UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TÉCNICAS GEOFÍSICAS APLICADAS NO MAPEAMENTO
E MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO
DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

José Milton Benetti Mendes

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo
1987

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TÉCNICAS GEOFÍSICAS APLICADAS NO MAPEAMENTO
E MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO
DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

José Milton Benetti Mendes

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. N. Ellert	<i>N. Ellert</i>
Examinadores:	Dr. A. C. Rebouças	<i>A. C. Rebouças</i>
	Dr. C. C. A. e Silva	<i>C. C. A. e Silva</i>
	Dr. A. Pacheco	<i>A. Pacheco</i>
	Dr ^a M. S. M. Mantovanni	<i>M. S. M. Mantovanni</i>

São Paulo
1987

SUMARIO

I

	PG
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE QUADROS	IX
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 - INTRODUÇÃO	3
1.1 - <u>HISTÓRICO</u>	4
1.2 - <u>OBJETIVOS</u>	12
1.3 - <u>LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO</u>	14
1.4 - <u>AGRADECIMENTOS</u>	17
2 - METODOS GEOFISICOS APLICADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	19
2.1 - <u>ELETORRESISTIVIDADE</u>	20
2.1.1 - SONDAGEM ELÉTRICA	20
2.1.2 - CAMINHAMENTO ELÉTRICO	21
2.1.3 - PERFILAGEM ELÉTRICA	22
2.2 - <u>ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO</u>	23
2.2.1 - SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA	24
2.2.2 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO	24
2.2.3 - PERFILAGEM ELETROMAGNÉTICA	25
2.3 - <u>EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</u>	25
2.3.1 - ELETORRESISTIVIDADE	25
2.3.2 - ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO	26

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005192

3	-	ANTECEDENTES E EXEMPLOS BRASILEIROS.....	27
3.1	-	<u>ATERROS SANITÁRIOS</u>	27
3.1.1	-	ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ	29
3.1.2	-	ATERRO SANITÁRIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS..	43
3.1.3	-	ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE	52
3.2	-	<u>ÁREAS DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA</u>	64
3.2.1	-	NOVO HORIZONTE	66
3.2.2	-	RIBEIRÃO PRETO	77
4	-	MAPEAMENTO DE AREA CONTAMINADA: REGIAO LITORANEA.	86
4.1	-	<u>LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA ÁREA DE ESTUDO</u>	87
4.2	-	<u>GEOLOGIA</u>	89
4.3	-	<u>LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS E PONTOS INVESTIGADOS</u>	92
4.4	-	<u>INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS</u>	93
4.5	-	<u>ANÁLISE DOS DADOS</u>	103
4.5.1	-	SONDAGENS ELÉTRICAS	104
4.5.2	-	SONDAGENS ELETROMAGNÉTICAS	104
4.5.3	-	CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO	125
5	-	MAPEAMENTO E MONITORAMENTO DETALHADO DE UMA AREA INDUSTRIAL COM PROBLEMAS DE POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO	140
5.1	-	<u>GEOLOGIA</u>	141
5.2	-	<u>LEVANTAMENTO GEOFÍSICO</u>	143
5.3	-	<u>METODOLOGIA EMPREGADA</u>	153

5.3.1 - AMPLIAÇÃO DA REDE DE POÇOS	153
5.3.2 - MONITORAMENTO	158
5.3.3 - PERMEABILIDADE "IN SITU"	158
5.3.4 - PERFILAGEM ELÉTRICA	160
5.3.5 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO	160
5.3.6 - INSTALAÇÃO DE CÁPSULAS POROSAS	163
5.4 - <u>ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS</u>	163
5.4.1 - SETOR GLIPHOSATE	166
5.4.2 - SETOR P_2O_5	166
5.4.3 - SETOR DAS LAGOAS	175
5.5 - <u>CONSIDERAÇÕES GERAIS</u>	180
6 - CONCLUSOES	181
7 - BIBLIOGRAFIA	186

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	1 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DO ESTADO DE SÃO PAULO, COM A LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	15
--------	---	----

ATERRO SANITARIO DE TAUBATE

FIGURA	2 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
FIGURA	3 - PLANTA DE LOCAÇÃO DAS SONDAGENS E CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS	32
FIGURA	4 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	33
FIGURA	5 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	34
FIGURA	6 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	36
FIGURA	7 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	37
FIGURA	8 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	38
FIGURA	9 - PLANTA DE LOCAÇÃO DOS POÇOS E PIEZÔMETROS .	40
FIGURA	10 - MAPA DE ISOCONDUTIVIDADE DA ÁGUA	41
FIGURA	11 - CORRELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE DA ÁGUA DOS POÇOS DE OBSERVAÇÃO E DOS SEDIMENTOS.	42

ATERRO SANITARIO DE SAO JOSE DOS CAMPOS

FIGURA	12 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
FIGURA	13 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS, CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS E PIEZÔMETROS...	46
FIGURA	14 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	47
FIGURA	15 - PERFIL DE RESISTIVIDADE APARENTE	48
FIGURA	16 - PERFIL DE RESISTIVIDADE APARENTE	49
FIGURA	17 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	51

ATERRO SANITARIO DE NOVO HORIZONTE

FIGURA	18 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	54
FIGURA	19 - PLANTA DE LOCAÇÃO DAS SONDAGENS E CAMINHAMENTO ELÉTRICOS	55

FIGURA	20 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	57
FIGURA	21 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	58
FIGURA	22 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	59
FIGURA	23 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	61
FIGURA	24 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	62
FIGURA	25 - PLANTA COM O CONTOURO DA ÁREA POLUÍDA E LOCALIZAÇÃO DOS PIEZÔMETROS E PIEZÔ METROS MULTINÍVEIS	63

AREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE NOVO HORIZONTE

FIGURA	26 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	67
FIGURA	27 - PLANTA DE LOCAÇÃO DAS SONDAGENS E CAMI NHAMENTOS ELÉTRICOS	69
FIGURA	28 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	71
FIGURA	29 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE	72
FIGURA	30 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	74
FIGURA	31 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	75
FIGURA	32 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE	76
FIGURA	33 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO/EM31-V	78
FIGURA	34 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO/EM34-20-H..	79

AREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE RIBEIRAO PRETO

FIGURA	35 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	81
FIGURA	36 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO (MAIO-86)..	84
FIGURA	37 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO (SETEMBRO-86)	85

REGIAO LITORANEA

FIGURA	38 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DA REGIÃO LITORÂNEA COM A LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	90
FIGURA	39 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL I ...	94
FIGURA	40 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL II ..	95
FIGURA	41 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL III..	96
FIGURA	42 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL IV ..	97

FIGURA	43 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL V ...	98
FIGURA	44 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL VI ..	99
FIGURA	45 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE/SE-1 ...	105
FIGURA	46 - INTERPRETAÇÃO DA SE-1	106
FIGURA	47 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE/SE-2 ...	107
FIGURA	48 - INTERPRETAÇÃO DA SE-2	108
FIGURA	49 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE/SE-3 ...	109
FIGURA	50 - INTERPRETAÇÃO DA SE-3	110
FIGURA	51 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE/SE-7 ...	111
FIGURA	52 - INTERPRETAÇÃO DA SE-7	112
FIGURA	53 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE/SE-8 ...	113
FIGURA	54 - INTERPRETAÇÃO DA SE-8	114
FIGURA	55 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM).	116
FIGURA	56 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	117
FIGURA	57 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	118
FIGURA	58 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	119
FIGURA	59 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	120
FIGURA	60 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	121
FIGURA	61 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	122
FIGURA	62 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	123
FIGURA	63 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDA- ELÉTRICA (SER) E ELETROMAGNÉTICA (SEM)..	124
FIGURA	64 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	126
FIGURA	65 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	127
FIGURA	66 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	128
FIGURA	67 - PERIFS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	129
FIGURA	68 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	131

FIGURA	69 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	132
FIGURA	70 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	134
FIGURA	71 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE	135
FIGURA	72 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE (CAMI NHAMENTO ELÉTRICO)	136
FIGURA	73 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE (CAMI NHAMENTO ELÉTRICO)	137
FIGURA	74 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE (CAMI NHAMENTO ELÉTRICO)	138
FIGURA	75 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE (CAMI NHAMENTO ELÉTRICO)	139

AREA INDUSTRIAL

FIGURA	76 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DA BACIA SE DIMENTAR DE TAUBATÉ	142
FIGURA	77 - PERFIS DOS POÇOS EXISTENTES NA ÁREA IN DUSTRIAL	144
FIGURA	78 - PLANTA DA ÁREA INDUSTRIAL COM A LOCALI ZAÇÃO DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO	145
FIGURA	79 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	147
FIGURA	80 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	148
FIGURA	81 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	149
FIGURA	82 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	150
FIGURA	83 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	151
FIGURA	84 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	152
FIGURA	85 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	154
FIGURA	86 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	155
FIGURA	87 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	156
FIGURA	88 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO	157
FIGURA	89 - PERFILAGEM ELÉTRICA	161
FIGURA	90 - PERFILAGEM ELÉTRICA	162
FIGURA	91 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO	164
FIGURA	92 - PLANTA DA ÁREA INDUSTRIAL COM A LOCALI ZAÇÃO DOS POÇOS E SETORES DE MONITORA MENTO	165

FIGURA	93 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	167
FIGURA	94 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	168
FIGURA	95 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	169
FIGURA	96 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	170
FIGURA	97 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	171
FIGURA	98 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	172
FIGURA	99 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	173
FIGURA	100 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	174
FIGURA	101 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	176
FIGURA	102 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	177
FIGURA	103 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	178
FIGURA	104 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POÇOS	179

LISTA DE QUADROS

ATERRO SANITARIO DE TAUBATE

QUADRO I	- DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉ TRICAS	35
----------	--	----

ATERRO SANITARIO DE SAO JOSE DOS CAMPOS

QUADRO II	- DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELE TRICAS	47
-----------	--	----

ATERRO SANITARIO DE NOVO HORIZONTE

QUADRO III	- DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉ TRICAS	60
------------	--	----

AREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE NOVO HORIZONTE

QUADRO IV	- DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉ TRICAS	73
-----------	--	----

REGIAO LITORANEA

QUADRO V	- CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA COM BASE NA CONCEN TRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS	88
QUADRO VI	- DADOS DOS PERFIS INVESTIGADOS	100
QUADRO VII	- LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS	101

AREA INDUSTRIAL

QUADRO VIII	- DADOS DOS POÇOS	159
-------------	-------------------------	-----

RESUMO

Neste trabalho estão descritas as técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas, especificamente nos casos de aterros sanitários, áreas de infiltração de vinhaça, intrusão de água salgada em aquíferos costeiros e áreas com problemas de infiltração e vazamento de produtos e efluentes industriais. No caso de regiões costeiras procurou-se desenvolver um padrão de investigação que pudesse ser aplicado junto às pequenas e médias concentrações urbanas de modo a prevenir e controlar a intrusão marinha nos aquíferos costeiros, através apenas da aplicação de métodos geofísicos. Do mesmo modo, procurou-se estabelecer um roteiro para a aplicação de técnicas geofísicas de mapeamento e monitoramento de áreas industriais com problemas de poluição e contaminação.

As áreas estudadas estão distribuídas pelo Estado de São Paulo, representando situações bastante diversificadas num contexto geográfico e geológico mais amplo. Os aterros sanitários estudados estão localizados nos municípios de Taubaté, São José dos Campos e Novo Horizonte e as áreas de infiltração de vinhaça, em Novo Horizonte e Ribeirão Preto. A região litorânea enfocada no estudo está situada no litoral norte paulista entre Bertioga e São Sebastião, e a área industrial poluída em São José dos Campos.

No presente trabalho é feito ainda um estudo comparativo entre as duas metodologias empregadas, eletrorresistividade e eletromagnético indutivo, consideradas as mais adequadas para o estudo de poluição subterrânea, ressaltando-se as vantagens e desvantagens de cada uma objetivando otimizar sua aplicação conjunta.

