iraldo e Célia, pela disponibilidade demonstrada e pela ajuda prestada.

Ao prof. Botelho, pelos esclarecimentos durante a realização dos trabalhos de campo.

Aos professores Fabio Taioli, João Carlos Dourado e Walter Malagutti, pelos auxílios oportunos.

À CETESB, pela infra-estrutura fornecida para a elaboração desta pesquisa.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, que possibilitou a realização deste mestrado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

TEXTO

Tabela 1. Densidade e coeficiente dielétrico dos compostos orgânicos.....	p.13
Figura 1. Localização do Município de Araras	p.19
Figura 2. Croqui de localização e mapa topográfico da área	p.20
Figura 3. Superfície topográfica da área.....	p.20
Figura 4. Mapa geológico do Estado de São Paulo	p.21
Figura 5. Geologia da região de Araras	p.22
Figura 6. Sistemas aquíferos da região.	p.24
Figura 7. Mapa potenciométrico do local	p.26
Foto 1. Visão em detalhe da indústria Sulfabrás.....	p.27
Figura 8. Representação do princípio dos métodos eletromagnéticos indutivo.....	p.32
Figura 9. Disposição das bobinas e dos eixos dipolos magnéticos.....	p.35
Figura 10. Relação entre a condutividade medida e a verdadeira	p.35
Figura 11. Função resposta relativa para os modos HD e VD	p.36
Figura 12. Função resposta cumulativa para os modos HD e VD.....	p.37
Foto 2. Condutímetro de solo EM-31	p.39
Foto 3a. Bobina transmissora do EM-34.....	p.39
Foto 3b. Bobina receptora do EM-34.....	p.39
Tabela 2. Parâmetro de operação e exploração do EM-31 e EM-34	p.40
Figura 13. Emissão e reflexão do sinal de geo-radar.....	p.42
Tabela 3. Coeficiente dielétrico, condutividade elétrica, velocidade e atenuação	p.46
Tabela 4. Frequência da antena e penetração do sinal de radar	p.47
Tabela 5. Frequência da antena e resolução vertical.....	p.48
Foto 4. Sistema básico do geo-radar.....	p.49
Figura 14a. Procedimento do ensaio CMP	p.51

Figura 14b. Procedimento do ensaio WARR	p.51
Figura 15a. Propagação das ondas na aquisição CMP e WARR.....	p.52
Figura 15b. Configuração dos registros das ondas no CMP e WARR	p.52
Foto 5. Aquisição em campo de dados com o EM-34.....	p.54
Foto 6. Levantamento de campo com o geo-radar	p.54
Tabela 6. Parâmetros de aquisição de campo para o geo-radar	p.55

ANEXO 1

Figura 1.1. Descrição geológica das sondagens a percussão	p.82
Figura 1.2. Descrição geológica nos locais dos poços de monitoramento	p.83

ANEXO 2

Tabela 2.1. Medidas do N.A. nas sondagens a percussão	p.85
Tabela 2.2. Cotas do N.A. medido nas sondagens a percussão.....	p.85
Tabela 2.3. Medidas e cotas do N.A. nos poços de abastecimento	p.85
Tabela 2.4. Medidas do N.A. nos poços de monitoramento.....	p.86
Tabela 2.5. Cotas das medidas do N.A. nos poços de monitoramento.....	p.86
Tabela 2.6. Condutividade hidráulica obtidas nos poços de monitoramento.....	p.86

ANEXO 3

Tabela 3.1. Padrões de potabilidade do CONAMA	p.88
Tabela 3.2. Resultado da análise da água no antigo poço de infiltração.....	p.88
Tabela 3.3. Análise da água dos poços de monitoramento para organoclorados	p.89
Tabela 3.4. Análise da água dos poços de monitoramento para BTX.....	p.89
Tabela 3.5. Análise da água dos poços de monitoramento para íons solúveis	p.90
Tabela 3.6. Análise da água dos poços próximos à indústria	p.90
Tabela 3.7. Análise da água dos poços próximos à indústria para íons solúveis	p.91
Tabela 3.8. Análise da água dos poços próximos à indústria para BTX.....	p.91

ANEXO 4

Figura 4.1. Mapa de isocondutividade para 7,5m de profundidade (1992).....	p.93
Figura 4.2. Mapa de isocondutividade para 15m de profundidade (1992).....	p.94
Figura 4.3. Mapa de isocondutividade para 30m de profundidade (1992).....	p.95
Figura 4.4. Mapa de isocondutividade para 60m de profundidade (1992).....	p.96
Figura 4.5. Mapa de isocondutividade em detalhe para 7,5m de prof. (1992).....	p.97
Figura 4.6. Mapa de isocondutividade em detalhe para 15m de prof. (1992).....	p.97
Figura 4.7. Distribuição da condutividade para 7,5 e 15 metros (1992)	p.98
Figura 4.8. Distribuição da condutividade para 7,5 e 15 mertros (1999)	p.98
Figura 4.9. Mapa de isocondutividade para 7,5m de prof (1999)	p.99
Figura 4.10. Mapa de isocondutividade para 15m de prof (1999)	p.99
Figura 4.11. Perfis de condutividade da linha L1	p.100
Figura 4.12. Modelo eletromagnético da linha L1	p.100
Tabela 4.1. Resultado do modelamento eletromagnético	p.101-102

ANEXO 5

Figura 5.1. Localização dos perfis de geo-radar	p.104
Figura 5.2. Seção do ensaio CMP1.....	p.105
Figura 5.3. Seção do ensaio CMP2.....	p.105
Figura 5.4. Perfis de condutividade da linha L1 (7,5 e 15 metros)	p.106
Figura 5.5. Seção de geo-radar da linha L1 (25MHz)	p.106
Figura 5.6. Seção de geo-radar da linha L1 (100MHz)	p.107
Figura 5.7. Perfis de condutividade da linha L2	p.108
Figura 5.8. Seção de geo-radar da linha L2 (25MHz)	p.108
Figura 5.9. Seção de geo-radar da linha L3 (100MHz)	p.109
Figura 5.10. Seção de geo-radar da linha L4 (100MHz)	p.109
Figura 5.11. Perfis de condutividade da linha L5	p.110
Figura 5.12. Seção de geo-radar da linha L5 (100MHz)	p.110

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO	
1. Introdução e Objetivos.....	1
CAPÍTULO 2. MÉTODOS GEOFÍSICOS	
2.1. Definições e aplicações na investigação de áreas contaminadas.....	3
CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1. Histórico dos métodos eletromagnéticos indutivos.....	6
3.2. Histórico do método de geo-radar.....	7
3.3. Literatura especializada sobre o tema.....	8
3.4. Propriedades elétricas dos materiais geológicos em estudos de contaminação...	10
3.5. Aplicações dos métodos eletromagnéticos em estudos ambientais.....	13
CAPÍTULO 4. ÁREA DE ESTUDO	
4.1. Descrição do local.....	19
4.2. Geologia regional.....	21
4.3. Hidrogeologia regional.....	23
4.4. Geologia e hidrogeologia local.....	24
4.5. Histórico da situação.....	27
CAPÍTULO 5. MÉTODOS GEOFÍSICOS ELETROMAGNÉTICOS	
5.1. Equações de Maxwell e os métodos eletromagnéticos.....	30
5.2. Método eletromagnético indutivo.....	32
5.2.1. Princípios do método.....	32
5.2.2. Penetração dos campos eletromagnéticos.....	33
5.2.3. Princípios do método dos condutímetro de solo.....	34
5.2.4. Condutímetros de solo EM-31 e EM-34.....	38
5.3. Método de geo-radar.....	41
5.3.1. Princípios do método.....	41
5.3.2. Permissividade dielétrica e coeficiente dielétrico dos materiais.....	42
5.3.3. Reflexão das ondas do geo-radar.....	44
5.3.4. Condutividade elétrica e atenuação das ondas de geo-radar.....	44

5.3.5. Penetração e frequência de operação.....	46	
5.3.6. Resolução vertical.....	47	
5.3.7. Equipamento.....	49	
5.3.8. Arranjos de campo para aquisição de dados.....	50	
CAPÍTULO 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS		
6.1. Levantamento de dados.....	53	
6.2. Processamento dos dados obtidos.....	55	
6.2.1. Dados de condutividade aparente.....	55	
6.2.2. Dados do geo-radar.....	57	
CAPÍTULO 7. PROCESSO DE CONTAMINAÇÃO		
7.1. Considerações.....	59	
CAPÍTULO 8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		
8.1. Mapas de isocondutividade aparente.....	61	
8.1.1. Mapas gerais de isocondutividade de 1992.....	61	
8.1.2. Mapas de isocondutividade de 1992 em detalhe.....	64	
8.1.3. Mapas de isocondutividade de 1999.....	65	
8.2. Modelo eletromagnético da linha L1.....	67	
8.3. Aquisição tipo CMP.....	68	
8.4. Seções de geo-radar de afastamento constante.....	70	
8.4.1. Seções de geo-radar da linha L1.....	70	
8.4.2. Seções de geo-radar da linha L2.....	72	
8.4.3. Seções de geo-radar da linha L3.....	73	
8.4.4. Seções de geo-radar da linha L4.....	74	
8.4.5. Seções de geo-radar da linha L5.....	75	
CAPÍTULO 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....		77
ANEXOS.....	81	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111	

RESUMO

Nos últimos anos é crescente o emprego de métodos geofísicos para diagnóstico ambiental em áreas contaminadas, uma vez que estes se têm mostrado uma ferramenta eficiente na avaliação da contaminação do solo e das águas subterrâneas por resíduos perigosos. Neste contexto, os levantamentos geofísicos podem fornecer informações valiosas, tanto sobre a existência de contaminantes em subsuperfície, como da constituição geológica dos locais investigados. Assim, na pesquisa ora apresentada, esta metodologia foi aplicada para avaliar a situação quanto à contaminação do solo e das águas subterrâneas em área industrial desativada, onde ocorreu a infiltração de resíduos perigosos diretamente no solo. Portanto, os objetivos aqui propostos foram detectar e mapear a presença dos contaminantes em subsuperfície através do emprego de métodos geofísicos. Para tal finalidade, foram executados levantamentos eletromagnéticos utilizando-se dois métodos geofísicos distintos: o eletromagnético indutivo (EM) e o geo-radar (GPR). Os resultados obtidos por estas técnicas puderam ser comparados e correlacionados com as informações geológicas e hidrogeológicas existentes sobre o local, além de outros dados. O método eletromagnético indutivo (EM) foi empregado para se obter a condutividade elétrica aparente do terreno em diferentes profundidades de investigação, o que proporcionou o mapeamento da pluma de contaminação associada, segundo a interpretação realizada, com a presença de contaminantes inorgânicos disseminados no solo e dissolvidos na água subterrânea. O mapeamento da pluma de contaminação indicou sua abrangência fora dos limites da indústria, alcançando outras propriedades próximas porém, descartou a possibilidade de contaminação da Represa Hermínio Ometto, uma vez que o sentido de fluxo da propagação da contaminação não se observa em direção a este corpo d'água superficial. Quanto ao método de geo-radar, devido à alta resolução fornecida por este método, foi possível imagear a contaminação presente na zona não saturada, detectar a contaminação da água subterrânea e observar a existência de um gradiente no nível d'água identificado, confirmando as indicações do fluxo da contaminação apontadas no levantamento eletromagnético indutivo. Além disso, constatou-se a potencialidade da antena de baixa frequência (25MHz) na determinação da extensão da contaminação presente na água subterrânea. Os resultados geofísicos também foram comparados às análises químicas e às informações provenientes das descrições geológicas e das medições do nível d'água nos poços monitorados, demonstrando uma forte correspondência entre os dados.

ABSTRACT

In the last years it has constantly increased the usage of geophysical methods in environmental evaluation of contaminated sites with hazardous waste, once they have proved to be an efficient tool in the diagnoses of soil and groundwater contamination. In this kind of application, the geophysical surveys can supply valuable information, not only on the existence of underground contamination, but also on the geological background of the investigated locations. Thus, in the study now presented, this methodology was applied in the evaluation of soil and groundwater contamination of an abandoned industrial area, where the hazardous wastes were infiltrated directly into the soil. Therefore, the proposed goals were to detect and map the presence of the contaminants on the subsurface, through the use of geophysical methods. For such purpose, electromagnetic surveys were conducted using two distinct geophysical methods: the inductive electromagnetic (EM) and the ground penetrating radar (GPR). The results obtained from these techniques could be compared and correlated with the geological and groundwater data, besides others information. The inductive electromagnetic method (EM) was carried out to obtain apparent electrical conductivity of the terrain in different investigated depths, what allowed to map contaminant plume related, according to the interpretation, with the presence of inorganic compounds disseminated in the ground and dissolved in the groundwater. Mapping of the contaminant plume indicated its size to be bigger than the industry boundaries, reaching other surrounding properties, but it removed any idea of contamination of the Hermínio Ometto Dam, once the flow of the contamination was not observed to head towards this surface water source. Regarding the GPR method, due to its high-resolution results, it was possible in the sections to visualize the contaminants present in the non-saturated zone, also to detect the possible groundwater contamination, besides to observe the existence of a gradient to water table, confirming the indications of the contamination flow pointed by the inductive electromagnetic survey. It was verified that the low frequency antenna (25MHz) is an able tool to determine the extension of the groundwater contamination. The geophysical results were also compared to the chemical analysis and to the information gathered from geological descriptions and also from the measurements of the water table level taken from monitored wells, demonstrating an evident correspondence between all data.

CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A destinação de resíduos ou efluentes oriundos do processo industrial tem se apresentado como um dos principais problemas ambientais que vem sendo enfrentado nos últimos anos. A falta de opções para a reutilização dos resíduos sólidos e efluentes, associado aos elevados custos de transporte e disposição em aterros industriais adequados, tem proporcionado o emprego de ações nocivas ao meio ambiente, especificamente no que diz respeito à qualidade dos solos e das águas subterrâneas.

Práticas como a infiltração ou descarte direto de resíduos no solo foram comumente adotadas, principalmente, na década de 70 e 80, uma vez que o desconhecimento das consequências de tais procedimentos, aliado aos conceitos equivocados de absorção e depuração a partir do solo, induziram o emprego destas ações. Outro aspecto agravante associado a este tipo de prática foi o passivo ambiental estabelecido após a desativação de algumas plantas industriais e que, além dos riscos que permanecem, demandam elevados recursos a serem despendidos na sua remediação.

Apesar do conhecimento das consequências danosas deste procedimento ao meio ambiente e da evolução técnica adquirida hoje em dia, recentes descartes clandestinos de resíduos, sem o conhecimento dos órgãos públicos responsáveis pela fiscalização e controle ambiental, ainda podem ser verificados.

Em contraposição a esta situação, constata-se cada vez mais a importância da preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que esta reserva estratégica de abastecimento tem apresentado uma demanda crescente, sendo responsável, atualmente, pelo suprimento de grande parte dos municípios do Estado de São Paulo, o que corresponde à milhões de habitantes atendidos.

Desta forma, a degradação da qualidade dos solos e da água subterrânea decorrente de contaminação industrial se constitui numa questão de saúde pública, sendo que suas consequências devem ser investigadas com intuito de se avaliar a extensão e os impactos causados.

Dentro deste quadro, os métodos geofísicos podem contribuir de forma efetiva para diagnóstico da situação de áreas suspeitas ou comprovadamente contaminadas na

definição da abrangência da contaminação subterrânea, além de fornecerem informações fundamentais que podem ser úteis na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

O emprego de métodos geofísicos como ferramenta em estudos de problemas ambientais relacionados à contaminação do solo e das águas subterrâneas vem se desenvolvendo de forma marcante nos últimos anos. A adoção crescente desse tipo de levantamento não invasivo se justifica pela eficiência e rapidez que esses métodos apresentam para diagnosticar a presença de contaminantes em subsuperfície.

Muitas vezes os levantamentos geofísicos periódicos são a única de forma de estabelecer o monitoramento da migração presente, principalmente em áreas industriais abandonadas e que carecem de um controle ambiental sistemático, e onde a figura do agente poluidor, responsável pelo diagnóstico e remediação, é difícil de ser determinada.

A aplicação dos métodos geofísicos consiste, assim, na avaliação das condições locais, tanto em relação à contaminação existente, como dos possíveis processos dinâmicos de migração do contaminante através do meio geológico, contribuindo para um melhor conhecimento dos impactos ambientais causados.

Decorrente do aspectos anteriormente abordados, esta pesquisa propõe apresentar um diagnóstico sobre a contaminação do solo e das águas subterrâneas, através da aplicação de métodos geofísicos distintos, em local de ocorrência de infiltração de resíduos, além de avaliar e comparar os resultados obtidos, correlacionando-os com outros dados da área em estudo.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS GEOFÍSICOS

2.1. DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES NA INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas de investigação geológica, a partir da aquisição de dados instrumentais, geralmente dispostos na superfície, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos ou não destrutivos (JEWELL et al. 1993).

Esta metodologia permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de subsuperfície, por exemplo condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade etc, e que podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades naturais ou não.

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície, como por exemplo as sondagens, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes, por exemplo, das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (GREENHOUSE et al., 1983).

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Em relação ao meio geológico, a interpretação dos dados geofísicos podem contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Na avaliação da presença da contaminação em profundidade, o emprego dos métodos geofísicos está voltado, especificamente, à localização de vaías contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de

tambores e tanques enterrados, e determinação de vazamentos em tanques ou dutos (GRETSKY et al., 1990).

Segundo GREENHOUSE & SLAINE (1986), decorrente da capacidade que as técnicas geofísicas possuem para detectar e mapear a contaminação do solo e das águas subterrâneas (pluma), é possível acompanhar a evolução da propagação dos contaminantes em subsuperfície através de medidas multitemporais.

As propriedades físico-químicas dos contaminantes, além das características geológicas e hidrogeológicas do meio, podem determinar o comportamento da contaminação em subsuperfície, sendo estes, também, os fatores decisivos na seleção das técnicas geofísicas a serem utilizadas. Além disso, a aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações (NOBES, 1996).

Os desvios significantes do padrão normal das medidas geofísicas (anomalias) podem, do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em subsuperfície. A interpretação das anomalias é de fundamental importância na investigação de áreas contaminadas, indicando a intensidade da poluição, e na orientação dos trabalhos subsequentes de monitoramento da propagação dos contaminantes e de recuperação do local afetado (GRETSKY et al., 1990).

Desta forma, as informações derivadas dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados. Além disso, podem ser aplicadas para reduzir o risco de perfuração de tanques e tambores enterrados contendo resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas

A realização dos levantamentos geofísicos pode ser efetuada nas diferentes etapas de atividades estabelecidas para o gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 1999), e pode ser descrita da seguinte forma:

- na etapa de investigação confirmatória, as técnicas geofísicas são utilizadas como métodos de rastreamento (screening) para localizar os pontos de amostragem mais adequados, através da determinação de anomalias que representam os locais com maiores concentrações de contaminantes (hot spots);

- quando da investigação detalhada e da investigação para remediação, os métodos geofísicos podem ser empregados para o mapeamento e monitoramento da propagação da contaminação;
- na fase de remediação de áreas contaminadas, estes métodos podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação pela confirmação das reduções das concentrações dos contaminantes.

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais porém, os principais métodos, e que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea, são, segundo NOBES (1996), o geo-radar (GPR), o eletromagnético indutivo (EM) e a eletrorresistividade (ER).

A vantagem destes métodos, em relação aos demais métodos geofísicos, consiste basicamente na capacidade de detecção direta da resposta da contaminação subterrânea e não apenas na identificação das feições geológicas das áreas em estudo, uma vez que se baseiam nas propriedades elétricas dos materiais e que são perturbadas quando da existência de contaminantes em subsuperfície.

CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. HISTÓRICO DOS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS INDUTIVOS

Desde de seu início, a evolução da metodologia geofísica esteve vinculada à necessidade econômica da procura de minérios presentes em profundidade, sendo que não são recentes os estudos relativos ao emprego das propriedades físicas das rochas, especificamente o magnetismo e a resistividade, na prospecção de jazidas minerais.

Entre os anos de 1919 e 1922, os suecos H. LUNDBERG e K.SUNDBERG iniciaram os trabalhos de exploração elétrica com campos variáveis, e, em particular, com métodos baseados na observação das linhas equipotenciais do campo elétrico e na intensidade do campo magnético, dando origem, assim, ao desenvolvimento dos métodos eletromagnéticos indutivos (*in* IAKUBOVSKII & LIAJOV, 1980).

Segundo PARASNIS (1970), os métodos eletromagnéticos mais utilizados atualmente foram desenvolvidas entre 1925 e 1940 na Suécia por SUNDBERG, em conjunto com H. HEDSTRÖM, cujas as pesquisas estavam voltadas para a prospecção de minerais metálicos e de petróleo. Estes estudos deram origem ao método de Sundberg ou do Compensador, utilizado para medições das componentes real e imaginária do campo eletromagnético, e ao método Turam, empregado nas medições da razão de amplitudes e da diferença de fase dos campos eletromagnéticos.

Adicionalmente, podem ser citadas as pesquisas dos norte-americanos PETERS e BARDEEN, durante a década de 30, para a determinação da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas no solo como função da frequência emitida (*in* DOBRIN, 1982).

Os métodos de emissor e receptor móveis, semelhantes ao empregado nos levantamentos deste trabalho, foram desenvolvidos pelos suecos entre 1940 e 1950, sendo que em particular, a utilização do método Slingram, do sueco slinga (bobina) e ram (aro), tornou-se popular na América do Norte a partir de 1958 (TELFORD et al., 1986).

O desenvolvimento histórico das técnicas de prospecção eletromagnéticas centralizadas, a princípio, na Suécia e, posteriormente, no Canadá, segundo STEWART (1982), decorre das características geológicas apresentadas por estes dois países, que estão localizados numa vasta área de rochas cristalinas pré-cambrianas associadas à depósitos minerais, o que motivou as pesquisas relativas ao método.

3.2. HISTÓRICO DO MÉTODO DE GEO-RADAR

De acordo com PARASNIS (1997), as referências mais antigas quanto à idéia da utilização de ondas eletromagnéticas de alta frequência para exploração do interior da terra são provenientes da Alemanha, sendo que o primeiro registro notificado é a concessão de uma patente, em 1904, para C. HÜLSMEYER. Posteriormente, em 1910, G. LEIMBACH e H. LÖWY obtiveram, também, a autorização para um projeto de construção de um equipamento aplicando o mesmo princípio (*in* THIERBACH, 1994).

Além destes projetos iniciais, cabe registrar que, em 1923 e 1926, outras duas patentes foram fornecidas pelo governo alemão para a montagem de aparelhos utilizando ondas de radiofrequência para serem aplicadas em estudos geológicos (*in* PARASNIS, 1997).

Para OLHOEFT (1996), o ano de 1929 marca efetivamente o início da aplicação da metodologia, quando o pesquisador alemão W. STERN publica os resultados de seu trabalho intitulado "Versuch Einer Elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis", no qual o método foi empregado para a determinação da profundidade de uma geleira.

Segundo HÄNNINEN (1997), durante a II Guerra Mundial, o aperfeiçoamento da tecnologia de radiofrequência passou por um rápido avanço, porém, nos anos posteriores o ritmo das pesquisas diminuiu. Para esta época pode ser citado o trabalho do norte-americano L. RIDENOUR que, em 1947, apresentou um amplo estudo teórico sobre as ondas de radar e suas potencialidades.

Nos anos 50, as aplicações do método de geo-radar ficaram restritas apenas aos levantamentos em ambientes glaciais (*in* HANNINEN, 1997). Entretanto, HOESKTRA & DELANEY (1974) destacam o trabalho de VON HIPPEL (1954), que reportou os resultados de experimentos relativos a uma série de medições do coeficiente dielétrico de solos com quantidades variáveis de água, utilizando frequências até 10^{10} Hz.

Na década de 60, os trabalhos de BARRINGER e de CALDECOTT apontaram novas perspectivas para a utilização desta metodologia, uma vez que estes autores empregaram a emissão de pulsos eletromagnéticos em estudos hidrogeológicos para a detecção do nível d'água subterrâneo (*in* OLHOEFT, 1996).

Os levantamentos executados em ambientes não glaciais tiveram um impulso definitivo a partir da década de 70. Neste contexto, devem ser citadas as pesquisas efetuadas por MOREY (1974), aplicadas a estudos hidrogeológicos e de engenharia, e por STEWART & UNTERBERGER (1976), para a detecção de descontinuidades e interfaces em minas de sal. Nesta época, destacam-se também os trabalhos de ANNAN & DAVIS (1976), focalizando aplicações em solos congelados (permafrost).

No início dos anos 80, os equipamentos de geo-radar tornaram-se comercialmente disponíveis e as aplicações se expandiram rapidamente. A partir de 1986 conferências internacionais começaram a se realizar a cada dois anos, contando com a participação de profissionais de diversos países, demonstrando, assim, a aceitação e a propagação desta metodologia geofísica (*in* HANNINNEN, 1997).

Deve se reconhecer que o desenvolvimento e a difusão da potencialidade de aplicação do método de geo-radar nos dias de hoje é decorrente do empenho do Serviço Geológico do Canadá e dos esforços dispensados pelos professores A. P. ANNAN e J. L. DAVIS, no final dos anos 70 e no início da década de 80, para a construção e aperfeiçoamento de equipamentos portáteis e sensíveis, capazes de obter dados que pudessem ser tratados em rotinas similares a de um processamento sísmico, o que facilitou sobremaneira a aquisição e o tratamento de dados, ampliando, assim, os horizontes do método.

3.3. LITERATURA ESPECIALIZADA SOBRE O TEMA

Artigos sobre a aplicação de métodos geofísicos em estudos ambientais podem ser encontrados em publicações específicas sobre este assunto, principalmente nos anais do Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), que é realizado anualmente, e na revista Journal of Environmental and Engineering Geophysics.

Quanto ao método de geo-radar, em particular, diversos trabalhos sobre a aplicação desta metodologia em estudos ambientais estão documentados nos volumes dos anais da International Conference on Ground Penetrating Radar, que é realizada a cada dois anos e que possui uma sessão específica voltada para este tema.

Com menos frequência que nas publicações anteriormente citadas, porém em número considerável, trabalhos sobre levantamentos geofísicos relativos às questões

ambientais podem, também, ser verificados nas mais tradicionais revistas geofísicas internacionais, tais como *Geophysics*, *Geophysical Prospecting*, *Journal of Applied Geophysics* (antiga *Geoexploration*), *Journal of Geophysical Research* e *Geophysical Research Letters*.

Além das referências apontadas, outros periódicos importantes relacionados às pesquisas sobre águas subterrâneas trazem inúmeros artigos de estudos geofísicos empregados na detecção de contaminação subterrânea, como exemplos podemos citar: *Ground Water*, *Ground Water Monitoring Review*, *Water Resources Research*, *Ground Water Monitoring e Remediation* e *Journal of Hydrology*.

Destacam-se, também, as publicações editadas por WARD (1990) e NABIGHIAN (1991), promovidas pela *Society of Exploration Geophysicists (SEG)*, que descrevem a base teórica de diversos métodos geofísicos e apresentam inúmeras pesquisas relacionadas aos problemas ambientais e que se tornaram casos históricos.

Cabe apontar aqui o artigo publicado por NOBES (1996) na revista *Surveys in Geophysics*. Neste trabalho, o autor realiza um apanhado completo sobre o tema geofísica ambiental, com enfoque na aplicação dos métodos elétricos e eletromagnéticos, desde o registro das principais publicações, passando pela teoria destes métodos, até o comportamento dos contaminantes em subsuperfície e suas respostas geofísicas.

NOBES (1996) reporta um aumento substancial nos últimos anos de publicações sobre a utilização de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos em estudos ambientais relacionados às águas subterrâneas, intrusões salinas em áreas costeiras, hidrogeologia e disposição de resíduos. Este autor exemplifica que no período anterior a 1960, apenas 10 artigos sobre estes tópicos haviam sido publicados, e que, nos anos posteriores, o número de trabalhos foi aumentando rapidamente, sendo encontrados 158 artigos para o período de 1960 a 1969, cerca de 400 textos durante a década de 70, culminando com a produção de 1385 trabalhos somente entre 1988 e 1993.

Outros dois artigos de destaque podem ser apontados: os elaborados por DOBECKI & ROMIG (1985) e por JEWELL et al. (1993). DOBECKI & ROMIG (1985) descrevem aplicabilidade de inúmeros métodos geofísicos, tais como a sísmica, a eletrorresistividade, os métodos eletromagnéticos, a magnetometria e a gravimetria, em estudos geotécnicos e em assuntos relativos à água subterrânea, trazendo uma série enorme de referências sobre estes tópicos. JEWELL et al. (1993) apresentam um estudo completo sobre a utilização das

técnicas geofísicas para a investigação e monitoramento de locais contaminados e de áreas com disposição de resíduos e fornecem um fluxograma de procedimentos para a investigação de áreas suspeitas de contaminação, além de apresentarem a comparação das potencialidades de diversos métodos geofísicos em diferentes aplicações ambientais.

Neste contexto, também, deve ser citado o trabalho de GRETSKY et al. (1990), que discorre sobre as aplicações dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, geo-radar, eletromagnético indutivo, magnetometria e sísmica na investigação de contaminação subterrânea e detecção de resíduos enterrados, apresentando um resumo das potencialidades e limitações de cada um destes métodos.

Na literatura nacional, podemos citar as resenhas de ELLERT et al. (1988) e JOSÉ (1997) que descrevem os princípios de diversos métodos geofísicos (eletrorresistividade, sísmica, geo-radar, eletromagnético indutivo e magnetometria) aplicados ao mapeamento e monitoramento da contaminação das águas subterrâneas em áreas de disposição de rejeitos urbanos e industriais.

Além destes, diversos trabalhos sobre a aplicação ambiental dos métodos geofísicos podem ser encontrados nos volumes dos anais do Congresso Brasileiro de Geofísica, realizado pela Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), que a partir de 1993 reserva uma sessão exclusiva para o tema.

Outra fonte importante são as publicações do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, promovido pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), que trazem diversos artigos sobre geofísica aplicada, principalmente dos métodos de eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e geo-radar, na investigação da contaminação de aquíferos.

Adicionalmente a estas referências, podem ser citadas, como fontes específicas de pesquisa sobre o tema, os anais do I Workshop de Geofísica Aplicada ao Meio Ambiente realizados em Belém do Pará (1996) e do II Workshop de Geofísica Aplicada em Rio Claro (1998).

3.4. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS GEOLÓGICOS EM ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO

Os fenômenos físicos que estão envolvidos na aplicação dos métodos eletromagnéticos indutivos e do geo-radar, inclusive nos estudos de contaminação

subterrânea, são decorrentes dos contrastes das propriedades elétricas dos solos ou rochas. Segundo OLHOEFT (1998), estas propriedades elétricas são controladas principalmente pela condutividade elétrica (σ), pela permissividade dielétrica (ϵ), que é representada pelo coeficiente dielétrico (K) dos materiais, e alguns casos, também, pela permissividade magnética (μ).

Nos métodos eletromagnéticos de baixa frequência (EM), em geral até 25KHz, predominam os efeitos da condutividade elétrica dos materiais geológicos, contrariamente, nas frequências elevadas (radiofrequência), como é o caso da faixa de operação do método de geo-radar, de 10 a 1000MHz, dominam as propriedades dielétricas do meio (DAVIS & ANNAN, 1989).

A influência na condutividade ou resistividade elétrica de uma formação geológica em função da porosidade da rocha, da condutividade do fluido contido em seus poros e do formato desses poros foi, primeiramente, determinada por Archie em 1942 (in NOBES, 1996). A Lei de Archie, como ficou conhecida, é uma relação empírica aplicada às rochas sedimentares ou solos saturados sem a presença de argila, que a princípio foi utilizada na exploração de petróleo.

Outros pesquisadores, tais como KELLER & FRISCHKNECHT (1977) e MCNEILL (1990), apontam a presença da argila como uma importante componente adicional da condutividade elétrica dos solos ou rochas.

De acordo com MCNEILL (1990), a matriz da rocha ou solo é assumida como sendo um isolante elétrico, sendo que o fluxo de corrente se dá através da água contida no poro. Nestas condições os fatores principais que afetam a condutividade elétrica de determinado volume de solo ou rocha são: a porosidade, a condutividade elétrica da água presente nos poros, o formato dos poros, o grau de saturação, a temperatura e a presença de argilas com alta capacidade de troca catiônica (CTC).

Além da presença de argila, outro fator importante nas medidas de condutividade ou resistividade elétrica é a concentração de íons dissolvidos na zona saturada. CARTWRIGHT & SHERMAN (1972) desenvolveram estudos que determinaram a relação inversa entre a resistividade do terreno e a quantidade de sólidos totais dissolvidos (TDS) na água subterrânea, confirmando a potencialidade dos métodos de eletrorresistividade na detecção de contaminantes inorgânicos.

Posteriormente, MCNEILL (1980a) apresentou um estudo detalhado da condutividade elétrica dos solos e das rochas, abordando os efeitos da presença de íons dissolvidos na água subterrânea e quantificando a contribuição individual de suas concentrações nas medidas de condutividade elétrica do terreno, definindo, assim, as bases teóricas para a aplicação dos métodos eletromagnéticos indutivos na investigação da contaminação inorgânica subterrânea. Neste trabalho, MCNEILL estabelece que o acréscimo de 25ppm na concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS) na água subterrânea implica num aumento de 1mS/m na leitura da condutividade elétrica aparente do terreno.

Desta forma, MCNEILL aponta que a capacidade dos métodos eletromagnéticos indutivos em detectar a presença de contaminação inorgânica tanto no solo, como na água subterrânea, está relacionada à alta condutividade elétrica apresentada por este tipo de contaminante, uma vez que os compostos inorgânicos produzem um aumento na concentração de íons livres quando em contato com o solo ou com a água subterrânea, provocando o acréscimo dos valores da condutividade elétrica do meio.

A permissividade dielétrica de uma rocha, representada por seu coeficiente dielétrico (K), é altamente dependente do valor da permissividade dielétrica do fluido presente no poro, do grau de saturação e da porosidade (HOEKSTRA E DELANEY, 1974). A presença de poros preenchidos com água aumenta o valor da permissividade dielétrica do meio, sendo que esta característica permite ao método de geo-radar detectar o nível d'água subterrâneo através dos contraste apresentado entre a zona não saturada e saturada do terreno.

A penetração do sinal de radar no interior do solo é governada, principalmente, pela atenuação (α), que por sua vez é governada pela condutividade elétrica (σ) do terreno numa relação direta. Ou seja, quanto maior a condutividade do meio geológico, maior será a atenuação da onda eletromagnética em subsuperfície (DAVIS & ANNAN, 1989).

Este fato, viabiliza a utilização do uso do geo-radar para a detecção de contaminação provocada por contaminantes inorgânicos, uma vez que estes compostos, geralmente, são iônicos e provocam uma aumento sensível na condutividade elétrica do meio, como já foi visto. Assim, devido à presença de contaminação inorgânica, os registros de radar podem apresentar uma zona onde as reflexões são atenuadas indicando os efeitos provocados pelos compostos condutivos (DAVIS & ANNAN, 1989; NOBES et al., 1994).

Em relação aos compostos orgânicos, tais como os organoclorados, que são líquidos não aquosos mais densos que a água (DNAPL), o comportamento dos sinais de radar é distinto daquele apresentado para os compostos inorgânicos. Se a água contida no poro for removida pelos contaminantes organoclorados, tendo estes um coeficiente dielétrico menor que o da água (Tabela 1), a energia eletromagnética pode ser refletida, sendo possível identificar a presença da contaminação orgânica através de reflexões do sinal (GREENHOUSE et al., 1993).

Entretanto, se o contaminante orgânico for menos denso que a água (LNAPL), como é o caso dos hidrocarbonetos, o meio apresentará redução da amplitude das reflexões da onda eletromagnética (DANIELS et al., 1995; BENSON, 1995).

Tabela 1. Densidade e coeficiente dielétrico (K) de compostos orgânicos (hidrocarbonetos e organoclorados) (Fonte: ANNAN et al, 1991; API, 1993; DANIELS et al., 1995)

<i>Substância</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>	<i>Coeficiente dielétrico (K)</i>
Água	1,0	81
Metanol	0,79	30,9
Etanol	0,79	22,3
Gasolina	0,72-0,76	1,95
Querosene	< 1,0	2,1
Diclorometano	1,33	9,1
Tricloroetano (1,1,1 TCA)	1,35	7,6
Tricloroetileno (TCE)	1,46	3,4
Tetracloroetileno (PCE)	1,63	2,3
Tetracloroeto de carbono	1,59	2,2

3.5. APLICAÇÕES DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS EM ESTUDOS AMBIENTAIS

Como marco inicial da geofísica ambiental, URISH (1983) e NOBES (1996) referenciam SWARTZ como sendo o pioneiro, que, em 1937, se utilizou de medições de resistividade do terreno para identificar a intrusão salina em ilhas do Havaí.

Também, de acordo com NOBES (1996), a investigação da contaminação antrópica através de métodos geofísicos se iniciou no final da década de 60 com os trabalhos de CARTWRIGHT & MCCOMAS, que, em 1968, empregaram levantamentos de eletrorresistividade para mapear a extensão do chorume proveniente de um aterro sanitário em Illinois (EUA), e de WARNER, que, no ano de 1969, utilizou a mesma metodologia na detecção de contaminantes disseminados na água subterrânea.

MCNEILL (1990) divide a aplicação dos métodos geofísicos em estudos relativos à água subterrânea nos seguintes temas principais: prospecção para exploração, mapeamento da qualidade relacionada à salinidade e mapeamento da contaminação por resíduos domésticos ou industriais. Porém, na abordagem a seguir, referenciar-se-á os trabalhos relacionados aos dois últimos tópicos, uma vez que estão associados ao diagnóstico dos impactos causados pelos contaminantes à qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Em relação à poluição dos aquíferos, a qualidade da água subterrânea muitas vezes é afetada pela presença do cloreto, que de forma natural pode prejudicar, por exemplo, a potabilidade dos recursos hídricos em áreas litorâneas. As altas concentrações de cloreto na água salgada das cunhas salinas proporcionam grandes contraste de condutividade ou resistividade elétrica no meio (STEWART, 1982), possibilitando sua detecção através do emprego dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, eletromagnético e geo-radar.

Inúmeros trabalhos foram publicados para a investigação da intrusão salina, os quais descrevem a aplicação do método de eletrorresistividade (VAN DAM, 1976; HAGEMEYER & STEWART, 1990), eletromagnético indutivo no domínio da (STEWART, 1982; ANTHONY, 1992), eletromagnético no domínio do tempo (MILLS et al., 1988; GOLDMAN et al., 1991) e pela combinação entre medidas de resistividade elétrica e condutividade eletromagnética (BARKER, 1990).

Até a presente data, são poucos os exemplos da aplicação do geo-radar na identificação de intrusão salina em ambientes costeiros, podendo se referenciar os trabalhos de SOLDAL et al. (1994) e AQUINO et al. (1998a). SOLDAL et al. (1994) utilizam o método de geo-radar e medidas de resistividade elétrica para investigar a hidrogeologia de aquíferos deltaicos em fjords e mapear a intrusão salina neste locais. AQUINO et al. (1998) comparam os resultados do emprego de antenas com frequências diferentes (50 e 200MHz),

estabelecendo, através dos dados de radar, um valor para a relação de Ghyben-Herzberg próximo de 1:25.

A primeira referência da aplicação do método eletromagnético indutivo para mapeamento da contaminação da água subterrânea é atribuída ao Professor J. P. GREENHOUSE, da Universidade de Waterloo (Canadá), que, em 1977, dentro de uma série de atividades executadas na área de um aterro sanitário abandonado em Borden, empregou os condutivímetros de solo EM-31 e EM-34 (Geonics Ltd) para o levantamento e mapeamento das anomalias de condutividade elétrica do terreno provocadas pelos contaminantes presentes.

Além do pioneirismo, esta pesquisa, que foi apresentada inicialmente por MCNEILL (1980b) e publicada integralmente em 1983, tem grande importância ao desenvolvimento da aplicação da metodologia geofísica em estudos de contaminação, pois, elabora uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo método eletromagnético indutivo e os dados adquiridos por outros dois métodos geofísicos também empregados: a eletrorresistividade e o VLF (very low frequency).

As conclusões mais importantes reportadas por GREENHOUSE et al. (1983), e que norteiam até hoje as investigações geofísicas para mapeamento da contaminação subterrânea, são a potencialidade do método eletromagnético indutivo em estudos de contaminação inorgânica, o custo relativamente menor em comparação à coleta e análise de amostras obtidas em sondagens, e a vantagem que os métodos eletromagnéticos apresentam com relação à eletrorresistividade em termos de resolução dos dados e da velocidade do levantamento.

Vários estudos sobre a aplicação dos métodos eletromagnéticos indutivos na detecção da contaminação subterrânea foram desenvolvidos após os estudos iniciais de GREENHOUSE. GLACCUM et al (1982) apresentam diversos casos sobre a investigação em locais contendo resíduos perigosos, salientando a precisão e a redução de custos fornecida por esta metodologia. MONIER-WILLIAMS et al. (1990) empregam os condutivímetros de solo EM-31 e EM-34 em três áreas de disposição inadequada de resíduos, descrevendo de forma detalhada os procedimentos de correção topográfica nos dados de condutividade do terreno. LAHTI & HOEKSTRA (1991) utilizam os levantamentos eletromagnéticos para caracterizar três locais de disposição de sal em campos de exploração de petróleo.

Destaca-se, também, o artigo elaborado por GREENHOUSE & SLAINE (1986), que reporta diversos levantamentos para mapeamento da contaminação da água subterrânea, ressaltando não só o potencial dos métodos eletromagnéticos em detectar a presença de contaminantes mas, como também em monitorar sua propagação através de medições ao longo do tempo.

A combinação dos métodos eletromagnéticos indutivos e outros métodos geofísicos na investigação de locais contaminados é registrada por MATIAS et al. (1994), que executaram medições da condutividade do terreno e resistividade elétrica para a avaliação de aquífero contaminado por aterro, e SCHUTTS & NICHOLS (1991) que empregaram levantamentos eletromagnéticos e magnetométricos na detecção de tanques subterrâneos em área abandonada.

Em relação à detecção da contaminação por compostos orgânicos com o uso do geo-radar, deve-se citar inicialmente os trabalhos de GREENHOUSE et al. (1993) e BREWSTER & ANNAN (1994) que descrevem o experimento realizado em Borden (Canadá), no qual o método de geo-radar foi utilizado, em conjunto com outras técnicas geofísicas, para monitorar a injeção controlada de tetracloroetileno (PCE), e cuja resposta nos sinais obtidos foi o aparecimento de reflexões decorrente do deslocamento da água dos poros pelo contaminante. Posteriormente, LAWTON et al. (1994), em estudo para a detecção de creosoto (DNAPL) em fraturas de rocha, verificaram este mesmo fenômeno descrito no experimento de Borden.

DANIELS et al. (1995) e BENSON (1995) investigaram a resposta do radar em áreas contaminadas por hidrocarbonetos, tendo estas pesquisas indicado anomalias de baixa amplitude de reflexão na área de vazamento de combustível (gasolina), quando comparadas às porções adjacentes sem a presença deste hidrocarboneto.

BARBER & REXFORD (1994) e REDMAN et al. (1994), utilizando metodologias similares de modelagem e de experimentos controlados para simulação de vazamentos, registraram a diminuição da amplitude dos sinais de radar, respectivamente, para diesel e querosene, conforme havia sido constatado por DANIELS et al. (1995).

Entretanto, a resposta geofísica fornecida pela presença de contaminação por hidrocarbonetos pode ser diferente da prevista. Exemplo disto pode ser verificado nos resultados obtidos por SAUCK et al. (1998), onde é observada a atenuação do sinal de radar e valores anômalos de condutividade elétrica do terreno. Os autores relacionam tal

fenômeno ao aparecimento de ácidos orgânicos e ácidos carbônicos decorrentes da biodegradação dos hidrocarbonetos pelos microrganismos naturais.

Quanto à aplicação do geo-radar em estudos de contaminação inorgânica, podem ser referenciados os trabalhos de DAVIS & ANNAN (1989), NOBES et al. (1994) e LANZ et al. (1994), que identificaram a presença dos contaminantes em subsuperfície através da atenuação das ondas eletromagnéticas do radar em áreas de aterros de disposição de resíduos. Nas pesquisas citadas, NOBES et al. (1994) realizaram de forma simultânea medidas de condutividade elétrica do terreno e radar, enquanto que LANZ et al. (1994) empregaram levantamentos magnetométricos e de eletrorresistividade em conjunto com a aquisição por meio do geo-radar.

A aplicação no Brasil dos métodos eletromagnéticos indutivos para estudos de contaminação subterrânea se iniciou a partir da segunda metade da década de 80. Nesta época, MENDES & HASSUDA (1986) registram a aplicação destes métodos geofísicos no mapeamento da contaminação em áreas de disposição de resíduos domésticos e industriais.

Na sequência, MENDES et al. (1987, 1989a, 1989b) empregam os condutímetro de solo, associados às medições de resistividade do terreno, na avaliação dos impactos causados à água subterrânea por diferentes tipos de fontes de contaminação, como cemitérios, intrusão salina em áreas litorâneas, aterros sanitários e locais com disposição inadequada de resíduos.

Simultaneamente a estes trabalhos iniciais, ELLERT et al. (1990) executaram levantamentos eletromagnéticos, combinados à eletrorresistividade e sísmica de refração, para avaliação geológica e identificação da contaminação proveniente de local inadequado (boçoroca) para recebimento de resíduos.

A partir destes levantamentos pioneiros, seguiram-se outros, com o objetivo de se determinar a presença da contaminação por fontes diversas, tais como as pesquisas realizadas por COSTA et al. (1995), DEHAINI (1995), BOIAN (1995) e ANTUNES et al. (1998).

Quanto ao método de geo-radar, são recentes, no Brasil, os estudos relativos à detecção da contaminação subterrânea. Pode ser citado o trabalho de RODRIGUES & APPI (1996), que apresenta os resultados de experimentos realizados para a identificação de

duto e rejeitos de petróleo (borra ácida) enterrados, e de ARAÚJO (1997), que realizou levantamentos de geo-radar e polarização induzida (IP) espectral para avaliar a contaminação por organoclorados (DNAPL) em pólo petroquímico.

Em relação à detecção de contaminantes inorgânicos, NASCIMENTO et al. (1998) identificam a presença deste tipo de contaminação em subsuperfície através da atenuação do sinal de radar em consequência da infiltração no solo de efluentes de esgoto doméstico. Cita-se, também, o artigo de AQUINO et al. (1998a), cujos resultados apresentam a determinação da configuração da intrusão salina, obtida em seções de radar de área litorânea por meio da atenuação decorrente da alta condutividade elétrica da água salgada.

Além destes, cabe o registro dos trabalhos de GRAZZINOLI et al. (1999), que conjugam a aquisição de dados de resistividade elétrica aos de radar, identificando através da detecção de porções mais condutivas do terreno focos enterrados do pesticida hexaclorociclohexano (BHC) misturados a cal hidratada, e de AQUINO et al. (1998b), que empregam o geo-radar na detecção da contaminação por vazamento de combustíveis (LNAPL), verificando a diminuição da amplitude das reflexões nos locais afetados, conforme havia sido preconizado por DANIELS et al. (1995).

CAPÍTULO 4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL

A área em estudo se localiza no distrito industrial do município de Araras, e suas coordenadas geográficas são 22°22'S de latitude e 47°23'W de longitude (Figura 1), e mais precisamente, o ponto central da indústria possui como coordenadas UTM 7.523,29 Km Norte e 252,28 Km Leste, obtidas através de sistema de posicionamento por satélites (GPS).

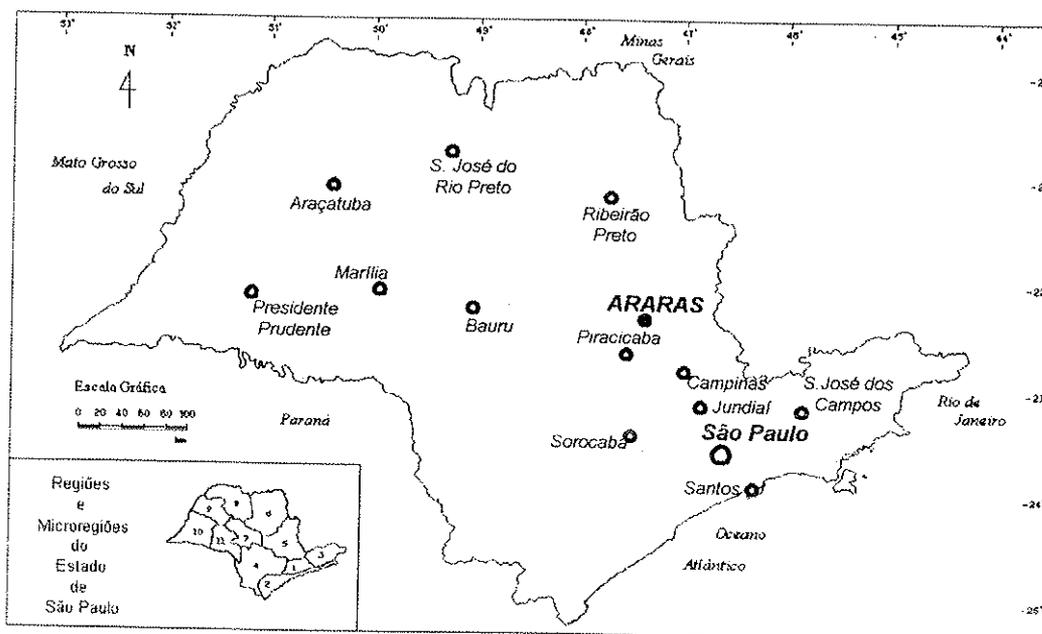


Figura 1. Localização do município de Araras no Estado de São Paulo (Fonte: CETESB, 1977).

O acesso à indústria Sulfabrás se dá através da rodovia SP 191 (Araras-Rio Claro) km 51,2 (Figura 2), sendo que a distância até a rodovia SP 330 (rodovia Anhanguera) é de, aproximadamente, 1.400 metros (CETESB, 1997a).

A área investigada pertence à bacia hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu e o corpo d'água superficial de maior importância próximo da indústria (1.400m) é a Represa Hermínio Ometto (Figura 2). Esta represa é manancial de abastecimento parcial da cidade de Araras (CETESB, 1997b), daí resulta a importância deste corpo d'água e a necessidade da preservação da qualidade de suas águas.

Até o início da década de 90, a atividade predominante num raio de 500 metros ao redor da área da indústria era agricultura, representada pelo cultivo de cana de açúcar. Porém, nos últimos anos esse quadro se modificou sobremaneira, dando lugar a atividades industriais e comerciais em torno do local.

4.2. GEOLOGIA REGIONAL

Quanto à geologia, a região do município de Araras está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná que abrange grande área do Estado de São Paulo (Figura 4).

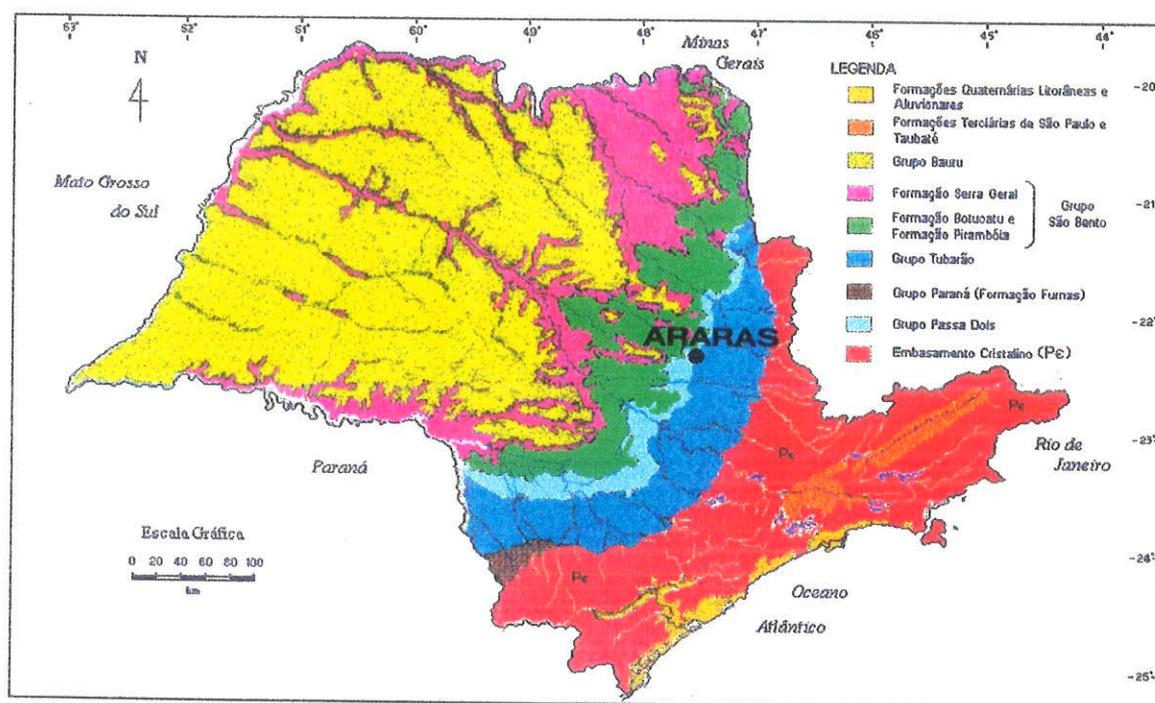


Figura 4. Mapa geológico do Estado de São Paulo (modif. DAEE in CETESB, 1977).

Esta região é constituída predominantemente por rochas neocarboníferas e permianas do Grupo Tubarão e do Grupo Passa Dois, além de rochas intrusivas básicas (IPT, 1981).

O Grupo Passa Dois na área do município de Araras é caracterizado pela presença de rochas das formações Irati na base e Corumbataí no topo (Figura 5), esta última também denominada de Formação Estrada Nova (DAEE, 1981).

A Formação Irati, cujos sedimentos foram depositados em ambientes marinhos, subdivide-se em dois membros: o inferior ou membro Taquaral, de natureza

predominantemente pelítica, constituído por argilitos, siltitos e folhelhos de cor cinza e o membro superior ou Assistência, com litologia bem mais variada, representado por folhelhos pretos, calcários dolomíticos e siltitos (IPT, 1981). O membro Taquaral prolonga-se desde Piracicaba, passando por Araras, até leste do município de Leme, com espessura média de 35 metros (DAEE, 1981).

A litologia da Formação Corumbataí é representada por arenitos muito finos, siltitos, argilitos e folhelhos; níveis de calcários oolíticos lilás e cinza. A deposição dos sedimentos decorreu em ambiente marinho de águas rasas em condições redutoras e em ambiente litorâneo, sob a influência de marés, em condições oxidantes (IPT, 1981). A espessura total na zona de afloramento pode variar em torno de 250 metros, com tendência a aumentar para oeste, no sentido de mergulho para o interior da Bacia do Paraná (DAEE, 1981).

O Grupo Tubarão está representado litologicamente na região por rochas permocarboníferas das formações Itararé, Aquidauana e Tatuí (Figura 5).

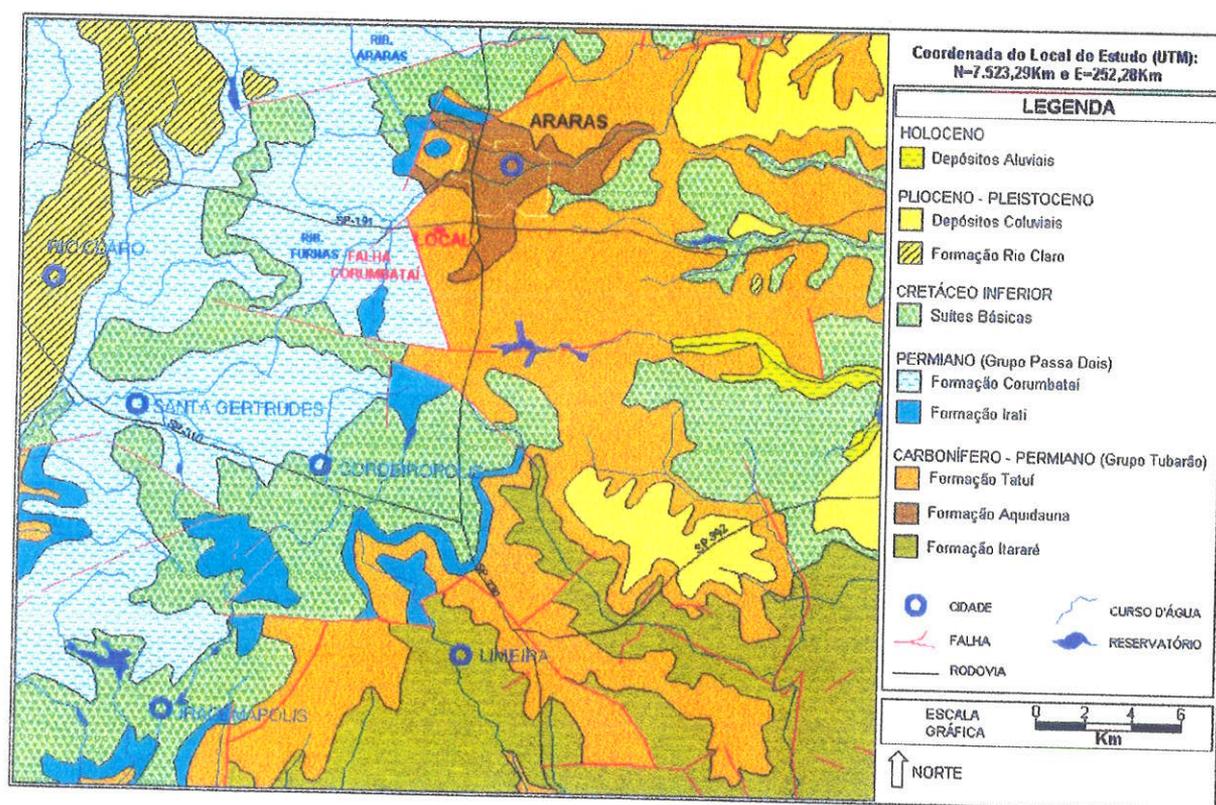


Figura 5. Geologia da região do município de Araras (modif. DAEE-UNESP, 1982).

Os sedimentos da Formação Itararé assentam-se diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino e possuem uma espessura que pode variar de 200 a 1.300 metros (DAEE, 1981). A litologia desta formação é constituída por arenitos de granulação variada,

imaturos, passando a arcósios, conglomerados, diamictitos, tilitos, siltitos, folhelhos, ritmitos e raras camadas de carvão.

A Formação Aquidauana aflora na região de Araras em pequenas manchas, tornando-se a litologia sedimentar predominante nas porções mais setentrionais, próximo do município de Mococa. Do ponto de vista litológico esta formação é constituída por arenitos finos a grosseiros e lamitos arenosos vermelhos com estratificação plano-paralela.

Os sedimentos da Formação Aquidauana chegam a atingir cerca de 70 metros de espessura na parte norte da Bacia do Rio Pardo, diminuindo gradativamente para o sul, na região de Limeira e Americana. Sendo que, na região de Araras, estes sedimentos assentam-se diretamente sob a Formação Tatuí (DAEE, 1981).

A Formação Tatuí marca o início do ciclo pós-glacial e é representada no membro inferior por siltitos e arenitos muito finos de cor marrom-avermelhada e no membro superior por siltitos de cores claras amareladas e esverdeadas intercalando arenitos. No município de Araras, estão representados, tanto o membro superior como o inferior.

Além destas litologias, pode ser observada na área abrangida pelo município, a presença de sedimentos cenozóicos representados por depósitos aluviais que apresentam areias e argilas com conglomerados na base, e por depósitos coluvionais constituídos de areias com matriz argilosa, cascalhos de limonita e quartzo na base. Na região são verificados, também, suítes intrusivas básicas em forma de diques e sills, que incluem diabásios e dioritos pórfiros (IPT, 1981).

4.3. HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Hidrogeologicamente, a região pertence ao Aquífero Tubarão (Figura 6), que encontra-se cortado em diversos pontos por intrusões de diabásio, podendo encontrar-se recoberto por pequena camada de sedimentos cenozóicos (DAEE, 1981).

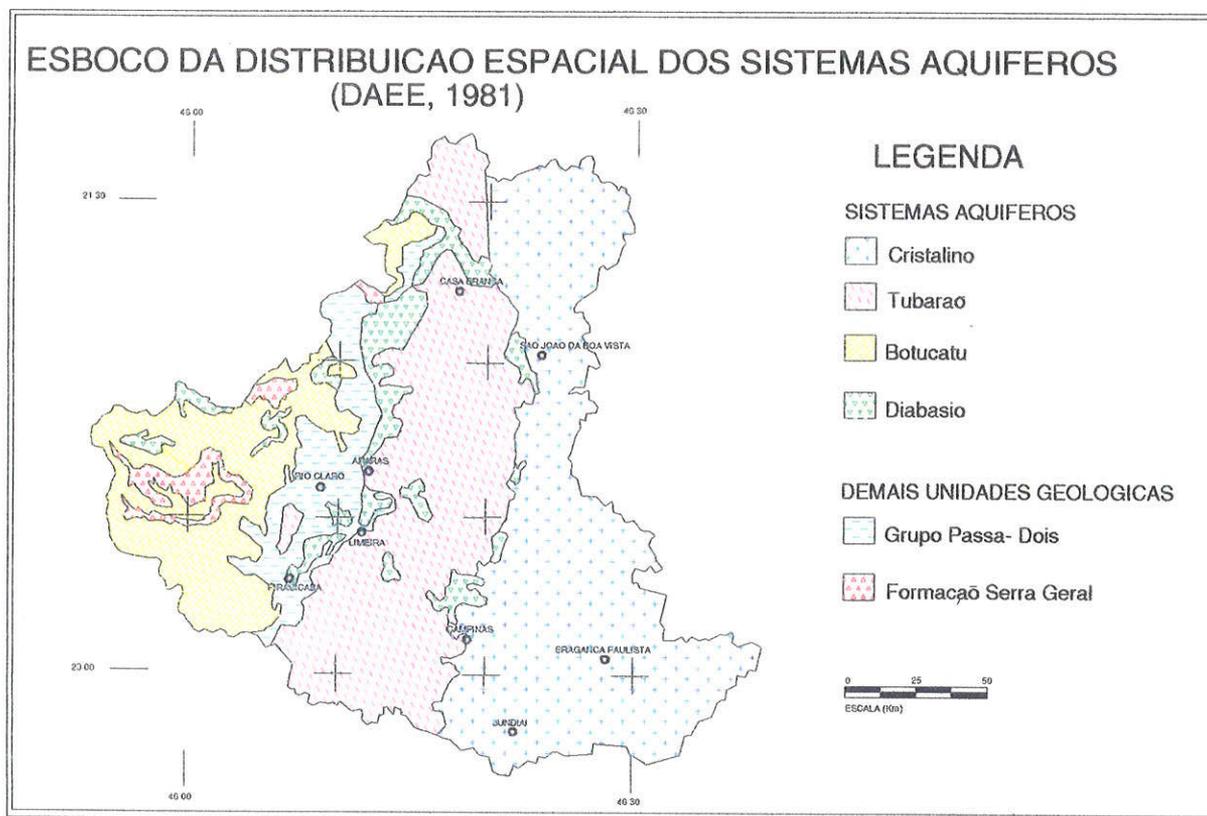


Figura 6. Sistemas aquíferos principais da região de Araras (Fonte: DAEE, 1981).

O valor médio da espessura saturada deste aquífero na área de afloramento é da ordem de 400 metros. O armazenamento e a circulação da água subterrânea ocorrem através de interstícios dos grãos dos sedimentos clásticos grossos. Estes estão intercalados com camadas de sedimentos finos impermeáveis, que dificultam o escoamento da água subterrânea no sentido vertical. Caracteriza-se, assim, uma situação de anisotropia com permeabilidades verticais inferiores às horizontais.

A alternância de camadas de sedimentos grossos e finos, com espessura variada, condiciona a heterogeneidade do armazenamento e circulação de água subterrânea neste aquífero. À medida que este aquífero avança para oeste, cresce em espessura (até 1.300m) e passa a ser confinado pela sequência sedimentar do Grupo Passa Dois que possui características de aquícluíde (DAEE, 1981).

4.4. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA LOCAL

Os dados da geologia e hidrogeologia do local (Anexo 1) foram adquiridos a partir das descrições geológicas e medições nos furos de sondagens a percussão realizados pela

Tecsolo em 1988, nos poços de monitoramento executados pela Sondosolo em 1989 (*in* CETESB, 1997a) e através das medidas de nível d'água efetuadas pela CETESB (Anexo 2).

A área da indústria se localiza sobre os sedimentos da Formação Tatuí (Figura 4), cuja a predominância de material silto-argiloso foi confirmada através das descrições geológicas das sondagens executadas na área (Anexo 2). Próximo à área da indústria, a Formação Tatuí está em contato direto por falha com a Formação Corumbataí, pertencente ao Grupo Passa Dois (Figura 4).

Os seis furos de sondagem a percussão da Tecsolo atingiram profundidades entre 7,5 e 16,0 metros. As descrições geológicas nestes pontos mostraram uma constituição argilo-arenosa nas porções mais superficiais, em média até 7 metros de profundidade, tornando-se mais argilosa nos estratos mais profundos.

As descrições geológicas nos locais dos seis poços de monitoramento instalados pela Sondosolo revelaram perfis semelhantes às sondagens a percussão, ou seja, predominância de solo argilo-arenoso mais superficial, tornando-se mais argiloso (sedimentos argilo-siltosos) até as profundidades atingidas (14,5 a 18,1m).

A indústria Sulfabrás se localiza em área de recarga local, estando localizada a montante da Represa Hermínio Ometto e próxima dos pontos de maior cota topográfica (Figura 3).

As medições da profundidade do nível d'água nos locais das sondagens a percussão apontaram valores entre 10,7 e 14,1 metros. Os níveis d'água medidos em setembro de 1988 pela Tecsolo e Sulfabrás em dezessete poços de abastecimento próximos à indústria, indicaram uma variação de nível de 7,9 a 14,9 metros para a área como um todo. E foi para esta data, devido ao maior número de dados em relação às demais, que se confeccionou o mapa potenciométrico da área investigada (Figura 7), e que confirmou a localização da indústria em área de recarga local.

Verifica-se que as curvas equipotenciais do mapa potenciométrico (Figura 7) possuem padrão concordante se comparadas às curvas topográficas da Figura 2, indicando, portanto, que o sentido de propagação da água subterrânea acompanha a topografia do terreno.

Porém, deve-se ressaltar que próximo do ponto de infiltração de resíduos o sentido de escoamento subterrâneo é para sudoeste, e não em direção à represa (sentido noroeste), sendo este fato de muita revelância nas considerações a serem feitas adiante neste trabalho quanto à propagação da contaminação e aos resultados obtidos pelos levantamentos geofísicos realizados.

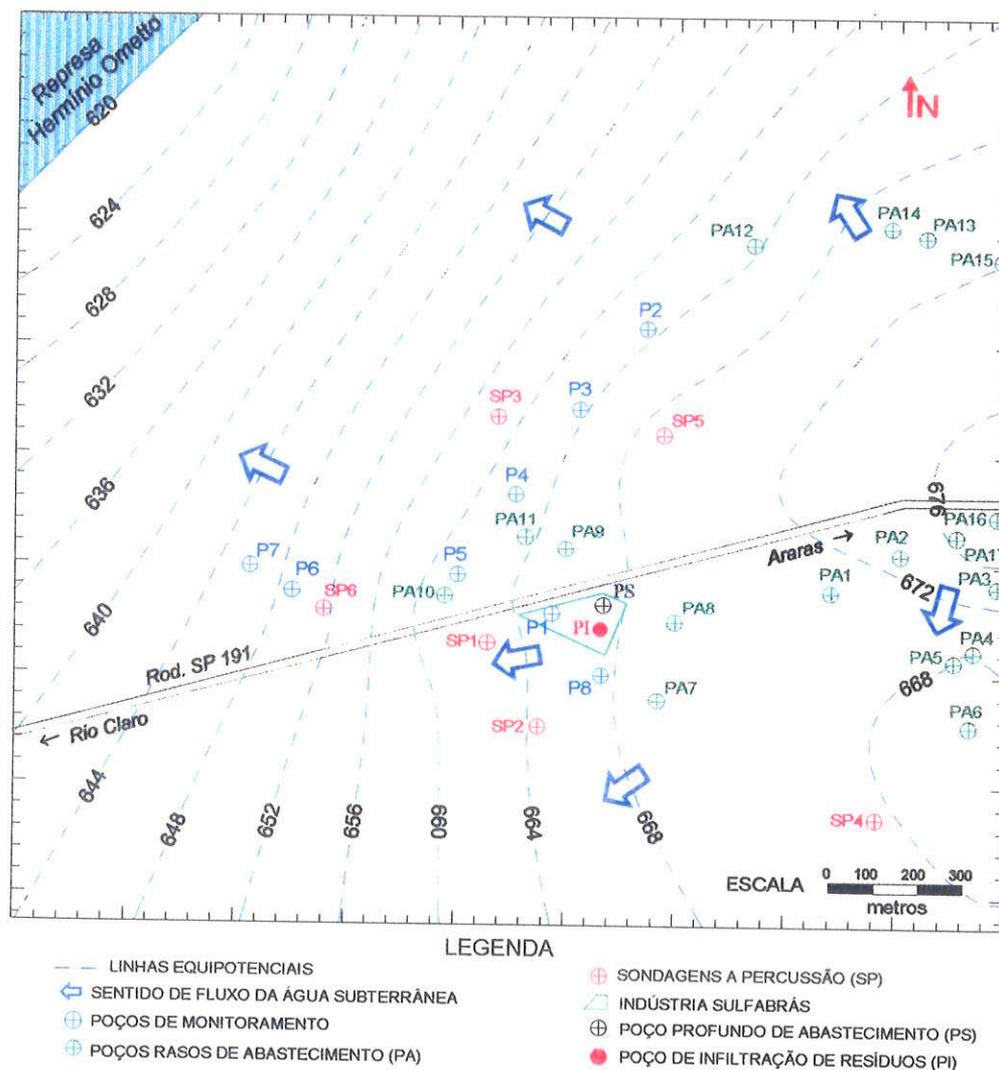


Figura 7. Mapa potenciométrico da área da indústria Sulfabrás (setembro de 1988).

As medidas de nível d'água realizadas pela CETESB (Anexo 2) nos poços de monitoramento, desde julho de 1990 até agosto de 1992, e em novembro de 1999, indicaram a maior variação de nível para a área em 20/01/92 (7,8m). Além disso, para um mesmo poço, a maior diferença encontrada, decorrente de variação sazonal, foi de 3,7 metros (poço P1) entre 05/02/92 e 27/08/92.

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica, da ordem de 10^{-7} cm/s, adquiridos a partir dos ensaios de infiltração da Sondosolo, confirmam que o solo na zona saturada é predominantemente argiloso, como observado nas diversas sondagens executadas na área.

O coeficiente médio da condutividade hidráulica para a área é $5,4 \times 10^{-7}$ cm/s, calculado a partir dos dados da Sondosolo (Anexo 2), sendo este valor característico de sedimentos argilosos. O gradiente hidráulico médio (dh/dL) calculado em direção à represa é de aproximadamente 3%, sendo que próximo à indústria este valor é menor (2%). Assim, assumindo-se uma porosidade efetiva (η) de 10% para o material argilo-siltoso (FREEZE & CHERRY, 1979), a velocidade de propagação da água subterrânea, através da Lei de Darcy, foi calculada em 6,0cm/ano.

4.5. HISTÓRICO DA SITUAÇÃO

Na área da indústria Sulfabrás, hoje desativada (Foto 1), se infiltrava efluentes industriais líquidos no solo desde 1981. Nesta data, a primeira indústria química a se instalar no local foi a Redistil Indústria Química Ltda, iniciando a produção de piridina anidra, dietiloxalato, acetato de etila, 4-amino-N-2-tiozolil-benzeno-sulfonamida e solventes regenerados por destilação (CETESB, 1997a).



Foto 1. Visão em detalhe da indústria Sulfabrás em abandono (1998).

A partir de 1985, a Sulfabrás S.A. Indústria Química instalou-se no local, e passou a produzir acetopiruvato de metila, 5-metil-3-carboxiamidoxazol (carboxiamido) e 3-amino-5-metil-isoxazol (3-amino). Entre os solventes utilizados por esta indústria, destacam-se o 1,2 dicloroetano e o tolueno.

Os solventes, usados na síntese de outros compostos, eram reutilizados após passarem por colunas de destilação. As águas residuárias deste processo eram encaminhadas a um tacho de evaporação, cuja finalidade era concentrar os efluentes, teoricamente isentos de solventes. Posteriormente, os efluentes gerados neste processo eram infiltrados em dois poços instalados nas dependências da própria indústria, sendo que quando do início dos levantamentos geofísicos a posição de apenas um deles era conhecida (Figura 7).

A partir de novembro de 1985, como resultado deste procedimento inadequado, foram detectados odores em poços de abastecimento rasos (cacimbas), localizados próximos da área de infiltração e responsáveis pelo suprimento de boa parte da região.

Após esta constatação, iniciou-se a realização periódica de análises químicas das águas subterrâneas, coletadas nos poços de abastecimento próximos da indústria e, posteriormente, nos poços de monitoramento. Os resultados destas análises indicaram a contaminação da água subterrânea em alguns destes poços, confirmando os impactos causados pela infiltração de resíduos.

Com base nestas análises, os poços domiciliares foram interditados, sendo que a população local passou a ser abastecida por água proveniente de um poço profundo existente na indústria Sulfabrás.

Adicionalmente, foram efetuadas, também, algumas análises químicas dos resíduos infiltrados para caracterizar sua composição química e possibilitar sua correlação com as substâncias contaminadoras presentes na água subterrânea.

A infiltração de resíduos foi interrompida em fevereiro de 1988, após exigência da CETESB, tendo em vista não somente a contaminação dos solos e das águas subterrâneas, mas também a possibilidade de uma contaminação futura da Represa Hermínio Ometto. A partir desta data, os trabalhos de monitoramento da qualidade da água subterrânea e caracterização do local foram intensificados.

Além da infiltração de resíduos através dos poços de injeção, outros dois fatores podem ter sido relevantes para a contaminação do solo e da água subterrânea: a estocagem inadequada dos resíduos e o manuseio incorreto dos mesmos, pois verificou-se, naquela época, que os tambores utilizados para a armazenagem eram dispostos em local aberto e sem base impermeabilizada.