ABSTRACT

This thesis describes geophysical techniques applied to the mapping and monitoring of ground water pollution and contamination, specifically for cases involving sanitary landfills, areas of vinasse infiltration, salt water intrusion into coastal aquifers, and areas with problems of infiltration and leakage of industrial products and residues. For coastal regions, investigative norms have been established that may be applied to both small and medium urban centers in order to control and prevent marine intrusion into coastal aquifers by applying geophysical methods only. Similarly, a routine for the application of geophysical techniques of mapping and monitoring industrial areas with pollution and contamination problems has also been developed.

The areas studied are distributed throughout the State of São Paulo and thus represent diverse situations within a broad geographic and geologic context. Sanitary landfills were studied in the Municipalities of Taubaté, São José dos Campos and Novo Horizonte, and areas of vinasse infiltration in Novo Horizonte and Ribeirão Preto. The coastal region focussed upon in this study is located between Bertioga and São Sebastião, and the polluted industrial area in São José dos Campos.

Also included in this thesis is a comparative study of the two methodologies, conventional resistivity and electromagnetic inductive techniques, considered the most appropriate for the study of ground water pollution, with emphasis on the advantages and disadvantages of each in order to optimize their joint application.

1 - INTRODUÇÃO

A civilização humana, através da herança e aprendizado de conhecimentos adquiridos, sempre teve como objetivo primordial, proporcionar ao Homem maiores e melhores condições de sobrevivência, tendo para tanto que sobrepujar os perigos existentes ao seu redor, procurando melhorar a condição existente no meio ambiente, de forma que sua vida fosse facilitada e prolongada.

O lento avanço tecnológico e sanitário foi a resposta obtida que se refletiu no aumento da expectativa de vida em todos os países. A industrialização desordenada e o alto crescimento demográfico obrigaram o Homem a aproveitar os espaços físicos disponíveis sem obedecer critérios básicos de ocupação.

Modificando radicalmente as condições de equilíbrio existentes no meio-ambiente, o ser humano voltou a se fragilizar diante da natureza novamente hostil, desta vez por obra dele mesmo, chegando a extremos com consequências totalmente imprevisíveis, como os desastres ecológicos de mercúrio na água (Japão), as condições de vida em Cubatão (Brasil), ou Chernobil (URSS).

A poluição da água subterrânea constitui atualmente uma das grandes preocupações mundiais com relação à preservação do meio-ambiente em função de sua importância estratégica como matéria-prima a todas as atividades desenvolvidas pelo Homem. Importantes e detalhados estudos vem sendo feitos, a nível global, sobre os problemas que poderiam ser causados caso esse manancial fosse atingido. Embora tardiamente, todos os países tentam achar soluções, criando leis e normas para proteção e prevenção deste bem que pode garantir a preservação da vida humana no planeta.

A água subterrânea representará em futuro muito breve, a principal fonte de abastecimento tanto para o consumo humano como para o aproveitamento industrial.

De modo simplista, pode-se afirmar que esta reserva mineral está protegida da poluição superficial e atmosférica pela zona não-saturada. No entanto, através de infiltração provocada, esta zona pode ser atingida por agentes poluentes, tornando-se, deste modo, uma fonte potencial de poluição.

Por outro lado, a contaminação da água doce pela intrusão da água salgada marinha, tem se constituído num problema de difícil solução no abastecimento de água potável em regiões costeiras.

Como resultado dos antigos meios de transporte somados à forte atração que o mar exerce sobre o Homem, atualmente cerca de 70% da população mundial está fixada em torno de regiões litorâneas. Como se isso não bastasse, grande parte dos que não vivem próximo ao litoral, dele se utiliza para passar as férias ou mesmo finais de semana, aumentando consideravelmente a população flutuante que, nessas ocasiões, passa a depender da infra-estrutura oferecida, em caráter muitas vezes precário, pelas cidades litorâneas. Essa deficiência de serviços é representada principalmente, entre outros fatores, pela escassez de água potável.

1.1 - HISTÓRICO

Entende-se por poluição de águas subterrâneas, a alteração de suas qualidades, porém a níveis que não ultrapassem os limites máximos permissíveis, fixados pelos padrões internacionais para as águas potáveis, de uso industrial ou agrícola, pela adição de substâncias naturais ou artificiais, direta ou indiretamente no aquífero. Quando a alteração de suas qualidades ultrapassa esses limites referidos, acarretando prejuízos à sua utilização, o termo empregado é "contaminação de águas subterrâneas".

De modo geral, o problema da contaminação de aquíferos costeiros por água do mar é conhecido desde a antiguidade, e sem o respaldo de um conhecimento científico de suas causas,

passou a ser resolvido, empiricamente, mediante a construção de sistemas de captação pouco profundos.

Segundo Kashef (in Custodio e Llamas, 1976) a primeira abordagem científica sobre o assunto remonta a 1855 quando Braithwaite descreveu o aumento crescente de salinidade nas águas bombeadas nas cidades de Londres e Liverpool, na Grã Bretanha.

Os estudos que estabeleceram as primeiras relações quantitativas entre a água doce e água salgada datam do final do século passado e foram realizados por Ghyben e Herzberg (in Custodio e Llamas, 1976). Trabalhando independentemente na costa da Holanda e da Alemanha, esses autores observaram que havia uma estreita relação entre profundidade da interface e posição do nível freático com relação ao nível do mar, definindo a conhecida "Relação de Ghyben-Herzberg".

Hubbert (1940) contribuiu significativamente para o entendimento de modelos hidráulicos nas áreas costeiras através dos resultados de seus estudos constantes na publicação "The theory of groundwater motion".

A questão da relação água doce-água salgada é enfocada detalhadamente e sob os mais diversos ângulos ainda por Todd & McNulty (1976), Bear (1979), Aucott & Speiran (1985), Gupta (1985) e outros mais.

No Brasil diversos autores se preocuparam com o problema, podendo ser destacados dentre eles, os trabalhos de Gimena et al. (1977 e 1981), Leão (1980), Santos (1984), Araujo et al. (1984) e Cabral (1986).

O estudo das características dos aquíferos costeiros através de métodos geofísicos é mais recente, e na maioria das vezes, resume-se em determinar a profundidade da interface água doce-água salgada. Na literatura internacional existem citações de 1955.

No Brasil, Ellert (1968) executou uma série de sondagens elétricas em sedimentos recentes da Baixada Santista visando determinar o relevo da superfície do embasamento subjacente. Caracterizou ainda a granulometria desses sedimentos e detectou grande variação na resistividade apresentada por esta litologia quando medida durante as marés alta e baixa. No mesmo trabalho o autor cita Kollert que, em 1963, em relatório feito ao Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo procura correlacionar os valores de resistividade às características dos sedimentos em Iguape-SP, no que teria sido o primeiro trabalho do gênero no Brasil.

Davino (1978) utilizando o método da eletrorresistividade consegue determinar as espessuras dos estratos geológicos com a finalidade de prospecção das águas subterrâneas e estudo da qualidade dessas águas quanto ao grau de salinidade, em Cabo-PE e Cabedelo-PB, em estudo visando o melhor aproveitamento dos aquíferos.

O mesmo autor, em 1980, consegue determinar as interfaces água doce-água salobra-água salgada, e a profundidade do embasamento cristalino, numa seção transversal executada na Ilha Comprida, em São Paulo, a partir de diversas sondagens elétricas.

Kobayashi & Rijs (1980) e Porsani et al. (1980) empregaram, com sucesso, os métodos elétricos no primeiro caso, e elétricos e eletromagnéticos no segundo, visando racionalizar o abastecimento com água potável em núcleos habitacionais da Ilha de Marajó.

Mais recentemente, Silva (1984) e Munis & Moraes (1984) executaram campanhas geofísicas nas regiões de Icapara - Iguape-SP, e na Praia do Futuro-Fortaleza/CE, respectivamente, visando estudar o comportamento da interface água-doce - água salgada a fim de adequar o abastecimento à captação de água de boa qualidade.

Numerosos trabalhos utilizando métodos geofísicos têm sido executados por empresas de prestação de serviços, principalmente para loteamentos de áreas particulares e, secundariamente, para órgãos governamentais, sempre com o objetivo de determinar a profundidade da interface, visando o abastecimento d'água de boa qualidade para consumo.

A poluição das águas subterrâneas é um problema que vem ocorrendo desde os primórdios da civilização, tendo aumentado, em progressão geométrica, o número de casos, a variedade de tipos de agentes poluentes, bem como a intensidade da poluição. Poderíamos dizer que, dos casos mais simples, como aqueles decorrentes de atividades fisiológicas do Homem, a poluição das águas subterrâneas evoluiu mais recentemente, para a contaminação devido a deposição no solo de resíduos sólidos ou líquidos, decorrentes de atividades domésticas, hospitalares, agrícolas, industriais de uma maneira geral, e particularmente, lixo atômico.

A grande maioria dos casos registrados na literatura mundial datam das últimas décadas, porém as causas podem remontar a um passado mais distante.

Vale lembrar que, ao contrário do que ocorre com as águas superficiais, a contaminação das águas subterrâneas é praticamente irreversível a curto e médio prazos, visto que as técnicas de descontaminação são muito complexas, onerosas e demoradas.

Rebouças (1987), citando outros autores, menciona que depósitos de lixo da época do Império Romano ainda estão produzindo percolantes, atualmente, tendo sido identificados cerca de 40 compostos orgânicos nas águas subterrâneas provenientes de aterros sanitários da época.

No mesmo trabalho, para explicar algumas alterações na qualidade da água por influências diretas, o autor cita que "no vale do São Joaquim, na Califórnia, há exemplos de elementos químicos, componentes de pesticidas que só foram

detectados nas águas subterrâneas cerca de 15 anos após ter cessado a utilização do produto".

É sabido que na Europa, ainda hoje se manifestam os efeitos da poluição de aquíferos produzida durante a última guerra pelo bombardeamento de depósitos de combustíveis e de complexos industriais.

Numerosos casos localizados, ocorridos nos Estados Unidos, de poluição das águas subterrâneas pelas mais diversas substâncias e sob as mais variadas condições aparecem mencionados em revistas especializadas.

Dados do U.S. Environmental Protection Agency indicam que nos Estados Unidos, em 1977, havia pelo menos 17 milhões de locais de deposição de resíduos produzindo mais de 6,5 milhões de metros cúbicos de líquidos lançados anualmente nas águas subterrâneas (Freeze & Cherry, 1979).

Em nosso País, os problemas de contaminação dos aquíferos somente agora vêm sendo considerados, acreditando-se que, muito embora não apresentem causas diferentes dos casos já registrados em outras partes do mundo, conduzirão a consequências mais danosas ao meio ambiente em função do despreparo dos órgãos de controle ambiental e da falta de legislação mais adequada e atual que realmente puna com o rigor necessário, os responsáveis pelas fontes e focos de poluição.

Vignoli F? (1981), através de uma análise estatística preliminar, atribui ao consumo de água subterrânea contaminada, o motivo de numerosos casos de doenças no Estado de Minas Gerais, função da construção inadequada e/ou locação imprópria de poços rasos, geralmente na proximidade de fossas negras, ou profundos.

Dados colhidos pela CETESB revelam que apenas na Grande São Paulo há mais de 50 locais de disposição de resíduos sólidos cadastrados, estimando que existam em todo o Estado mais de 300, recebendo em torno de 60 000 t/dia de resíduos domésticos e 25 000 t/dia de detritos industriais.

Segundo Rebouças (1987), o Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (CEPAS) registrou a ocorrência de 36 acidentes de transporte de produtos químicos perigosos, 20 vazamentos de tubulações e 12 vazamentos de estoques industriais, no período de janeiro de 1980 a dezembro de 1985, tendo a maioria dos casos ocorridos na região da Grande São Paulo.

O mesmo órgão desenvolve pesquisas no meio rural estudando o efeito da infiltração e da fertirrigação por vinhaça, sub-produto das destilarias de álcool, no Arenito Bauru. Em nove áreas piloto do Estado de São Paulo, o CEPAS vem desenvolvendo ainda estudos sobre a deterioração das águas subterrâneas por influência de aterros sanitários e/ou controlados.