Após o abandono da área industrial por parte dos responsáveis, a CETESB, em junho de 1990 foi acionada e passou a estudar o problema sistematicamente, coletando, inicialmente, amostras para análises químicas das águas dos poços de monitoramento instalados pela Sulfabrás (Anexo 3) e executando medições do nível d'água local. Nesta primeira fase, foram iniciados os trabalhos de campo dos levantamentos geofísicos, sendo retomados somente em 1998, quando foi realizada nova avaliação da área.

CAPÍTULO 5. METODOS GEOFÍSICOS ELETROMAGNÉTICOS

5.1. EQUAÇÕES DE MAXWELL E OS MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

As equações de Maxwell descrevem a propagação da energia eletromagnética como um processo conjunto entre forças e fluxos elétricos e magnéticos. Através destas equações é possível compreender o comportamento de propagação e atenuação dos campos eletromagnéticos num determinado meio a partir das propriedades elétricas e magnéticas do mesmo (OLHOEFT, 1998).

Os parâmetros presentes nestas equações indicam a capacidade que os materiais possuem em transportar ou armazenar energia, sendo que estes efeitos são fundamentais para a aplicação dos métodos eletromagnéticos em estudos geológicos.

As relações vetoriais definidas por Maxwell entre os campos gerados e suas fontes são descritas da seguinte forma (SHARMA, 1986):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1) \qquad \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2),$$

onde J é a densidade de corrente elétrica (A/m^2), E é a intensidade do campo elétrico (V/m), B é a indução magnética ou densidade de fluxo (Wb/m^2 ou tesla), H é a intensidade do campo magnético (A/m) e D é a polarização elétrica (C/m^2).

A primeira equação (1) representa matematicamente a Lei de Faraday e que estabelece a geração do campo elétrico (E) através da variação do campo indução magnética (B). A equação (2), baseada na Lei de Ampère, indica que o campo magnético é produzido pelo fluxo de correntes elétricas e que este campo é proporcional à corrente total, representada pelas correntes de condução e correntes de deslocamento.

Para se estabelecer a correlação entre as propriedades elétricas e magnéticas do meio com o campo eletromagnético são definidas as chamadas relações constitutivas, a saber:

$$D = \varepsilon E \quad (3) \qquad B = \mu H \quad (4) \qquad J = \sigma E \quad (5) \text{ (Lei de Ohm)}$$

onde ε , μ e σ são, respectivamente, a permissividade dielétrica (F/m), a permeabilidade magnética (H/m) e a condutividade elétrica (S/m) do meio. Para o vácuo a permissividade

dielétrica (ϵ_0) é $8,854 \times 10^{-12}$ F/m e a permeabilidade magnética (μ_0) assume o valor de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Assim, utilizando-se das relações constitutivas, as equações de Maxwell podem ser reduzidas por manipulação algébrica (TELFORD et al., 1986) em termos de somente dois campos, E e H . Assumindo para E e H a dependência do tempo sob a forma $E(t) = E_0 e^{i\omega t}$ e $H(t) = H_0 e^{i\omega t}$, onde ω (rad/s) é a frequência angular do campo ($=2\pi f$), as equações vectoriais para E e H tomam-se:

$$\nabla^2 E = i\omega\mu\sigma E - \epsilon\mu\omega^2 E \quad (6) \quad \nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H - \epsilon\mu\omega^2 H \quad (7)$$

O primeiro e o segundo termo do lado direito das equações (6) e (7) são relacionadas, respectivamente, às correntes de condução e às correntes de deslocamento. Estas são as equações básicas para a propagação dos vetores campo elétrico e magnético num meio isotrópico e homogêneo com as propriedades físicas de permissividade dielétrica (ϵ), permeabilidade magnética (μ) e condutividade elétrica (σ).

Nos métodos eletromagnéticos indutivos a frequência de operação é relativamente tão baixa que o segundo termo das equações (6) e (7), associado às correntes de deslocamento pode ser negligenciado, predominando, portanto, as correntes de condução, o que resulta em:

$$\nabla^2 E = i\omega\mu\sigma E \quad (8) \quad \nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H \quad (9)$$

Em contrapartida, nas frequências elevadas, típicas da faixa de operação do georadar (10 a 1000MHz), onde dominam as correntes de deslocamento (DAVIS & ANNAN, 1989), deve-se considerar também os efeitos de condução. Devido a isto, é definida a permissividade dielétrica complexa, representada por $\epsilon^* = \epsilon + i\epsilon'$, onde a parte real (ϵ) está associada ao efeito dielétrico (armazenamento de energia) e a parte imaginária (ϵ') é relativa à atenuação do campo elétrico (perda de energia).

Para a maior parte dos materiais geológicos, com condutividade elétrica abaixo de 100mS/m, a parcela da permissividade dielétrica complexa relacionada à perda de energia pode ser desconsiderada (PIPAN et al., 1996), assim a permissividade complexa é representada apenas por sua componente real (ϵ).

5.2. MÉTODO ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

5.2.1. PRINCÍPIOS DO MÉTODO

Nos métodos eletromagnéticos indutivos (EM) a propriedade física envolvida é a condutividade elétrica (σ) dos materiais de subsuperfície, sendo este parâmetro inversamente proporcional à resistividade elétrica.

Os métodos eletromagnéticos indutivos no domínio da frequência (FDEM) estão baseados em medições de campos eletromagnéticos associados à correntes alternadas induzidas em subsuperfície a partir de um campo primário (SHARMA, 1986). Na maioria dos métodos eletromagnéticos indutivos, o campo magnético primário ou indutor é produzido pela passagem de uma corrente alternada através de uma bobina ou ao longo de um fio colocado sobre o terreno (Figura 8). O campo primário propaga-se no espaço acima e abaixo da superfície e induz correntes nos corpos condutores de subsuperfície de acordo com as leis da indução eletromagnética.

Estas correntes produzem campos magnéticos secundários, que por sua vez distorcem o campo primário. Em geral, o campo resultante, que é captado na bobina receptora, diferirá do campo primário em intensidade, fase e direção, podendo, assim, revelar a presença de corpos condutores.

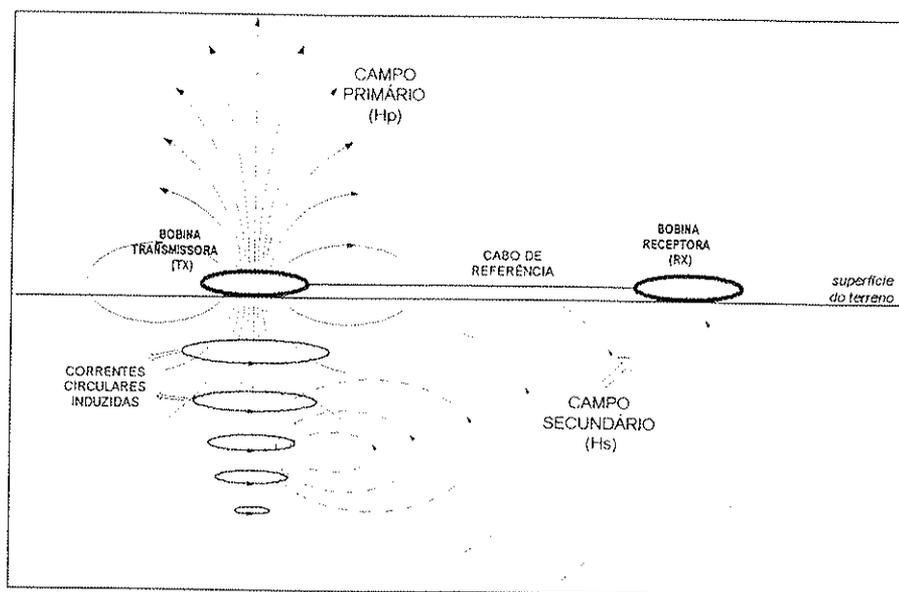


Figura 8. Representação do princípio de aplicação dos métodos eletromagnéticos indutivos (modif. SHARMA, 1986).

O campo resultante na bobina receptora terá como constituintes as componentes em fase e 90° fora de fase em relação ao campo primário. O sinal em fase é muitas vezes denominado "real" e a componente fora de fase é conhecida como "imaginária" ou componente em quadratura (MILSOM, 1989).

A componente em fase do campo magnético não está relacionada diretamente à condutividade do terreno, como é observado para a componente em quadratura, mas apresenta grande resposta à objetos condutivos, tais como metais enterrados. Assim, utilizando-se de medidas em quadratura em conjunto com medições em fase, tanto a condutividade do solo, como a presença ou não objetos metálicos enterrados, podem ser inferidas (SCHUTTS & NICHOLS, 1991).

Os métodos eletromagnéticos indutivos possuem a vantagem de não requerer contato elétrico com a superfície do terreno, reduzindo a sensibilidade dos instrumentos às variações muito próximas à superfície, permitindo, desta forma, a execução de levantamentos sobre terrenos rochosos irregulares ou sobre áreas pavimentadas (MCNEILL, 1980b).

5.2.2. PENETRAÇÃO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Devido à resistividade finita da maioria das formações superficiais e das rochas subjacentes, a energia incidente é absorvida, e a amplitude das ondas eletromagnéticas decresce exponencialmente ao atravessar os corpos condutores.

Assim, para os métodos eletromagnéticos a penetração do sinal pode ser quantificada através do parâmetro "skin depth", que é a profundidade para qual a amplitude se reduz a 1/e (37%) em relação ao seu valor na superfície (SHARMA, 1986). No caso das ondas planas que atravessam um condutor não magnético o skin depth é dado por:

$$Z_s = \frac{503,8}{(\sigma \cdot f)^{1/2}} = 503,8 (\rho / f)^{1/2} \quad (\text{metros}) \quad (10).$$

Esta equação indica que a penetração da onda eletromagnética diminui quanto maior é a condutividade elétrica (σ) do meio (menor resistividade elétrica ρ), ou quanto maior for a frequência (f) de operação do sistema.

5.2.3. PRINCÍPIOS DO MÉTODO DOS CONDUTIVÍMETROS DE SOLO

Entre as diversas técnicas eletromagnéticas no domínio da frequência e que empregam como fonte um dipolo magnético ou bobina, duas das mais populares, segundo MCNEILL (1990), são o Slingram e o método do condutivímetro de solo (GCM).

A técnica Slingram, também conhecida como método de bobina horizontal (HLEM), consiste no emprego de bobinas transmissora e receptoras portáteis, ambas em posição horizontal fixa (eixo dipolo vertical), separadas por uma distância determinada através de um cabo de conexão ou de referência. A separação entre as bobinas é estabelecida de acordo com a profundidade do alvo a ser investigado.

No Slingram, o campo secundário captado na bobina receptora é comparado à intensidade do campo primário indutor, desta forma, a medida do campo secundário é dada em porcentagem do campo primário. Esta técnica permite, também, medir as componentes em fase e quadratura do campo eletromagnético em diversas frequências.

De acordo com MCNEILL (1990), o condutivímetro de solo (GCM) é um sistema derivado do Slingram, sendo sua frequência de operação baixa o suficiente (baixos números de indução) para garantir que a profundidade de penetração, representada pelo skin depth, seja maior que a separação entre as bobinas. Para este mesmo autor, devido à acuidade na calibração, que consiste em definir a condutividade zero para o equipamento, esta técnica fornece uma medida mais sensível da condutividade elétrica do terreno que o Slingram, principalmente em áreas que apresentam alta resistividade.

Outra diferença em relação ao Slingram, consiste na possibilidade, para uma mesma frequência, da determinação da variação da condutividade em duas profundidades através apenas da mudança na posição das bobinas (horizontal ou vertical), ou seja, com o eixo dipolo magnético vertical ou com o eixo dipolo magnético horizontal (Figura 9).

Além disso, a condutividade medida nos condutivímetros de solo, através da relação de amplitude ou fase entre o campo primário e o secundário, e é apresentada diretamente no equipamento em unidades de miliSiemens por metro (mS/m), diferentemente das leituras com o Slingram que são dadas em termos de percentual, como já foi citado.

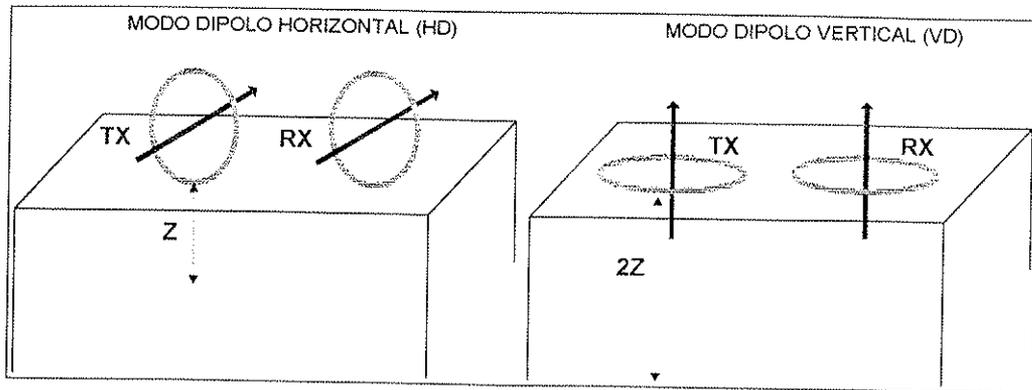


Figura 9. Disposição das bobinas no terreno e posição dos eixos dipolos magnéticos (modif. MCNEILL, 1980b).

Os condutímetro de solo são construídos para operar a baixas frequências, ou seja, em baixos números de indução, sendo que esta condição implica que a leitura no receptor será linearmente proporcional à condutividade elétrica verdadeira das estruturas em subsuperfície (MCNEILL 1980b). Exemplificando, em terrenos com condutividade elétrica muito baixa a resposta destes equipamentos é essencialmente zero, sendo que as leituras derivarão apenas quando as condutividades dos materiais em profundidade for elevada, acima de 100mS/m (Figura 10), contemplando, assim, a faixa de condutividade elétrica da maioria dos materiais geológicos.

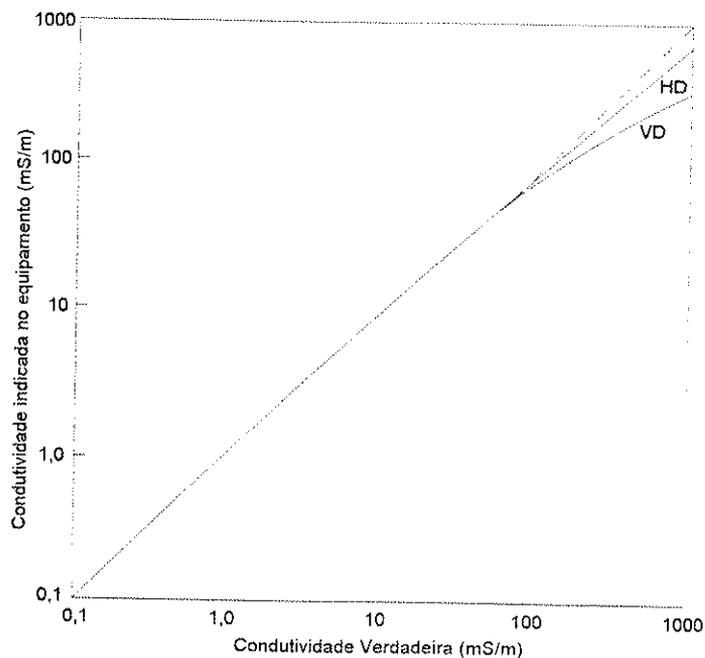


Figura 10. Relação da condutividade verdadeira e da medida nos condutímetro de solo (Fonte: MCNEILL, 1980b).

Desta forma, obedecendo a imposição de baixos números de indução, a expressão que relaciona a condutividade aparente (σ_a) e os campos magnético primário (H_p) e secundário (H_s) é dada por:

$$\sigma_a = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (\text{mho/m ou S/m}) \quad (11)$$

onde f é a frequência fornecida pelo equipamento (Hz), μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), e s é a distância (m) entre as bobinas transmissora e receptora. A unidade de condutividade elétrica no sistema MKS é mho (Siemen) por metro ou mais, convenientemente, milimho por metro (mS/m).

MCNEILL (1980b) define as funções ϕ_H e ϕ_V como a contribuição no valor do campo magnético secundário obtido, devido a uma fina camada de espessura dz , numa profundidade normalizada z (onde z é a profundidade dividida pelo espaçamento s entre as bobinas), para as configurações de dipolo horizontal (HD) e vertical (VD), respectivamente. A comparação das funções ϕ_H e ϕ_V (Figura 11) enfatiza a maneira que estas duas disposições das bobinas respondem aos materiais em várias profundidades.

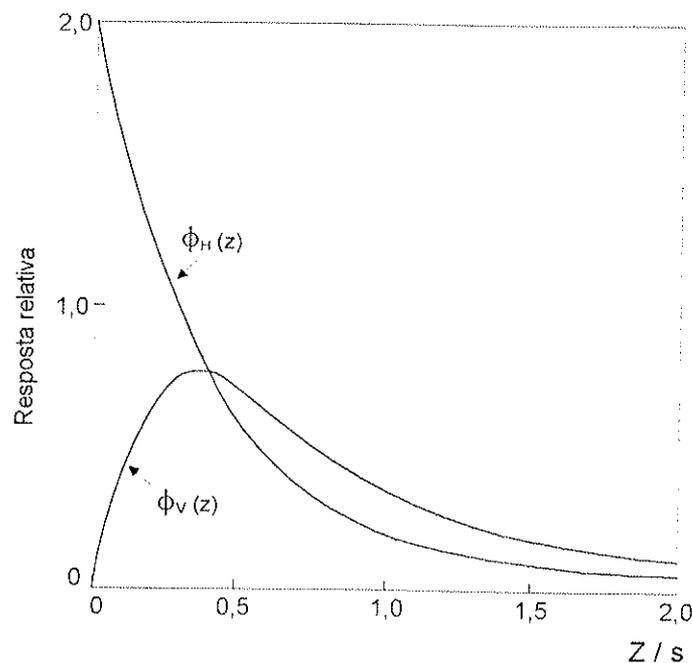


Figura 11. Comparação da função resposta relativa para os modos dipolos horizontal (HD) e vertical (VD) (Fonte: MCNEILL, 1980b).

No caso da função ϕ_H , relativa às bobinas com eixo dipolos horizontais, a Figura 11 ilustra que a contribuição relativa ao material próximo à superfície é grande e a resposta decresce exponencialmente com a profundidade.

Para a função ϕ_V , associada ao eixos dipolos na posição vertical, observa-se na Figura 11 que um material localizado a uma profundidade de 0,4s fornece a máxima contribuição ao campo magnético secundário mas, o material localizado a profundidade 1,5s ainda contribui significativamente. Verifica-se, também, que os materiais próximos à superfície têm pequena participação no campo secundário detectado e, portanto, esta configuração de bobinas (modo VD) é pouco sensível às mudanças de condutividade próximo à superfície.

O valor obtido de condutividade elétrica está relacionado a um pacote geológico desde a superfície até determinada profundidade investigada, daí o termo aparente. Ou seja, a leitura efetuada pelo condutímetro de solo é uma integração de valores de condutividade até a profundidade determinada pelo arranjo de campo. Assim, a contribuição relativa à condutividade aparente, ou ao campo magnético secundário, de todo o material de subsuperfície, até uma profundidade z é dada por:

$$R_{V,H}(z) = \int_z^{\infty} \phi_{V,H}(z) dz \quad (12)$$

que é chamada de função resposta cumulativa (Figura 12).

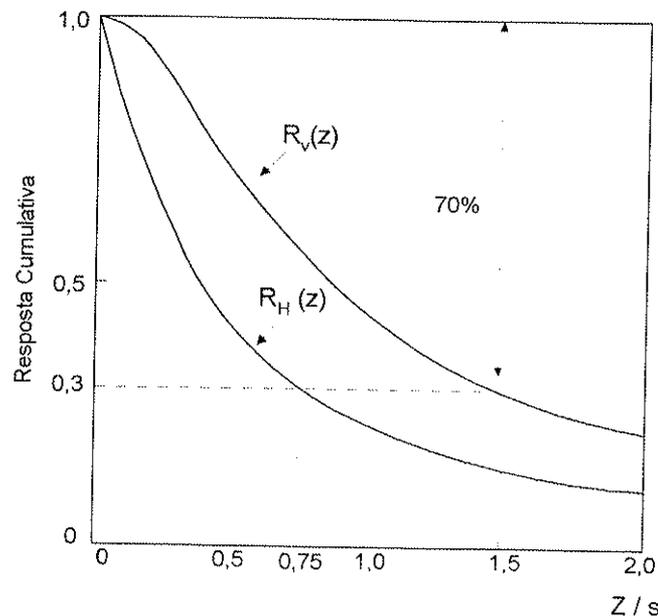


Figura 12. Resposta cumulativa para os modos de dipolo horizontal e vertical (Fonte: MCNEILL, 1980b).

A Figura 12 mostra que 70% da resposta no modo dipolo horizontal (HD) é dada por materiais em profundidade menor que 0,75s, enquanto que para o modo dipolo vertical (VD) a resposta é decorrente de materiais em profundidade mais rasa que 1,5s.

Esta diferença de profundidade efetiva de exploração permite estimar a variação vertical da condutividade por meio da comparação dos valores obtidos por estas duas configurações de bobinas.

5.2.4. CONDUTÍMETROS DE SOLO EM-31 E EM-34

Nos levantamentos de campo para a obtenção dos valores de condutividade elétrica do terreno, foram utilizados dois tipos de condutímetros de solo: o EM-31 e o EM34, modelo 3XL, ambos fabricados pela Geonics Ltd (Canadá).

O instrumento EM-31 (Foto 2) consiste de duas bobinas coplanares montadas num tubo rígido numa distância fixa de 3,7 metros, e que pode ser carregado e operado por uma pessoa apenas. A frequência de operação desta instrumento é única, sendo de 9.8 kHz, o que define que para se investigar duas profundidades diferentes é necessário se alterar a disposição do eixo do dipolo magnético (GEONICS, 1992).

Na configuração de operação normal do EM-31, as bobinas se encontram na horizontal, ou seja, o eixo do dipolo magnético é vertical (modo VD). Esta posição fornece uma profundidade de exploração de até 6 metros (Tabela 2). Por meio da rotação de 90° do aparelho ao longo de seu eixo, as bobinas se dispõem no modo de dipolo horizontal (HD), e a profundidade de investigação se reduz à metade, ou seja, até 3 metros.

O equipamento EM-31 permite a leitura da condutividade elétrica das duas componentes do campo magnético resultante, isto é, a componente em fase (real) e fora de fase (imaginária) ou em quadratura. As medidas da componente em quadratura (fora de fase) são utilizadas para se obter a condutividade aparente do terreno, enquanto que as medições da componente em fase são empregadas para a detecção de objetos ou resíduos metálicos enterrados.



Foto 2. Condutivímetro de solo Geonics EM-31.

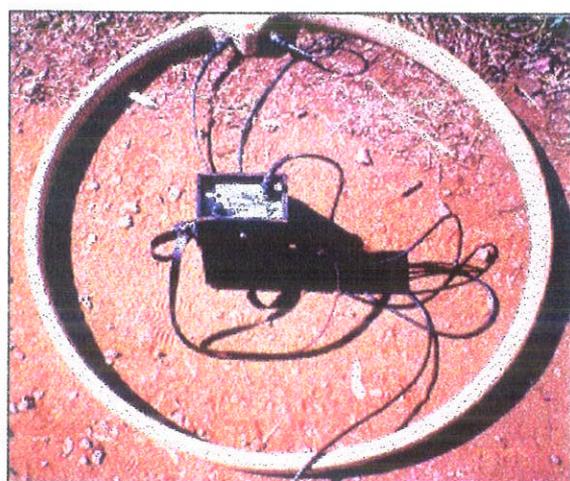


Foto 3a. Bobina transmissora do EM34.

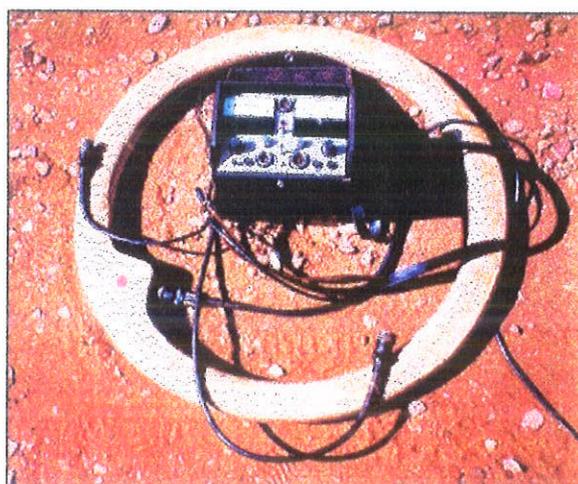


Foto 3b. Bobina receptora do EM34.

O aparelho EM-34 (Fotos 3a e 3b), modelo 3XL, emprega duas bobinas circulares, uma transmissora e outra receptora, conectadas por um cabo eletrônico de referência, cujos os comprimentos podem ser de 10, 20 ou 40 metros, e que podem ser substituídos de acordo com a profundidade de interesse na investigação. Estes comprimentos dos cabos estão associados às três frequências em que opera o equipamento, e que são 6,4KHz para a distância de 10 metros, 1,6KHz para 20 metros e 0,4KHz para 40 metros (GEONICS, 1990).

As bobinas do EM34-3XL podem ser dispostas em relação ao terreno com o eixo dipolo vertical (modo VD) ou horizontal (modo HD). O modo VD fornece duas vezes a profundidade de exploração que o modo HD e é mais sensível às variações laterais de condutividade (GOLDESTEIN et al., 1990).

Assim, conjugando-se os diferentes comprimentos dos cabos de referência do instrumento com a posição horizontal ou vertical do eixo dipolo das bobinas, podem ser investigadas, respectivamente, as profundidades de 7,5 e 15m para o cabo de 10 metros, 15 e 30m para a distância de 20 metros, e 30 e 60m com a separação de 40 metros.

Tabela 2. Parâmetros de operação e de exploração dos condutivímetros de solos (Fonte: GEONICS, 1990 e 1992)

<i>Condutivímetro de Solo</i>	<i>Distância entre bobinas (m)</i>	<i>Profundidade de Investigação (m)</i>		<i>Frequência de Operação (Hz)</i>
		<i>Dipolo Horizontal</i>	<i>Dipolo Vertical</i>	
EM-31	3,7	3	6	9.800
EM-34-3XL	10	7,5	15	6.400
EM-34-3XL	20	15	30	1.600
EM-34-3XL	40	30	60	400

As leituras da condutividade elétrica obtidas com o condutivímetro EM-34-3XL são relativas apenas à componente fora de fase ou em quadratura do campo magnético resultante, sendo, assim, menos sensível que o EM-31 na identificação de objetos ou resíduos metálicos enterrados. Em contrapartida, o EM-34-3XL possibilita a detecção da contaminação disseminada no solo ou na água subterrânea em profundidades maiores que a fornecida pelo EM-31 (Tabela 2).

Nos trabalhos de campo com os condutivímetros de solo, para se definir os limites da contaminação presente em subsuperfície, a técnica mais indicada é o caminhamento eletromagnético (CEM), pois permite avaliar a variação lateral dos valores de condutividade elétrica para uma mesma profundidade de investigação ao longo dos perfis de levantamento (GREENHOUSE et al., 1983).

A técnica do caminhamento eletromagnético constitui-se no deslocamento conjunto da bobina emissora e receptora sobre o terreno, mantendo-se fixa a separação das mesmas e a posição dos eixos dipolos, para garantir a varredura lateral na mesma profundidade de exploração. A profundidade de investigação atingida, como já foi visto, depende do comprimento do cabo de separação entre as bobinas (cabo de referência) e da posição das mesmas em relação à superfície (eixo dipolo vertical ou horizontal).

5.3. MÉTODO DE GEO-RADAR (GPR)

5.3.1. PRINCÍPIOS DO MÉTODO

A descrição completa dos fundamentos da metodologia do geo-radar podem ser encontradas, principalmente, nos trabalhos publicados por ULRIKSEN (1982) e por DAVIS & ANNAN (1989).

O método de geo-radar, conhecido também como radar de penetração no solo, GPR (ground penetrating radar) ou, simplesmente, radar de solo, é um método eletromagnético de investigação geofísica, diferente dos tradicionais, uma vez que se baseia na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, e não na indução de correntes elétricas em subsuperfície (HÄNNINEN, 1997).

A maioria dos sistemas de geo-radar opera na faixa de frequência de 10 a 1000 MHz, onde dominam as correntes de deslocamento que dependem da permissividade dielétrica (ϵ) do meio de propagação, contrariamente às investigações eletromagnéticas convencionais (frequências menores), onde predominam as correntes de condução.

Nesta faixa de altas frequências, a propagação da onda eletromagnética em profundidade é similar a de uma onda elástica (sísmica), sofrendo, portanto, refração e reflexão de acordo com os contrastes, fundamentalmente, de permissividades dielétricas (ϵ) dos materiais geológicos (DAVIS & ANNAN, 1989).

O equipamento irradia através de uma antena transmissora acoplada ao solo pulsos de ondas de radio de alta frequência para o interior do terreno (Figura 13). Quando a energia transmitida (onda eletromagnética) atinge corpos ou estratos geológicos com permissividades dielétricas (ϵ) ou condutividades elétricas diferentes, parte da onda reflete nestes objetos ou interfaces, enquanto outra parte, através de refração, se propaga até a próxima descontinuidade (DAVIS & ANNAN, 1989). A onda eletromagnética refletida é captada por uma antena receptora, sendo o sinal amplificado, digitalizado e armazenado para posterior processamento.

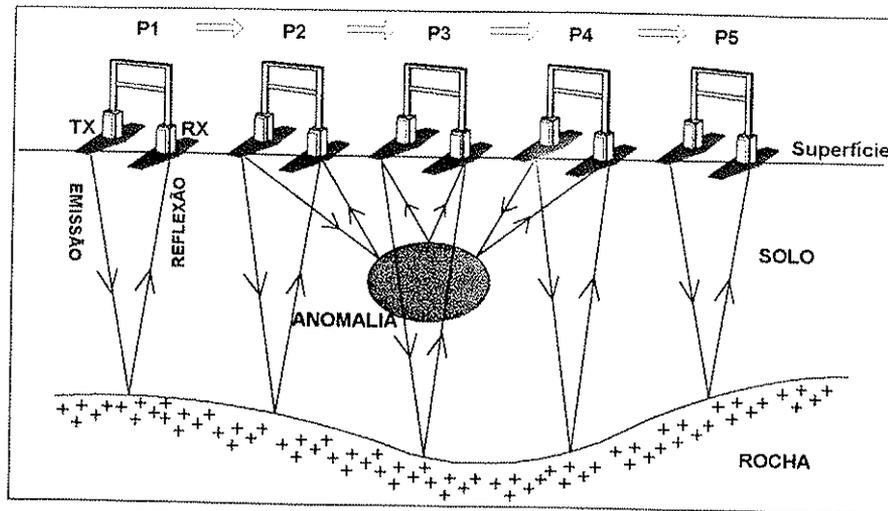


Figura 13. Representação da emissão e reflexão do sinal de geo-radar em subsuperfície (modif. DAVIS & ANNAN, 1989).

Os sinais obtidos da onda eletromagnética refletida são registrados em relação ao tempo de percurso (ida e volta) em subsuperfície e estimando-se a velocidade de propagação da onda no meio investigado é possível calcular a profundidade e espessura das estruturas geológicas presentes.

O produto final da aquisição de campo é uma seção contínua onde consta a distância percorrida e o tempo de reflexão (ou profundidade), formada por uma série de sinais obtidos em cada ponto de amostragem (traços), que no conjunto forma uma imagem de alta resolução da porção investigada do subsolo (ULRIKSEN, 1982). Através destas seções é possível identificar configurações representativas de feições geológicas e hidrogeológicas presentes, e de outras estruturas em subsuperfície.

5.3.2. PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA E COEFICIENTE DIELÉTRICO DOS MATERIAIS.

A permissividade dielétrica (ϵ) descreve a separação das cargas (polarização) quando da presença de um campo elétrico, ao invés de fluxo de corrente, que é determinado pela condutividade elétrica (DAVIS & ANNAN, 1989). Diferentemente da condutividade elétrica, a permissividade dielétrica possui um valor bem definido no ar ou no vácuo (ϵ_0) que é de $8,854 \times 10^{-12}$ farads por metro (F/m).

A aplicação de um campo elétrico (E) distende ou polariza a distribuição das cargas na molécula, sendo assim, a densidade maior de cargas positivas e negativas se estabelecem em pontos opostos, sendo quantificada pela polarização intrínseca D , que

possui unidades de separação de cargas por metro quadrado, ou coulombs/m² (OLHOEFT, 1998). A permissividade dielétrica relaciona a polarização intrínseca com o campo aplicado conforme visto na equação (3):

$$D = \varepsilon E \quad (\text{C/m}^2) \quad (3),$$

e é normalmente expressa em termos da permissividade dielétrica do vácuo (ε_0), e em termos do coeficiente dielétrico K , na forma:

$$\varepsilon = K \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{F/m}) \quad (13).$$

O coeficiente dielétrico (K) assume valores que variam desde 1, para o ar, até no máximo próximo de 81, que é o valor para água (Tabela 3), sendo, portanto, um número adimensional. Seu valor é fortemente dependente da freqüência em que se está operando dentro do espectro eletromagnético.

NOBES (1996) chama a atenção que o termo coeficiente dielétrico é mais adequado que constante dielétrica, utilizado por inúmeros autores, uma vez que este parâmetro varia de acordo com a quantidade de água, portanto, não sendo constante, e afetando, conseqüentemente, as propriedades dielétricas.

Para solos e rochas, o coeficiente dielétrico K é fortemente influenciado pela presença de água nestes materiais dielétricos e independe da densidade do solo, da textura, do conteúdo de sal, sendo insignificante a influência da temperatura (TOPP et al., 1980).

Assim, o coeficiente dielétrico K , que está relacionado diretamente à permissividade dielétrica, é o principal fator que afeta as medidas do radar, uma vez que pode influenciar a velocidade de propagação da radiação eletromagnética nos materiais geológicos, e cujos os contrastes podem produzir reflexões de energia nas interfaces de subsuperfície. Desta maneira, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas através de um determinado meio pode ser expressa por (DAVIS & ANNAN, 1989):

$$V = \frac{C}{\sqrt{K}} \quad (\text{m/ns}) \quad (14),$$

onde C é a velocidade da luz ou de uma onda eletromagnética no vácuo, cujo valor é 3×10^8 m/s).

Nas altas frequências de operação do geo-radar, onde as correntes de deslocamento dominam as de condução, a velocidade de propagação permanece essencialmente constante, e não depende da frequência.

5.3.3. REFLEXÃO DAS ONDAS DO GEO-RADAR

A princípio, a reflexão das ondas eletromagnéticas do geo-radar em subsuperfície requer um contraste, entre os dois meios de propagação envolvidos, de uma ou mais destas propriedades físicas: condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) ou permissividade magnética (μ) (OLHOEFT, 1998). Assim, pode ser definida a impedância elétrica de um meio como sendo (BREWSTER & ANNAN, 1994):

$$Z = \left(\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15).$$

Então, o coeficiente de reflexão para uma incidência normal, de modo análogo à sísmica, será dado por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (16).$$

Desta forma, mudanças em qualquer uma das propriedades anteriormente referidas, pode ocasionar reflexão, com alguma parcela de energia continuando à atravessar a interface entre os meios (refração) e outra parcela de energia retornar de volta à superfície.

Entretanto, no ambiente geológico, a permissividade magnética (μ) é muito pequena ou não varia consideravelmente de uma camada para outra, sendo então negligenciada. Assim, para um meio de baixa condutividade elétrica, o coeficiente de reflexão pode ser expresso como (PIPAN et al., 1996):

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}} \quad (17),$$

onde os parâmetros K_1 e K_2 são os coeficientes dielétricos dos meios de propagação 1 e 2, respectivamente.

5.3.4. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E ATENUAÇÃO DAS ONDAS DE GEO-RADAR

Como já foi visto na Seção 5.2.2., a profundidade na qual uma onda eletromagnética é atenuada a $1/e$ (37%) de sua amplitude na superfície é chamada skin depth. A utilidade do conceito do skin depth é que este representa a penetração máxima de um sistema

eletromagnético operando numa determinada frequência em um meio de condutividade elétrica definida (SHARMA, 1986).

Associado ao conceito de skin depth e devido ao fato de que as ondas eletromagnéticas que se propagam em profundidade são atenuadas pela energia em mover as cargas, principalmente pela condução elétrica, como também através da polarização, foi definido, para as altas frequências onde opera o geo-radar, o parâmetro atenuação (α) (DAVIS & ANNAN, 1989). Este quantifica a capacidade que os sinais eletromagnéticos têm em se propagar em determinado meio, sendo importante, principalmente, na avaliação de terrenos condutivos naturais ou que apresentem contaminação.

O valor da atenuação é normalmente expresso em decibéis por metro (dB/m) e, na faixa de 100 a 1000 MHz, é dada pela expressão (DAVIS & ANNAN, 1989):

$$\alpha = 1,69 \sigma / \sqrt{K} \quad (\text{dB/m}) \quad (18),$$

onde K é o coeficiente dielétrico e σ é a condutividade elétrica do meio geológico, expresso em mS/m.

As ondas do radar, em terrenos com baixa condutividade elétrica, tais como areia seca e granito, podem alcançar profundidades superiores a 30 metros. Argilas, folhelhos e outros materiais de alta condutividade, como por exemplo contaminantes inorgânicos disseminados no solo, atenuam ou absorvem o sinal, diminuindo sensivelmente a profundidade de penetração, em alguns casos para somente 1 metro ou menos.

Em seções de radar obtidas em áreas contaminadas por compostos inorgânicos, o fenômeno da atenuação é detectado como sendo uma zona de ausência do sinal ("zona de sombra") e conseqüentemente pode ser correlacionado à presença de substâncias mais condutivas eletricamente (DAVIS & ANNAN, 1989; NOBES et al, 1994).

A seguir é apresentada uma tabela contendo os valores do coeficiente dielétrico e da condutividade elétrica de alguns materiais geológicos, além dos valores da velocidade de propagação e atenuação da onda eletromagnética nestes materiais.

Tabela 3. Valores típicos do coeficiente dielétrico (K), condutividade elétrica (σ), velocidade de propagação da onda eletromagnética e atenuação (α) para alguns materiais numa frequência de 100MHz (Fonte: DAVIS & ANNAN, 1989; ULRIKSEN, 1982; ROBILLARD et al., 1994).

<i>Material</i>	K	σ (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água doce	81	0,5	0,033	0,09
Água do mar	81	4000	0,033	751
Areia seca	3-5	0,01	0,13-0,17	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,05-0,07	0,03-0,3
Calcário	4-8	0,5-2	0,11-0,15	0,4-1
Folhelho	5-15	1-100	0,08-0,13	1-100
Siltos	5-30	1-100	0,05-0,13	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0,05-0,13	1-300
Granito	4-6	0,01-1	0,12-0,15	0,01-1
Arenito (saturado)	6	40	0,12	27
Gabro	8,5 a 40	1	0,05-0,10	0,3-0,6
Gnaisse	8,5	0,01	0,10	0,05
Solo arenoso seco	2,6	0,14	0,19	0,15
Solo arenoso satur.	25	6,9	0,06	2,3
Solo argiloso seco	2,4	0,27	0,19	0,29
Solo argiloso satur.	15	50	0,08	22

5.3.5. PENETRAÇÃO E FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

Como foi visto, a penetração da onda eletromagnética de radar no interior do solo é limitada, fundamentalmente, pela atenuação, que por sua vez é governada pela condutividade elétrica do terreno. Entretanto, na quantificação do skin depth, verifica-se que a frequência de emissão também é um fator importante relacionado à penetração do sinal eletromagnético.

Assim, para um mesmo meio, observa-se que a profundidade de penetração é função da frequência transmitida, o que implica que a profundidade que se deseja investigar pode ser determinada pela frequência de operação (frequência central) da antena transmissora utilizada (JOL, 1995).

Antenas transmissoras de baixas frequências, por exemplo de 10 a 200MHz, com grandes comprimentos de onda (λ), apresentam maior profundidade de penetração e menor resolução que as antenas de altas frequências e curtos comprimentos de onda, tais como na faixa de 300 a 1000MHz (ANNAN & COSWAY, 1994).

De forma geral, as antenas de baixas frequências são empregadas em estudos geológicos ou identificação de grandes objetos enterrados em profundidades maiores até que 30 metros. Em contrapartida, as antenas de altas frequências são empregadas, comumente, para profundidades de até 10metros, e são utilizadas para investigar o solo superficial, localizar objetos rasos e de dimensões reduzidas enterrados e mapear interferências subterrâneas (Tabela 4).

Tabela 4. Frequência central de operação das antenas de radar e faixa aproximada de profundidade de investigação (Fonte: MALÄ GEOSCIENCE, 1997).

<i>Frequência central da antena (MHZ)</i>	<i>Faixa de profundidade (metros)</i>
25	5 – 30
50	5 – 20
100	2 – 15
200	1 – 10
400	1 – 5
1000	0,05 - 2

5.3.6. RESOLUÇÃO VERTICAL

Considerando que os sistemas de geo-radar medem o tempo de percurso do sinal eletromagnético, a resolução vertical é a capacidade que o sistema possui, operando numa determinada frequência, para distinguir dois sinais que estão próximos um do outro na escala de tempo (t) de chegada (DAVIS & ANNAN, 1989).

De modo geral, a espessura mínima para a resolução de uma camada é adotada como sendo $\lambda/4$ (JOL, 1995). Isto significa que dois pulsos, um refletido no topo e outro na base de um estrato, podem ser distinguidos entre si quando separados por um quarto do comprimento de onda.

O comprimento de onda (λ) se relaciona inversamente com a frequência de operação (f) e diretamente com a velocidade de propagação da onda eletromagnética. Assim, verifica-se que à medida que as frequências são maiores, menores são os comprimentos de onda do sinal, sendo possível, assim, se detalhar (resolver) com maior definição as estruturas (Tabela 5).

Tabela 5. Frequência de operação das antenas de radar e resolução vertical para uma velocidade de 0.07m/ns (Fonte: JOL, 1995, MALÄ GEOSCIENCE, 1997).

<i>Frequência central da antena (MHZ)</i>	<i>Resolução vertical (metros)</i>
25	0,76
50	0,37
100	0,21
200	0,15
400	0,05

Meios com velocidades de propagação diferentes apresentam resolução distintas, assim, para uma mesma frequência, meios de velocidades elevadas proporcionam maior resolução do sinal que meios com velocidades menores (DAVIS & ANNAN, 1989), o que corresponde à influência dos coeficientes dielétricos dos materiais constituintes destes meios.

Na prática este fato, como exemplo, pode indicar a diferença de resolução entre a zona não saturada, com velocidade de propagação maior, e portanto maior resolução, em relação à zona saturada do mesmo local, com velocidade de propagação menor, devido ao preenchimento dos poros com água, e conseqüentemente, com menor resolução.

A frequência de operação é escolhida de modo a fornecer a relação mais vantajosa entre a penetração e a resolução para um determinado objetivo. Geralmente, é possível adequar os equipamentos de radar às condições locais variando-se a frequência de operação, pois, antenas de altas frequências fornecem maior resolução, e de baixas frequências maior penetração (JOL, 1995).

5.3.7. EQUIPAMENTO

Um sistema de geo-radar consiste basicamente de quatro módulos principais (Foto 4), que são: unidade transmissora, unidade receptora, unidade de controle e unidade de armazenamento de dados e apresentação (computador).

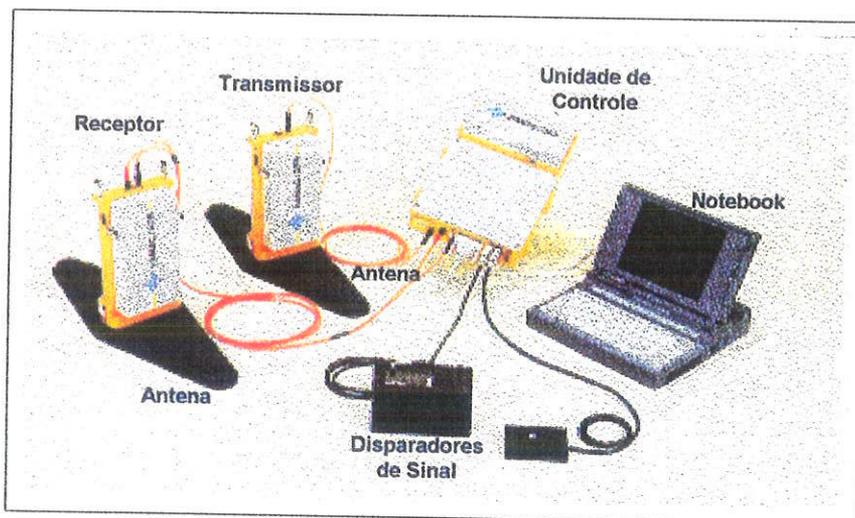


Foto 4. Sistema básico do geo-radar (MALÄ GEOSCIENCE, 1997).

Quando da aquisição de dados, o funcionamento do equipamento se desenvolve da seguinte forma: a unidade de controle envia um sinal característico para o transmissor e o receptor, respectivamente. O transmissor produz um pulso curto de alta voltagem, cuja energia (onda eletromagnética) é irradiada para o interior do terreno através de uma antena transmissora. Este sinal transmitido percorre o solo e os sinais refletidos nas interfaces de permissividades dielétricas diferentes, retornam à superfície, sendo captados por uma antena receptora e que são enviados para o receptor. O receptor, por sua vez, amplifica os sinais detectados e os envia para a unidade de controle, que os formata para serem armazenados em disco rígido e apresentados na tela do computador (DAVIS & ANNAN, 1989).

Nos sistemas mais modernos, um notebook pode ser utilizado como unidade de armazenamento e apresentação dos dados. Isto possibilita ao operador a visualização em tempo real da seção durante a aquisição dos dados em campo, e o acompanhamento do deslocamento das antenas no perfil investigado.

Grande parte dos equipamentos pode operar em diferentes frequências, sendo que suas antenas são, individualmente, caracterizadas e limitadas pelas frequências de

emissão, ou seja, pelos comprimentos de onda. Normalmente, podem ser utilizados os mesmos transmissores e receptores eletrônicos quando do emprego de antenas de frequências diferentes (DAVIS & ANNAN, 1989).

A maioria dos sistemas de geo-radar podem operar na faixa de frequência de 100 a 500 MHz, sendo que este intervalo compreende as frequências mais comumente empregadas em estudos ambientais e geotécnicos.

Para a execução dos perfis de radar no levantamento da área da indústria Sulfabrás empregou-se o equipamento de geo-radar Ramac/GPR (Foto 4), fabricado pela Måla Geoscience (Suécia). Este aparelho, que possui fator desempenho de 150dB, pode operar, conforme as antenas utilizadas nas frequências de 25, 50, 100, 200, 250, 400, 500, 800 e 1.000MHz.

5.3.8. ARRANJOS DE CAMPO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Como principais arranjos de campo para a aquisição de dados de radar têm-se o modo de afastamento constante (common off set), o CMP (common mid-point) e o WARR (wide angle reflection and refraction) (DAVIS & ANNAN, 1989).

O arranjo de afastamento constante, também chamado de modo de reflexão de forma similar à sísmica ou arranjo dipolo, consiste na aquisição de dados mantendo-se fixa a separação entre as antenas transmissora e receptora, e amostragens em espaçamentos regulares durante a realização dos perfis (Figura 13).

As seções obtidas neste tipo de arranjo, que são as mais comuns em levantamentos de radar e permitem a visualização de refletores decorrentes das interfaces e de hipérbolas de difração geradas por corpos de dimensões limitadas.

Os arranjos CMP (Figura 14a) e WARR (Figura 14b) são utilizados para se obter a velocidade de propagação do sinal de radar em diferentes profundidades. Isto é possível através da variação da distância de separação das antenas e medidas do tempo de reflexão do sinal emitido.

A velocidade de propagação obtida nestes arranjos é utilizada para converter a escala de tempo de reflexão para profundidade das seções de afastamento constante, além de possibilitar a obtenção do coeficiente dielétrico dos materiais presentes em subsuperfície.

Na sondagem CMP, as antenas transmissora e receptora, inicialmente juntas, são afastadas a partir de um ponto central em intervalos regulares para cada lado. Desta forma, é amostrado o tempo de reflexão do sinal em profundidade abaixo do ponto central do arranjo.

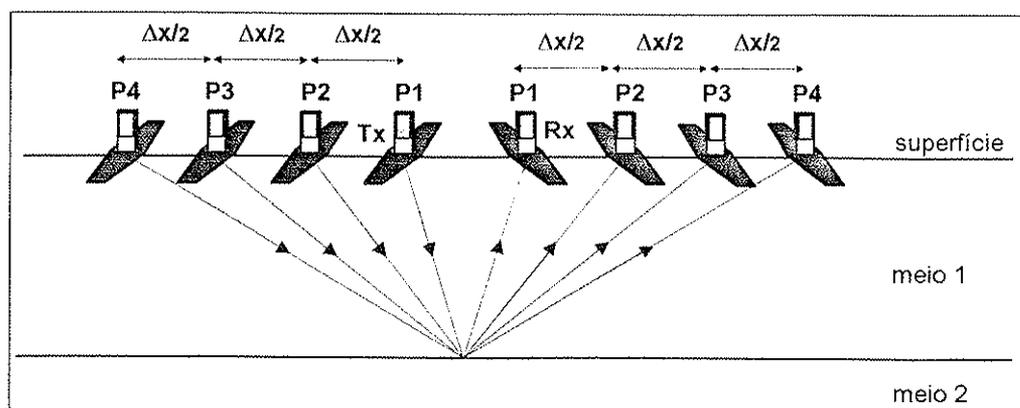


Figura 14a. Procedimento de execução do ensaio CMP (modif. ANNAN, 1992).

Quanto ao modo WARR, uma das antenas permanece fixa, enquanto a outra é afastada, sendo que a cada intervalo de separação é emitido um sinal de radar, obtendo-se os tempos das reflexões da onda ao longo dos refletores amostrados, numa varredura lateral.

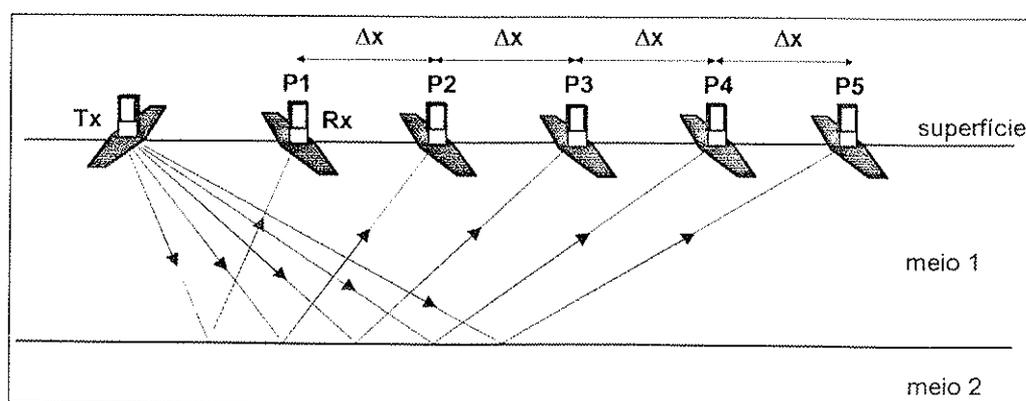


Figura 14b. Procedimento de execução do ensaio WARR (modif. ANNAN, 1992).

Nas seções obtidas por CMP ou WARR o tempo de chegada da onda refletida em profundidade é uma hipérbole e depende da separação das antenas. A análise dos diversos pares de distância entre antenas (x) e tempo de reflexão (t) permite estimar a profundidade do refletor, e, conseqüentemente, a velocidade de propagação no meio e o coeficiente

dielétrico dos materiais. Uma das formas de se calcular a profundidade dos refletores é dada por ULRIKSEN (1982), através da fórmula:

$$Z = \sqrt{\frac{l_2^2 \cdot x_1^2 - l_1^2 \cdot x_2^2}{4(l_1^2 - l_2^2)}} \quad (19)$$

Além das hipérbolas, outras conformações típicas podem ser visualizadas nas seções de CMP e WARR, decorrente da propagação da onda direta pelo ar, da onda direta pelo solo e da onda refletida e refratada no ar através do ângulo crítico (Figuras 15a e 15b).

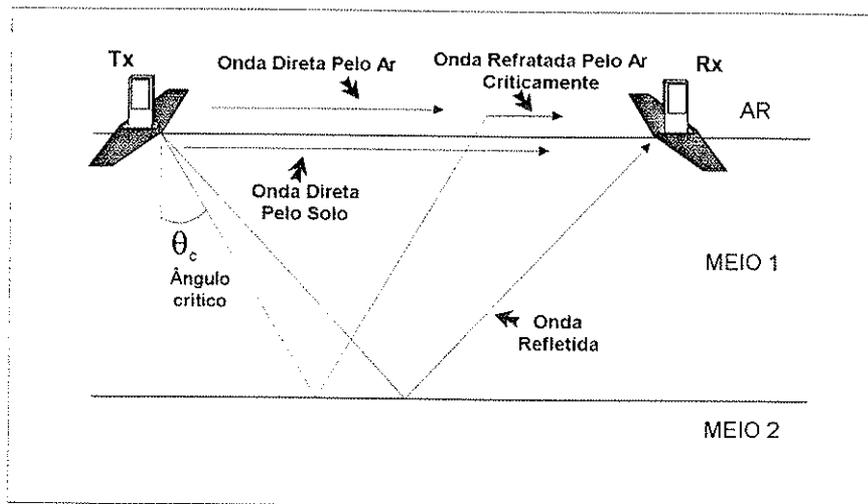


Figura 15a. Propagação das ondas nos ensaios CMP e WARR (modif. ANNAN, 1992).

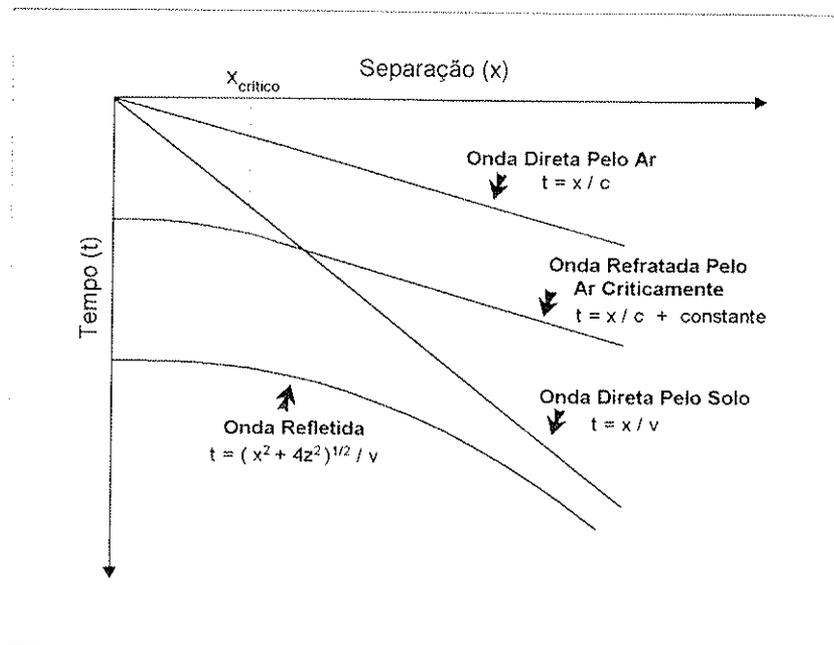


Figura 15b. Configuração dos registros das ondas nas seções CMP e WARR (modif. ANNAN, 1992).

CAPÍTULO 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

6.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

A partir de novembro de 1992, foi iniciado um levantamento eletromagnético abrangente em toda a área suspeita de contaminação utilizando-se o condutímetro de solo EM-34-3XL. A princípio, a realização dos perfis de campo teve como objetivo circundar o foco principal da contaminação, localizado na área da indústria, e suas adjacências. Após essa primeira fase, os pontos de execução de medidas geofísicas foram sendo locados a distâncias maiores da área de infiltração, com o objetivo de se estabelecer os limites da contaminação do solo e da água subterrânea e, principalmente, avaliar uma possível migração dos contaminantes em direção à Represa Hermínio Ometto.

Na realização dos perfis dos caminhamentos eletromagnéticos (CEMs) procurou-se manter o intervalo de 20 metros entre cada ponto de leitura. Sendo que, para as medições da condutividade do terreno, foram utilizados os cabos de referência de comprimento 10 e 40 metros, o que, associado às duas disposições das bobinas (modo HD e VD), proporcionou quatro (4) leituras de condutividade aparente nos pontos amostrados e que correspondem às profundidades de investigação de 7,5, 15, 30 e 60 metros. Desta forma, foi possível confeccionar para o ano de 1992 quatro mapas de gerais de isocondutividade aparente, e dois mapas em detalhe, com profundidades de investigação distintas (Anexo 4).

Em 1998, foram retomados os trabalhos geofísicos na área, sendo empregados na ocasião os condutímetros de solo EM-31 e EM34-3XL em conjunto com o geo-radar. Nesta data, foram selecionadas algumas linhas de controle, sendo que em algumas delas foram realizados perfis utilizando estes dois métodos em conjunto para a comparação dos resultados obtidos.

Nesta ocasião, foram empregados os cabos de referência de 10, 20 e 40 metros do condutímetro EM-34-3XL, resultando em seis medidas em cada ponto leitura, que somados aos dados adquiridos por meio do equipamento EM-31 (mais duas medidas) possibilitou o modelamento eletromagnético da geologia e da contaminação num dos perfis próximo à indústria Sulfabrás (linha L1).

A frequência de operação do geo-radar empregada nos trabalhos de campo desta época foi de 100MHz e por intermédio das seções obtidas para esta frequência (Anexo 5),

foi possível obter resultados, tanto em relação à resposta do meio geológico, como da detecção da contaminação.

Finalmente, no ano de 1999, foi realizada uma campanha de medições com o condutímetro EM-34-3XL interno à área da indústria Sulfabrás, para maior detalhamento do local, como nas suas circunvizinhanças com intuito de se delimitar a pluma de contaminação atual. Neste levantamento mais recente foi empregado o cabo de referência de 10 metros, gerando mapas de isocondutividade para as profundidades de 7,5 e 15 metros (Anexo 4), e cujos resultados são comparados aos obtidos em 1992.

Nesta época, também foram executados perfis de geo-radar empregando-se a frequência de operação de 25MHz, com intuito de se avaliar a resposta na identificação da contaminação à frequência mais baixa que a anteriormente empregada de 100 MHz (Anexo 5).



Foto 5. Aquisição de dados em campo com o condutímetro de solo EM-34.



Foto 6. Levantamento de campo com o geo-radar utilizando-se a antena de 100MHz.

Tabela 6. Parâmetros de aquisição de campo utilizados para o levantamento de georadar.

<i>Frequência da antena</i>	<i>Amostras</i>	<i>Frequência de amostragem</i>	<i>Janela de tempo</i>	<i>Empilhamento dos traços</i>	<i>Separação entre antenas</i>	<i>Intervalo de medidas</i>
25 MHz	512	303,4 MHz	1.687 ns	128	4,0m	1,0m
100 MHz	512	769,2 MHz	665 ns	64	1,2m	0,5m

6.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

6.2.1. DADOS DE CONDUTIVIDADE APARENTE

Os valores de condutividade elétrica aparente, obtidos nos caminhamentos eletromagnéticos (CEMs) de campo, podem ser apresentados sob a forma de perfis de condutividade e mapas de isocondutividade (MONIER-WILLIAMS et al.,1990). Estes dados permitem a determinação das variações, tanto lateral, como em profundidade, da condutividade aparente do terreno.

Os mapas de isocondutividade apresentados (Anexo 4) exibem isolinhas de condutividade aparente obtidas pela interpolação dos valores adquiridos nos diversos pontos de medidas dos perfis do levantamento de campo. Os contornos de isocondutividade foram efetuados através da plotagem das coordenadas dos pontos de leitura e posterior interpolação dos dados de condutividade aparente medidos nestes pontos. Na interpolação dos dados de condutividade aparente utilizou-se o programa Surfer, versão 6.01, da Golden Software Inc. (GOLDEN SOFTWARE, 1995).

Foram confeccionados dois grupos de mapas de isocondutividade para o ano de 1992: um primeiro que representa a área geral investigada (4 mapas) com as profundidades de investigação de 7,5, 15, 30 e 60 metros e outro grupo (2 mapas) que detalha a área próxima à indústria Sulfabrás nas profundidades de 7,5 e 15 metros. Estes últimos, foram utilizados para comparação dos resultados com os dois mapas obtidos em 1999 nas mesmas profundidades de investigação.

Na construção das isolinhas de condutividade dos mapas gerais, os dados foram interpolados pelo método do inverso do quadrado da distância, uma vez que naquela escala

os pontos de medida não eram regularmente distribuídos na área investigada. Já nos mapas em detalhe de 1992 e 1999, empregou-se a interpolação por krigagem (LANDIM, 1998), pois próximo à Sulfabrás os pontos de medida apresentaram-se com uma distribuição mais regular.

Verificou-se para a área em estudo que a condutividade elétrica natural do meio geológico aumenta com a profundidade de investigação, isto decorre graças à presença de material argiloso muito espesso e da saturação do meio. Desta forma, os valores naturais (background), definidos para os mapas gerais de 7,5, 15, 30 e 60 metros, são 4, 8, 30 e 40mS/m, nesta ordem. Assim, nestes mapas (Figuras 4.1 a 4.4), as anomalias de contaminação inorgânica foram estabelecidas para os valores superiores a 9, 15, 45 e 55 mS/m, respectivamente.

O valor definido de condutividade natural (background) para o mapa em detalhe de 1992 de 7,5 metros de profundidade foi de 4mS/m (Figura 4.5) e para o mapa de 15 metros de 8mS/m (Figura 4.6), baseados nas curvas de distribuição dos valores de condutividade medidos para estas profundidades (Figura 4.7), sendo que a pluma de contaminação nestas profundidades foi estabelecida para as condutividades acima de 8mS/m e 14mS/m, respectivamente.

Estes limites de condutividade para a pluma de contaminação são distintos dos adotados nos mapas gerais, isto decorre do fato que a escala dos mapas é diferente e a distribuição dos pontos também, além de serem utilizados dois métodos distintos de interpolação dos dados, como já foi descrito anteriormente.

Para os mapas de isocondutividade de 1999 (Figuras 4.9 e 4.10), adotaram-se os mesmos valores naturais de condutividade (Figura 4.8) e de definição dos limites da pluma de contaminação que os dos mapas de detalhe de 1992, o que permitiu a comparação de resultados entre estas duas datas.

Os perfis de condutividade aparente foram úteis para a determinação do modelo eletromagnético (Anexo 4) e na comparação dos resultados apresentados nas seções de radar (Anexo 5). Estes perfis foram confeccionados a partir da plotagem direta dos dados de condutividade obtidos em campo (eixo y), para cada uma das profundidades de investigação (3, 6, 7,5, 15, 30 ou 60m) em função da distância percorrida (eixo x) nos caminhamentos eletromagnéticos.

Quanto ao modelo eletromagnético (Figura 4.12), este foi elaborado a partir do processamento dos dados de condutividade aparente, obtidos para as profundidades de 3, 6, 7,5, 15, 30 e 60 metros da linha L1 (Figura 4.11), através da utilização do programa EMIX-34 da Interpex Ltd.

O programa EMIX-34 permite o processamento dos dados de diferentes profundidades somente em cada ponto de leitura (Tabela 4.1) na forma de uma sondagem eletromagnética (INTERPEX, 1988), não possuindo uma saída gráfica para a apresentação de uma seção. Assim, foi necessário modelar os dados dos pontos de medida individualmente e, após finalizar esta tarefa, de posse dos valores obtidos de condutividade verdadeira e profundidade das estruturas, confeccionou-se a seção modelada obtida (Figura 4.10).

6.2.2. DADOS DO GEO-RADAR

Para processamento dos dados de geo-radar adquiridos em campo, foi utilizado o programa Radpro, versão 2.25, da empresa Malã Geoscience, fabricante do equipamento Ramac/GPR (MALÃ GEOSCIENCE, 1996).

A rotina de processamento de dados do radar é similar a do processamento de dados sísmicos (DAVIS & ANNAN, 1989) devido ao comportamento cinemático da onda eletromagnética, nas altas frequências de operação deste método, ser semelhante ao de uma onda elástica (sísmica).

O objetivo do processamento foi realçar nas seções obtidas os contrastes entre as porções de maior e menor grau de atenuação do sinal, com intuito de identificar as zonas anômalas relacionadas à presença da contaminação inorgânica. Desta forma, tomou-se o cuidado de não se alterar demasiadamente os resultados originais obtidos, utilizando-se para isto apenas alguns comandos básicos para o processamento dos dados do radar.

Assim, a rotina de processamento de dados estabelecida foi: remoção da componente DC e de baixa frequência, correção do tempo-zero, aplicação de ganho, filtragem passa-banda e conversão tempo-profundidade (FISHER et al., 1994).

O comando DC Filter do programa Radpro (MALÃ GEOSCIENCE, 1996) foi utilizado para remover as ruídos intrínsecos do equipamento (DC) e as componentes de baixa

freqüência incorporadas ao traço de radar, permitindo também a correção do tempo-zero, ou seja, possibilita deslocar a primeira quebra do traço para a sua correta posição em tempo ($t=0$).

Um ganho tipo AGC (Controle Automático de Ganho) foi aplicado aos dados para corrigir a redução da amplitude do sinal de radar decorrente da atenuação natural sofrida à medida que a onda se propaga em subsuperfície.

Empregou-se a filtragem passa-banda para se obter uma resposta do sinal de radar apenas em torno do valor da freqüência central das antenas utilizadas (25 e 100MHz). Geralmente, a resposta de maior amplitude é um pouco menor que a freqüência central da antena, estando associada ao efeito do solo atuando, de forma natural, como um filtro passa-baixa.

A conversão tempo-profundidade foi realizada através da obtenção da velocidade de propagação da onda eletromagnética executando-se uma aquisição tipo CMP (common mid-point). Daí, as velocidades de conversão adotadas para as seções das antenas de 25 e 100MHz, foram, respectivamente, 0,085 e 0,093m/ns.

CAPÍTULO 7. PROCESSO DE CONTAMINAÇÃO

7.1. CONSIDERAÇÕES

A estimativa para a velocidade de propagação da água subterrânea da ordem de centímetros por ano (Seção 4.4.) contribui, a princípio, para a idéia de uma pequena dispersão dos contaminantes, mesmo para um período de 18 anos, contados entre o início das infiltrações e a realização dos mais recentes levantamentos geofísicos.

Porém, é provável que existiram alguns fatores que podem ter sido decisivos para modificar este processo e aceleraram a propagação da contaminação e que são apresentados a seguir:

- quando ocorreu a infiltração, foi criado um cone de injeção que provocou um aumento na velocidade de propagação em subsuperfície, sendo este acréscimo ocasionado pela modificação do gradiente hidráulico naquele ponto;
- a presença de determinados compostos no meio geológico, principalmente organoclorados, pode ter aumentado a permeabilidade do solo, colaborando com a dispersão inicial mais rápida dos contaminantes;
- a existência de sedimentos argilo-arenosos mais superficiais, conforme pode ser observado nos perfis geológicos do local (Anexo 1), pode ter colaborado para uma migração lateral inicial mais rápida (maior permeabilidade) que a fornecida pelos estratos argilosos mais profundos.

Assim, levando-se em conta as observações anteriores e as características físico-químicas dos contaminantes presentes em subsuperfície, foi elaborado um modelo conceitual da contaminação pela infiltração de resíduos, cuja evolução pode ser explicada da seguinte forma:

- na época da infiltração, ocorreu a formação de um cone de impressão na superfície potenciométrica, diminuindo a espessura da zona não saturada, principalmente próximo à área de injeção. Isto gerou um fluxo radial das águas subterrâneas e poluentes a partir do ponto de infiltração através da alteração do gradiente hidráulico;
- cessada a infiltração o nível d'água voltou à sua posição normal, mas os contaminantes ficaram retidos na região do antigo cone de impressão sob condições não saturadas;

- os compostos menos densos que a água e aqueles que foram dissolvidos se propagaram de acordo com o sentido de fluxo da água subterrânea, próximos das porções mais superficiais da zona saturada;
- em contrapartida, os contaminantes organoclorados, por serem mais densos que água (DNAPL), migraram para posições mais profundas, independentemente do sentido de fluxo da água subterrânea.

CAPÍTULO 8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1. MAPAS DE ISOCONDUTIVIDADE APARENTE

8.1.1. MAPAS GERAIS DE ISOCONDUTIVIDADE DE 1992

A abordagem da interpretação dos resultados obtidos através dos mapas de isocondutividade aparente se estabeleceu sob o aspecto qualitativo em referência à presença da contaminação existente na área em estudo.

Em todos os mapas gerais de isocondutividade, para as 4 profundidades de investigação de 7,5, 15, 30 e 60 metros (Anexo 4), foram observadas claramente a presença de três áreas anômalas designadas pelas letras A, B e C (Figuras 4.1 a 4.4). A anomalia principal, cuja a origem está associada à infiltração de resíduos pela Sulfabrás, foi identificada pela letra A, sendo sua investigação o objetivo principal dos levantamentos eletromagnéticos realizados.

A anomalia B também é uma anomalia de condutividade devido a contaminação, porém de origem distinta da anomalia da Sulfabrás (A). Durante a execução dos trabalhos de campo observou-se entulho e lixo bem próximos à linha do perfil onde foi detectada a anomalia B. Informações posteriores indicaram que aquele local se encontrava na borda do antigo lixão da cidade de Araras, justificando os valores anômalos encontrados. Cabe ressaltar que a dimensão desta anomalia não é a real, uma vez que foi executado apenas um perfil naquele local.

Quanto à anomalia C, que se localiza próxima à Falha Corumbataí (Figura 5), supõe-se que esta seja de origem geológica, tratando-se de um solo de alteração muito argiloso de um dique ou sill de diabásio, uma vez que bem próximo ao local existem afloramentos deste tipo de rocha.

As observações efetuadas a seguir são pertinentes apenas à anomalia principal (A), que tem origem na infiltração de resíduos da Sulfabrás.

Em todos os mapas, os maiores valores de isocondutividade foram observados nos pontos próximos da área da Sulfabrás, sendo bem mais elevados que os valores naturais de condutividade aparente (background), o que sugeriu a presença de maior concentração de

contaminantes inorgânicos em subsuperfície próximo à indústria, diminuindo à medida que se afasta da mesma.

Com base nos limites definidos para esta anomalia de contaminação, inferiu-se que os contaminantes em subsuperfície estavam restritos nas proximidades da Sulfabrás, excluindo, assim, a possibilidade de poluição das águas da Represa Hermínio Ometto pelos resíduos infiltrados.

A abrangência da contaminação determinada pelos levantamentos eletromagnéticos para a pluma principal (A) foram muito semelhantes nos mapas de profundidade de investigação de 7,5 e 15 metros (Figuras 4.1 e 4.2). Este fato demonstrou a homogeneidade, tanto do meio geológico, como do comportamento da pluma de contaminação entre essas duas profundidades que compreendem a porção superior da zona saturada.

Quanto às configurações das anomalias de contaminação apresentadas nos mapas de isocondutividade de 7,5, 15 e 30 metros de profundidade, verificou-se que estas possuem um prolongamento para sudoeste. Esta distorção, observada melhor nos mapas de detalhe (Figuras 4.5 e 4.6), está associada ao sentido preponderante do fluxo da água subterrânea próximo da indústria (Figura 7) e que, provavelmente, transportou os contaminantes inorgânicos dissolvidos para aquela direção.

Esta configuração observada para a pluma de contaminação revelou a locação inadequada dos poços de monitoramento instalados naquela época, uma vez que não havia o conhecimento preciso do sentido de fluxo da água subterrânea e muito menos da migração dos contaminantes.

As áreas da pluma de contaminação mapeada para 7,5 e 15 metros de profundidade, são relativamente maiores que a definida para o mapa de 30 metros. Isto indica que a contaminação inorgânica possuía maior abrangência nas porções superiores da zona saturada (mais rasas), apresentando, portanto, menor espessura em suas bordas.

Esta constatação subsidia a tese que, a partir do ponto de infiltração de resíduos, os contaminantes inorgânicos, ao atingirem as porções superiores da zona saturada, dispersaram-se horizontalmente (pluma dissolvida) de acordo com a potenciometria do local, sem atingir posições mais profundas, o que é coerente com o comportamento físico-

químico, tanto do cloreto, como do sódio, que são os íons em maior concentração detectados pelas análises químicas (Anexo 3).

O mapeamento eletromagnético da contaminação em 1992 é coerente aos resultados constatados nas análises químicas da água subterrânea para esta época (Anexo 3), observando-se uma relação direta entre a condutividade aparente medida e as concentrações detectadas dos compostos inorgânicos. Ou seja, quanto maior a proximidade da indústria, maiores eram os teores verificados para estas substâncias, implicando num acréscimo das medidas obtidas para a condutividade do terreno.

Os poços P2, P3, P4, P5, P6 e P7, localizados mais distantes da indústria (Figura 7), apresentaram valores bem menores para cloreto, sódio e nitrogênio amoniacal que os poços P1 e P8 (Anexo 3), sendo que o levantamento geofísico não identificou anomalia de condutividade nos pontos de localização daqueles poços, confirmando, assim, as indicações das análises químicas.

A configuração da pluma de contaminação para o mapa de 60 metros de profundidade (Figura 4.4) é bem diferente daquelas dos outros mapas, apresentando uma área bem menor. Salienta-se que os valores obtidos para esta profundidade são influenciados pela anomalias de condutividade do pacote superior. Supõe-se, então, que a contaminação inorgânica não atinge tal profundidade, limitando-se, desta forma, a níveis mais superficiais.

Neste mapa, a anomalia de condutividade aparente, oriunda da Sulfabrás, está dividida em duas partes. A explicação disso se dá pela provável existência de compostos menos condutivos, que podem ser os organoclorados em profundidade, localizados entre essas duas porções de maior concentração de contaminantes condutivos (inorgânicos). Assim, é possível que a baixa condutividade dos organoclorados, dentro desse ambiente geológico, forneceu valores próximos dos valores naturais de condutividade para a profundidade de 60 metros, não existindo, portanto, contraste evidente onde estes compostos orgânicos estão presentes.

Além disso, o mapa de 60 metros apresentou em alguns pontos valores anômalos de condutividade aparente, dissociados da contaminação, mas com origem provável nas estruturas geológicas mais profundas.