Pacheco (1984) revela em seu estudo que muitos poços existentes na Grande São Paulo são utilizados como esgoto de efluentes industriais perigosos, devido às condições de uso inadequadas, e suas más características técnicas, como a inexistência de laje de proteção.

Segundo Digilio (1986), cerca de 630 000 m³ de óleo lubrificante básico são descartados por ano pela indústria nacional, sendo que cerca de 80% é disposto no solo sem qualquer tratamento ou monitoramento.

Mesmo nos países mais adiantados, até há bem pouco tempo o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas em áreas próximas a locais de disposição de resíduos era feito sem qualquer fundamento científico, valendo-se geralmente, da abertura de poços de monitoramento, perfurados sem critérios que permitissem definir a malha, ou mesmo sua localização.

A quantidade e a disposição espacial destes poços é de fundamental importância para o estudo da qualidade das águas subterrâneas, pois é a partir deles que é feito o acompanhamento da variação do nível potenciométrico dos aquíferos, a

amostragem da água para análises físico-químicas, a determinação de coeficientes de condutividade hidráulica e a amostragem dos materiais do sub-solo.

Num estudo criterioso, a distribuição dos poços de monitoramento deve ser feita com base nas características geológicas, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas e topográficas da área, assim como do estudo dos sistemas de águas superficiais e subterrâneas.

A este conjunto de procedimentos de apoio, soma-se hoje, a aplicação de métodos geofísicos de investigação que rapidamente ocupou um espaço importante no monitoramento de poluição subterrânea pela sua versatilidade, rapidez na obtenção de dados, precisão dos resultados e a custos relativamente baixos quando comparados com os métodos convencionais de prospecção.

De há muito se conhece a utilização da metodologia geofísica aplicada à prospecção de água subterrânea, no entanto, a sua utilização no estudo da qualidade das águas subterrâneas remonta à cerca de duas décadas apenas, sendo que, seu maior incremento ocorreu nos últimos dez anos.

Em 1968, Cartwright & McComas descreveram a aplicação de métodos geofísicos em área próxima a aterro sanitário situado em Illinois-USA. Kelly (1976) procurou mapear manchas de contaminação utilizando-se de sondagens elétricas. Cameron et al. (1981) utilizaram os métodos da resistividade e eletromagnético indutivo para mapear intrusões salinas. Greenhouse & Harris (1983) estudaram a migração de poluentes na água subterrânea próximo a um local para disposição de resíduos utilizando-se dos métodos da resistividade, VLF e eletromagnético indutivo. Em 1985, Greenhouse & Williams aplicaram métodos geofísicos no monitoramento da qualidade da água subterrânea próximo a um depósito de lixo.

A prática da utilização dos métodos geofísicos no estudo da qualidade das águas subterrâneas é hoje, bastante difundida nos países mais adiantados da América do Norte e Europa, sendo muitos os casos referidos na literatura técnica especializada e particularmente nas notas e catálogos de equipamentos da GEONICS LIMITED de Ontario, Canadá.

Em nosso país, esta aplicação teve início em fins de 1984 com a vinda do professor John P. Greenhouse da Universidade de Waterloo, Ontario, Canadá, sob o patrocínio do International Development Research Center (IDRC) que resultou num programa de colaboração com o Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo envolvendo, entre outras coisas, a aquisição de equipamentos geofísicos e a permanência de dois pesquisadores canadenses no Brasil, pelo prazo de 6 meses em 1985.

O CEPAS através de convênio firmado entre FAPESP-DAEE para pesquisa de água subterrânea no Estado de São Paulo, encarregou-se do projeto "Hidrodinâmica e Hidroquímica de Aquíferos" (Processo FAPESP nº. 83/1424-1), e com o apoio dos órgãos federais FINEP/PADCT (Processo 53/84/0755/00) passou a pesquisar os "Impactos da Urbanização e Industrialização nas Águas Subterrâneas", que resultou em vários trabalhos já publicados e outros ainda em andamento sobre a poluição do sub-solo.

Os métodos geofísicos foram aplicados no estudo de nove casos de impactos ambientais envolvendo, entre eles, os aterros sanitários de Taubaté, São José dos Campos e Novo Horizonte, e os casos de infiltração de vinhaça em Novo Horizonte e Ribeirão Preto, todos no Estado de São Paulo, objetos de abordagem posterior neste trabalho.

Como resultado de tais estudos já foram publicados, ou apresentados em reuniões científicas, vários trabalhos

envolvendo a utilização de métodos geofísicos de investigação, podendo-se citar os de Ellert et al. (1986) e Greenhouse et al. (1987).

1.2 - OBJETIVOS

O presente estudo pretende dar sua contribuição no sentido de alertar os responsáveis pelo controle das condições do meio-ambiente para o problema da poluição das águas subterrâneas em nosso país, a ao meso tempo, estabelecer critérios que auxiliem na recuperação de áreas poluídas e/ou contaminadas, a partir da utilização de metodologia geofísica.

Dentre os métodos geofísicos possíveis de serem empregados, estão aqueles que medem os parâmetros físicos e/ou químicos da água subterrânea que são, ou podem ser, diretamente influenciados pela presença de poluentes. A Termometria mede a variação da temperatura da água poluída através da radiação infra-vermelha. A Radiometria mede a intensidade de radiação. Contudo, a propriedade física da água mais afetada é a resistividade, e conseqüentemente a condutividade, que é o seu inverso.

Outros métodos geofísicos como a Sísmica de Refração e o Radar de Penetração são considerados métodos auxiliares, úteis na avaliação das condições do sub-solo e das feições hidrogeológicas. O primeiro se baseia nas constantes elásticas dos diferentes materiais e o segundo utiliza ondas de rádio de alta frequência que refletem as feições do sub-solo.

A Eletrorresistividade é o método que envolve os procedimentos de medida da resistividade dos materiais do sub-solo. É um método tradicional e de grande versatilidade, sendo largamente utilizado na prospecção de água subterrânea, e tendo inclusive, aplicações nas áreas de mineração e engenharia civil.

O Método Eletromagnético Indutivo permite medir a condutividade dos materiais do sub-solo e da água neles contida. O seu desenvolvimento para atender aos estudos da qualidade da água subterrânea é mais recente, e hoje discute-se as vantagens e desvantagens que apresenta com relação ao Método da Eletrorresistividade. Ambos foram utilizados de modo concomitante nas áreas de estudo, a fim de possibilitar uma comparação prática de seus desempenhos.

Primeiramente são apresentados os resultados dos levantamentos geofísicos executados em cinco áreas-problema no Estado de São Paulo, quais sejam:

- aterro sanitário de São José dos Campos;
- aterro sanitário de Taubaté;
- aterro sanitário de Novo Horizonte;
- área de infiltração de vinhaça em Novo Horizonte; e
- área de infiltração de vinhaça em Ribeirão Preto.

Em seguida, com o objetivo de definir um procedimento eficaz de estudo geofísico de área contaminada, onde os recursos disponíveis não fossem suficientes para se fazer um maior controle tais como a instalação de piezômetros e perfuração de poços de amostragem escolheu-se uma região litorânea onde a super-exploração do aquífero costeiro estivesse induzindo à contaminação do mesmo, pelo avanço da cunha salina.

Finalmente, foi escolhida uma área industrial situada na Bacia Sedimentar de Taubaté, próxima a São José dos Campos, onde a indústria ali instalada processa substâncias químicas de alta periculosidade, produzindo como rejeito, compostos organo-clorados, onde foi constatada a ocorrência de vazamentos de estoques industriais e das lagoas de tratamento. Foi proposto um monitoramento detalhado a partir das informações obtidas através da aplicação dos dois métodos geofísicos mencionados anteriormente.

Assim, os estudos desenvolvidos nas áreas mencionadas têm como objetivo principal, estabelecer comparações práticas entre os Métodos da Eletrorresistividade e Eletromagnético Indutivo, no tocante à eficiência, rendimento e custos operacionais, estabelecendo um procedimento de utilização dos mesmos no caso do estudo de áreas-problema em que se disponha de poucos recursos financeiros para complementação das informações, além da apresentação de uma proposta de aplicação dos métodos para o mapeamento e monitoramento de talhado de áreas poluídas e/ou contaminadas.

1.3 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

A Figura 1, constituída do mapa do Estado de São Paulo contendo um esboço geológico, apresenta a localização das cidades, assim como a região litorânea, onde foram desenvolvidos os estudos.

Deve-se observar que o contexto geológico abordado pertence a uma gama bastante ampla, envolvendo áreas de sedimentos quaternários, terciários e paleozóicos, além daquelas cobertas por efusivas básicas pertencentes à Formação Serra Geral.

A importância da escolha de Novo Horizonte reside no fato de ser representativa para uma região muito ampla, isto é, praticamente todo o centro-oeste do Estado, de domínio do Arenito Bauru, onde está concentrada a maior parte das usinas de açúcar e destilarias de álcool, que com a prática da fertirrigação e infiltração de vinhaça, ameaçam poluir e mesmo contaminar uma reserva de água subterrânea largamente utilizada para o abastecimento humano e industrial, estratégica para o desenvolvimento do Estado.

A poluição por aterros de lixo, ou sanitários, ao contrário daquela, é mais localizada, afetando, no entanto, o abastecimento de água potável de propriedades rurais que por estarem distantes dos centros urbanos, não dispõem de

Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Estado de São Paulo, com a localização das áreas de estudo (Modificado de IGG, 1974).

serviços públicos de água e esgoto. A exemplo de Novo Horizonte, todas as pequenas e médias cidades da região podem se deparar com o mesmo tipo de problema, evidenciado ainda mais pela alta porosidade e alta permeabilidade do arenito do Grupo Bauru.

Na região de Ribeirão Preto é muito comum a prática da infiltração no solo dos excedentes de vinhaça, já que é grande ali, o número de usinas e destilarias em atividade. O contexto geológico local no entanto, torna a situação por demais delicada, pois na região, os basaltos da Formação Serra Geral apresentam-se fraturados, favorecendo a infiltração dos poluentes, podendo atingir inclusive o Arenito Botucatu, subjacente, praticamente em sua área de recarga.

A importância do estudo de uma região litorânea como a do Norte do Estado de São Paulo, é a de que existe ao longo de todo o litoral brasileiro situações semelhantes, onde as planícies sedimentares de idade quaternária se apresentam bastante vulneráveis à intrusão da água salgada, contaminando os aquíferos costeiros, pela sua super-exploração.

Há de ser lembrado a grande extensão da costa brasileira, e o fato dela ser palco de grandes concentrações urbanas fixas, e/ou flutuantes, em épocas de temporada de férias.

O mesmo problema quanto aos aterros de lixo, existe com relação às numerosas cidades que povoam o vale do Rio Paraíba nos domínios da Bacia Sedimentar de Taubaté. O pacote sedimentar, com espessura pouco superior a 500 metros em alguns locais, apresenta elevada porosidade e permeabilidade, o que, se por um lado o torna um excelente aquífero, por outro o deixa muito vulnerável à poluição subterrânea.

A grande vazão obtida pelos poços tubulares profundos e a estratégica situação geográfica - situada no eixo Rio-São Paulo - faz com que a região apresente uma das maiores taxas de industrialização do país, aumentando assim os riscos de poluição das águas subterrâneas por resíduos industriais.

1.4 - AGRADECIMENTOS

Na realização deste trabalho o autor contou com o auxílio e colaboração de várias pessoas e entidades, às quais registra aqui sua gratidão.

Ao professor Nelson Ellert pela orientação e efetiva colaboração tanto na fase de obtenção dos dados quanto na de interpretação dos resultados.

Ao professor Aldo da Cunha Rebouças, por permitir a utilização de dados e da infraestrutura do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS, além das discussões profícuas sobre o assunto.

Aos professores John P. Greenhouse e Mark Monier Williams da Universidade de Waterloo, Canadá, responsáveis em grande parte pela atual preocupação no aprimoramento do uso de técnicas geofísicas aliadas ao estudo de poluição de águas subterrâneas em nosso meio, e pelo incentivo nunca negado durante todas as etapas do trabalho.