8.1.2. MAPAS DE ISOCONDUTIVIDADE DE 1992 EM DETALHE

De forma geral, os limites da pluma de contaminação dos mapas de 7,5 e 15 metros possuem configurações semelhantes. Este fato demonstra que as medições efetuadas para estas profundidades são influenciadas pelas porções superficiais da zona saturada, indicando assim a extensão da contaminação da água subterrânea.

Nestes mapas podem ser observadas de forma mais clara a dispersão da pluma de contaminação para sudoeste, confirmando as suspeitas que a propagação dos contaminantes não se dirigia no sentido da Represa Herminio Ometto (noroeste) e corroborando a idéia de locação inadequada dos poços de monitoramento.

A intensidade das isolinhas de condutividade na área de infiltração da indústria para o mapa de 7,5 metros de profundidade (Figura 4.5) é maior que a verificada para o mapa de 15 metros (Figura 4.6). Estes valores mais elevados de condutividade aparente permitem inferir que existia para este local grande concentração de contaminantes inorgânicos impregnados em profundidades mais rasas, provavelmente na zona não saturada, reforçando a tese da contaminação do modelo do cone de injeção.

No mapa de 7,5 metros (Figura 4.5) foi possível determinar um dos locais de infiltração de resíduos através da identificação do ponto de maiores valores de condutividade aparente (hot spot). Entretanto, o segundo ponto de injeção de resíduos não pode ser estabelecido neste mapa pois, na época do levantamento (1992), a área interna da indústria não foi tão detalhada.

O mapa de profundidade de 15 metros (Figura 4.6) apresentou as maiores anomalias deslocadas do ponto de infiltração I1. Isto deve ter ocorrido devido à propagação dos contaminantes inorgânicos para posições mais afastadas do local de infiltração através da água subterrânea. No entanto, os altos valores detectados neste ponto para o mapa de 7,5 metros indicou a existência de grande concentração de compostos condutivos impregnados nas porções mais superficiais da zona não saturada.

Para o poço de monitoramento P8, a análise química realizada em 1992 apresentou concentrações elevadas de cloreto, sódio e nitrogênio amoniacal na água subterrânea. Os mapas de isocondutividade em detalhe (Figuras 4.5 e 4.6) puderam confirmar estes resultados, pois a pluma mapeada revelou altos valores de condutividade aparente em direção a este poço.

8.1.3. MAPAS DE ISOCONDUTIVIDADE DE 1999

Os mapas de isocondutividade aparente de 1999 (Figuras 4.9 e 4.10), como os de 1992, revelam valores extremamente altos da condutividade aparente do terreno, muito discrepantes dos valores naturais para a área (background), apontando a existência de altos índices de contaminação do solo local. Isto demonstra que mesmo tendo sido cessada a infiltração dos resíduos em 1988, a carga poluente que está presente na área afetada é intensa e se configura como uma fonte permanente do processo de contaminação, prolongando os efeitos de sua atuação e os impactos que esta possa causar.

Pode ser visto nos mapas de isocondutividade de 1999, da mesma forma que foi observado para 1992, que a abrangência da contaminação determinada pelo levantamento eletromagnético extrapola as dependências da indústria, atingindo, assim, propriedades situadas ao redor da mesma.

Uma das constatações mais importantes obtidas na campanha de 1999, e que já havia sido verificada em 1992, é que a propagação dos contaminantes não tem sentido preferencial para a Represa Hermínio Ometto (noroeste), mas sim em direção sudoeste, o que é concordante com o sentido de fluxo determinado pelo mapa potenciométrico elaborado para área (Figura 7).

Verifica-se que os mapas de 1999 de 7,5 e 15 metros de profundidade de investigação possuem configurações muito parecidas quanto ao formato da pluma de contaminação. Assim, deduz-se que estes dois levantamentos estão contemplando a mesma porção do terreno onde os compostos condutivos estão presentes em maiores concentrações, concluindo-se que seja a região superficial da zona saturada, o que é concordante com os dados de variação do nível d'água para o local, entre 6 e 14 metros.

Portanto, o formato muito semelhante das plumas nestas duas profundidades reforça a hipótese da contaminação das porções mais superficiais da zona saturada através da variação sazonal do nível d'água, como havia sido proposto no modelo conceitual anteriormente elaborado. Decorrente disto, pode se inferir que, apesar da dispersão lateral, a contaminação fora dos limites da indústria se encontra na profundidade do nível d'água, no intervalo compreendido entre as variações sazonais e possivelmente retida na franja capilar.

Ao comparar-se a dimensão das plumas de contaminação de 1999, em relação às determinadas nos levantamentos de 1992, observa-se que os limites definidos apresentam pequena diferença, o que incide que não ocorreu migração significativa dos contaminantes inorgânicos entre estas duas datas. Cabe observar aqui que os contornos da pluma de contaminação são melhor definidos nos mapas de isocondutividade de 1999 pois, nesta data, houve um maior detalhamento e adensamento de pontos de leitura de condutividade aparente.

O fato do tamanho da pluma de contaminação ser semelhante para 1992 e 1999 corrobora com a idéia que a princípio o processo de contaminação favoreceu o escoamento mais acelerado, tornando-se mais vagaroso nos últimos anos. A verificação de uma migração lenta é concordante aos dados de condutividade hidráulica obtidos para o local, que é da ordem de 10^{-7} cm/s, e que incorre numa velocidade muito pequena de propagação da água subterrânea (6,0 cm/ano) e da pluma dissolvida.

Através das indicações iniciais do levantamento eletromagnético de 1992 de que a contaminação não tinha propagação em direção à Represa Hermínio, em 1999, procurou-se detalhar melhor a área da indústria e suas adjacências. Este procedimento possibilitou a identificação dos dois pontos de infiltração (Figura 4.9), já que apenas um deles (I1) era conhecido. Sendo que o segundo local de injeção de resíduos (I2), após o levantamento de 1999 ter sido concluído, foi confirmado através de informações obtidas.

Devido ao este maior detalhamento e conseqüente melhor definição dos contornos da pluma de contaminação foi possível calcular a área afetada, que para o mapa de 7,5 metros de profundidade é de aproximadamente 50.000m^2 , e para o mapa de 15 metros próximo de 53.000m^2 .

Foi observado que no mapa de isocondutividade de 15 metros de profundidade (Figura 4.10) há uma diminuição dos valores abaixo do ponto de infiltração I1 se comparado com os dados do mapa de 7,5 metros. Outra constatação importante é que no mapa de 15 metros esta anomalia de menor condutividade aparente (40 mS/m) está circundada por três anomalias mais condutivas (60mS/m).

Esta porção do terreno com menores valores de condutividade aparente está associada, possivelmente, à presença de poluentes orgânicos em níveis mais profundos que 7,5 metros, sendo assim melhor identificada no mapa de 15 metros. Assim, estes compostos, devido as suas características apolares (não condutoras), por apresentarem-se

no ponto de infiltração I1 em grandes concentrações, inibiram neste local a amplitude das anomalias condutivas provenientes dos contaminantes inorgânicos.

Além disso, como foi observado na análise dos mapas de detalhe de 1992, existe a suposição que os contaminantes inorgânicos foram deslocados pelos compostos orgânicos, se afastando, por sua vez, do ponto de infiltração na zona saturada através da migração por meio da água subterrânea.

A existência desta feição particular pode ser vista na seção de radar da linha L3 (Figura 5.9), onde é possível se identificar uma zona na qual os sinais eletromagnéticos apresentam reflexões marcantes, característica de porções menos condutivas, e que está restrita entre zonas de maior atenuação.

Estes resultados reforçam a hipótese que após a injeção de resíduos em subsuperfície, por diferença de propriedades físico-químicas das substâncias presentes, os contaminantes orgânicos (organoclorados) ocuparam seus espaços em maiores profundidades, deslocando os contaminantes inorgânicos lateralmente para pontos mais afastados do local de infiltração. Devido às características de dissolução dos próprios contaminantes inorgânicos, estes, por sua vez, foram se afastando gradativamente do foco principal de acordo com a propagação da água subterrânea.

Quanto à correlação dos resultados do levantamento geofísico de 1999 e das análises químicas da água subterrânea, observa-se que a alta concentração de cloreto ($1,35 \times 10^3$ mg/L) para a água do poço P8 (Anexo 3), justifica para este ponto os valores anômalos determinados nos mapas de isocondutividade das profundidades de 7,5 e 15 metros.

Além disso, os poços PA7 e PA8, que estão posicionados próximos da borda da pluma de contaminação definida (Figuras 4.9 e 4.10), apresentam maiores índices para o cloreto e para a condutividade elétrica da água que os detectados para o poço raso da indústria Fuganholi, que, segundo o mapeamento eletromagnético de 1999, está completamente fora da abrangência da pluma.

8.2. MODELO ELETROMAGNÉTICO DA LINHA L1

O modelamento eletromagnético é uma forma de quantificar a resposta da condutividade aparente obtida nos levantamentos de campo para diferentes profundidades,

sendo possível, assim, estimar a condutividade elétrica verdadeira das feições presentes e as profundidades onde se encontram. Neste caso, foram selecionados os perfis de condutividade aparente da linha L1 e que possuem valores para as profundidades de 3, 6, 7,5, 15, 30 e 60 metros (Figura 4.11).

O modelo apresentado (Figura 4.12) para o perfil da linha L1, localizada em frente à indústria (Figura 5.1), mostra a existência de uma camada condutiva superficial (40mS/m), que pode ser associada ao solo argiloso raso existente no local, até 1,2 metros de profundidade.

Abaixo desta camada superficial, observa-se, segundo o modelo obtido, a presença de um material geológico menos condutivo (0,6mS/m) e que possui espessura variável, podendo ser relacionado ao solo argilo-arenoso não saturado verificado nas descrições geológicas do local (Anexo 1).

De acordo com o modelamento, as menores espessuras desta porção não saturada do terreno podem ser verificadas entre as distâncias de 100 e 160 metros, próximas do foco da contaminação, chegando a atingir a profundidade de apenas 2,5 metros.

Este fato indica a presença de materiais condutivos naqueles pontos em profundidades muito rasas, com condutividades verdadeiras maior que 100mS/m, uma vez que os contaminantes, conforme havia sido proposto no modelo conceitual, podem ter ficado retidos na zona não saturada quando da injeção resíduos e também por meio da oscilação do nível d'água.

Os limites laterais da contaminação na zona saturada, apresentados no modelo eletromagnético, foram determinados através da observação do acréscimo dos valores medidos nos perfis de condutividade aparente da linha L1 (Figura 4.11).

Nas extremidades do modelo eletromagnético, verifica-se o espessamento da zona não saturada modelada devido ao posicionamento em maior profundidade do nível d'água interpretado e que para estes pontos não possui influência da contaminação.

8.3. AQUISIÇÃO TIPO CMP

O levantamento CMP (common mid-point) foi realizado para a obtenção da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio geológico e conversão tempo-

profundidade das arranjos de afastamento constante (common off set). Além disso, de posse da velocidade da onda eletromagnética, foi possível calcular o coeficiente dielétrico (K) dos materiais presentes em subsuperfície.

Foram realizadas dois ensaios CMP (Anexo 5) posicionados no perfil da linha L1 (Figura 5.1), denominados CMP1 e CMP2. O primeiro levantamento, CMP1, foi executado próximo do foco de contaminação, sendo que os resultados obtidos sofreram grande influência da contaminação rasa presente (Figura 5.2), inviabilizando a utilização dos dados obtidos devido à pouca penetração do sinal eletromagnético em subsuperfície. Desta forma, as observações aqui descritas são referentes à análise elaborada para o registro da seção CMP2.

Através desta seção (Figura 5.3), foi possível determinar o registro da onda aérea ($V=0,3\text{m/ns}$), calcular a velocidade de propagação da onda direta ($0,098\text{m/ns}$), obtendo-se um coeficiente dielétrico (K) de 9,4 para as camadas muito superficiais do terreno e identificar a presença de dois refletores contínuos distintos com profundidades de 4,5 e 7,0 metros.

O refletor (R1) mais raso (4,5m), foi interpretado como sendo a franja capilar, o que corrobora com as informações e indicações já expressas neste trabalho. A velocidade calculada para a porção do terreno superior à este refletor, e que pode ser identificada como a zona não saturada, é de $0,093\text{m/ns}$, resultando num coeficiente dielétrico de 10,4.

Para o refletor mais profundo (7,0m), a interpretação dada é que este representa o nível d'água na área próxima à indústria, sendo que esta profundidade está de acordo com as medições realizadas nos poços próximos ao local (Anexo 2). A velocidade calculada para as camadas superiores a este refletor é de $0,085\text{m/ns}$, obtendo-se um coeficiente dielétrico de 12,0, sendo que este valor é coerente ao expresso para terrenos argilosos saturados que consta da Tabela 3, e é representativo da porção do terreno entre o início da franja capilar e o nível d'água local.

Desta forma, para a conversão tempo-profundidade das seções de afastamento constante de 100MHz, onde a penetração da onda se limitou na maioria das seções na zona não saturada do terreno, foi utilizada a velocidade de $0,093\text{m/ns}$. Sendo, que para as seções de 25MHz, a velocidade adotada foi de $0,085\text{m/ns}$, uma vez que para esta frequência de operação foi possível atingir profundidades maiores que a fornecida pela antena de 100MHz.

Cabe observar quanto aos coeficientes dielétricos determinados, 9,4, 10,4 e 12,0, que estes não assumem valores tão discrepantes para que o coeficiente de reflexão seja elevado. Assim, as fortes reflexões identificadas como sendo a franja capilar e o nível d'água na seção CMP2 e nas seções de afastamento constante têm como origem outro fator que apenas a diferença das permissividades dielétricas entre os meios. Desta forma, pressupõe-se que a maior contribuição para a reflexão das ondas eletromagnéticas é a alta condutividade elétrica apresentada pelo meio, provocada, conseqüentemente, pela presença dos contaminantes inorgânicos.

8.4. SEÇÕES DE GEO-RADAR DE AFASTAMENTO CONSTANTE

8.4.1. SEÇÕES DE GEO-RADAR DA LINHA L1

Na linha L1, para a comparação dos resultados obtidos, foram executados levantamentos com o geo-radar utilizando-se as antenas de frequência de operação de 25 e 100MHz, além de serem confeccionados perfis de condutividade aparente para 6, 7,5 e 15 metros de profundidade (Figura 5.4)

A seção de radar da frequência de 25MHz (Figura 5.5) apresenta o comportamento do sinal eletromagnético nas porções superficiais da zona saturada, atingindo a profundidade de penetração de aproximadamente 15 metros. Nesta seção observa-se uma atenuação na parte central, entre as distâncias de 100 e 235 metros, que corresponde às condutividades aparentes maiores que 50mS/m no perfil de profundidade de 15 metros (Figura 5.4), que é aquele onde se constata uma correspondência maior com os dados de radar obtidos. Esta atenuação está relacionada à contaminação mais aguda presente no local, uma vez que este perfil cruza a pluma de contaminação próximo dos dois pontos de infiltração existentes na área da indústria (Figura 5.1).

Além da atenuação do sinal de radar, podem ser verificados dois fortes refletores sub-horizontais, simetricamente opostos, nas distâncias de 30 a 100 metros e de 230 a 320 metros, posicionados na profundidade de 8 metros, e que foram interpretados como sendo o nível d'água local contaminado.

Estes refletores, cuja a reflexão é bem definida, aparecem entre as condutividades aparentes de 18 a 50mS/m para o perfil de 15 metros. Presume-se, assim, que na faixa compreendida entre estas condutividades aparentes, existe contraste de reflexão da onda eletromagnética decorrente da presença de contaminantes condutivos disseminados na

água subterrânea. Sendo que, à medida que se distância dos domínios da pluma de contaminação, estes contrastes vão diminuindo, desaparecendo estas fortes reflexões.

Tanto as curvas dos perfis de condutividade aparente para as profundidades de 6, 7,5 e 15 metros (Figura 5.4), como a zona de atenuação e os refletores fortes identificados na seção de 25MHz (Figura 5.5), possuem simetria em suas configurações. Esta constatação remete a idéia que a propagação da contaminação através da água subterrânea não possui sentido preferencial ao longo deste perfil.

Para corroborar com esta suposição, verifica-se a inexistência de inclinação dos refletores identificados como o nível d'água contaminado, ou seja, estes não apresentam gradiente significativo ao longo da direção do perfil realizado, diferentemente do que foi constatado na seção de radar da linha L2 (Figura 5.8).

Quanto à seção de radar da antena de 100MHz (Figura 5.6), percebe-se que o sinal eletromagnético atingiu a profundidade de aproximadamente 8 metros. Assim, os resultados obtidos por esta frequência traduzem melhor a resposta da zona não saturada do terreno.

Nesta seção, entre as distâncias de 100 e 200 metros, foi observada uma atenuação menos profunda que a verificada para a antena de 25MHz, iniciando-se por volta de 2 metros de profundidade, ou seja, nas porções superficiais da zona não saturada.

Esta anomalia foi interpretada como sendo o cone formado pela injeção de resíduos e demonstra, portanto, que os contaminantes, no trecho em questão, estão retidos sob condições não saturadas, corroborando com o modelo proposto de infiltração e confirmando as informações levantadas sobre o processo de contaminação do local.

Entretanto, não foi possível identificar na seção de 100MHz nenhum refletor contínuo e mais profundo que pudesse ser associado ao nível d'água local, como foi verificado para a frequência de 25MHz (Figura 5.5). A explicação para isto é que a antena de 100MHz, devido à sua maior frequência, obteve uma atenuação mais pronunciada do sinal eletromagnético nas camadas contaminadas superficiais, sendo a energia da onda absorvida na zona não saturada do terreno, não permitindo, assim, a detecção de reflexões em profundidade maiores.

8.4.2. SEÇÃO DE GEO-RADAR DA LINHA L2

Na seção de radar da linha L2 (Figura 5.8), onde foi utilizada a antena de 25 MHz, observa-se a atenuação do sinal nos 45 metros iniciais, e que são relacionados aos valores de condutividade elétrica acima de 45mS/m se comparada ao perfil de condutividade de 15 metros de profundidade de investigação (Figura 5.7).

A partir desta distância, inicia-se uma forte reflexão, numa profundidade aproximada de 9 metros, e que corresponde ao nível d'água subterrâneo, e que se prolonga até a distância de 110 metros. A presença deste refletor forte está relacionada às condutividades obtidas de 10 a 45mS/m para o perfil eletromagnético de 15 metros.

Verificou-se que este refletor (nível d'água), está mais raso (9m) próximo à indústria (início da seção) se aprofundando (12m) à medida que as distâncias são maiores, possuindo, portanto, uma visível inclinação, o que confere a existência de um gradiente no sentido da execução do perfil (sudoeste).

A partir da distância de 110 metros, este refletor forte (contaminação) deixa de ser observado, decorrente da, provável, diminuição das concentrações dos contaminantes condutivos, e conseqüente redução da condutividade elétrica da água subterrânea. Desta forma, o contraste de permissividade ou coeficiente dielétrico entre a água subterrânea e o meio argiloso se reduz, não produzindo, a partir deste trecho, uma reflexão marcante da onda eletromagnética.

A existência de um gradiente neste perfil é coincidente com a indicação do mapa potenciométrico elaborado para a área (Figura 7), confirmando, assim, o sentido de fluxo da água subterrânea e da propagação dos contaminantes dissolvidos para sudoeste, conforme já havia sido observado nos mapas de isocondutividade aparente (Anexo 4).

Ao se calcular o gradiente do refletor identificado como o nível d'água, obteve-se um valor de aproximadamente 2%, sendo que este resultado é coerente com os dados das linhas equipotenciais obtidas para as porções mais próximas da indústria (Figura 7).

Nesta seção também pode ser constatada a presença de outro refletor, que se estende do início ao fim do perfil, também apresentando inclinação, cuja a profundidade inicial é de 4 metros, terminando na profundidade de 8,5 metros. Este refletor contínuo, foi interpretado como sendo a franja capilar que está presente ao longo de todo o perfil, sendo

que esta interpretação é apoiada no paralelismo com o refletor considerado como o nível d'água e que está mais profundo.

Associando os resultados obtidos com a antena de 25MHz da linha L1 e L2 aos dados obtidos nos perfis e mapas de condutividade, constata-se o potencial de utilização de antenas de radar de baixas frequências na identificação da extensão da contaminação disseminada na água subterrânea, mesmo estando em terreno argiloso, como é o caso.

8.4.3. SEÇÃO DE GEO-RADAR DA LINHA L3

Para a obtenção dos dados de radar da linha L3, foi empregada a antena de 100MHz de frequência de operação.

O perfil de levantamento desta linha (Figura 5.9) percorreu por sobre a área contaminada, sem sair dos domínios da pluma de contaminação, ou seja, se estende por local de alta condutividade elétrica do terreno. Desta forma, podem ser visualizadas fortes atenuações do sinal da onda eletromagnética em toda a seção deste perfil, com exceção do trecho entre as distâncias de 35 e 55 metros.

Neste intervalo são verificadas fortes reflexões de pequena extensão, com limites laterais bem definidos, sendo que o trecho em questão está a pouca distância de um dos pontos de infiltração de resíduos.

Este efeito sugere a existência de compostos menos condutivos neste local, como já foi observado no mapa de isocondutividade de 1999 para a profundidade de 15 metros (Figura 4.10), e que favoreceu a reflexão da onda eletromagnética, diferentemente das porções laterais mais condutivas que atenuaram o sinal.

A presença deste material mais resistivo deve estar associada aos compostos organoclorados (apolares), cuja a tendência é se propagar para níveis mais profundos, em detrimento de uma dispersão lateral, ocasionado pela maior densidade em relação à água, daí o limite abrupto (vertical) com as zonas mais condutivas adjacentes, como pode ser constatado na seção apresentada, e que corrobora com as demais considerações efetuadas anteriormente nesta discussão de resultados.

8.4.4. SEÇÃO DE GEO-RADAR DA LINHA L4

O perfil da linha L4 foi realizado empregando-se a antena de frequência de 100MHz. Na seção deste perfil (Figura 5.10), que é paralelo à linha L2, foram identificadas algumas feições que retratam tanto a contaminação existente, como indicações do sentido de propagação da água subterrânea e da contaminação.

Nos primeiros metros da seção, pode ser observada a atenuação do sinal na zona não saturada entre as profundidades de 3 e 4 metros. Esta atenuação superficial deve estar relacionada ao cone de infiltração de resíduos, uma vez que o perfil foi iniciado bem próximo do foco da pluma de contaminação (Figura 5.1), onde as condutividades aparentes medidas são bem elevadas.

Do início da seção até a distância de 23 metros verifica-se a atenuação do sinal na zona saturada, uma vez que o refletor interpretado como o nível d'água só aparece após esta distância. Este refletor apresenta uma inclinação marcante, se aprofundando à medida que se distancia da área da indústria, sendo que sua profundidade inicial é de 6 metros, atingindo o nível de 8 metros no final da seção.

Esta diferença de profundidade do refletor confirma a existência de um gradiente no sentido de realização do perfil, para sudoeste, o que está de acordo com as observações quanto à potenciometria do local efetuadas na análise da linha L2.

Além disso, constata-se que, entre as distâncias de 25 e 38 metros, a inclinação deste refletor é forte, sugerindo uma alteração significativa do gradiente hidráulico, e conseqüente, aumento da velocidade de propagação subterrânea, provocado pela infiltração da contaminação, como foi proposto no modelo conceitual do cone de injeção.

Ao longo de quase toda a seção, pode ser observado um refletor contínuo, que foi determinado como sendo a franja capilar. A profundidade inicial deste refletor é de 4,5 metros, sendo de aproximadamente 5,5 metros no final da seção, apresentando, portanto, um gradiente menor que aquele definido para o refletor do nível d'água.

Observa-se que próximo do foco da contaminação (zona de atenuação do sinal), estes dois refletores estão em profundidades mais rasas e muito próximas, comprovando, assim, a diminuição da espessura da zona não saturada, também prevista no modelo

conceitual da contaminação. À medida que se distancia no perfil, estes refletores se separam conforme seus respectivos gradientes.

8.4.5. SEÇÃO DE GEO-RADAR DA LINHA L5

A linha L5 (Figura 5.12), realizada com a antena de 100MHz, foi executada dentro das dependências da indústria Sulfabrás (Figura 5.1), em direção à Rodovia SP 191 (noroeste), sendo portanto paralela ao perfil L1.

Nesta seção, podem ser observadas duas áreas distintas de atenuação: a primeira se estende do início do perfil até a distância de 30 metros, enquanto a segunda se localiza entre 50 e 125 metros.

A diferenciação entre estas anomalias de atenuação é confirmada pelo comportamento das curvas dos perfis de condutividade (Figura 5.11), que, para todas as profundidades investigadas (3, 6, 7,5 e 15m), apresentam duas regiões de valores elevados, observadas no início e na parte central dos perfis.

Cabe observar que os valores máximos de condutividade aparente para estas regiões são diferentes, revelando que há uma influência relativamente maior decorrente da proximidade ou da maior concentração de contaminantes de uma das fontes geradoras das anomalias.

A interpretação da origem destas zonas distintas de atenuação pode ser explicada pela influência dos dois diferentes pontos de infiltração outrora existentes no local, e que estão identificados no mapas de isococondutividade de 7,5 metros de 1999 (Figura 4.9).

Na seção da linha L5, a zona de atenuação nas distâncias iniciais foi atribuída ao primeiro ponto de infiltração (I1) que já era conhecido em 1992, enquanto que a segunda zona de atenuação é referente ao ponto de infiltração (I2) determinado nos levantamentos de 1999. Desta forma, observando-se o ponto de maior atenuação na seção de radar e os maiores valores determinados nos perfis de condutividade para as profundidades de 3, 6 e 15 metros (Figura 5.11), foi possível localizar a exata posição do ponto de infiltração I2 nesta seção obtida.

Cabe ressaltar que as atenuações verificadas na seção, decorrentes dos dois diferentes pontos de infiltração I1 e I2, se iniciam na zona não saturada do terreno,

respectivamente, nas profundidades de 2,5 e 1,5 metros, o que confirma as informações anteriormente obtidas sobre infiltração rasa dos resíduos industriais.

Constata-se também que, na parte final da seção, após a distância de 125 metros, o sinal da onda eletromagnética assume suas características naturais, não apresentando atenuação, e sendo interpretado, portanto, como o solo argilo-arenoso não saturado existente no local.

O limite abrupto entre a segunda zona de atenuação do sinal e o solo argilo-arenoso, sugere que a contaminação não se propagou no sentido noroeste, em direção à Represa Hermínio Ometto, confirmando, assim, as considerações realizadas quando da análise das seções da linha L1 e dos mapas de isocondutividade aparente (Anexo 4).

CAPÍTULO 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os métodos geofísicos utilizados neste trabalho, eletromagnético indutivo e geo-radar, proporcionaram informações úteis para se esboçar as características geológicas e hidrogeológicas da área em estudo. Os dados obtidos por estas técnicas geofísicas contribuíram, também, para confirmar a homogeneidade geológica do local, associada, a princípio, apenas às sondagens realizadas.

Os resultados apresentados pelos levantamentos geofísicos forneceram indicações importantes com relação ao posicionamento da pluma de contaminação, tanto em área, como em profundidade. Através das anomalias identificadas nos mapas de isocondutividade aparente, foi possível delimitar a extensão da contaminação inorgânica do solo e das águas subterrâneas, provocadas pela infiltração de resíduos da indústria Sulfabrás, revelando a abrangência da área afetada.

Além disso, os dados geofísicos obtidos puderam apontar o sentido preferencial de propagação dos contaminantes inorgânicos, de acordo com o fluxo local da água subterrânea, descartando a possibilidade de migração em direção à Represa Hermínio Ometto e de contaminação de suas águas pelos resíduos oriundos da Sulfabrás.

Decorrente disto, os levantamentos geofísicos indicaram a disposição inadequada da rede de poços de monitoramento que haviam sido instalados no local em relação à presença da pluma de contaminação mapeada e do sentido preferencial de propagação da contaminação. É muito provável que a locação destes poços de monitoramento foi realizada sem nenhum ou pouco conhecimento dos limites reais da contaminação, nem tampouco da propagação dos contaminantes em subsuperfície através da água subterrânea. Este fato comprova a necessidade do emprego de levantamentos geofísicos na avaliação e diagnóstico de ocorrências semelhantes a esta em estudo.

A grande concentração de compostos iônicos (inorgânicos), detectada pelas análises químicas da água subterrânea, foi responsável pelo aumento da condutividade elétrica do terreno, o que possibilitou a aplicação com sucesso dos métodos eletromagnéticos empregados nesta pesquisa.

Desta forma, verificou-se que o mapeamento eletromagnético da contaminação, tanto pelo método eletromagnético indutivo, como pelo geo-radar, é coerente aos resultados constatados nestas análises químicas, observando-se uma relação direta entre a

condutividade aparente medida, a atenuação do sinal eletromagnético do radar e as concentrações detectadas dos compostos inorgânicos.

Verificou-se que a dimensão da contaminação inorgânica, determinada pelos levantamentos geofísicos, é maior que aquela prevista apenas com os dados geológicos e hidrogeológicos do local e que apontavam uma velocidade de propagação da água subterrânea muito reduzida. Desta forma, os levantamentos geofísicos puderam confirmar a influência de outros processos que alteraram a dinâmica da propagação dos contaminantes em subsuperfície.

A presença atual de intensas anomalias de condutividade aparente mostra, claramente, a permanência dos resíduos em profundidade, constituindo, ainda hoje, uma fonte contínua de contaminação do solo e da água subterrânea, através da lixiviação e percolação dos contaminantes em subsuperfície. Este fato, aponta o risco à saúde dos moradores próximos da área da indústria que porventura possam utilizar a água subterrânea do local para consumo.

Além dos aspectos anteriormente mencionados, deve ser observado que o levantamento geofísico também propiciou a identificação dos dois pontos de infiltração de resíduos através de detecção de anomalias de condutividade mais expressivas ou por meio da atenuação mais significativa do sinal do radar. Estes dados puderam contribuir para uma maior compreensão do processo dinâmico de contaminação ocorrido no local.

O monitoramento geofísico da contaminação por meio das medições de condutividade do terreno em épocas diferente, no caso 1992 e 1999, se mostrou uma ferramenta eficiente para a avaliação da propagação da contaminação, sendo que os resultados indicaram uma dispersão atual lenta, coerente, portanto, com os dados de condutividade hidráulica anteriormente obtidos para a área.

A importância do monitoramento geofísico eletromagnético foi realçada, no caso em questão, pelo fato que a maior parte dos poços de monitoramento que instalados haviam sido destruídos devido ao abandono em que se encontra a área, conforme foi verificado em 1998, implicando, assim, como forma de monitoramento abrangente do local, apenas o emprego dos levantamentos eletromagnéticos.

Os dados dos levantamentos geofísicos indicaram a existência de grande concentração de contaminantes impregnados na zona não saturada e saturada do terreno, reforçando a tese proposta no modelo conceitual da contaminação e que adota como

processo de contaminação a infiltração de resíduos na zona não saturada, a impregnação das camadas superiores da zona saturada através das variações sazonais do nível d'água local e a dispersão dos contaminantes dissolvidos de acordo com o fluxo da água subterrânea.

Em grande parte, os resultados geofísicos indicaram os efeitos das propriedades físico-químicas dos contaminantes inorgânicos, associados às características hidrogeológicas do local. Porém, deve se ressaltar que alguns dados obtidos apontaram a resposta geofísica decorrente da presença dos compostos orgânicos (solventes organoclorados), como foi observado na diminuição da condutividade aparente abaixo do ponto de infiltração I1 em profundidades maiores que 7,5 metros, e das fortes reflexões observadas na seção de radar próxima a este ponto de injeção.

De modo geral, as seções de radar apontaram em diversos trechos a atenuação evidente do sinal da onda eletromagnética, demonstrando a presença em subsuperfície de contaminantes eletricamente condutivos em altas concentrações.

Foi verificada uma correspondência direta entre os dados do radar e os adquiridos nos perfis de condutividade do levantamento eletromagnético indutivo, observando-se nas seções de radar de 25 e 100MHz que existe a atenuação do sinal eletromagnético quando os valores obtidos de condutividade aparente são muito elevados.

Entretanto, somente nas seções de 25MHz, ou seja, de baixa frequência, registrou-se a existência de reflexões fortes quando os valores de condutividade aparente não são tão elevados. À medida que os valores de condutividade aparente diminuíam, estes refletores fortes desapareciam, evidenciando, assim, a influência da condutividade elétrica nos dados do radar.

Estes refletores de sinal marcante foram interpretados como sendo o nível d'água local, baseado nas medições em poços, e correspondem, portanto, a água subterrânea contaminada por compostos que apresentam alta condutividade elétrica e que são os contaminantes inorgânicos dissolvidos.

Outro fato que confirma as considerações aqui apresentadas é que os valores do coeficiente dielétrico K encontrados a partir dos ensaios CMP para diferentes profundidades do terreno não são suficientemente contrastantes para que houvesse a presença de reflexões fortes do sinal eletromagnético. Este fato implica que as reflexões marcantes,

principalmente do nível d'água, que aparecem nas seções são decorrentes da presença de contaminantes condutivos, uma vez que a alta condutividade elétrica dos mesmos é o único fator, neste caso, que pode gerar contrastes nos valores de impedância elétrica .

Assim, se conclui que para a antena de baixa frequência empregada (25MHz) é possível se identificar zonas de atenuação do sinal para altas condutividades aparentes, ou seja, altas concentrações de contaminantes, e se detectar reflexões fortes da água subterrânea quando os valores de condutividade não são tão elevados, e que correspondem a uma contaminação em níveis menores.

Este fato, indica a viabilidade da antena de 25MHz para estudos de determinação da abrangência da contaminação inorgânica na água subterrânea de forma similar à efetuada através dos métodos eletromagnéticos indutivos, mesmo em terrenos argilosos como é caso. Ou seja, é possível se mapear as plumas de contaminação inorgânicas por meio da aplicação do geo-radar com a utilização de baixa frequência de operação.

Cabe ressaltar aqui que esta constatação não foi verificada nos trabalhos de outros pesquisadores (DAVIS & ANNAN (1989); NOBES et al. (1994), LANZ et al. (1994)), uma vez que estes só relacionam a presença da contaminação inorgânica quando há atenuação do sinal eletromagnético, não verificando a existência de fortes refletores nestes casos. É muito provável que o fenômeno da reflexão pela presença de contaminantes inorgânicos dissolvidos, descrito nesta pesquisa, não foi detectado por estes autores devido à utilização de antenas de maiores frequências.

Em resumo, os resultados obtidos através da aplicação dos métodos geofísicos eletromagnéticos, especificamente o eletromagnético indutivo e o geo-radar, contemplaram os objetivos propostos nesta pesquisa, contribuindo para um conhecimento melhor da situação do local e demonstrando que existe o comprometimento do solo e da qualidade da águas subterrâneas decorrentes da infiltração de resíduos oriunda da indústria Sulfabrás.

ANEXO 1

DESCRIÇÕES GEOLÓGICAS

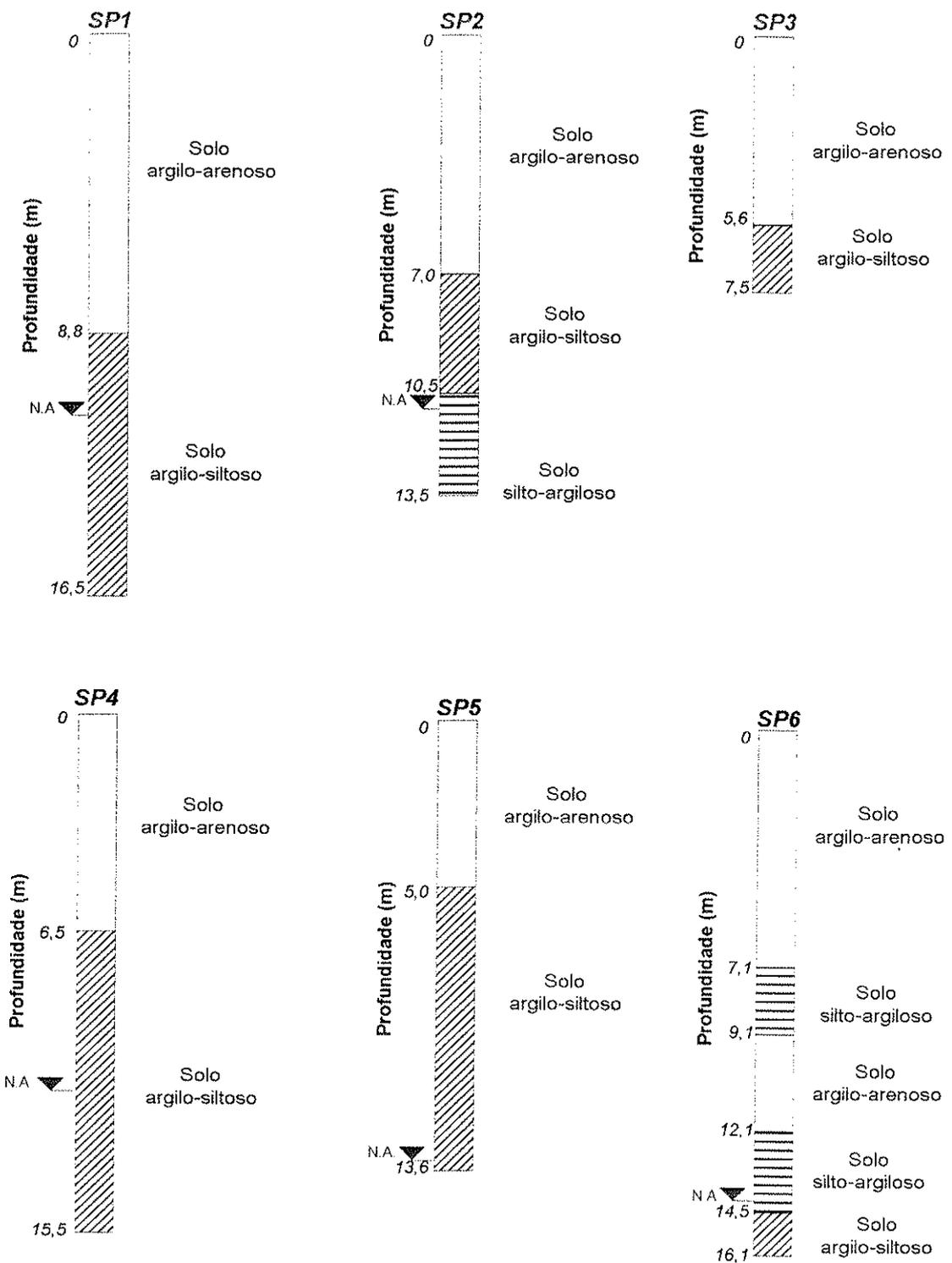


Figura 1.1. Descrição geológica nos locais das sondagens a percussão (Tecsolo in CETESB, 1997a)

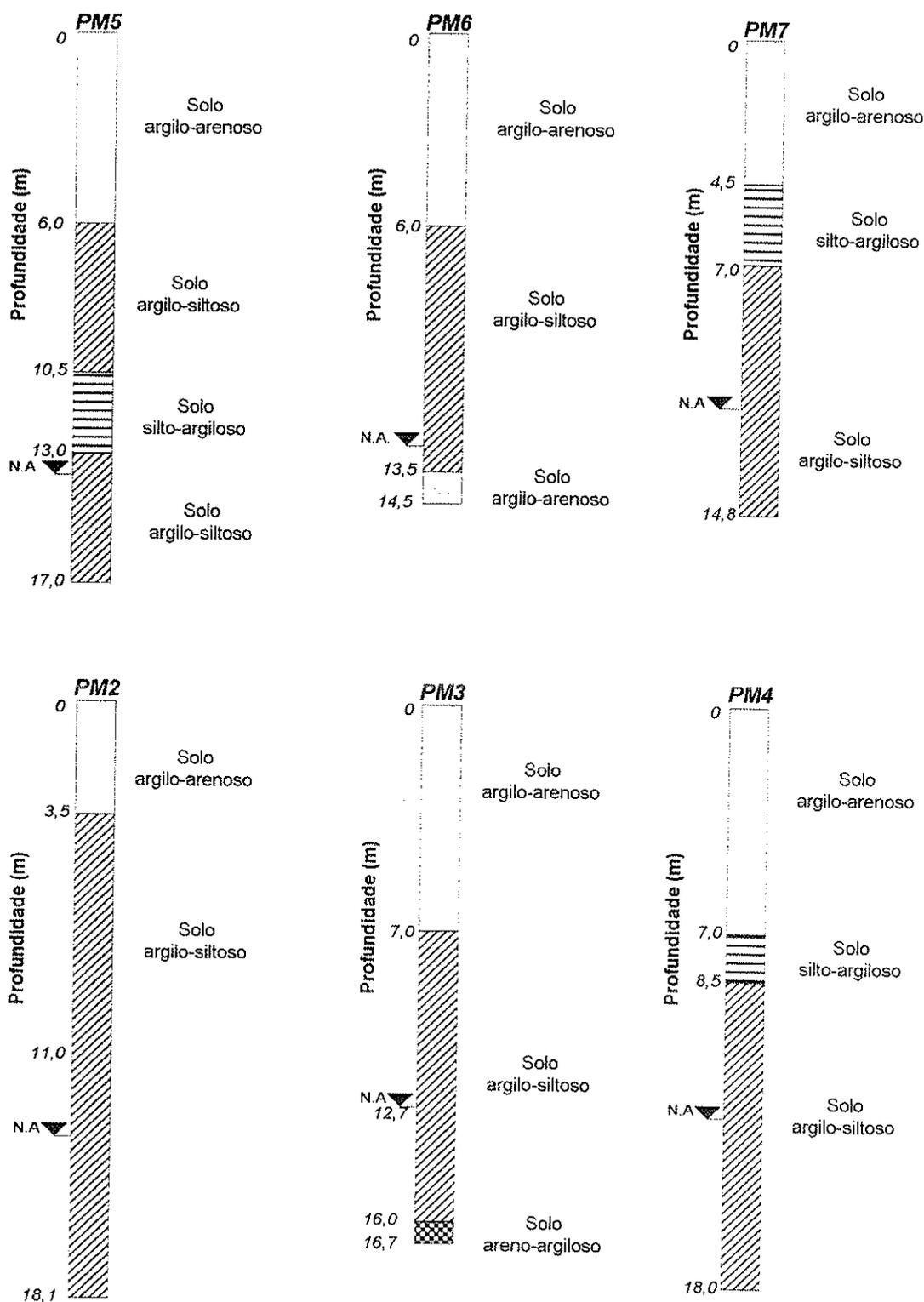


Figura 1.2. Descrição geológica nos locais dos poços de monitoramento (Sondosolo in CETESB, 1997a)

ANEXO 2

MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

Tabela 2.1. Medidas de nível d'água (m) executadas nas sondagens a percussão (Tecsolo)

	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5	SP 6
COTA (m)	672,8	674,8	672,6	681,6	683,5	664,7
DATA						
01/09/88	12,4	11,9	-	-	-	-
02/09/88	11,2	10,7	-	12,5	-	-
03/09/88	-	-	-	11,3	-	-
05/09/88	-	-	-	-	13,3	14,4
06/09/88	-	-	-	-	13,0	14,1

Tabela 2.2 Cotas do nível d'água medido (m)

	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4	SP 5	SP 6
DATA						
01/09/88	660,4	662,9	-	-	-	-
02/09/88	661,6	664,1	-	669,1	-	-
03/09/88	-	-	-	670,3	-	-
05/09/88	-	-	-	-	670,2	650,3
06/09/88	-	-	-	-	670,5	650,6

Tabela 2.3. Medidas de nível d'água nos poços de abastecimento e respectivas cotas (m) (Tecsolo-Sulfabráis) - Data: 06/09/88

POÇO	PA 1	PA 2	PA 3	PA 4	PA 5	PA 6	PA 7	PA 8
COTA	683,1	686,7	685,5	680,8	681,4	675,5	677,9	678,6
N.A.	13,2	14,9	13,0	13,8	13,7	10,8	8,4	8,5
COTA	669,9	671,8	672,5	667,0	667,7	664,7	669,5	670,1

POÇO	PA 9	PA 10	PA 11	PA 12	PA 13	PA 14	PA 15	PA 16	PA 17
COTA	677,0	672,0	676,0	677,5	681,2	681,4	683,7	689,4	689,5
N.A.	11,8	7,9	11,9	13,4	10,8	10,2	11,1	10,4	14,2
COTA	665,2	664,1	664,1	664,1	670,4	671,2	672,6	679,0	675,3

* N.A. em 11/11/99: PA7 = 7,8m e PA8 = 7,9m

Tabela 2.4. Medidas de nível d'água (m) executadas nos poços de monitoramento

POÇO	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	
COTA (m)	676,4	680,3	678,0	674,3	672,0	662,9	659,5	676,6	
DATA									Medido por
06/12/89	10,1	14,5	13,5	12,1	13,7	12,6	11,3	7,0	Sondosolo
07/07/90	-	12,5	12,0	-	-	12,0	10,9	-	CETESB
15/01/91	-	14,3	-	-	-	12,5	11,4	-	CETESB
16/04/91	-	-	11,1	-	-	12,7	11,1	-	CETESB
20/01/92	-	13,2	12,7	-	-	12,4	11,2	5,4	CETESB
05/02/92	10,2	12,8	12,6	12,5	13,2	12,3	-	6,1	CETESB
27/08/92	13,8	14,4	-	13,3	13,6	12,7	11,5	7,4	CETESB
11/11/99	#	#	#	11,8	#	#	#	6,1	CETESB

Poços danificados ou destruídos

Tabela 2.5 - Cotas das medidas do nível d'água (m)

DATA	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8
06/12/89	666,3	665,8	664,5	662,2	658,3	650,3	648,2	669,6
07/07/90	-	667,8	666,0	-	-	650,9	648,6	-
15/01/91	-	666,0	-	-	-	650,4	648,1	-
16/04/91	-	-	666,9	-	-	650,2	648,4	-
20/01/92	-	667,1	665,3	-	-	650,6	648,3	671,2
05/02/92	666,2	667,5	665,4	661,8	658,8	650,7	-	670,5
27/08/92	662,6	665,9	-	661,0	658,4	650,2	648,0	669,2
11/11/99	#	#	#	662,5	#	#	#	670,5

Tabela 2.6. Condutividade hidráulica obtidas através dos ensaios de infiltração (Sondosolo)

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8
K (cm/s)	-	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$6,8 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	-

ANEXO 3

RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Tabela 3.1. Padrões de Potabilidade da Portaria 36 do Ministério da Saúde de 19/01/90 (CONAMA)

PARÂMETROS/UNIDADES	PADRÕES
pH	6,5 a 8,5
Cloreto (mg/L)	250,0
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
* Padrões recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS)	

Tabela 3.2. Resultado das análises de amostras de água do poço de infiltração conhecido quando em atividade (µg/L) (data de coleta: 19/08/87)

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

Tabela 3.3. Resultado das análises para solventes halogenados em amostras de água dos poços de monitoramento e do poço profundo da Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (data de coleta: 21/01/92)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloro- etano	Tetracloro- de carbono	Tricloro- etileno	Tetracloro- 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

Tabela 3.4. Resultado das análises para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostra de água dos poços de monitoramento e do poço profundo da Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (data de coleta: 21/01/92)

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	ND	ND
P7	ND	ND	ND
P8	$6,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$	ND

Tabela 3.5. Resultado de análises para íons solúveis nas amostras de água dos poços de monitoramento e do poço profundo de abastecimento da Sulfabrás (mg/L) (data de coleta: 21/01/92)

Procedência	Cloreto	N Amoniacal	N Nitrato	Sódio	Sulfato
PS	<0,5	0,12	0,02	6,7	2,0
P1	$1,5 \times 10^3$	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	$2,15 \times 10^3$	240,0	0,05	$1,8 \times 10^3$	31,0

Tabela 3.6. Resultado das análises de amostras de água dos poços próximos à indústria Sulfabrás (data de coleta: 11/11/99)

Procedência	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	pH
P8	$1,35 \times 10^3$	< 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

ND = Não Detectado

PF = Poço da Ind. Fuganholi

Tabela 3.7. Resultado das análises para solventes halogenados em amostras de água dos poços próximos à indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) (data de coleta: 11/11/99)

Procedência	Clorofórmio	1,2 Dicloro- etano	Tetracloro- de carbono	Tricloro- etileno	Tetracloro- 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

Tabela 3.8. Resultado das análises para Benzeno, Tolueno e Xileno (BTX) em amostras de água dos poços próximos à indústria Sulfabrás ($\mu\text{g/L}$) - (data de coleta: 11/11/99)

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

ANEXO 4

MAPAS DE ISOCONDUTIVIDADE

E

MODELO ELETROMAGNÉTICO

Mapa de Isocondutividade Aparente - EM34/10HD - Indústria Sulfabrás (Araras) - 1992
 Profundidade de Investigação: até 7,5 metros

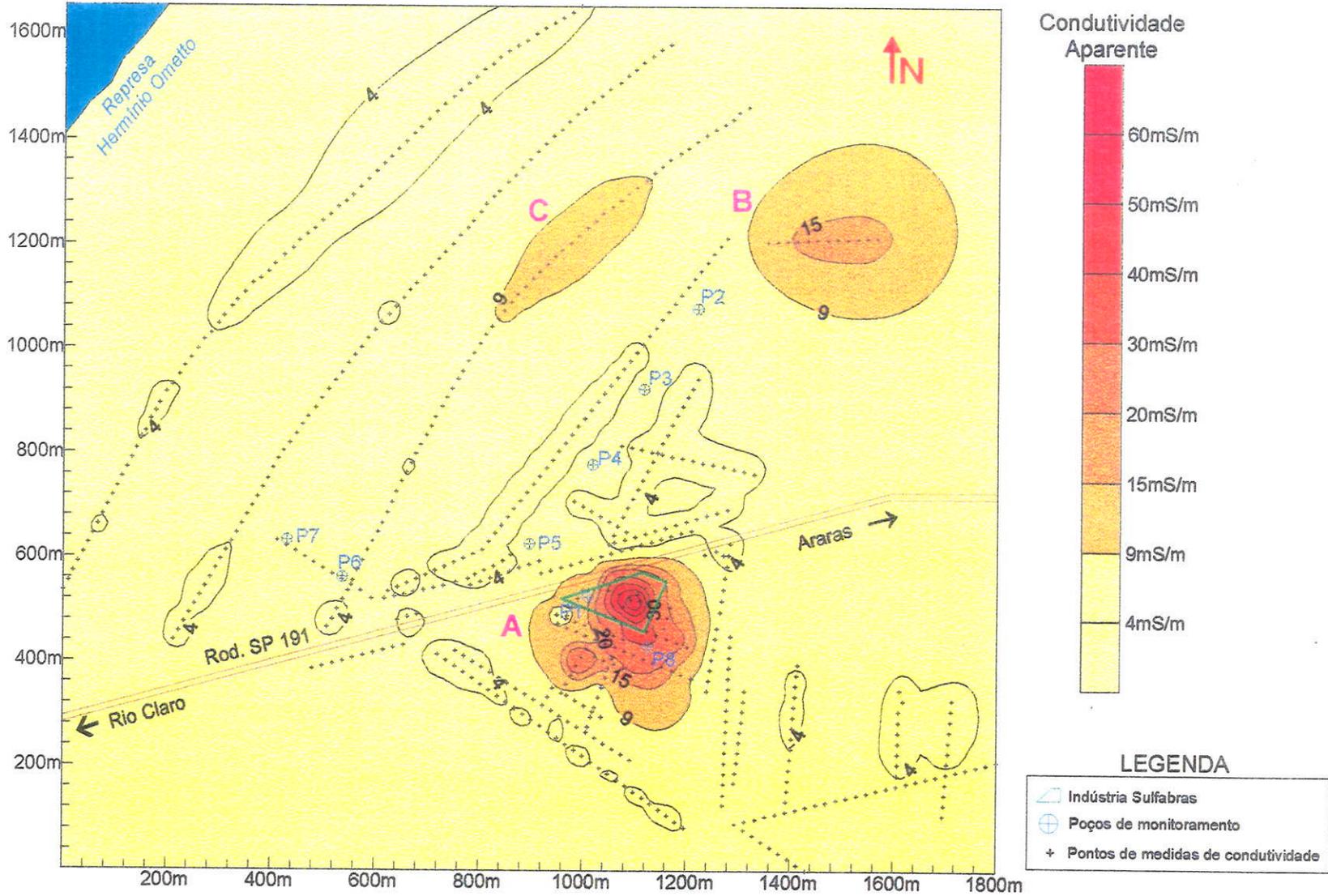


Figura 4.1 . Mapa geral de isocondutividade aparente para a profundidade até 7,5 metros (1992).

Mapa de Isocondutividade Aparente - EM34/10VD - Indústria Sulfabrás (Araras) - 1992
 Profundidade de Investigação: até 15 metros

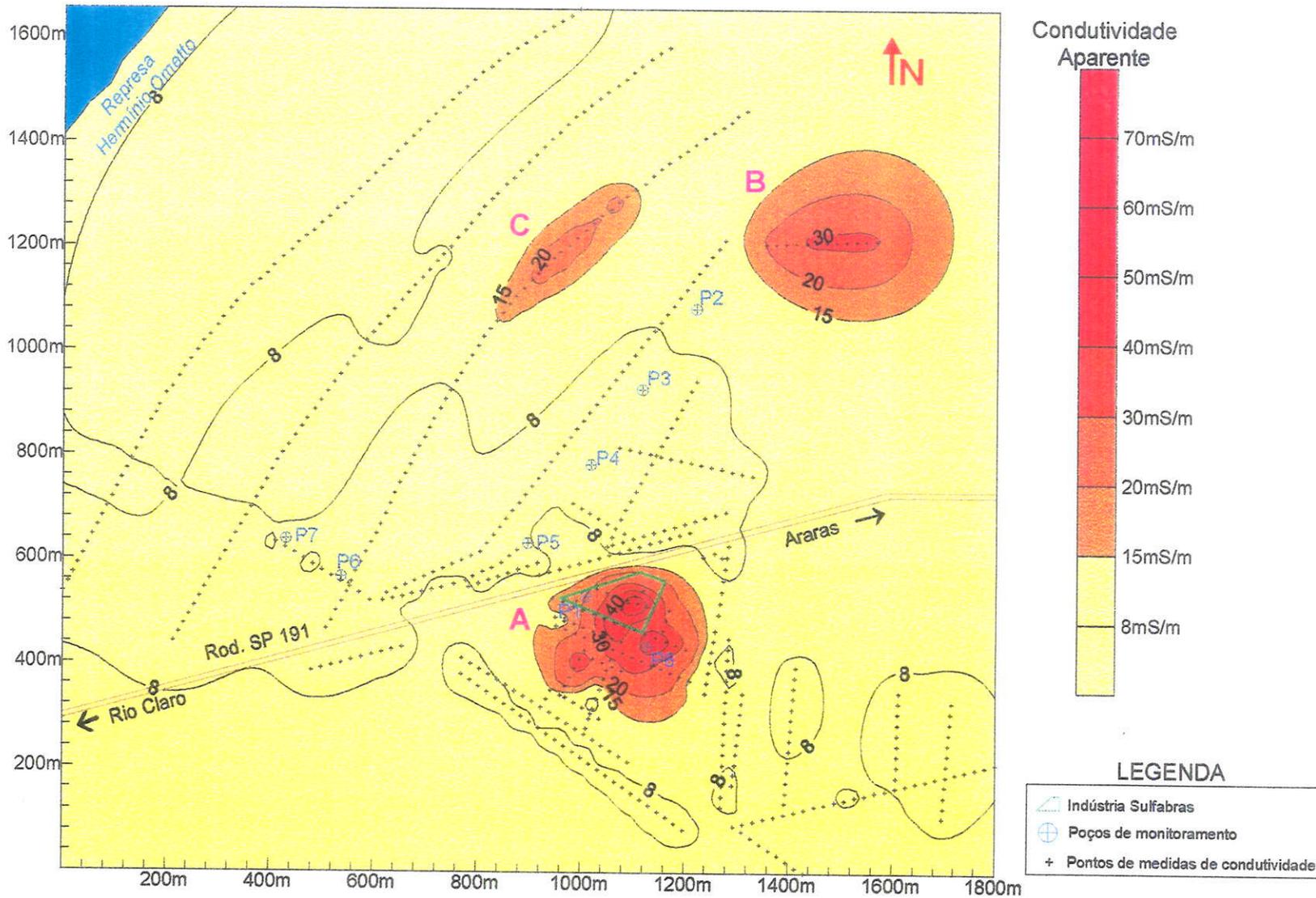


Figura 4.2 . Mapa geral de isocondutividade aparente para a profundidade até 15 metros (1992).

Mapa de Isocondutividade Aparente - EM34/40HD - Indústria Sulfabrás (Araras) - 1992
 Profundidade de Investigação: até 30 metros

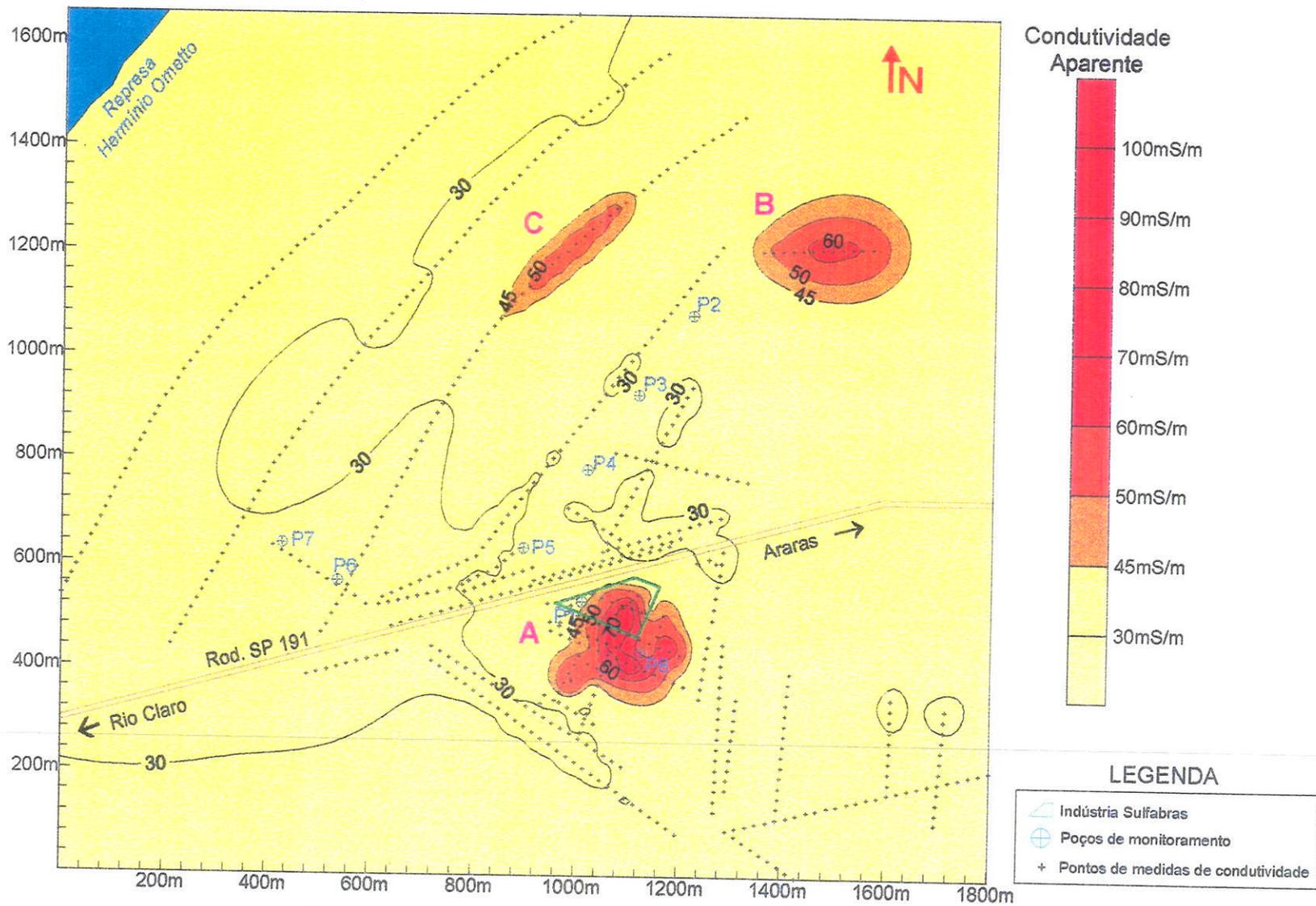


Figura 4.3 . Mapa geral de isocondutividade aparente para a profundidade até 30 metros (1992).

Mapa de Isocondutividade Aparente - EM34/40VD - Indústria Sulfabrás (Araras) - 1992
 Profundidade de Investigação: até 60 metros

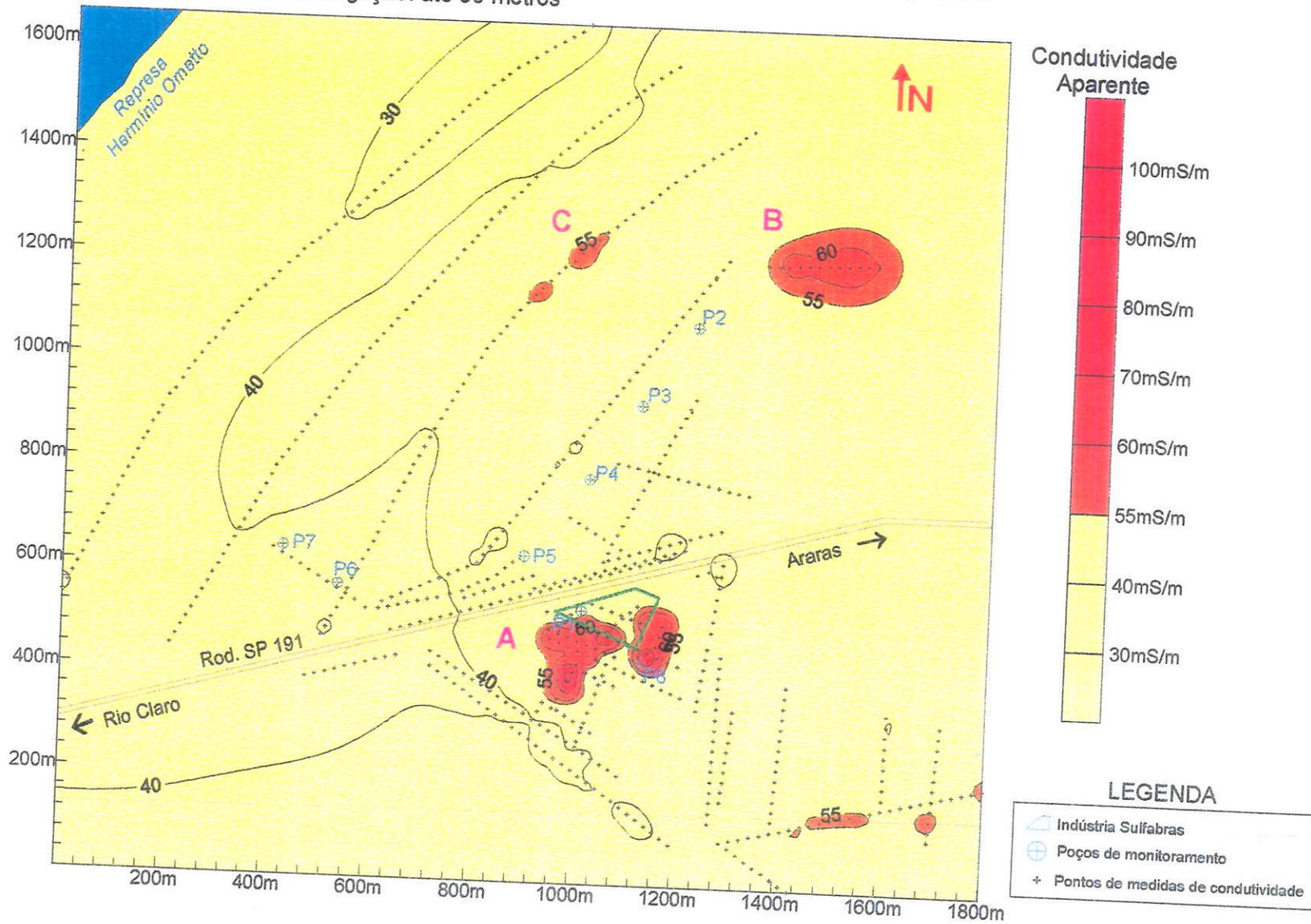


Figura 4.4 . Mapa geral de isocondutividade aparente para a profundidade até 60 metros (1992).

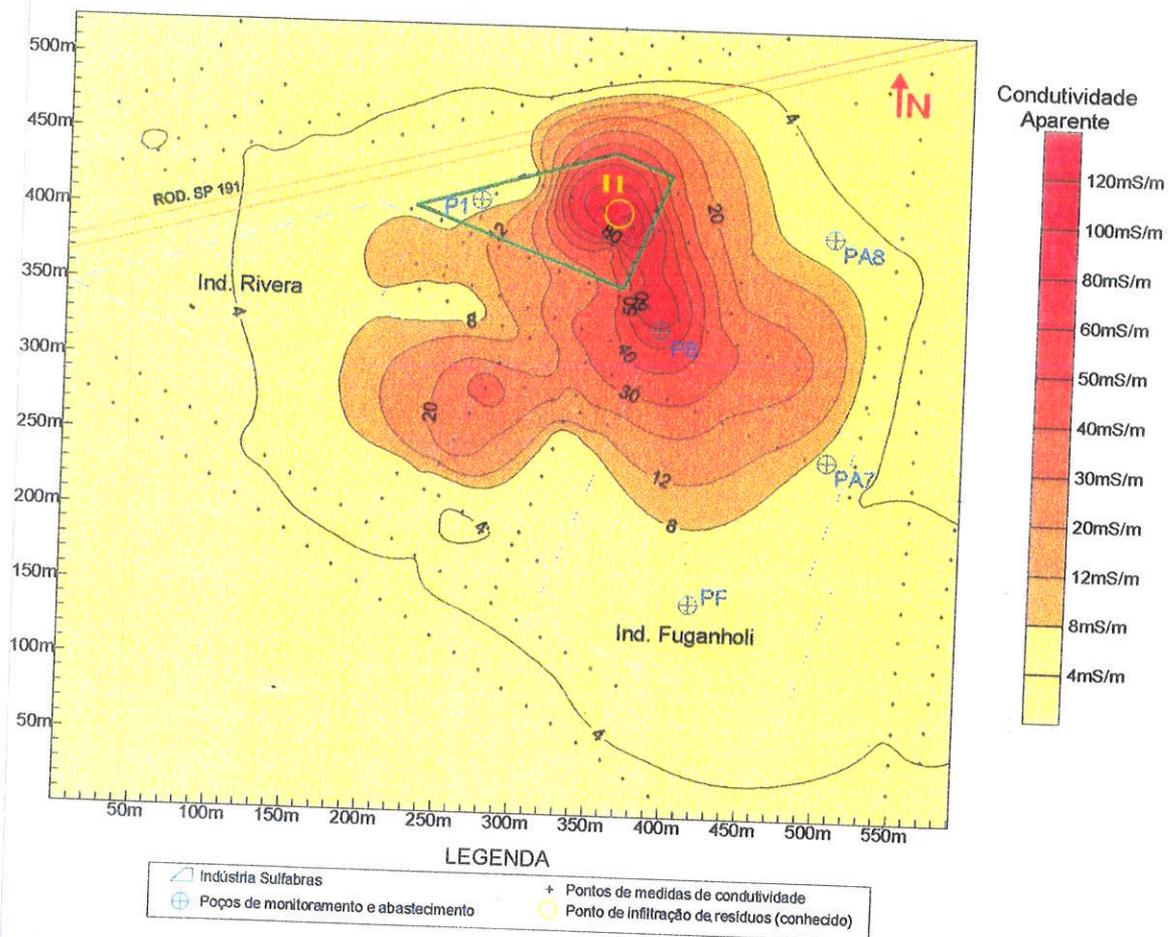


Figura 4.5 . Mapa de isocondutividade aparente em detalhe: profundidade até 7,5 metros (1992).

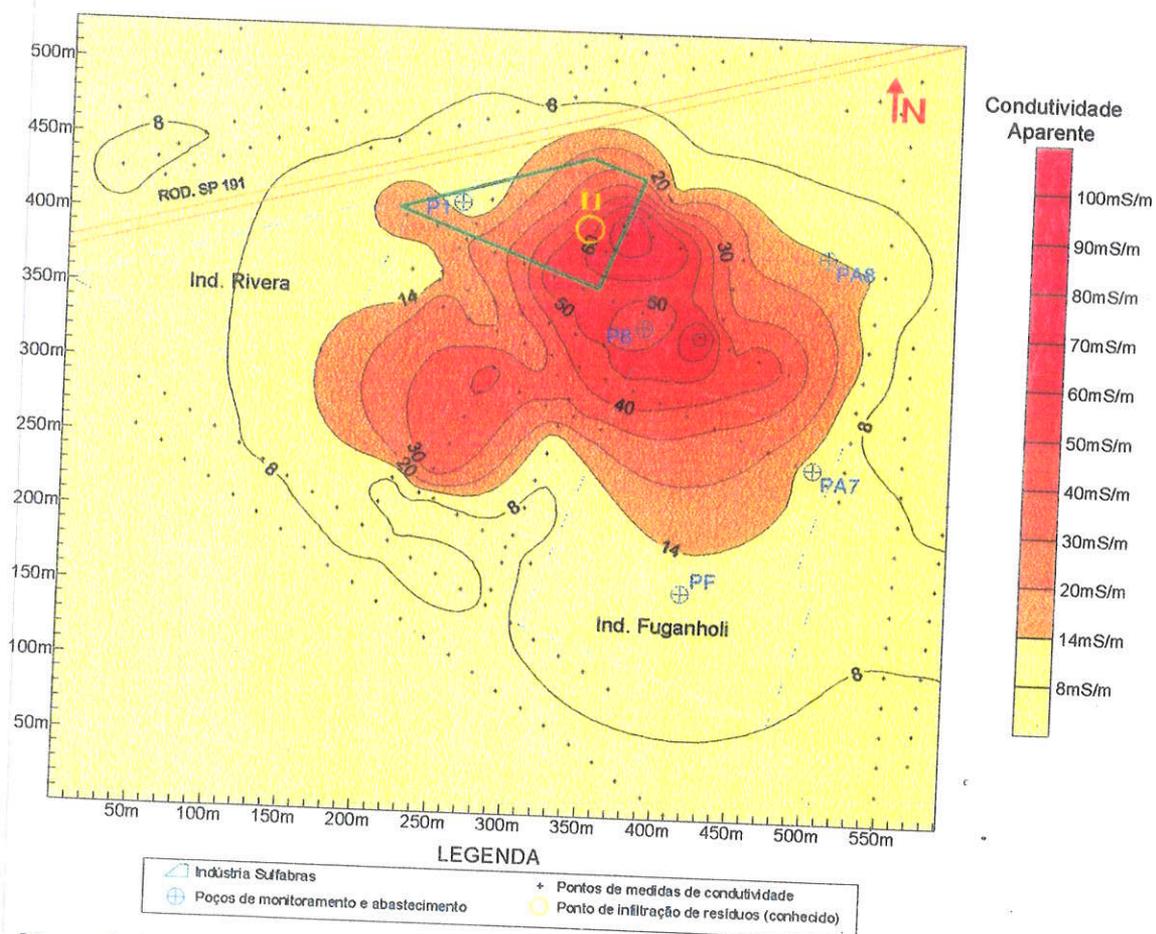


Figura 4.6 . Mapa de isocondutividade aparente em detalhe: profundidade até 15 metros (1992).

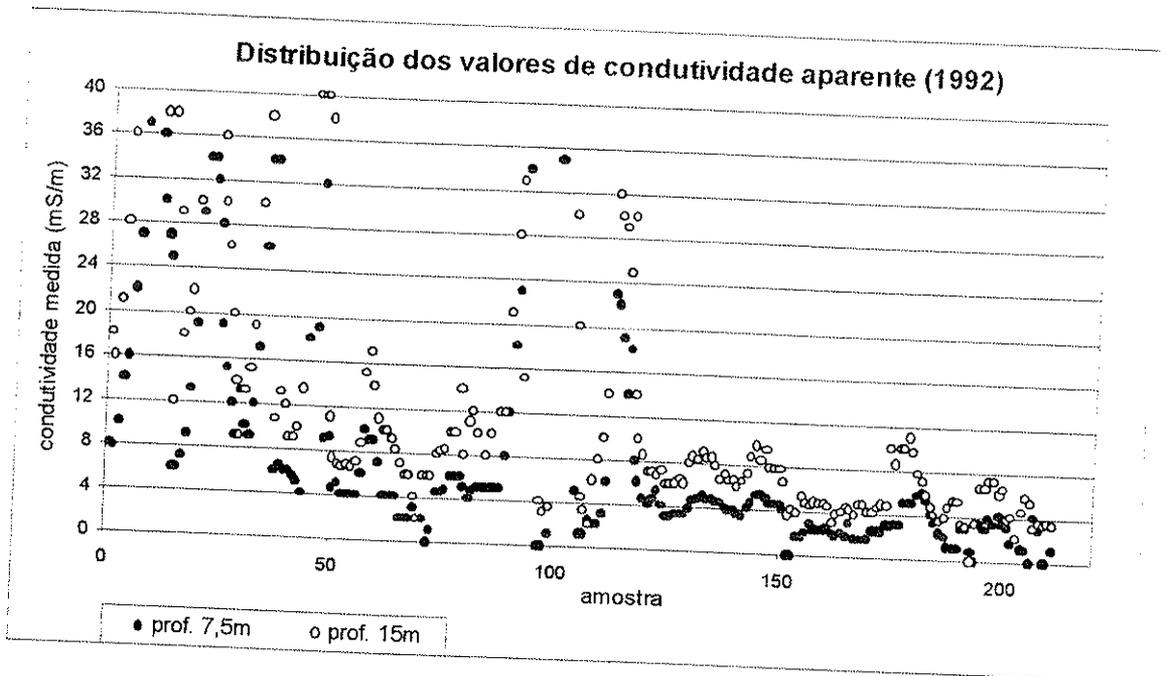


Figura 4.7. Distribuição dos valores de condutividade aparente para 7,5 e 15 metros de profundidade (Ano: 1992).