Ao professor Uriel Duarte pelo constante incentivo e colaboração nos trabalhos da área de São José dos Campos.

Ao geólogo Alberto Pacheco pela disposição para troca de idéias e esclarecimentos sobre dúvidas pertinentes ao assunto em questão.

Ao engenheiro Nilson Guiguer Jr., encarregado do Laboratório de Computação do CEPAS, pela importante colaboração prestada na área de informática, e pelos dados fornecidos da área de Taubaté.

Aos professores do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada e aos de todo o Instituto, pelo incentivo e compreensão demonstrados nos momentos mais difíceis.

Ao geólogo Seiju Hassuda pelos dados fornecidos sobre a área de infiltração de vinhaça de Novo Horizonte.

Aos pós-graduandos do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada, Sueli Yoshinaga, Maria Amélia Souza Menezes e Itabaraci Nazareno Cavalcanti, que além do constante incentivo, auxiliaram na coleta de dados bibliográficos.

A estagiária Mara Akie Iritani pela colaboração na correção e datilografia do texto final.

A todos os funcionários do Instituto, em especial aos deste Departamento, e a todas as pessoas que, de alguma forma, ajudaram no desenvolvimento das diversas fases deste trabalho.

Aos diversos Órgãos de Pesquisa, dentre eles o Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas-CEPAS, Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo-FAPESP, Financiadora de Estudos e Projetos-FINEP e ao International Development Research Center-IDRC que, direta ou indiretamente, através de convênios, auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, o autor expressa seus mais sinceros agradecimentos.

2 - METODOS GEOFISICOS APLICADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Vários são os métodos geofísicos que podem ser utilizados no estudo de águas subterrâneas. Alguns fornecem dados sobre as condições dos materiais do sub-solo, como espessura das camadas, grau de compactação, profundidade do topo rochoso, e no caso de se possuir dados geológicos confiáveis para controle, até mesmo informações sobre tipos de rochas existentes em profundidade, possibilitando o mapeamento de feições hidrogeológicas naturais.

Outros métodos dão informações diretas sobre propriedades físicas e/ou químicas da água, que podem estar associadas à presença ou não de substâncias poluentes. As águas subterrâneas contaminadas pela água salgada de origem marinha, substâncias químicas provenientes de resíduos industriais, rejeitos orgânicos ou líquidos percolados de aterros sanitários se caracterizam por apresentar uma maior mineralização e/ou temperatura mais elevada, o que faz aumentar sensivelmente sua condutividade. Deste modo, os métodos que medem esta propriedade física da água tornam-se os mais adequados para o estudo de sua qualidade, mesmo porque, prestam-se também, ao estudo das feições hidrogeológicas e das condições dos materiais do sub-solo.

Nos últimos dez anos foi dispendido um grande esforço na idealização de equipamentos geofísicos, técnicas de campo, técnicas analíticas e de processamento de dados que contribuíram consideravelmente para melhorar as condições de acesso e conhecimento de áreas com problemas de poluição. No caso particular de poluição de águas subterrâneas, o maior salto foi qualitativo e se deu com a redução no tamanho dos equipamentos de forma a permitir medidas de condutividade dos materiais do sub-solo em até algumas dezenas de metros, utilizando o método eletromagnético indutivo.

Os métodos empregados no presente estudo foram os da Eletrorresistividade e o Eletromagnético Indutivo.

2.1 - ELETORRESISTIVIDADE

A resistividade dos materiais do sub-solo é um parâmetro que depende quase exclusivamente da quantidade e qualidade da água que ocupa seus espaços vazios.

As rochas cristalinas, geralmente compactas, tendem a apresentar uma resistividade bem mais elevada do que as rochas sedimentares, pois estas normalmente apresentam alguma porosidade, que por sua vez podem armazenar maior ou menor quantidade de água de saturação.

Um solo arenoso seco apresenta uma resistividade muito alta. O mesmo solo, saturado d'água, pode apresentar uma resistividade dezenas de vezes menor. Se esta água de saturação for salgada, e não doce, esta resistividade será menor ainda.

Do mesmo modo, a água subterrânea contaminada por substâncias químicas, sejam elas de origem orgânica ou inorgânica, tende a apresentar uma resistividade menor que a da água não contaminada, e esta diferença será tanto maior quanto maior for a quantidade de sais e outras substâncias químicas nela dissolvidas.

Os procedimentos mais utilizados na medida da resistividade dos materiais do sub-solo são os da sondagem, caminhamento e perfilagem elétricas.

2.1.1 - SONDAGEM ELÉTRICA

Através deste procedimento procura-se identificar a resistividade dos materiais investigados em diferentes profundidades sob um mesmo ponto do terreno.

As medidas de campo são executadas através de um arranjo de quatro eletrodos alinhados na superfície. O arranjo mais utilizado é o de Schlumberger, onde os eletrodos internos, para medida do potencial, se mantêm fixos e próximos ao ponto investigado, à medida que são espaçados simetricamente os eletrodos externos ou de corrente.

O ponto de investigação corresponde sempre ao centro do arranjo, e a profundidade investigada depende dos valores de resistividade aparente medidos. De uma maneira geral, será maior quanto maior for o espaçamento entre os eletrodos externos.

A resistividade verdadeira e as espessuras das camadas são conhecidas comparando-se a curva de resistividade aparente com curvas padrões, calculadas com base em dados físicos e modelos matemáticos.

Esta comparação pode ser feita através de ábacos e/ou através de técnicas de inversão automática baseadas em programas de computador para ajuste de curvas (Zohdy, 1973).

Como em todo método indireto de investigação, os resultados de uma sondagem elétrica podem apresentar erros devido a fatores extra medidas que podem alterar o comportamento das linhas de corrente por ocasião das leituras, provocando distorções nas curvas de resistividade aparente. Estes fatores são comumente representados por anisotropia, equivalência e supressão de camadas, e as variações laterais de resistividade. Em condições ideais os resultados fornecidos por uma sondagem elétrica podem atingir uma precisão acima de 90%, diminuindo na medida em que ocorram estes fatores, e proporcionalmente à sua intensidade.

2.1.2 - CAMINHAMENTO ELÉTRICO

Para este procedimento são válidas as mesmas técnicas e princípios utilizados para as sondagens elétricas.

Enquanto no primeiro caso mede-se a resistividade em várias profundidades sob um mesmo ponto da superfície, no caminhamento elétrico mede-se a resistividade a uma profundidade aproximadamente constante, em vários pontos de um perfil do terreno. Assim, desloca-se um arranjo fixo de quatro eletrodos, fazendo-se uma medida em cada estação pré-fixada.

O perfil de resistividade aparente devidamente analisado, e em conjunto com outros dados, permite identificar qualitativamente as variações laterais de resistividade, que podem estar relacionadas a contatos litológicos, níveis de alteração mais profundos, zonas de intenso fraturamento e zonas de contaminação. O arranjo de eletrodos, indicado para se investigar a profundidade desejada é definido mediante a execução e interpretação de algumas sondagens elétricas preliminares, na região que se pretende investigar.

2.1.3 - PERFILAGEM ELÉTRICA

A perfilagem elétrica consiste na medida da resistividade feita diretamente nas paredes de uma perfuração. Ela pode ser feita aproveitando a existência de poços de monitoramento, ou em perfurações executadas exclusivamente para tal fim, sem revestimentos.

Dependendo do tipo de perfilador utilizado, as medidas podem ser contínuas ou pontuais, e determinar outros parâmetros físicos como a condutividade, o potencial espontâneo, a radiação gama natural, e outros.

A interpretação é qualitativa e, uma vez conhecidas as características dos materiais perfurados, as anomalias encontradas podem ser associadas a um maior ou menor grau de contaminação da água de saturação.

A grande vantagem é a riqueza de detalhes que pode ser obtida, visto que cada método mede um determinado parâmetro,

e as informações obtidas por um sensor são frequentemente completadas pelas de outro.

2.2 - ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

Os equipamentos eletromagnéticos que medem os componentes e a inclinação do vetor campo eletromagnético resultante são conhecidos e utilizados há décadas no campo da mineração, com capacidade de investigação de algumas centenas de metros (eletromagnético transiente).

Os equipamentos eletromagnéticos para medidas de condutividade foram desenvolvidos nos últimos 10 anos para serem utilizados na solução de problemas mais superficiais como a poluição de águas subterrâneas.

A base teórica é a mesma para os dois casos, independentemente da profundidade de investigação, a diferença está na escolha do objetivo e na precisão da medida. A investigação de manchas de poluição envolve profundidades menores, mas frequentemente requer uma resolução muito maior, visto que os corpos anômalos são em geral de reduzidas dimensões, se comparados com corpos de depósitos minerais.

A diferença fundamental entre o método eletromagnético e a eletrorresistividade convencional está no fato daquele utilizar um campo eletromagnético alternado para induzir corrente elétrica no solo.

Uma corrente elétrica alternada circulando por uma bobina transmissora (Tx) cria ao seu redor um campo eletromagnético indutivo alternado, que induz correntes elétricas secundárias no solo, sob o aparelho. Estas correntes secundárias por sua vez, criam um campo eletromagnético alternado que é proporcional à corrente induzida. Uma parte desse campo secundário induz correntes em uma bobina receptora (Rx), que é ligada à transmissora por um cabo de referência, que produz uma saída que é proporcional à condutividade do solo.

É uma medida de condutividade global, sendo uma resposta cumulativa do efeito de cada parcela do solo partindo da superfície até a profundidade de alcance dos equipamento.

A profundidade de investigação é função da posição e espaçamento entre as bobinas. Com o eixo das bobinas na horizontal, a condutividade medida corresponde a uma profundidade de 0,75 vezes a distância entre elas, e 1,5 vezes no caso do eixo vertical. Os valores medidos representam os efeitos combinados das diferentes camadas, suas espessuras e condutividade, desde a superfície até a profundidade de alcance do aparelho. Os resultados são bastante influenciados por fatores superficiais, o que deve ser considerado quando da interpretação.

Em geral, os equipamentos são calibrados para ler a condutividade em unidades de milimho/m. ($1 \text{ milimho/m} = 1 \text{ mili-Siemen/m}$; $\text{ohm.m} = 1000/\text{milimho/m}$).

A exemplo do método da eletrorresistividade, o método eletromagnético indutivo permite a execução de sondagens, caminhamento e perfilagem eletromagnéticas, procedimentos bastante semelhantes em ambos os casos.

2.2.1 - SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Um sondagem eletromagnética consiste numa sucessão de medidas de condutividade elétrica a profundidades progressivamente maiores, sob um mesmo ponto da superfície do terreno.

Isto é conseguido aumentando-se o espaçamento entre as bobinas e alternando a posição de seu eixo, mantendo-se fixo o centro do arranjo.

2.2.2 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Ao ser escolhida uma profundidade de investigação, as variações laterais na condutividade elétrica podem ser determinadas através do caminhamento eletromagnético.

O levantamento é feito ao longo de um perfil pré-determinado do terreno, geralmente disposto perpendicularmente à direção destas variações, com os pontos de medida distanciados de acordo com a grandeza esperada para as anomalias. O registro contínuo das leituras pode ser feito, dependendo do equipamento utilizado.

2.2.3 - PERFILAGEM ELETROMAGNÉTICA

A exemplo da perfilagem elétrica, este procedimento requer a perfuração de um poço para introdução do sensor, ou então aproveita perfurações já existentes. O parâmetro medido refere-se às vizinhanças imediatas do furo, e a leitura pode ser contínua ou pontual.

2.3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a aplicação das duas metodologias geofísicas já mencionadas, foram utilizados equipamentos dimensionados para investigar com segurança e níveis de precisão satisfatórios as profundidades desejadas.

2.3.1 - ELETORRESISTIVIDADE

Nas medidas de resistividade foi utilizado um resistivímetro fabricado pela TECTROL - Indústria Brasileira, constituído de um milivoltímetro de alta impedância de entrada, e um conversor DC/DC, modelo TDC 1000/12, alimentado por uma bateria de 12 V, com tensão máxima de saída de 1000 V, potência de 1000 Watts, e seus acessórios.

Com este equipamento consegue-se investigar com total segurança, em condições normais, profundidades de até 500 metros, sob um ponto da superfície.

2.3.2 - ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

Os equipamentos eletromagnéticos que foram utilizados são de procedência canadense, fabricados pela GEONICS LIMITED, modelos EM-31 e EM-34.

O EM-31 pode ser operado por uma única pessoa, e possui um espaçamento fixo entre as bobinas de 3,66 metros.

O EM-34 já requer duas pessoas para sua operação, e vem acompanhado de três cabos de referência que possibilitam sua utilização com as bobinas espaçadas de 10, 20 e 40 metros. Deste modo, dependendo da posição das bobinas, o intervalo de investigação situa-se a profundidade entre 2,5 e 60,0 metros, aproximadamente.

O EM-31 opera na frequência de 9,8 KHz e é alimentado por um conjunto de 8 pilhas alcalinas comuns, de 1,5 V, tamanho médio. O EM-34 opera nas frequências de 6,4; 1,6 e 0,4 KHz, para os cabos de referência de 10, 20 e 40 metros respectivamente. O transmissor é alimentado por 8 pilhas alcalinas comuns de 1,5 V, tamanho grande, e o receptor 8 do mesmo tipo, tamanho médio.

3 - ANTECEDENTES E EXEMPLOS BRASILEIROS

Alguns casos de mapeamento da influência de aterros sanitários e de áreas de infiltração de vinhaça na poluição ou contaminação de águas subterrâneas com auxílio de técnicas geofísicas já foram estudados, além de outras áreas atualmente em processo de detalhamento, que contam com a participação do autor.

3.1 - ATERROS SANITÁRIOS

O aterro sanitário é definido como "um método para a disposição do lixo no solo sem detrimento do meio ambiente, sem causar moléstias e sem causar perigos para a saúde e segurança pública, utilizando princípios de Engenharia para confinar o lixo em uma área menor possível, procurando reduzir seu volume de forma prática, e cobrindo o lixo assim depositado com uma capa de terra, diariamente no final do trabalho, o mais frequentemente possível". (ASCE - American Society of Civil Engineers).

No entanto os primeiros estudos brasileiros sobre poluição de águas subterrâneas foram realizados nestes tipos de aterros, onde se verificou que, apesar da capa de terra ser uma barreira considerada impermeável, há percolação por ela e poluição do freático pelo líquido resultante da infiltração da água e dos resíduos em decomposição do aterro: o chorume.

Isto posto, pode-se afirmar que, apesar da denominação Aterro Sanitário em determinados locais de disposição de resíduos, não ocorrem as condições acima definidas. Por vezes a disposição do lixo e sua cobertura tem sido realizada de modo caótico desobedecendo qualquer critério técnico, além do fato de muitos deles estarem situados em regiões que apresentam alta vulnerabilidade do aquífero.

Por isso, nestes aterros notam-se características típicas de locais de disposição a céu aberto como a ocorrência de odores desagradáveis, presença de vetores nocivos (moscas, baratas), de roedores e aves transmissoras de moléstias. A presença do chorume surgindo em alguns locais baixos do terreno, foi detectada em alguns casos.

Ainda hoje, a maior parte das cidades brasileiras deposita seus dejetos em locais afastados, geralmente a céu aberto, por ser esta a forma mais fácil e econômica de se livrar de seus resíduos.

Geralmente, os locais escolhidos para a deposição dos lixo municipais geralmente são: zonas de baixadas, brejos, manguesais, grotas, lagoas ou escavações, em que o lixo é utilizado para "recuperação" destas áreas, ocasionando, assim, poluição do lençol freático (Loureiro, 1976).

Segundo Pacheco & Coelho (1981), a poluição das águas subterrâneas proveniente de "lixões" e aterros mal construídos, pode ocorrer através dos seguintes mecanismos:

- contato direto, horizontal, da água subterrânea atravessando os resíduos sólidos depositados;
- movimento vertical da água de percolação proveniente da precipitação - chuvas ou irrigação, ou dos próprios resíduos sólidos, atingindo o lençol freático; e
- transferência de gases produzidos na decomposição dos resíduos sólidos, através de difusão e convecção.

A água subterrânea, sendo atingida pelo chorume, adquirirá maior mineralização e temperatura, acompanhada de cor amarela escura ou esverdeada cheiro desagradável, elevado conteúdo do íon amônio, elevado DBO (demanda biológica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), possível redução de sulfatos, ausência de nitratos, presença de Fe^{++} e elevado conteúdo de Co_2 .

Em estudos hidrogeológicos para o mapeamento da mancha poluente, utilizam-se como traçadores o ânion Cl^- , a temperatura e o cátion K^+ , que apresentam valores anômalos com relação aos da água subterrânea regional, além dos métodos geofísicos citados anteriormente.

3.1.1 - ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ

A cidade de Taubaté está situada no Vale do Paraíba a aproximadamente 140 Km de São Paulo, atendida pela BR-116, Rodovia Presidente Dutra, bem no centro da Bacia Sedimentar que leva seu nome.

O sítio urbano desenvolve-se por sobre as duas formações da bacia: Formação Caçapava, superior, e Formação Tremembé, inferior.

A Formação Caçapava constitui-se por camadas alternadas e lenticulares de argilas, areias e conglomerados. Seus sedimentos apresentam quartzo com baixo grau de arredondamento, feldspatos, epidoto e biotita, atestando sua imaturidade. A presença de estruturas hidrodinâmicas indica um ambiente fluvial de sedimentação (Almeida et al. 1981).

Podendo apresentar espessura superior a 200 metros, esta formação transgride sobre a Formação Tremembé, depositando-se diretamente sobre o embasamento cristalino (Petri & Fúlfaro, 1983).

Na Formação Tremembé, de origem lacustre, predominam folhelhos e argilitos com intercalações de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais (Almeida et al. 1981).

As duas formações, de idade cenozóica, chegam a atingir espessuras de até 520 metros, no centro da bacia, segundo dados de poços perfurados para abastecimento de água.

A área do aterro sanitário está assentada sobre sedimentos da Formação Caçapava, aproximadamente 3 Km a leste do trevo da rodovia que dá acesso à cidade (Figura 2), na cabeceira de um vale onde tem origem uma drenagem que, através do Rio Una, vai desaguar no Rio Paraíba do Sul.

FIGURA 2 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ) (GUIGUER JR., 1987).

Alguns cortes de estrada próximos da área mostram uma alternância de camadas arenosas e argilosas de coloração variada, com espessuras da ordem de alguns centímetros. Na área do aterro algumas perfurações rasas confirmam estas ocorrências.

O aterro sanitário de Taubaté começou a ser operado em 1979, e até 1981 recebeu resíduos de indústrias químicas e metalúrgicas da região, a uma taxa de 700 m³/ano. Atualmente

só recebe lixo doméstico e de escritórios do município, a uma taxa de 40 000 m³/ano (Guiguer Jr., 1987).

A área a jusante do aterro foi objeto de estudo que resultou na Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, em 1987, do pesquisador do CEPAS Nilson Guiger Jr., referida na bibliografia. Para a execução do trabalho, que enfocou uma abordagem matemático - experimental sobre a poluição das águas subterrâneas por aterros sanitários, foram instalados 40 poços de observação de até 5 metros de profundidade e 7 piezômetros multiníveis com até 30 metros de profundidade para a medição de níveis do lençol freático, realização de testes de condutividade hidráulica de carga variável e visando permitir a coleta de amostras para execução de análises químicas.

Para um perfeito posicionamento dos poços e piezômetros foi executado na área um levantamento geofísico que constou, numa primeira etapa, de medidas de resistividade do solo através dos procedimentos de sondagem e caminhamento elétricos (Figura 3).

As sondagens obedeceram ao arranjo Schlumberger, com os eletrodos de corrente distanciados de até 200 metros.

O caminhamento elétrico foi feito com três diferentes arranjos de eletrodos, AB = 15, 25 e 30 metros, mantendo-se MN = 5 metros, para investigar profundidades aproximadas entre 5 e 8, 8 e 12 e 12 e 17 metros, respectivamente. A distância entre os pontos de investigação foi de 5 metros.

A disposição das sondagens e dos perfis de caminhamento elétrico obedeceu a um critério lógico que levou em conta a frente de disposição do lixo e o sentido do fluxo de água subterrânea em função da configuração topográfica do local.

Foram executadas um total de 9 sondagens e 435 metros de caminhamento elétrico. Nas figuras 4 e 5 estão apresentadas as curvas de resistividade aparente correspondentes às

FIGURA 3 - PLANTA DE LOCAÇÃO DAS SONDAGENS E CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ) (MODIFICADO DE GUIGUER JR., 1987).

FIGURA 4 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ),

sondagens elétricas, e nas figuras 6, 7 e 8 os perfis de resistividade aparente correspondentes ao caminhamento elétrico. O Quadro I sintetiza os dados da interpretação das sondagens.

Uma simples observação na morfologia das curvas das sondagens SE-7 e SE-9, ou então uma análise dos dados de interpretação das mesmas e da SE-8, mostram que os locais investigados não foram atingidos pelo líquido percolado do aterro, de alta condutividade elétrica, que exerce uma influência negativa nos valores de resistividade dos sedimentos.

Os dados de interpretação das outras sondagens indicam valores de resistividade bem mais baixos, em torno de 10 ohm.m, sugerindo a influência do chorume nas camadas sedimentares.

FIGURA 5 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ).

Na interpretação destas sondagens, por mais que se tentasse individualizar as camadas elétricas nas curvas de resistividade aparente, sua correlação com a litologia ficou prejudicada pelas pequenas espessuras e o caráter lenticular das camadas sedimentares.

O Perfil I do caminhamento elétrico mostra valores elevados de resistividade aparente nas duas extremidades, que correspondem às cotas mais elevadas, o que leva a deduzir que nestes locais não há influência do líquido percolado do aterro.

Sond. Elétrica nº	Espessura (m)	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)
1	3,5	3,5	52
	2,5	6,0	130
	21,0	27,0	30
	23,0	50,0	17
	ind.	> 50,0	≈ 85
2	1,5	1,5	34
	1,0	2,5	90
	5,5	8,0	125
	2,5	10,5	17
	8,5	19,0	10
	ind.	> 19,0	≈ 32
3	1,0	1,0	60
	6,5	7,5	210
	33,0	40,5	10
	ind.	> 40,5	> 100
4	1,0	1,0	17
	1,0	2,0	44
	9,0	11,0	32
	1,5	12,5	85
	6,0	18,5	10
	3,5	22,0	160
	ind.	> 22,0	≈ 5
5	1,0	1,0	250
	2,5	3,5	130
	2,5	6,0	280
	5,0	11,0	13
	72,0	83,0	15
	ind.	> 83,0	≈ 500
6	3,0	3,0	1 500
	4,5	7,5	70
	20,5	28,0	13
	ind.	> 28,0	≈ 45
7	1,0	1,0	2 100
	3,5	4,5	5 250
	8,0	12,5	400
	ind.	> 12,5	≈ 1 400
8	1,0	1,0	500
	8,0	9,0	100
	ind.	> 9,0	≈ 30
9	2,0	2,0	1 000
	8,0	10,0	100
	ind.	> 10,0	> 1 000

QUADRO I - DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS
ELÉTRICAS (ATERRO SANITÁRIO DE
TAUBATÉ).

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - TAUBATÉ
PERFIL I

FIGURA 6 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - TAUBATÉ
PERFIL II

FIGURA 7 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - TAUBATÉ
PERFIL III

FIGURA 8 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

Nota-se ainda, uma anomalia positiva nos valores de resistividade aparente, principalmente para o arranjo de eletrodos que investiga a profundidade menor - $AB = 15$ metros -, entre os pontos 60 e 80 do perfil. Esta anomalia elétrica poderia ser atribuída apenas a variações granulométricas nos sedimentos, na profundidade investigada, porém, como será observado mais adiante, na Figura 11, ela se deve integralmente a uma menor condutividade da água que percola os sedimentos no local.