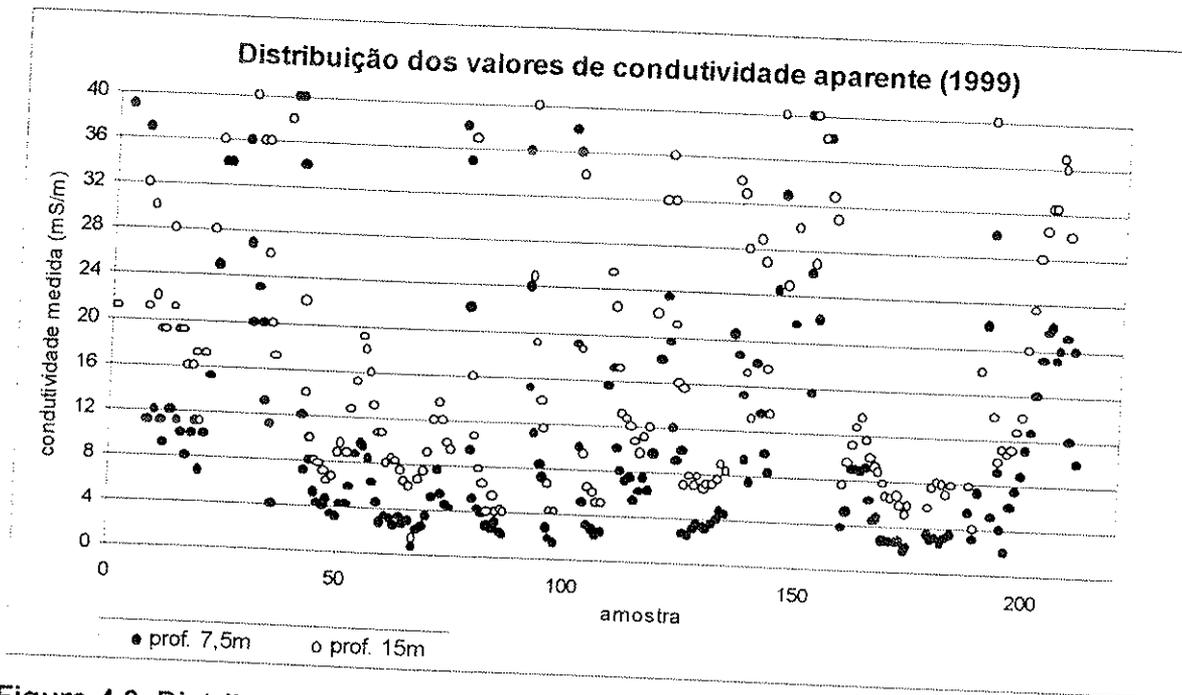


Figura 4.8. Distribuição dos valores de condutividade aparente para 7,5 e 15 metros de profundidade (Ano: 1999).

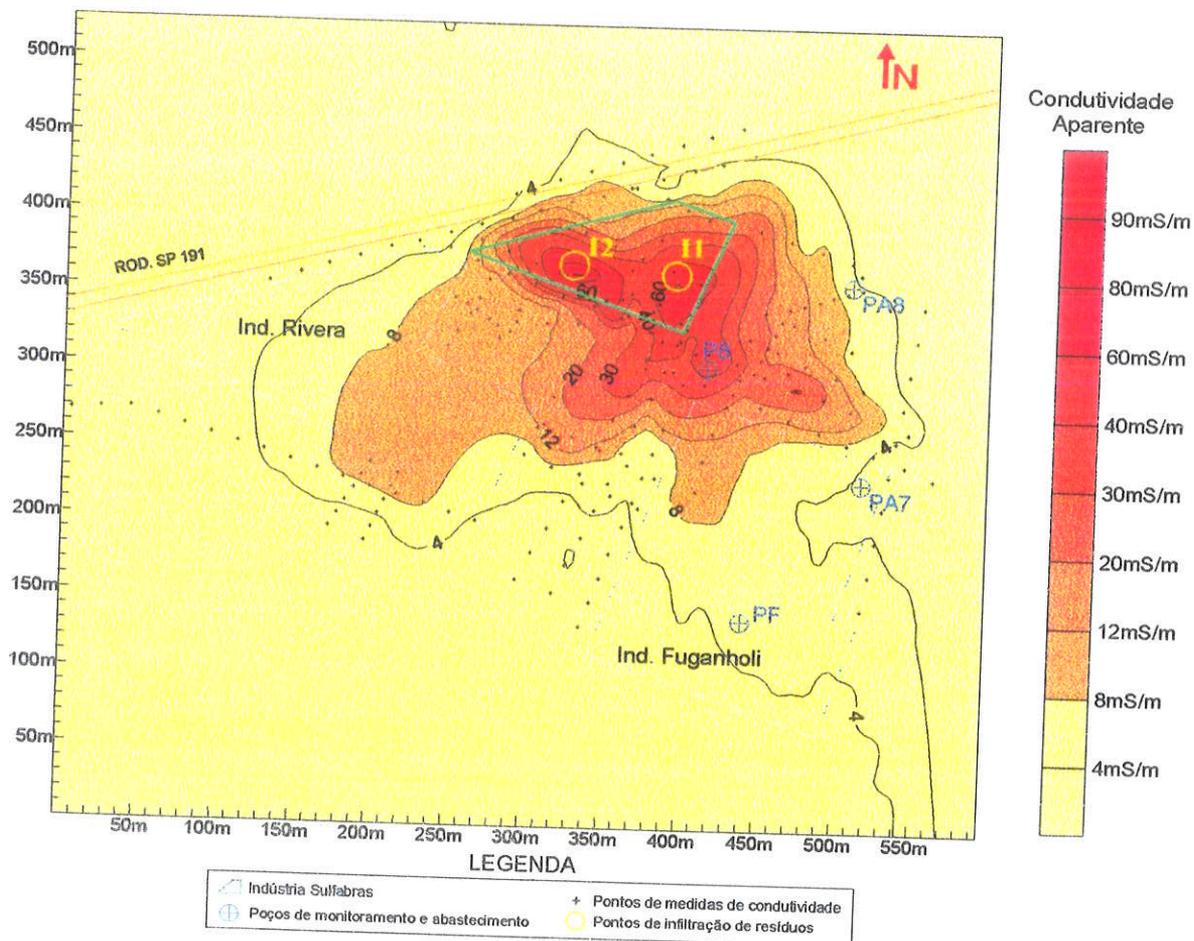


Figura 4.9 . Mapa de isocondutividade aparente em detalhe: profundidade até 7,5 metros (1999).

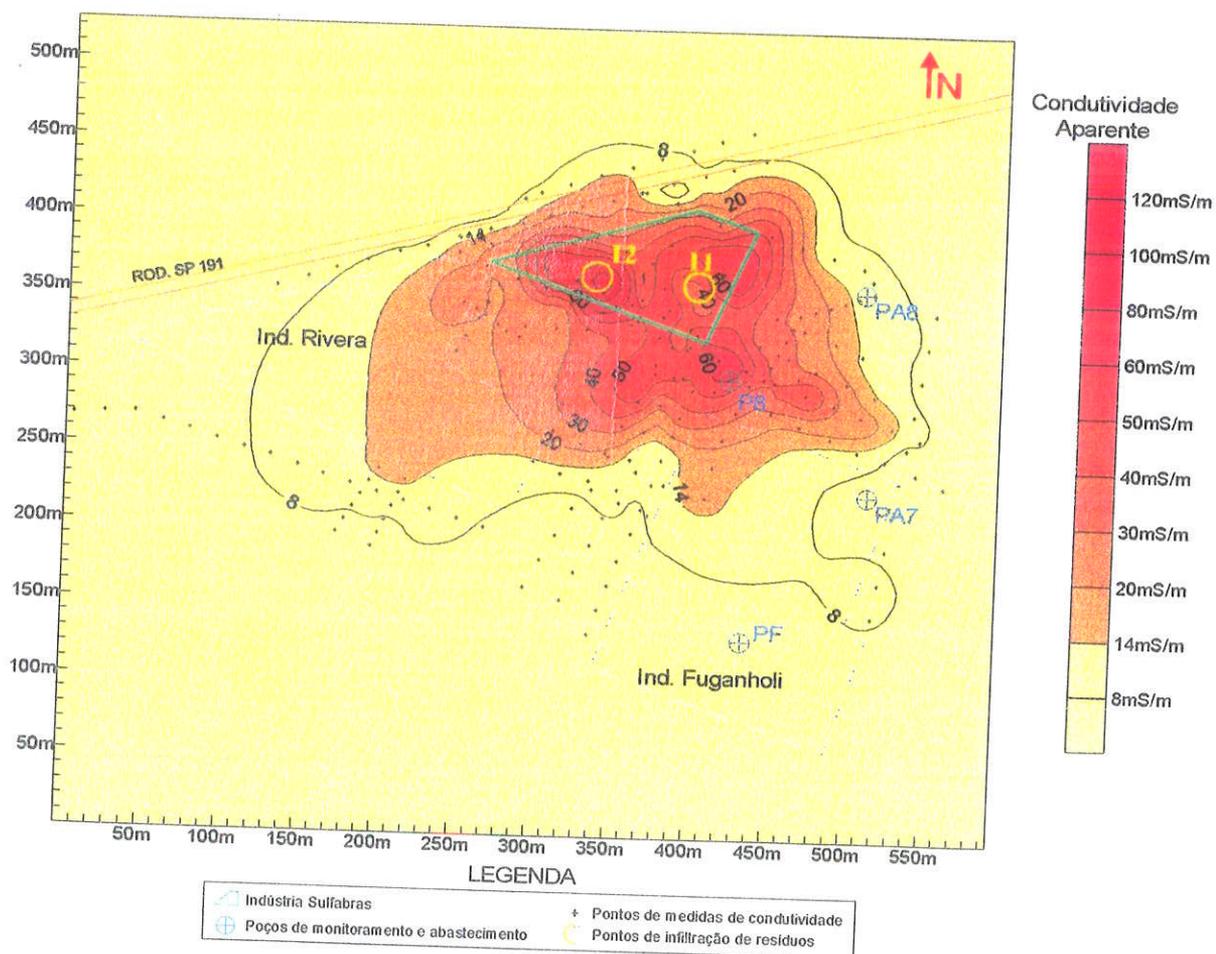


Figura 4.10 . Mapa de isocondutividade aparente em detalhe: profundidade até 15 metros (1999).

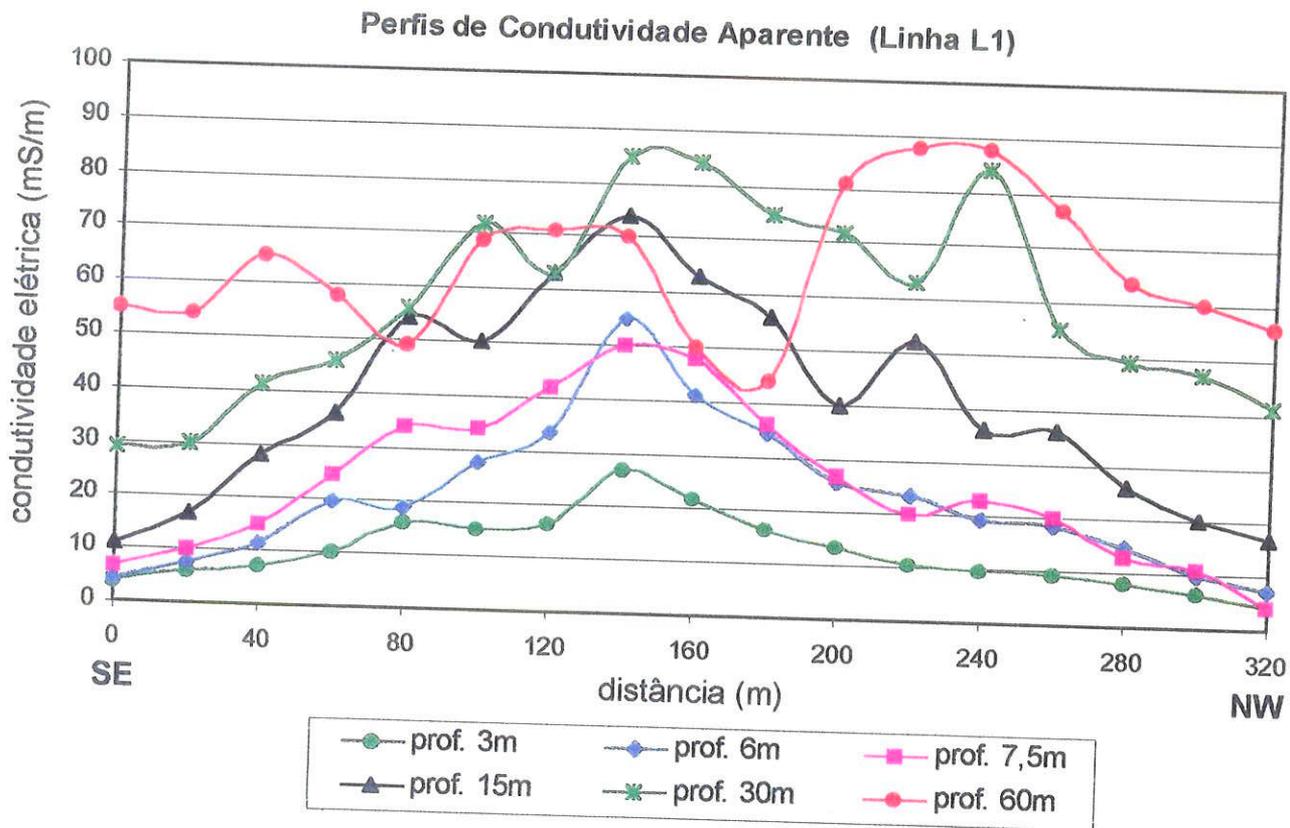


Figura 4.11 . Perfis de condutividade aparente da linha L1 para as profundidades de 3, 6, 7,5, 15, 30 e 60 metros.

T2876

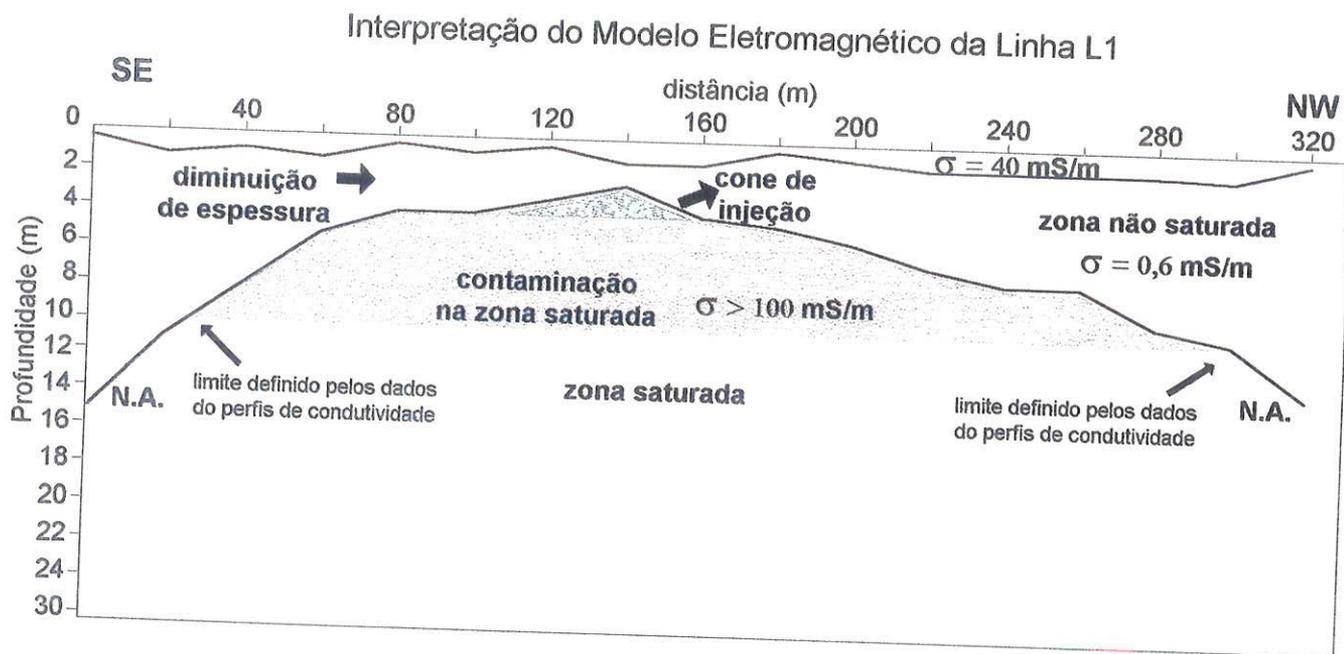


Figura 4.12 . Modelo eletromagnético elaborado a partir dos perfis de condutividade aparente da linha L1.

Tabela 4.1. Resultado do modelamento eletromagnético utilizando o programa EMIX-34 (Interpex).

PONTO 1	Conductiv. (mS/m)	24	0,6	141	16	erro: 16%
	Prof. base (m)	0,4	14,0	53,0		
	Resistiv. (Ohm.m)	42	1721	7	61	
PONTO 2	Conductiv. (mS/m)	17	0,6	106	13	erro: 18%
	Prof. base (m)	1,2	10,9	59,8		
	Resistiv. (Ohm.m)	60	1754	9	77	
PONTO 3	Conductiv. (mS/m)	24	0,6	118	14	erro: 16%
	Prof. base (m)	0,7	7,9	53,2		
	Resistiv. (Ohm.m)	41	1614	8	69	
PONTO 4	Conductiv. (mS/m)	30	0,6	110	14	erro: 9%
	Prof. base (m)	0,8	5,3	56,1		
	Resistiv. (Ohm.m)	33	1584	9	68	
PONTO 5	Conductiv. (mS/m)	28	0,6	127	20	erro: 19%
	Prof. base (m)	0,4	3,9	28,7		
	Resistiv. (Ohm.m)	36	1646	8	50	
PONTO 6	Conductiv. (mS/m)	23	0,5	155	18	erro: 15%
	Prof. base (m)	0,6	4,0	43,0		
	Resistiv. (Ohm.m)	44	1818	6	54	
PONTO 7	Conductiv. (mS/m)	25	0,6	163	225	erro: 9%
	Prof. base (m)	0,4	3,3	26,3		
	Resistiv. (Ohm.m)	40	1601	6,1	4,4	
PONTO 8	Conductiv. (mS/m)	24	0,6	195	37	erro: 17%
	Prof. base (m)	1,1	2,5	30,0		
	Resistiv. (Ohm.m)	40	1517	5	27	

Continuação Tabela 4.1. Resultado do modelamento eletromagnético com EMIX-34.

PONTO 9	Conductiv. (mS/m)	39	0,6	277	43	erro: 12%
	Prof. base (m)	1,0	4,1	14,8		
	Resistiv. (Ohm.m)	26	1630	4	23	
PONTO 10	Conductiv. (mS/m)	21	0,6	249	26	erro: 16%
	Prof. base (m)	0,5	4,4	15,7		
	Resistiv. (Ohm.m)	48	1591	4	39	
PONTO 11	Conductiv. (mS/m)	26	0,6	227	29	erro: 14%
	Prof. base (m)	0,6	5,6	24,1		
	Resistiv. (Ohm.m)	38	1574	4	35	
PONTO 12	Conductiv. (mS/m)	22	0,6	202	57	erro: 16%
	Prof. base (m)	1,2	6,3	33,9		
	Resistiv. (Ohm.m)	46	1541	5	17	
PONTO 13	Conductiv. (mS/m)	24	0,6	192	41	erro: 17%
	Prof. base (m)	1,2	6,9	36,1		
	Resistiv. (Ohm.m)	41	1618	5,2	24	
PONTO 14	Conductiv. (mS/m)	25	0,6	164	55	erro: 15%
	Prof. base (m)	1,1	7,0	37		
	Resistiv. (Ohm.m)	40	1610	6	18	
PONTO 15	Conductiv. (mS/m)	27	0,6	190	61	erro: 17%
	Prof. base (m)	1,1	9,5	29		
	Resistiv. (Ohm.m)	36	1628	5,2	16	
PONTO 16	Conductiv. (mS/m)	16	0,6	164	66	erro: 15%
	Prof. base (m)	1,4	10,3	35		
	Resistiv. (Ohm.m)	63	1612	6	15	
PONTO 17	Conductiv. (mS/m)	27	0,6	159	32	erro: 18%
	Prof. base (m)	0,3	12,5	37		
	Resistiv. (Ohm.m)	37	1758	6	31	

ANEXO 5

SEÇÕES DE GEO-RADAR

Localização dos perfis de campo do geo-radar

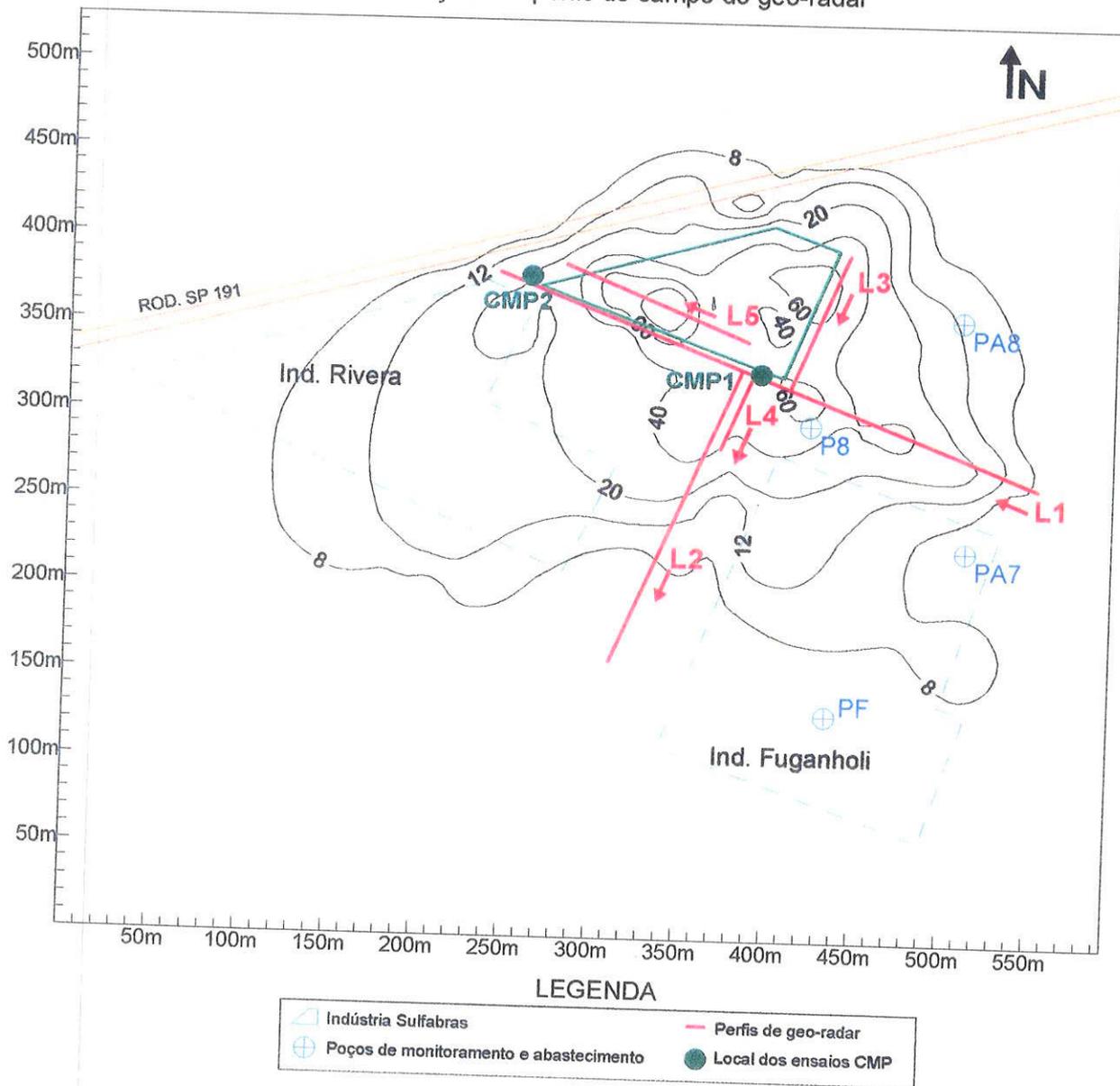


Figura 5.1 . Mapa de localização dos perfis de campo do geo-radar

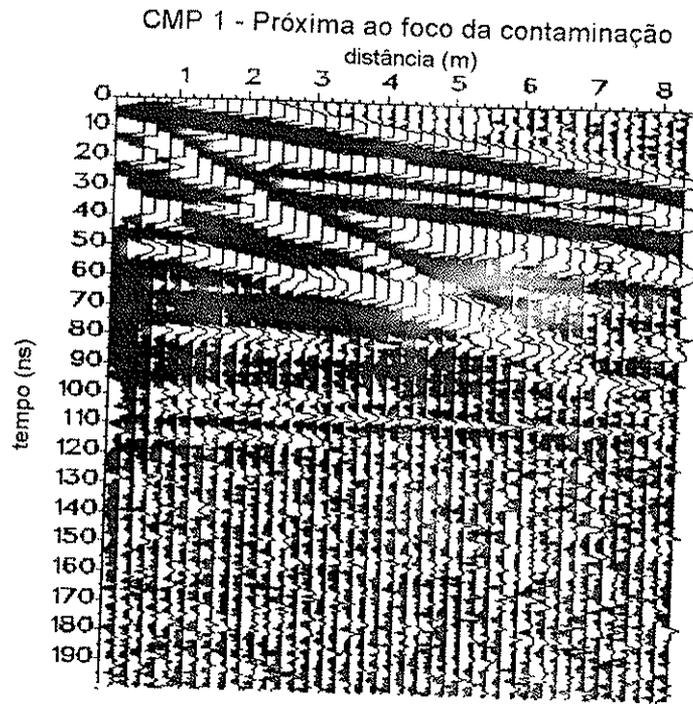


Figura 5.2. Seção do ensaio CMP1 localizado próximo ao foco da contaminação.

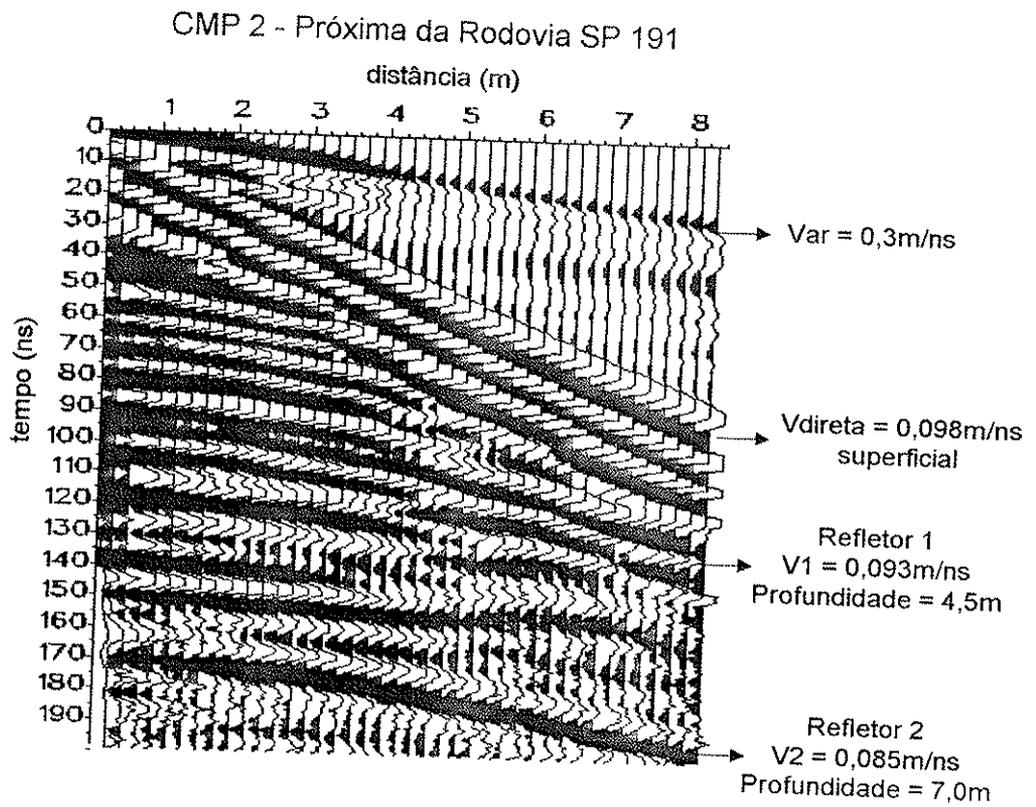


Figura 5.3. Seção do ensaio CMP2 localizado na borda da pluma.

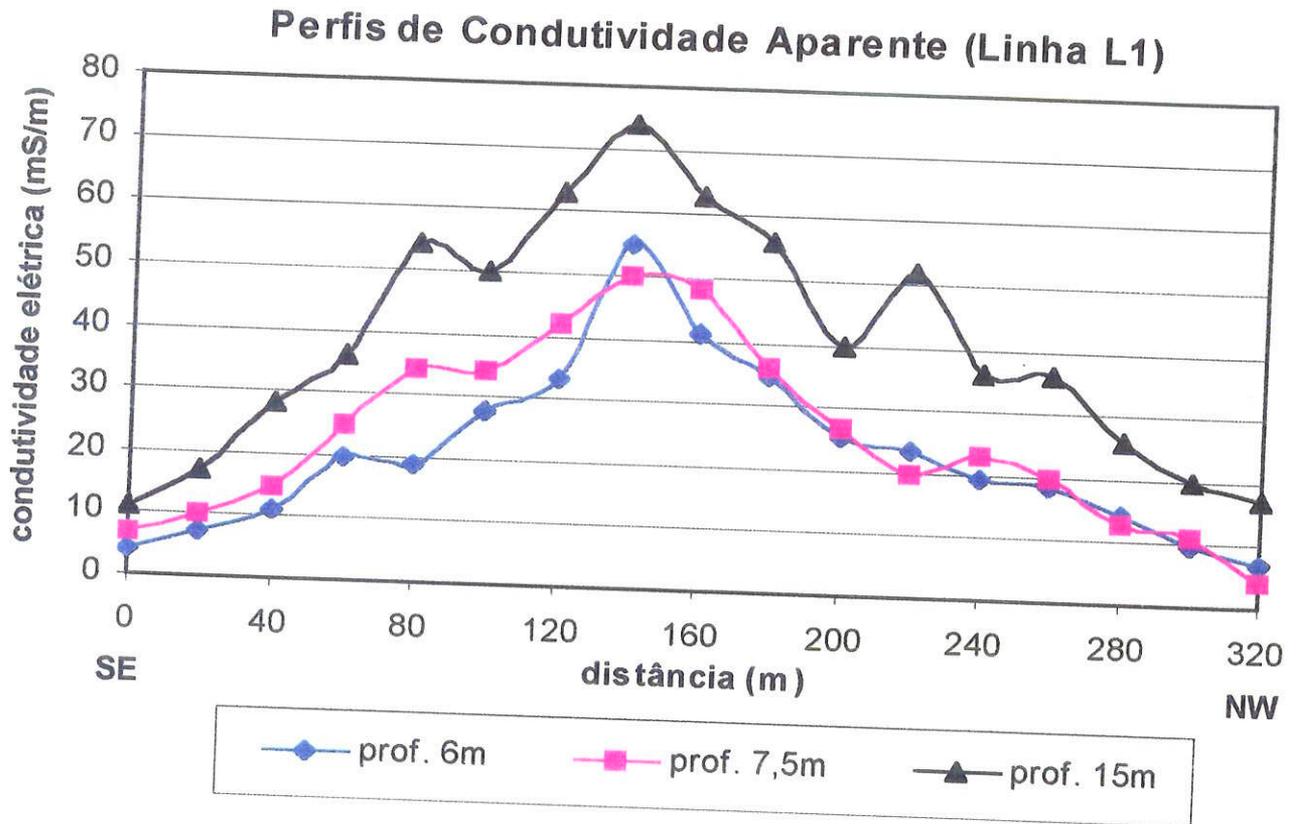


Figura 5.4 . Perfis de condutividade aparente da linha L1 para 6, 7,5 e 15m de profundidade.

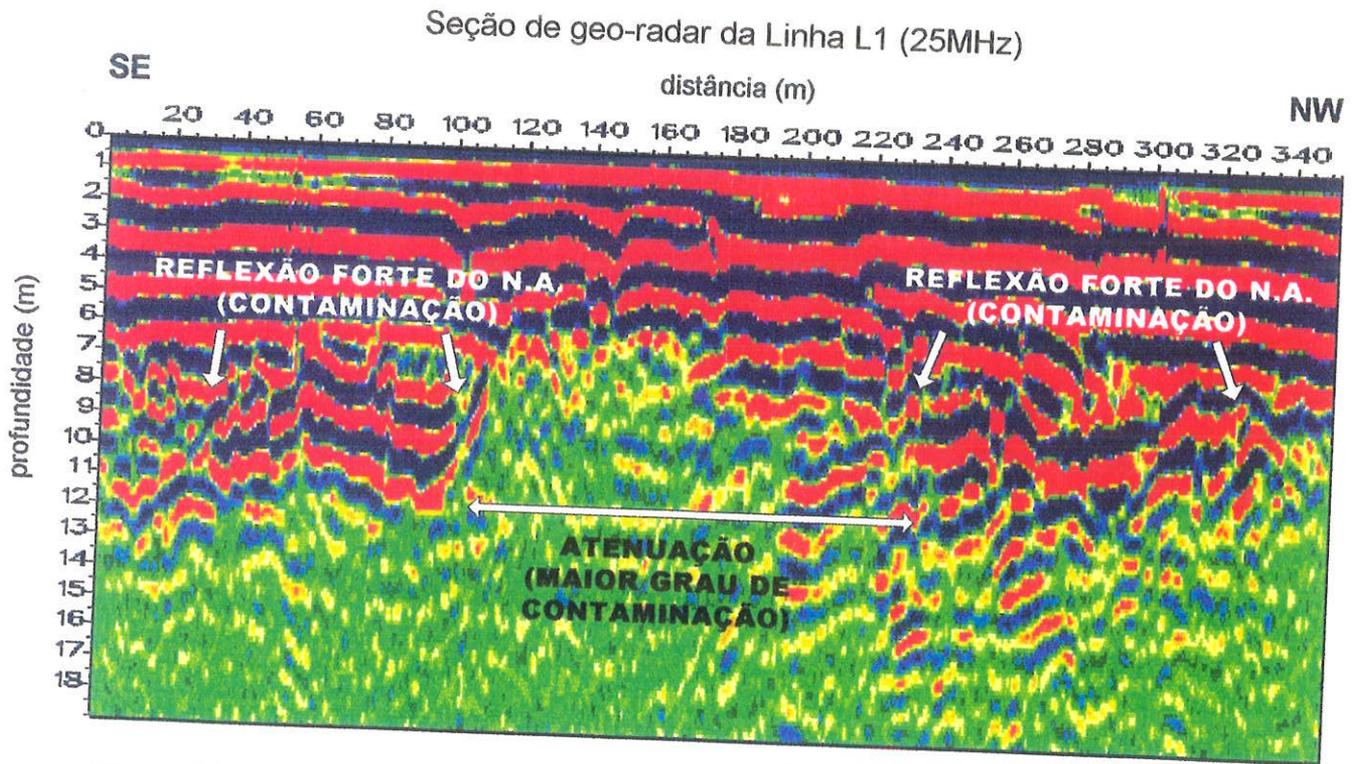


Figura 5.5 . Seção interpretada de geo-radar para linha L1 (frequência de 25MHz).

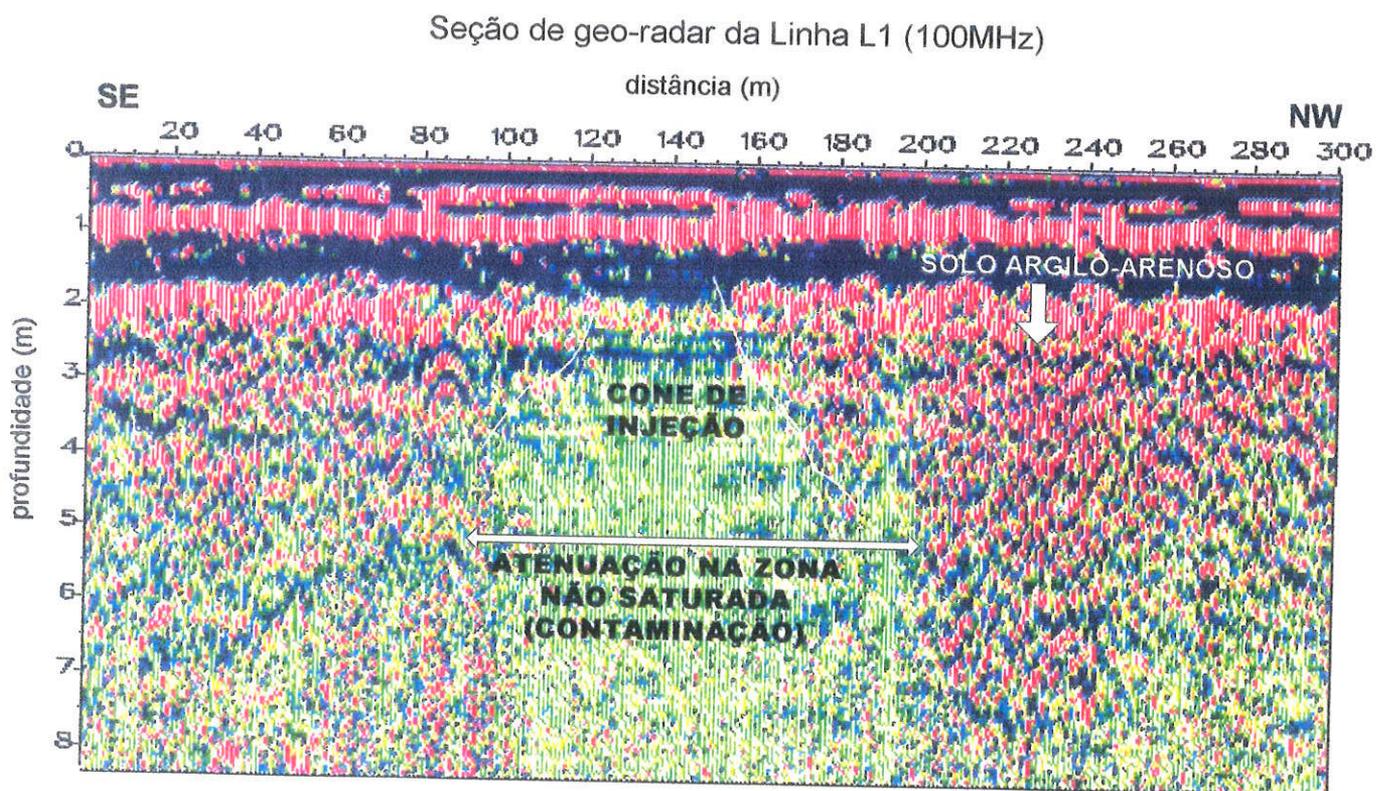


Figura 5.6 . Seção interpretada de geo-radar para linha L1 (frequência de 100MHz).

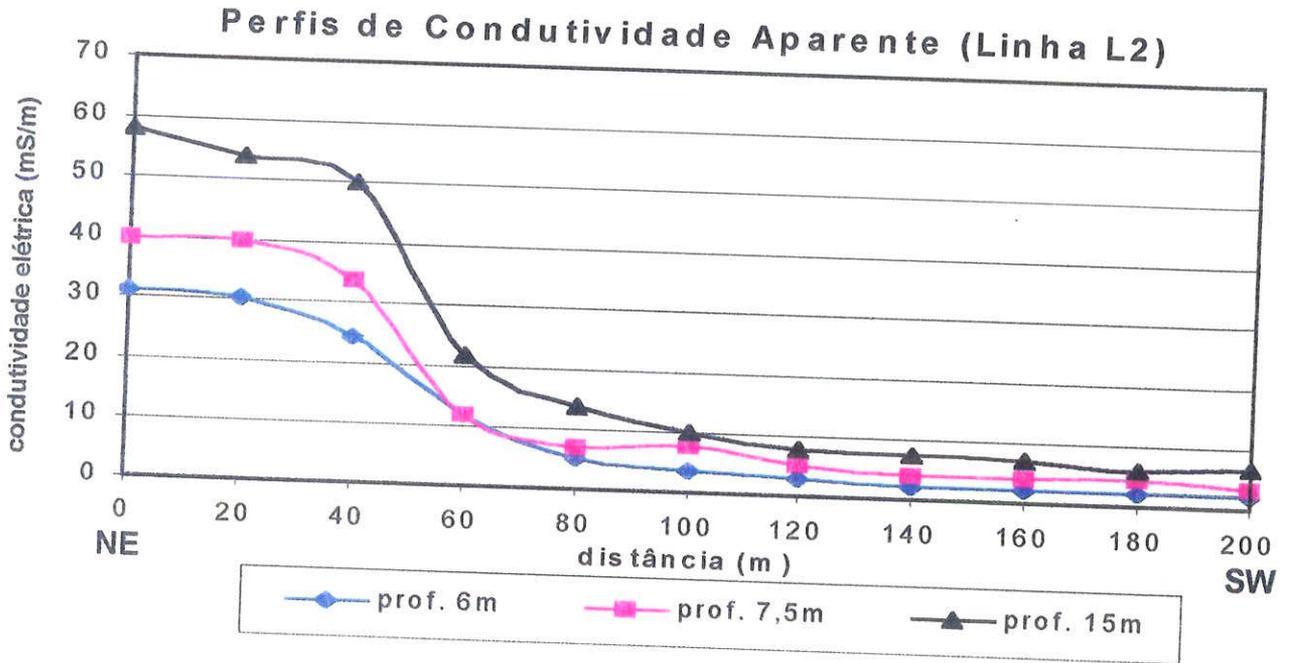


Figura 5.7 . Perfis de condutividade aparente da linha L2 para 6, 7,5 e 15m de profundidade.

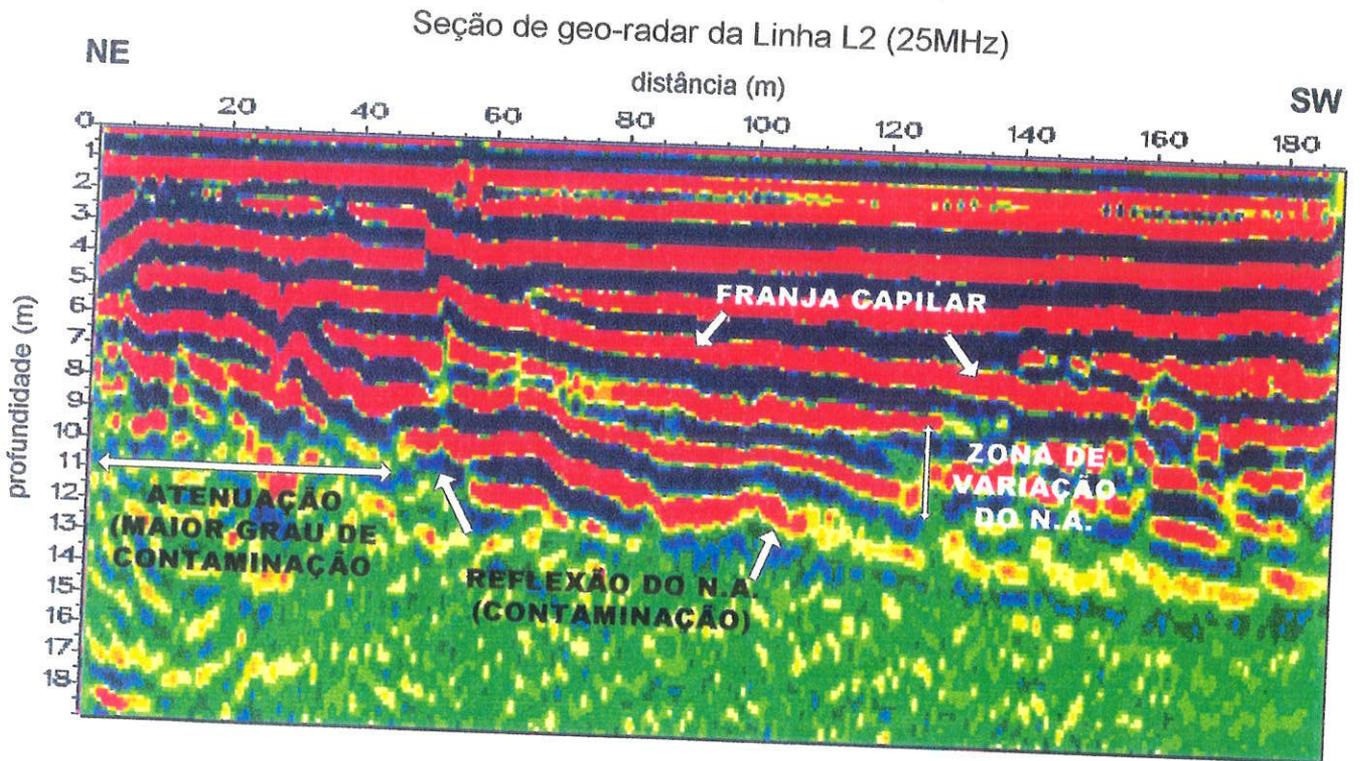


Figura 5.8 . Seção interpretada de geo-radar para linha L2 (frequência de 25MHz).

Seção de geo-radar da Linha L3 (100MHz)

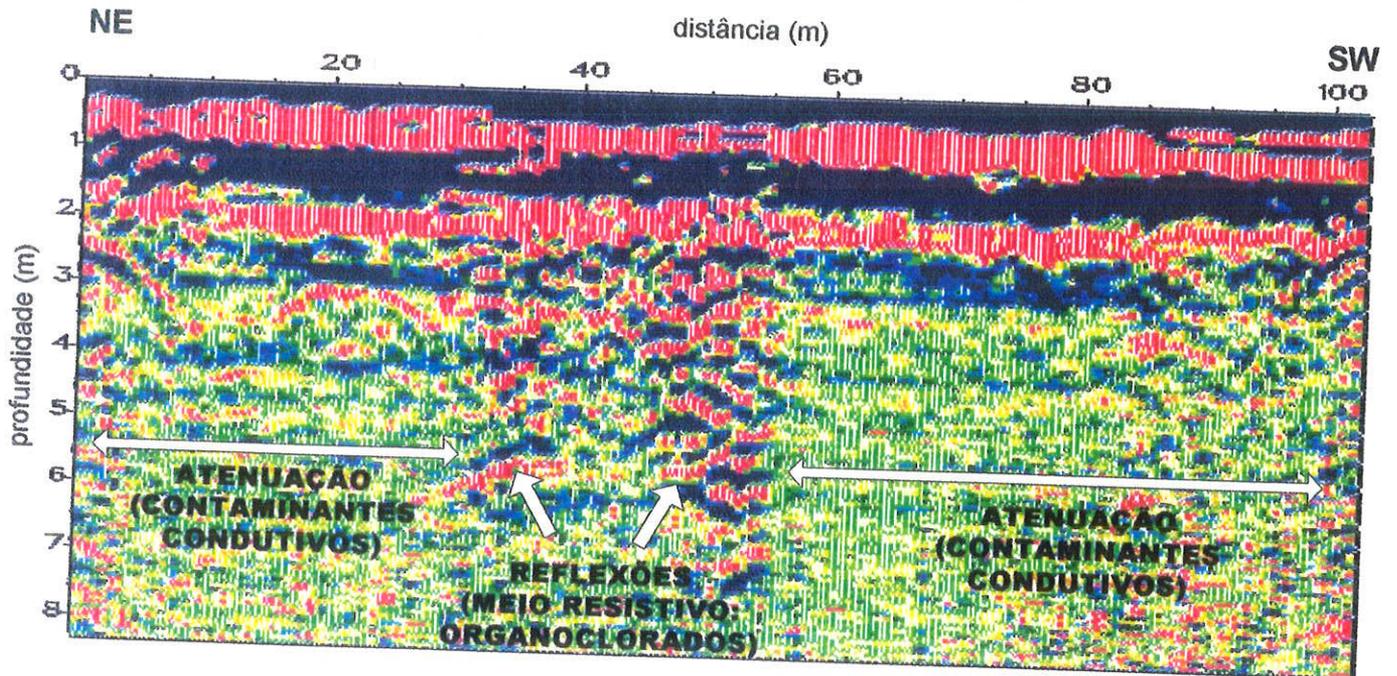


Figura 5.9 . Seção interpretada de geo-radar para linha L3 (frequência de 100MHz).

Seção de geo-radar da Linha L4 (100MHz)

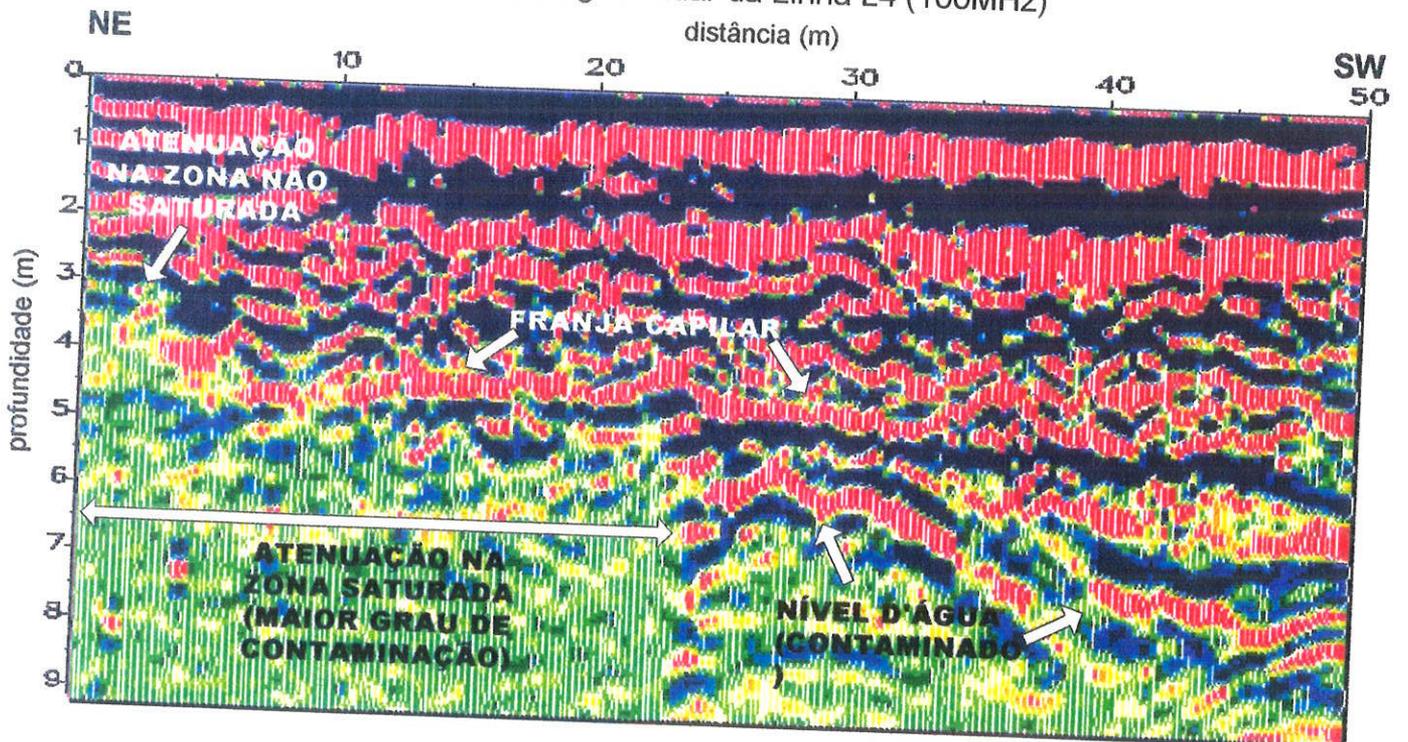


Figura 5.10 . Seção interpretada de geo-radar para linha L4 (frequência de 100MHz).

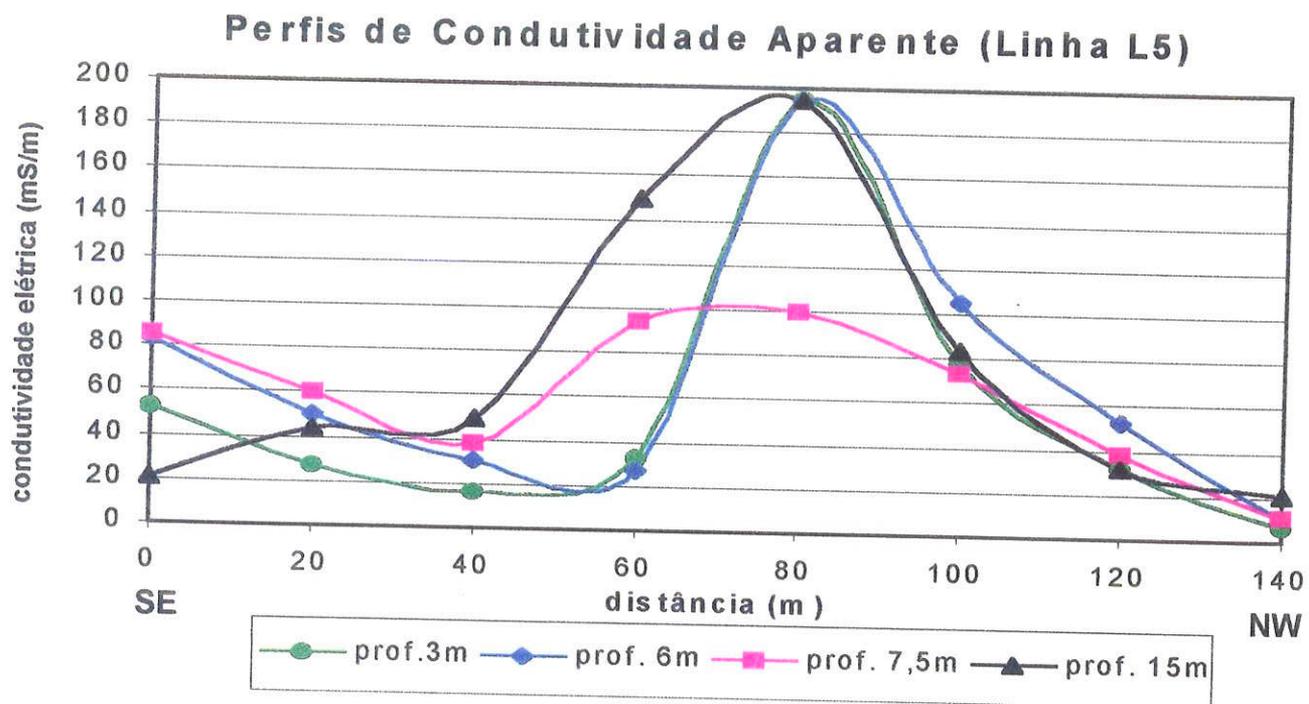


Figura 5.11 . Perfis de condutividade aparente da linha L5 para 3, 6, 7,5 e 15m de profundidade.

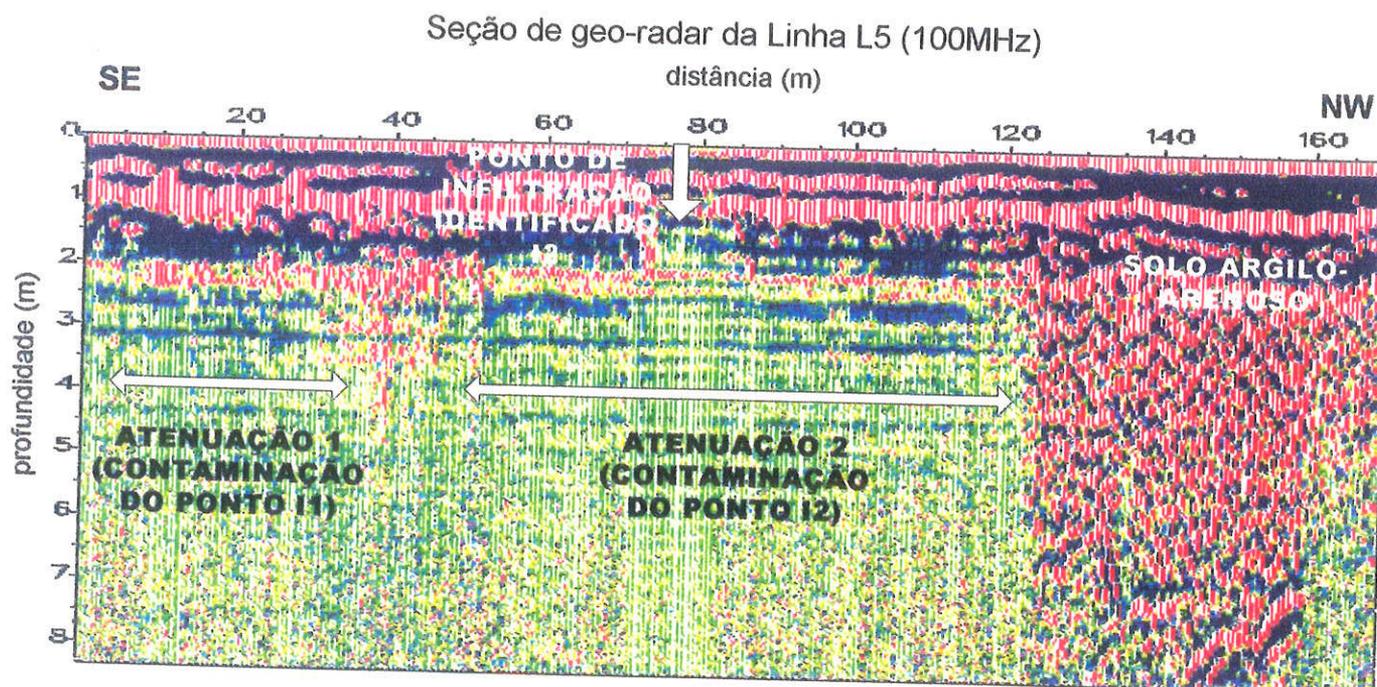


Figura 5.12. Seção interpretada de geo-radar para linha L5 (frequência de 100MHz).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNAN, P. (1992). Ground penetrating radar. Workshop notes. Sensors and Software, Canada, p.80.
- ANNAN, A.P.; COSWAY, S.W. (1994). GPR frequency selection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.747-760.
- ANNAN, A.P.; DAVIS, J.L. (1976) Impulse radar soundings in permafrost. Radio Science, v.11, p.383-394.
- ANNAN, A.P.; BAUMAN, P.; GREENHOUSE, J.P.; REDMAN, J.D. (1991) Geophysics and DNAPLs. In: NATIONAL OUTDOOR ACTION CONFERENCE ON AQUIFER RESTORATION, GROUND WATER MONITORING AND GEOPHYSICAL METHODS, 5, Las Vegas. Proceedings, Las Vegas, p.963-977.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1993) Guide for assessing and remediating petroleum hydrocarbons in soils, Washington, API.
- ANTHONY, S.S. (1992) Electromagnetic methods for mapping freshwater lenses on Micronesian atoll islands. Journal of Hydrology, v.137, p.99-111.
- ANTUNES, B; BASTIANON, D.; BATELLO, E.; PACHECO, A.; PELLIZARI, V.; MENDES, J.M.B. (1998) Contaminação do aquífero livre em cemitérios: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA, 10. São Paulo. Anais, São Paulo, ABAS, CD-ROM, p.8.
- AQUINO W.F, BOTELHO, M.B., GANDOLFO, O.C.B. (1998a) Emprego de geo-radar na detecção de intrusão salina e na identificação de estruturas geológicas em áreas litorâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA, 10. São Paulo. Anais, São Paulo, ABAS, CD-ROM, p.6.
- AQUINO, W.F.; DEHAINI, J.; MENDES, J.M.B (1998b) Geo-radar para a detecção de contaminação por hidrocarboneto. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA, 2, Rio Claro. Resumos, Rio Claro, UNESP, CD-ROM, p.3.

- ARAÚJO, F.F.S. (1997) Uso de GPR e IP-Espectral na avaliação da contaminação industrial numa área do pólo petroquímico de Camaçari. Salvador. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- BARKER, R. D. (1990) Investigation of groundwater salinity by geophysical methods. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. S.H. Ward, ed., SEG, v.2, p.201-211.
- BARBER, W.B.; MOREY, R. (1994) Radar detection of thin layers of hydrocarbon contamination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.1215-1228.
- BENSON, A. K. (1995). Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. Journal of Applied Geophysics. v.33, p.177-193.
- BOIAN, C. (1995) Aplicação geofísica a estudos geoambientais em sedimentos do Grupo Bauru: aterro sanitário de São José do Rio Preto (SP). (Dissertação – Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, p.173.
- BREWSTER, M.L.; ANNAN, A.P. (1994) Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200MHz radar. Geophysics, v.59, n.8, p.1211-1221.
- CARTWRIGHT, K.; SHERMAN, F. (1972) Electrical earth resistivity surveying in landfill investigations. In: ANNUAL ENGINEERING AND SOILS ENGINEERING SYMPOSIUM. Proceedings.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1977) Poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo: estudo preliminar. São Paulo, CETESB, p.88.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1997a). Relatório do levantamento geofísico para diagnóstico da contaminação da indústria Sulfabrás (Araras). São Paulo, CETESB, p.91.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1997b). Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. São Paulo, CETESB, p.48.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1999). Manual de gerencialmente de áreas contaminadas. São Paulo, CETESB, p.372.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Padrões de potabilidade da Portaria 36 do Ministério da Saúde de 19/01/90. Brasília, CONAMA.
- COSTA, A.F.U.; DIAS, N.L.; ZANINI, L.F.; CORREA, O.; (1995) Metodologia geofísica para detecção de contaminação de águas subterrâneas: caso do lixão da Estrada da Palha. A Água em Revista, n.6, p.24-37.
- DANIELS, J.J., ROBERTS, R., VENDL, M. (1995), Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. Journal of Applied Geophysics, v. 33, p.195-207.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. (1989) Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, v. 37, p.531-551.
- DAPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (1977). Mapa geológico do Estado de São Paulo. In: Poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 1977). São Paulo, DAEE. (Escala 1: 3.000.000)
- DAPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (1981) Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 5 - Campinas. São Paulo, DAEE, v.2.
- DAPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (1981) Mapa dos sistemas aquíferos da região administrativa de Campinas. In: Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 5 – Campinas. São Paulo, DAEE.
- DAPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (1982). Mapa geológico do Estado de São Paulo, folha Campinas. São Paulo, DAEE-UNESP. (Escala 1: 250.000)
- DEHAINI, J. (1995) Avaliação da aplicabilidade de métodos geofísicos em estudos de casos de contaminação das águas subterrâneas por diferentes fontes. (Dissertação – Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p.136.

- DOBECKI, T.L.; ROMIG, P.R. (1985) Geotechnical and groundwater geophysics. Geophysics, v.50, n.12, p.2621-2636.
- DOBRIN, M.B. (1982) Introduction to geophysical prospecting. 2ª ed., London, McGraw-Hill, 630p.
- ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.P., MONIER-WILLIAMS, M. (1988) A geofísica no estudo da poluição da água subterrânea. Revista Ambiente, v.2, n.2, p.94-100.
- ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J.M.B.; MARTIN, E. (1990) Mapeamento geofísico do lixão de São Carlos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, Porto Alegre. Anais, Porto Alegre, ABAS, p.82-88.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979) Groundwater. New Jersey, Prentice-Hall, p.604.
- FISHER, S.C.; STEWART, R.R.; JOL, H.M. (1994) Processing ground penetrating radar data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.661-675.
- GLACCUM, R.A.; BENSON, R.C.; NOEL, M.R. (1982) Improving accuracy and cost-effectiveness of hazardous waste site investigations. Ground Water Monitoring Review, summer, p.36-40.
- GEONICS (1990) Manual de instrução de operação do condutivímetro de solo EM34-3 e EM34-3XL. Mississauga, Geonics Ltd, p.13.
- GEONICS (1992) Manual de instrução de operação do condutivímetro de solo EM31. Mississauga, Geonics Ltd, p.61.
- GOLDEN SOFTWARE (1995) Manual do usuário do programa SURFER (Win 32), versão 6.01. Golden, Golden Software Inc.
- GOLDESTINEIN, N.E.; BENSON, S.M.; ALUMBAUGH, D. (1990) Saline groundwater plume mapping with electromagnetics. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. S.H. Ward, ed., SEG, v.2, p.17-25.

- GOLDMAN, M.; GILAD, D.; RONEN, A.; MELLOUL, A. (1991) Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. Geoexploration, v.28, p.153-174.
- GRAZINOLI, P. L.; AQUINO, W. F.; VARGAS JR., E. A. ; CAMPOS, T. M. (1999) Applications of ground penetrating radar (GPR) and resistivity surveys in the detection of organic contaminants in the subsoil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 6. Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro, SBGf, CD-ROM, p.2.
- GREENHOUSE, J. P., HARRIS, R. D. (1983) Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 7: DC, VLF and inductive resistivity survey. Journal of Hydrology, n. 63, p.177-197.
- GREENHOUSE, J.P.; SLAINE, D.D. (1986) Geophysical modelling and mapping of contaminated groundwater around three waste disposal sites in southern Ontario. Canadian Geotechnical Journal, v.23, p.372-384.
- GREENHOUSE, J.P.; BREWSTER, M.; SCHNEIDER, G.W.; REDMAN, D.; ANNAN, A.P.; OLHOEFT, G.R.; LUCIUS, J.; SANDER, K.; MAZZELLA, A. (1993) Geophysics and solvents: The Borden experiment. The Leading Edge, v.12, p.261-267.
- GRETSKY, P.; BARBOUR, R.; ASIMENIOS, G.S. (1990). Geophysics, pit surveys reduce uncertainty. Pollution Engineering, June, p.102-108.
- HAGEMEYER, R.T.; STEWART, M. (1990) Resistivity investigation of salt-water intrusion near a major sea-level canal. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. S.H. Ward, ed., SEG, v.2, p.67-77.
- HÄNNINEN, P. (1997) Dielectric coefficient surveying for overburden classification. Espoo, Geological Survey of Finland, p.72. (Bulletin 396)
- HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. (1974) Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. Journal of Geophysical Research, v.79, n.11, p.1699-1708.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICA (1981) Mapa geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, IPT, v.2, p.126.

- IAKUBOVSKII, I. V., LIAJOV, L. L. (1980) Exploración Eléctrica. Barcelona, Reverté, p.421.
- INTERPEX (1998). Manual do usuário do programa EMIX 34, versão 3. Colorado, Interpex Ltd, p.51.
- JEWELL, C.M.; HENSLEY, P.J.; BARRY, D.A.; ACWORTH, I. (1993) Site investigation and monitoring techniques for contaminated sites and potential waste disposal sites. In: Geotechnical Management of Waste and Contamination. Rotterdam; Fell, Phillips & Gerard, ed., p.33.
- JOL, H.M. (1995) Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity. Geophysical Prospecting, v.43, p.693-709.
- JOSÉ. C. (1997) Metodologias geofísicas para o mapeamento e monitoramento de áreas de rejeitos urbanos e industriais. In: Indicadores Ambientais. Sorocaba, Maia & Martos, ed., p.223-232.
- KELLER, G.V.; FRICKNECHT, F.C. (1977) Electrical methods in geophysical prospecting. London, Pergamon Press, p.519.
- LANDIM, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo, Universidade Estadual Paulista, p.137-218.
- LANZ, E.; JEMMI, L.; MÜLLER, R.; GREEN, A.; PUGIN, A.; HUGGENBERGER, P. (1994) Integrated studies of swiss waste disposal sites: results from georadar and other geophysical surveys. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.1261-1274.
- LAWTON, D.C.; JOL, H.M.; SMITH, D.G. (1994) Ground penetrating radar surveys for near-surface characterization: example from the Canada creosoto site, Calgary. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.1275-1282.
- MALÃ GEOSCIENCE (1996) Manual do programa de processamento de dados RADPRO, versão 2.25. Malã, Malã Geoscience. p.52

- MALÄ GEOSCIENCE (1997) Manual do programa de aquisição de dados do equipamento RAMAC/GPR, versão 2.28. , Malä, Malä Geoscience. p.84.
- MATIAS, M.S.; SILVA, M.M.; FERREIRA, P.; RAMALHO, E. (1994) A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. Journal Applied Geophysics, v.32, p.155-162.
- MCNEILL, J. D. (1980a) Electrical conductivity of soils and rocks. Missauga, Geonics, p.22. (Technical note TN-5)
- MCNEILL, J.D. (1980b) Eletromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Mississauga, Geonics, (Canada), p.15. (Technical note TN-6)
- MCNEILL, J.D. (1990) Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. S.H. Ward, ed., SEG, v.1, p.191-218.
- MCQUOWN, M.S.; BECKER, S.R.; MILLER, P.T. (1991) Subsurface characterization of a landfill using integrated geophysical techniques . In: NATIONAL OUTDOOR ACTION CONFERENCE ON AQUIFER RESTORATION, GROUND WATER MONITORING AND GEOPHYSICAL METHODS, 5, Las Vegas. Proceedings, Las Vegas, p.933-946.
- MENDES, J.M.B.; HASSUDA, S (1986) A geofísica aplicada na identificação da poluição do subsolo por depósito de rejeitos urbanos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília. Anais, Brasília, ABAS, p.528-532.
- MENDES, J.M.B. (1987) Técnicas geofísicas aplicadas ao mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas. (Tese – Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p.196.
- MENDES, J.M.B.; PACHECO, A. ; HASSUDA, S. (1989a) Cemitérios e meio ambiente-a geofísica como método auxiliar na avaliação de sua influência nas águas subterrâneas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 2, Florianópolis. Anais, Florianópolis, UFSC, v.1, p.50-57.
- MENDES, J.M.B.; IRITANI, M.A.; YOSHINAGA, S.; HASSUDA, S. (1989b) Aplicação de métodos geofísicos nos estudo e controle da contaminação de aquíferos costeiros. In:

- ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 2, Florianópolis. Anais, Florianópolis, UFSC, v.1, p.295-302.
- MILLS, T.; HOEKSTRA, P.; BLOHM, M.; EVANS, L. (1988) Time domain eletromagnetic soundings for mapping sea-water intrusion in Monterey County, California. *Ground Water*, v.26, n.6, p.771-782.
- MILSOM, J. (1989) Field geophysics. London, Geological Society of London Handbook, 1ª ed., p.107-122.
- MONIER-WILLIAMS, M.E.; GREENHOUSE, J.P.; MENDES, J.M.; ELLERT, N. (1990) Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. S.H. Ward, ed., SEG, v.2, p.41-55.
- MOREY, R.M. (1974) Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE ON SUBSURFACE EXPLORATION FOR UNDERGROUND EXCAVATION AND HEAVY CONSTRUCTION, Henniker. Proceedings, Henniker, American Society of Civil Engineers, p.213-232.
- NABIGHIAN, M.N., ed. (1991) Electromagnetic methods in applied geophysics. Society of Exploration Geophysicists (SEG), v.2.
- NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S.; PIRES, A.C.B. (1998) Análise geofísica, por meio de GPR, do espalhamento de efluente de fossa séptica no subsolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEA, 10. São Paulo. Anais, São Paulo, ABAS, CD-ROM, p.9.
- NOBES, D.C.; ARMSTRONG, M.J.; BROADBENT, M. (1994) Delineation of a landfill leachate plume using shallow electromagnetic and ground penetrating radar surveys. In: ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS. Expanded Abstracts, p.566-568.
- NOBES, D.C. (1996) Troubled waters: environmental applications of electrical and eletromagnetic methods. Surveys in Geophysics, v.17, p.393-454.

- OLHOEFT, G.R. (1996) Application of ground penetrating radar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 6, Sendai. Proceedings, Sendai, p.1-3.
- OLHOEFT, G.R. (1998) Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 7, Lawrence. Proceedings, Lawrence, CD-ROM, p.6.
- PARASNIS, D.S. (1970) Principios de geofísica aplicada. Madrid, Paraninfo, p.208.
- PARASNIS, D. S. (1997) Principles of applied geophysics, 5ª ed. London, Chapman & Hall.
- PIPAN, M.; FINETTI, I.; FERIGO, F. (1996). Multi-fold GPR techniques with applications to high-resolution studies: two cases histories. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v.1, p.83-103.
- REDMAN, J.D., D^o RYCK, S.M.; ANNAN, A.P. (1994). Detection of LNAPL pools with GPR: theoretical modelling and surveys of a controlled spill. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener p.1283-1294.
- ROBILLARD, C.; NICOLAS, P.; ARMIRAT, P.; GARIEPY, M.; GOUPIL, F. (1994) Shallow bedrock profiling using GPR. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p.1167-1179.
- RODRIGUES, A.R.; APPI, C.J. (1996) O processo de investigação de ferramentas geofísicas para o monitoramento ambiental no âmbito CENPES-PETROBRAS. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE, 1, Belém. Resumos, Belém, SBGf, p.51-55.
- SAUCK, W.A., ATEKWANA, E.A., NASH, M.S. (1998) High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v.2, n.3, p.203-212.
- SCHUTTS, L.D.; NICHOLS, D.G. (1991) Surface geophysical definition of ground water contamination and buried waste: case studies of electrical conductivity and magnetic applications. In: NATIONAL OUTDOOR ACTION CONFERENCE ON AQUIFER

- RESTORATION, GROUND WATER MONITORING AND GEOPHYSICAL METHODS, 5, Las Vegas. Proceedings, Las Vegas, p.889-903.
- SHARMA, P.V. (1986) Geophysical methods in geology. 2^a ed. Amsterdam, Elsevier, p.303-330.
- SOLDAL, O; MAURING, E; HALVVORSEN, E; RYE, N. (1994) Seawater intrusion and fresh groundwater hydraulics in fjord delta aquifers inferred from ground penetrating radar and resistivity profiles-Sunndalsora and Esebotn, western Norway. Journal of Applied Geophysics, v.32, p.305-319.
- STEWART, R.D.; UNTERBERGER, R.R. (1976) Seeing through rock salt with radar. Geophysics, v.41, p.123-132.
- STEWART, M.T. (1982) Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers. Ground Water, v.20, n.5, p.538-545.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. (1986) Applied geophysics. Cambridge, University of Cambridge, p.860.
- THIERBACH, R. (1994) Twenty years of ground-probing radar in salt and potash mines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 5, Kitchener. Proceedings, Kitchener, p. 957-979.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines: Water Resources Research, v.16, n.3, p.574-582.
- ULRIKSEN, C.P.F. (1982) Application of impulse radar to civil engineering. (Doctoral – Thesis) Lund University of Technology, p.179.
- URISH, D.W. (1983) The practical application of surface electrical resistivity to detection of ground-water pollution. Ground Water, v. 21, n.2, p.144-152.

- VAN DAM, J.C., (1976) Possibilities and limitations of the resistivity method of geoelectrical prospecting in the solution of geo-hydrological problems. Geoexploration, v.14, p.179-193.
- VON HIPPEL, A.R. (1954) Dielectric materials and applications. Cambridge, MIT Press, p.314.
- WARD, S.H., ed. (1990) Geotechnical and environmental geophysics. Society of Exploration Geophysicists (SEG), v.3.