Para os arranjos com $AB = 25$ e 35 metros, que investigam as profundidades maiores, notou-se que a partir de aproximadamente 60 metros da frente do depósito de lixo os valores de resistividade voltam a diminuir. Este comportamento indicou a necessidade de se fazer uma perfuração à jusante para avaliar se a causa era devida a uma variação faciológica nos sedimentos, ou a um aprofundamento da mancha poluente.

Com base nas recomendações feitas a partir do levantamento geofísico, os poços de observação e piezômetros multi-níveis foram dispostos como mostra a Figura 9.

Os trabalhos de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas a jusante do aterro sanitário de Taubaté foram desenvolvidos de 1984 a 1986, e para atestar o sucesso e a confiabilidade dos dados geofísicos levantados preliminarmente, foram recolhidas algumas conclusões da Dissertação de Mestrado que deles resultou:

- a Figura 10 mostra o mapa de isocondutividade elétrica da água dos poços de observação, medida em fevereiro/86; a mancha poluente tem influência na qualidade da água subterrânea, na parte superior do lençol, até aproximadamente 200 metros a jusante da frente de disposição do lixo;

- em amostragem da mesma época, o piezômetro multinível MN-VII, com pontos de coleta a 8, 19 e 23 metros de profundidade, apresentou os seguintes valores de condutividade: 45,

FIGURA 9 - PLANTA DE LOCAÇÃO DOS POÇOS E PIEZÔMETROS (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ) (GUIGUER JR., 1987).

FIGURA 10 - MAPA DE ISOCONDUTIVIDADE DA ÁGUA EM $\mu\text{MHO}/\text{CM}$ (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ) (GUIGUER JR., 1987),

FIGURA 11 - CORRELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE DA ÁGUA DOS POÇOS DE OBSERVAÇÃO (μ MHO/CM) E DOS SEDIMENTOS (MMHO/CM) (ATERRO SANITÁRIO DE TAUBATÉ).

135 e 37 mho/cm, respectivamente; este fato mostra que juntamente com a dissipação ocorre também um aprofundamento da mancha poluente no local estudado, à medida que se afasta da frente do depósito de lixo;

- os poços de observação de números 1 a 10 foram perfura dos praticamente ao longo do Perfil I do caminhamento elétrico. A Figura 11 mostra uma ótima correlação entre a condutividade elétrica da água dos poços, e da condutividade calculada a partir dos dados de resistividade aparente do perfil de caminhamento elétrico; a condutividade da água dos poços está expressa em $\mu\text{mho/cm}$, e a dos sedimentos em mmho/cm .

- os perfis II e III do caminhamento mostram um comportamento dos valores de resistividade que sugerem uma influência cada vez menor do líquido percolado do aterro, à medida que se afasta da frente de disposição do lixo.

3.1.2 - ATERRO SANITÁRIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

A cidade de São José dos Campos está situada no Vale do Paraíba aproximadamente a 100 Km de São Paulo pela BR-116, Rodovia Presidente Dutra, na extremidade SW da Bacia Sedimentar de Taubaté, onde predominam os sedimentos da Formação Caçapava, com as características descritas anteriormente.

A espessura do pacote sedimentar na região é bastante variável, havendo registro de poços que atingiram as rochas do embasamento entre 80 e 130 metros aproximadamente.

A área estudada dista aproximadamente 8 Km do centro da cidade, com acesso pela Rodovia dos Tamoios, que liga São José dos Campos a Caraguatatuba (Figura 12).

O aterro sanitário de São José dos Campos recebe, há mais de dez anos, dejetos industriais e domésticos numa área de aproximadamente 5 ha localizada na vertente de um morro, próximo a uma drenagem que, através do Ribeirão Vidoca, vai desaguar no Rio Paraíba do Sul.

A exemplo do ocorrido em Taubaté, pretendia-se fazer um estudo detalhado sobre a influência do aterro na qualidade das águas subterrâneas a jusante, por meio da instalação de poços de observação e piezômetros multiníveis.

Figura 12 - Planta de locação da área de estudo (Aterro Sanitário de São José dos Campos) (modificado de IBGE, 1973).

Para tanto, foram perfurados 21 poços de observação com profundidades em torno de 5 metros, nos locais assinalados na Figura 13. As primeiras análises já evidenciaram que o líquido percolado do aterro não alterava a qualidade da água na maioria dos poços, principalmente os localizados ao sul da área, indicando uma disposição errada dos mesmos em relação à direção do fluxo da solução poluente.

Posteriormente às duas primeiras medidas, verificou-se que os poços haviam secado, ou apresentavam lâminas d'água tão delgadas que impossibilitavam amostragem adequada. Isto ocorreu em função dos mesmos terem sido perfurados num período de janeiro-fevereiro de 1984, ocasião em que o nível estava alto, devido ao elevado índice pluviométrico da estação.

A pesquisa foi suspensa, interrompendo-se a execução de um levantamento planialtimétrico da área, decidindo-se, então, pela execução de uma campanha geofísica para mapear a área sob influência do líquido poluente, oriundo do aterro. Utilizou-se os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético indutivo.

Numa primeira etapa foram executadas 3 sondagens elétricas e 250 metros de caminhamento elétrico divididos em dois perfis. Os pontos investigados estão assinalados no croqui da Figura 13. As curvas de resistividade aparente estão apresentadas na Figura 14, os dados da interpretação no Quadro II, e os perfis de resistividade aparente nas Figuras 15 e 16.

As sondagens elétricas foram executadas com a linha de emissão de corrente distanciada de até 200 metros, segundo o arranjo Schlumberger. Como no caso de Taubaté, a alternância de camadas arenosas e argilosas de pequena espessura dificultou a individualização das mesmas nas curvas de resistividade aparente, fazendo com que seu comportamento seja de uma camada elétrica única, com resistividade equivalente à média dos valores reais das mesmas.

Figura 13 - Croqui com a localização das sondagens, caminhamento elétrico e piezômetros (Aterro Sanitário de São José dos Campos).

FIGURA 14 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITÁRIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS).

SOND. ELÉTRICA N°	ESPESSURA (M)	PROFUNDIDADE (M)	RESISTIVIDADE (OHM.M)
1	1,5	1,5	45
	6,0	7,5	8
	ind.	> 7,5	60
2	2,5	2,5	18
	1,5	4,0	36
	2,5	6,5	17
	ind.	> 6,5	45
3	0,5	0,5	60
	4,5	5,0	30
	ind.	> 5,0	100

QUADRO II - DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS (ATERRO SANITÁRIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS).

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - S.J. CAMPOS

PERFIL I

DISTANCIA (m)

□ AB = 30 m

FIGURA 15 - PERFIL DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELETRICO - S.J.CAMPOS
PERFIL II

FIGURA 16 - PERFIL DE RESISTIVIDADE APARENTE.

No entanto, as resistividade medidas não podem ser consideradas tão baixas a ponto de indicar com segurança a presença da mancha de poluição no local das sondagens. Apenas a segunda camada da SE-1, com 8 ohm.m de resistividade, permite sugerir esta situação. Coincidentemente, nota-se que esta sondagem é a que está mais próxima da frente de disposição do lixo.

O caminhamento elétrico foi executado com o arranjo de eletrodos AB=30m e MN=5m e pontos de medida a cada 5m. A intenção era de se investigar profundidades entre 10 e 15 metros aproximadamente.

O Perfil I indica uma anomalia condutora no terço central do caminhamento, que pode ser associada à direção do fluxo do líquido percolado do aterro. Os valores de resistividade mais altos nas extremidades do perfil mostram os locais onde o chorume não afetou a resistividade dos materiais investigados.

Os valores de resistividade aparente do Perfil II mostram uma tendência do aumento da condutividade da extremidade inicial para o final do perfil, justamente no sentido contrário ao dos poços de observação.

Constatado o mau posicionamento destes poços com relação ao fluxo do líquido poluente oriundo do aterro, optou-se pelo mapeamento de sua influência numa área de aproximadamente 5,5 ha, indicada na Figura 17, com a utilização do método eletromagnético indutivo.

O levantamento foi feito com o equipamento EM-31, com o eixo das bobinas na posição vertical. As medidas foram feitas ao longo de 6 perfis com direção aproximada N-S, distanciados de 50 metros, com pontos de investigação a cada 5 metros.

Na Figura 17, os resultados são expressos em curvas de isovalores de dB de condutividade, sendo o $dB = 20 \cdot \log \text{valor medido/valor do "background"}$.

FIGURA 17 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO (ATERRO SANITÁRIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS).

A morfologia das curvas na planta ou a anomalia condutora vista em perspectiva indica uma direção aproximada N-NW para o fluxo do líquido percolado a partir da frente de disposição do lixo, diferente daquela suposta quando da perfuração dos poços de observação já existentes.

A pesquisa no local não foi ainda retomada, motivo pelo qual não se dispõe de dados de análises químicas para correlação. No entanto, os resultados da campanha geofísica se adequaram perfeitamente ao mapeamento da influência do aterro sanitário na qualidade das águas subterrâneas no local, e certamente servirão de base para os trabalhos futuros.

3.1.3 - ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE

A cidade de Novo Horizonte está situada na região do médio Tietê, junto ao Ribeirão Três Pontes, no centro-oeste do Estado de São Paulo. O acesso, a partir da capital, é feito pelas rodovias Anhanguera e Washington Luiz, até as proximidades de Araraquara, e a partir daí pela rodovia SP-304.

Em toda região predominam os sedimentos do Grupo Bauru, pertencentes à Bacia do Paraná, que recobrem cerca de 40% da superfície do Estado e são constituídos predominantemente de arenitos, arenitos argilosos, por vezes carbonatados, além de siltitos, de idade cretácea.

Desde as primeiras descrições, datadas do início do século, têm surgido várias propostas com o intuito de interpretar a inter-relação de suas diversas unidades sedimentares. As últimas propostas, Soares et al., (1980) e Almeida et al. (1980), sugerem que a designação Grupo Bauru abranja as Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília.

A espessura destes sedimentos varia desde a inexistência, nos vales dos rios de maior expressão, onde afloram os basaltos da Formação Serra Geral, até o máximo de 250 metros nos espigões e depressões estruturais daquela rocha básica.

Estratigraficamente a Formação Adamantina, que é a que apresenta maior distribuição superficial, recobre as Formações Santo Anastácio e Caiuá, sendo recoberta pela Formação Marília. Stein et al. (1979) e Soares et al. (1980), entre outros, descrevem que seu contato é transicional com a Formação Santo Anastácio, e é constituída principalmente por arenitos de granulação fina a muito fina, cor rósea e castanha, alternados com siltitos de cor castanha avermelhada. Apresenta sua maior espessura, 190 metros, entre os rios Santo Anastácio e Paranapanema. Uma série de características, entre elas a presença de grande variedade de estruturas sedimentares, indica uma deposição em sistema flúvio-lacustre.

Em Novo Horizonte e região, incluindo a área do aterro sanitário, predominam os sedimentos da Formação Adamantina, com as características acima descritas.

Os dados dos 7 poços tubulares assinalados na Figura 18 indicam uma espessura variando entre 30 e 80 metros, aproximadamente, de SE para NW. O poço mais próximo ao aterro é do DAEE, e foi perfurado para abastecer a cidade. Seu perfil litológico apresenta 60 metros de arenitos da Formação Adamantina, assentados diretamente sobre o basalto da Formação Serra Geral, que no local apresenta uma espessura de 360 metros.

O aterro sanitário começou a operar em 1978 recebendo uma taxa diária de 10 toneladas de lixo, predominantemente do méstico. Por volta de 1981, o proprietário da Chácara da Estiva, situada a jusante do aterro, Figura 19, constatou alteração no odor e sabor da água do poço que abastecia sua residência, que apresenta o nível d'água a uma profundidade média de 6 metros.

Em meados de 1984, com a deterioração completa da qualidade da água do poço, foi providenciado o abastecimento da propriedade com água da SABESP.

No início do ano seguinte, a CETESB instalou 5 piezômetros com profundidades de até 7 metros, aproximadamente, no

FIGURA 18 - PLANTA DE LOCAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO
(ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE)
(MODIFICADO DE IBGE, 1973)

Figura 19 - Planta de locação das sondagens e caminhamentos elétricos — Aterro Sanitário de Novo Horizonte (modificado de CETESB, 1987).

interior da área do aterro, locais esses assinalados na Figura 19. Teve início, na ocasião, o monitoramento da qualidade da água subterrânea local, embora de maneira precária.

Com o agravamento do problema, constatado a partir do aumento do mau cheiro exalado pela água do poço da referida propriedade, a CETESB solicitou ao CEPAS - Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas do IG-SP, a execução de uma campanha geofísica para mapear a influência do aterro no sub-solo, e orientar a abertura de poços de observação e amostragem. Os trabalhos foram feitos no final de 1985 e início de 1986.

Numa primeira etapa foram feitas 13 sondagens elétricas e posteriormente 570 metros de caminhamento elétrico com 3 diferentes arranjos de eletrodos e pontos de investigação a cada 10 metros. As sondagens obedeceram ao arranjo Schlumberger, com a linha de emissão de corrente distanciada de até 200 metros. No caminhamento elétrico utilizou-se arranjos de eletrodos com AB = 15, 25 e 35 metros, para investigar profundidades compreendidas entre 5 e 17 metros aproximadamente.

Os pontos investigados estão assinalados na planta da Figura 19, as curvas de resistividade aparente nas Figuras 20, 21 e 22, os dados da interpretação das sondagens no Quadro III, e os perfis de resistividade aparente nas Figuras 23 e 24.

Na interpretação das sondagens, alguns dados não ficaram bem definidos. A profundidade do lençol freático é bastante variável no local, devido a existência de vários níveis argilosos impermeáveis nos sedimentos. Apenas nas sondagens de nºs 6, 7, 9, 10, 12 e 13 a profundidade do basalto ficou definida - em torno de 60 metros.

Apesar da correlação entre as camadas elétricas de cada sondagem não ser muito clara, pode-se, com algumas ressalvas, tirar algumas conclusões. A camada elétrica inferior, e mais espessa, do arenito saturado, apresenta uma resistividade inferior a 50 ohm.m. Entre as camadas superiores, de

resistividade mais elevada, destacam-se as segundas camadas das sondagens de nºs 2, 3, 7 e 8, e as terceiras das sondagens 4 e 5, com resistividade bem inferior às demais, que parecem estar influenciadas pelo líquido percolado do aterro, de alta condutividade.

FIGURA 20 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITARIO DE NOVO HORIZONTE),

Esta tendência define uma direção de fluxo da mancha de poluição que é bem mais nítida no caminhamento elétrico, entre os pontos 50 e 230 do Perfil I, e entre os pontos 100 e 230 do Perfil II, aproximadamente, onde se observa claramente uma anomalia negativa nos valores de resistividade aparente medidos.

Estas conclusões permitiram definir os limites da mancha de poluição assinalados na planta da Figura 25, com o sentido

FIGURA 21 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE).

do fluxo nitidamente para SE, a partir da frente de disposição do lixo. Estes limites são coerentes com a localização do poço cuja água se encontra contaminada, e a nascente, cuja água não apresentou sinais de poluição em análises químicas realizadas à época.

O contorno da mancha na frente sudeste não ficou bem definido, pois na área indicada como horta e pomar haviam diversas construções e cercas de arame que impediram a execução de medidas no local. A construção de poços de amostragem deverá definir estes limites e, através do monitoramento da qualidade das águas subterrâneas no local, permitir mapear o avanço da mancha de poluição com o transcorrer do tempo, a fim de sugerir medidas de controle.

FIGURA 22 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE),

SE nº	Espessura (m)	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)	Observações
1	0,5	0,5	170	
	9,0	9,5	3 500	
	43,0	52,5	240	
	indef.	> 52,5	50	
2	2,0	2,0	125	N.A. 2,0 m
	1,5	3,5	60	
	2,0	5,5	3 800	
	indef.	> 5,5	50	
3	2,0	2,0	120	N.A. 2,0 m
	2,0	4,0	35	
	9,0	13,0	160	
	6,5	19,5	800	
4	indef.	> 19,5	30	N.A. 4,5 m
	1,0	1,0	220	
	2,0	3,0	440	
	2,5	5,5	65	
5	33,0	38,5	120	N.A. 6,5 m
	3,5	42,0	600	
	indef.	> 42,0	30	
	2,5	2,5	250	
6	1,5	4,0	1 250	Rocha 57 m
	1,0	5,0	80	
	4,0	9,0	1 500	
	indef.	> 9,0	50	
7	2,0	2,0	350	Rocha 58 m
	0,5	2,5	3 700	
	8,5	11,0	1 200	
	16,0	27,0	135	
8	30,0	57,0	40	Rocha 61 m
	indef.	> 57,0	~ 200	
	3,0	3,0	270	
	5,0	8,0	130	
9	16,0	24,0	240	Rocha 63 m
	34,0	58,0	15	
	indef.	> 58,0	~ 200	
	1,0	1,0	440	
10	2,5	3,5	180	Rocha 67,5 m
	15,0	18,5	780	
	indef.	> 18,5	55	
	1,0	1,0	3 300	
11	23,0	24,0	630	Rocha 60,5 m
	37,0	61,0	30	
	indef.	> 61,0	~ 200	
	2,5	2,5	350	
12	0,5	3,0	2 500	Rocha 60,5 m
	9,0	12,0	1 700	
	51,0	63,0	50	
	indef.	> 63,0	150	
13	1,0	1,0	420	
	12,0	13,0	1 500	
	13,0	26,0	400	
	indef.	> 26,0	50	
14	1,5	1,5	340	Rocha 67,5 m
	10,0	11,5	700	
	6,0	17,5	60	
	50,0	67,5	25	
15	indef.	> 67,5	~ 200	Rocha 60,5 m
	2,5	2,5	520	
	6,5	9,0	2 700	
	51,5	60,5	35	
16	indef.	> 60,5	~ 200	

QUADRO III - DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS (ATERRO SANITÁRIO DE NOVO HORIZONTE).

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - NOVO HORIZONTE
PERFIL I

FIGURA 23 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - NOVO HORIZONTE
PERFIL II

FIGURA 24 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

Figura 25 - Planta com o contorno da área poluída e localização dos piezômetros e piezômetros multiníveis - Aterro Sanitário de Novo Horizonte (modificado de CETESB, 1987).

Providências neste sentido estão sendo tomadas conjuntamente pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do IG-USP e CETESB, tendo sido instalados recentemente na área os quatro piezômetros multiníveis assinalados na planta da Figura 25, seguindo orientação dos estudos geofísicos. A área está sendo objeto de estudo da pós-graduanda Maria Tereza Castelo Branco Ferreira Cleary, ligada ao CEPAS, que deverá resultar em Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

3.2 - ÁREAS DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA

O processamento industrial da transformação da cana-de-açúcar em álcool e açúcar utiliza grande volume d'água e, diversos efluentes sólidos e líquidos com características diferentes são, contínua ou intermitentemente produzidos. Pode-se classificá-los da seguinte forma (Hespanhol, 1978):

- água de lavagem de cana;
- bagaço;
- torta;
- água condensada dos evaporadores;
- água condensada das colunas barométricas; e
- vinhaça.

A vinhaça, embora seja produzida em volume muito pequeno quando comparado com outros resíduos oriundos das usinas de açúcar e álcool, é o que tem causado maiores controversias, devido aos efeitos negativos que provoca nos cursos de água quando disposto sem tratamento conveniente.

Considerando os danosos efeitos da vinhaça, seja pela poluição dos rios ou alterações do equilíbrio ecológico, o Ministério de Estado do Interior baixou a portaria GN/nº 323 de 29/11/1978 proibindo o seu lançamento direto ou indiretamente nos cursos d'águas pelas destilarias de álcool.

Desde então acelerou-se estudos para o uso racional e alternativo da mesma tais como: produção de biogás, produção de proteína unicelular, reciclagem industrial, fertilizantes, etc..

Os estudos do prof. Jayme Rocha de Almeida, do Instituto Zimotécnico de Piracicaba (SP) demonstraram as características fertilizantes da vinhaça, mais evidentes e viáveis que outros métodos. Portanto, esta prática denominada fertirrigação tem se manifestado como seu uso mais aceito.

A experiência tem demonstrado a necessidade de, em qualquer sistema integrado de seu aproveitamento, dispor de área de segurança, não muito distante da destilaria, que poderá ser utilizada, nos casos em que, por algum acontecimento extraordinário e imprevisível, seja necessário se desfazer rapidamente da vinhaça. Isto pode acontecer em dias de chuva prolongada, quebra de caminhões, ou qualquer outro evento que impeça sua aplicação racional. As áreas de segurança são também conhecidas como "áreas pulmão" ou "áreas de sacrifício", sendo caracterizadas por receber doses maciças do produto.

As áreas de sacrifício e/ou fertirrigação constituem-se num método muito difundido, em vista de ser muito mais econômico comparativamente aos métodos convencionais e que se traduz melhor, por uma transferência do tipo de poluição, ao invés de se promover a poluição dos recursos hídricos superficiais, substituem-se estes, pelo solo e água subterrânea que passam a ser, então, os corpos receptores (Amaral e Silva, 1982).

Os trabalhos referentes aos efeitos da aplicação da vinhaça na fertilidade dos solos foram largamente desenvolvidos pelos pesquisadores da área de agronomia. No que se refere à poluição das águas subterrâneas, somente agora estão sendo realizados os primeiros trabalhos, não se podendo ter uma visão estatística de seu alcance.

A vinhaça é um subproduto da fabricação do álcool etílico através do sistema de fermentação biológica, sendo conhecida regionalmente sob diferentes denominações, tais como: vinho to, calda, restilo, garapão, etc.. Apresenta uma elevada demanda biológica de oxigênio (DBO na ordem de aproximadamente 12000 a 20000 ppm de oxigênio), o que a caracteriza como um material altamente poluente. Isto decorre principalmente pelo fato de apresentar em sua composição um alto conteúdo de matéria orgânica.

É um produto que contém entre os seus componentes sólidos, além do alto conteúdo de matéria orgânica, uma elevada porcentagem de potássio, mostrando também quantidades apreciáveis de outros elementos como nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio, sódio, ferro e enxofre.

Ranzani (1956) mostrou que a condutividade elétrica dos solos que recebem vinhaça aumenta até atingir valores tão altos quanto 10 mS/cm, quando utilizado 1000 m³/ha de vinhaça. Este aumento, de acordo com Camargo et al. (1983), é atribuído em grande parte, ao aumento da saturação em potássio.

3.2.1 - NOVO HORIZONTE

A área de infiltração de vinhaça, ou área de sacrifício, utilizada pela Usina São José da Estiva em Novo Horizonte, dista aproximadamente 3,5 Km em linha reta, no sentido SE, da área do aterro sanitário enfocada no item anterior (Figura 26).

As condições geológicas das duas áreas são semelhantes, porém neste caso o pacote sedimentar apresenta uma espessura menor, em torno de 30 metros, segundo informações obtidas a partir do perfil do poço tubular existente nas proximidades.

Antes da utilização desta área, a referida usina chegou a praticar, sem critério algum, o despejo do produto em outros terrenos de sua propriedade. Com o passar do tempo

Figura 26 - Planta de locação da área de estudo (Área de Infiltração de Vinhaça de Novo Horizonte) (modificado de IBGE, 1973)

ocorreu a contaminação da água de alguns poços rasos que abasteciam residências situadas nas proximidades, porém em áreas de cotas mais baixas, chamando a atenção para o problema. Foi então escolhida a área de sacrifício em questão.

Esta área, com aproximadamente 27 ha, começou a ser operada em 1979, e até 1986 recebeu elevadas quantidades de vinhaça, aproximadamente 348.000 m³/ano. Atualmente recebe o produto somente nos dias de chuva, quando o acesso às áreas de fertirrigação torna-se impossível. A vinhaça é depositada em tanques escavados nos locais de cotas mais elevadas e distribuída por gravidade pela "zona de infiltração" através de sulcos ou canais. A área situada até 200 metros a partir da drenagem, era considerada "zona de proteção do manancial superficial" pela legislação da época, não podendo receber diretamente o líquido poluente.

A partir de 1985, o CEPAS/IG-USP, em convênio com a CETESB, se interessou pelo monitoramento da qualidade da água subterrânea na "zona de proteção do manancial" que passou a se constituir na área de estudo do pós-graduando Seiju Hassuda, e que deverá resultar em Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

Foi então implantada uma rede de piezômetros, nos locais assinalados na Figura 27. O nível d'água estava situado entre 1,5 e 6,5 metros de profundidade, com gradientes de fluxo de 5%. Os coeficientes de condutividade hidráulica situaram-se entre 10^{-5} e 10^{-6} m/s. Os dados sedimentológicos e mineralógicos do material perfurado mostraram tratar-se de uma formação arenosa relativamente homogênea. A análise da solução do solo da área de sacrifício em 3 amostras, apresentou valores de condutividade da ordem de 1 a 3 mS/cm, aproximadamente 10 vezes maiores que o valor normal encontrado na região. As primeiras medidas de pH e condutividade específica da água, executadas no campo, revelaram um grande contraste em relação aos valores de referência regional: pH entre 4,0 e 5,0, no

Figura 27- Planta de locação das sondagens e caminhamentos elétricos (Área de Infiltração de Vinhaça de Novo Horizonte) (modificado de REBOUCAS et al., 1986).

local, e pH entre 6,0 e 6,5, regional; condutividade entre 1,0 e 1,5 mS/cm, no local, e 0,05 mS/cm, regional. (Rebouças et al. 1986).

Este fato deu ensejo para que se aplicassem técnicas geofísicas para medidas de resistividade e condutividade dos materiais do sub-solo, com o objetivo de mapear os efeitos da poluição e o fluxo subterrâneo da vinhaça a partir dos tanques de deposição e dos canais de infiltração.

Numa primeira etapa foram executadas 6 sondagens elétricas e 2.400 metros de caminhamento elétrico com 3 diferentes arranjos de eletrodos e pontos de investigação a cada 10 metros. Nas sondagens, o arranjo de eletrodos utilizado foi o de Schlumberger, com a linha de emissão de corrente espaçada de até 200 metros. No caminhamento elétrico utilizou-se arranjos de eletrodos com AB=15, 25 e 35 metros, para investigar profundidades entre 5 e 17 metros aproximadamente.

Os pontos investigados estão assinalados na planta da Figura 27, as curvas de resistividade aparente nas Figuras 28 e 29, os dados da interpretação das sondagens no Quadro IV, e os perfis de resistividade aparente nas Figuras 30, 31 e 32.

No quadro de interpretação das sondagens observa-se que a última camada, correspondente ao basalto, está situada a uma profundidade em torno de 30 metros, e que a resistividade da camada sobrejacente, que corresponde ao sedimento saturado, diminui da sondagem nº 1 para a nº 6. Voltando a observar a planta da Figura 27, nota-se que o número de tanques de deposição de vinhaça aumenta também neste sentido, o que faz aumentar a condutividade dos sedimentos próximos a eles.

Nos perfis dos caminhamentos elétricos, os valores estão expressos em dB de resistividade ($dB = 20 \cdot \log \text{valor medido} / \text{valor do "background"}$) e são negativos porque foi adotado o valor 1.000 ohm.m para o "background".

FIGURA 28 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE NOVO HORIZONTE),

FIGURA 29 - CURVAS DE RESISTIVIDADE APARENTE (ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE NOVO HORIZONTE).

SOND. ELÉTRICA Nº	ESPESSURA (M)	PROFUNDIDADE (M)	RESISTIVIDADE (OHM.M)
1	1	1	500
	2	3	2 000
	17	20	150
	10	30	40
	ind.	>30	>300
2	1	1	80
	2	3	350
	25	28	40
	ind.	>28	>300
3	3	3	100
	4	7	140
	23	30	35
	ind.	>30	>300
4	1	1	120
	7	8	50
	24	32	20
	ind.	>32	>300
5	1	1	500
	3	4	800
	27	31	20
	ind.	>31	>300
6	3	3	500
	12	15	80
	20	35	25
	ind.	>35	>300

QUADRO IV - DADOS DA INTERPRETAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉTRICAS
(ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE NOVO HORIZONTE),

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - NOVO HORIZONTE
PERFIL I

FIGURA 30 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - NOVO HORIZONTE
PERFIL II

FIGURA 31 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

CAMINHAMENTO ELÉTRICO - NOVO HORIZONTE
PERFIL III

FIGURA 32 - PERFIS DE RESISTIVIDADE APARENTE.

No Perfil I os valores de resistividade aparente se apresentaram mais baixos e homogêneos por terem sido medidos diretamente na zona de infiltração do produto.

Os Perfis II e III apresentam um comportamento mais heterogêneo, onde os valores mais baixos de resistividade correspondem às zonas de maior porosidade e permeabilidade, que favorecem a percolação do produto infiltrado, conferindo uma maior condutividade aos sedimentos.

As Figuras 33 e 34 mostram os resultados do levantamento eletromagnético executado na área, utilizando o equipamento EM-31, com o eixo das bobinas na posição vertical, e o EM34, com espaçamento de 20 metros entre as bobinas e eixo na posição horizontal. Com estas disposições, as profundidades investigadas situaram-se em torno de 6 e 15 metros, respectivamente.

As medidas foram feitas ao longo de 7 perfis com direção aproximada N-S, espaçados de 40 metros, e com pontos de investigação a cada 10 metros. Os valores de condutividade estão expressos em dB, sendo que no primeiro caso, zero dB = 15 mmho/m, e no segundo, zero dB = 20 mmho/m, e o intervalo entre as curvas de equicondutividade é de 2 dB.

As formas das anomalias condutoras mostram as áreas de maior concentração de vinhaça no sub-solo, e o maior contraste de condutividade obtido com o Em-31 indica uma diminuição do grau de contaminação com o aumento da profundidade. Nos dois casos, as curvas de isovalores indicam uma diminuição da concentração de vinhaça no sub-solo a partir da área de infiltração para a zona de proteção do manancial.

3.2.2 - RIBEIRÃO PRETO

A cidade de Ribeirão Preto situa-se na região nordeste do Estado de São Paulo, distando cerca de 320 Km da capital,

Figura 33 - Levantamento eletromagnético (EM31-V) - (Área de Infiltração de Vinhaça de Novo Horizonte).

Figura 34 - Levantamento eletromagnético (EM34 - 20mH) - (Área de Infiltração de Vinhaça de Novo Horizonte).

cujo acesso é feito pela Rodovia Anhanguera (SP-330). A área de estudo, na Usina da Pedra, localiza-se a aproximadamente 25 Km a leste de Ribeirão Preto, com acesso pela Rodovia SP-333 (Figura 35).

Sob o ponto de vista geológico, a região caracteriza-se pela presença de arenitos da Formação Botucatu, pelos basaltos e diabásios da Formação Serra Geral, além de cobertura cenozóica, representada pelos aluviões, junto às drenagens mais expressivas.

A área de sacrifício encontra-se no contexto da calha do Rio Pardo, coberta parcialmente por sedimentos aluviais constituídos, predominantemente, por cascalhos, areias e argilas, com espessuras da ordem de 6 metros. O substrato destes sedimentos é constituído, em sua maior parte, por basaltos e diabásios intensamente fraturados. Poços existentes nesta área apresentam vazões entre 20 e 90 m³/hora, com taxa de infiltração total de 14,5% da precipitação pluviométrica e recarga profunda de 13%. Estes dados revelam valores elevados de porosidade fissural e alta permeabilidade, favorecendo a infiltração dos poluentes no aquífero (Ellert et al. 1987).

A infiltração de vinhaça no sub-solo é um problema de difícil solução, especificamente no contexto geológico da região de Ribeirão Preto, em razão da alta porosidade dos sedimentos quaternários e do intenso fraturamento dos basaltos e diabásios, que acabam, por conseguinte, não constituindo uma zona de retenção do produto e, portanto, não servindo de proteção ao arenito Botucatu, importante aquífero a nível local e regional, especificamente em sua área de recarga.

Considerando a concentração de usinas produtoras de açúcar e de álcool no Estado de São Paulo, onde a infiltração no sub-solo é uma prática de rotina, o CEPAS/IG-SP resolveu investigar os riscos de contaminação dos aquíferos já que estas unidades se localizam nas principais províncias hidrogeológicas da Bacia do Paraná, compreendendo as zonas de

Figura 35 - Planta de localização da área de estudo (Área de Infiltração de Ribeirão Preto) (modificado de IBGE, 1971)

afloramentos e recarga dos sistemas aquíferos do Estado, responsáveis pelo abastecimento de água de importantes centros urbanos. A área de sacrifício da Usina da Pedra foi um dos locais escolhidos.

O equipamento utilizado na pesquisa foi o EM31, que permite uma investigação máxima de 5 metros de profundidade.

Localmente, o nível da água estava a menos de 3 metros de profundidade sendo que as medidas de condutividade foram feitas entre os tanques de infiltração segundo uma malha regular, com pontos espaçados de 10 metros. Os valores de condutividade obtidos variaram de 7 mS/m a mais de 60 mS/m. O valor do "background" determinado a montante das bacias de infiltração mostrou uma condutividade da ordem de 7 mS/m e, a jusante das mesmas os valores subiram acima de até 10 vezes este valor regional.

O levantamento geofísico na área foi realizado em dois períodos: na entre-safra (mês de maio) quando as lagoas de infiltração estavam vazias, e na safra (mês de setembro) com as lagoas cheias de vinhaça. Os valores de isocondutividade em dB são mostrados nas Figuras 36 e 37, respectivamente, com representação em planta e em perspectiva.

Os valores de condutividade obtidos durante a entre-safra revelaram anomalias condutoras, na extremidade sul da área, onde o contraste atingido foi de até 12 dB, mostrando que a mesma foi utilizada, anteriormente, como zona de infiltração.

Os dados levantados mostram que no período da entre-safra, com os tanques de deposição de vinhaça vazios e a elevada vazão do rio, as soluções poluentes não atingem facilmente as águas superficiais, mas, desde que infiltradas podem alimentar o aquífero subterrâneo constituído pelos basaltos e diabásios.

Os dados obtidos através do levantamento executado no mês de setembro, mostraram que o contraste de condutividade atingiu até 18 dB na parte central da área. As linhas de isoanomalia apresentam o mesmo comportamento dos valores do levantamento anterior próximo à margem, onde a baixa condutividade indica a existência de um fluxo paralelo ao sentido do rio.

LEGENDA

—10—

Curva de isovalores
(dB de condutividade)

FIGURA 36 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO - MAIO-86 (ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE RIBEIRÃO PRETO) (MODIFICADO DE ELLERT ET AL., 1987).

LEGENDA

— 10 —

Curva de isovalores
(dB de condutividade)

FIGURA 37 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO - SETEMBRO-86
(ÁREA DE INFILTRAÇÃO DE VINHAÇA DE RIBEI-
RÃO PRETO (MODIFICADO DE ELLERT ET AL.,
1987).

4 - MAPEAMENTO DE AREA CONTAMINADA: REGIAO LITORANEA

A salinização da água dos oceanos através da constante evaporação a partir de sua superfície, é um processo irreversível e conhecido desde os primórdios da civilização.

Este fato acarreta sérios problemas para o abastecimento de água em regiões costeiras, que se vê fortemente prejudicado pela influência da água salgada dos oceanos que, penetrando em forma de cunha sob a água doce continental, chega a atingir distâncias consideráveis a partir da linha de costa, inviabilizando a perfuração de poços tubulares profundos em extensas áreas.

Por se tratar de dois líquidos miscíveis, a interface água doce/água salgada não se caracteriza por uma separação nítida, mas sim por uma zona de transição que reflete com intensidade variável as propriedades físicas e químicas dos dois líquidos.

A interface mergulha no sentido do continente, com a água doce sobre a água salgada, devido a suas diferentes densidades. Considerando 1.000 g/cm^3 a densidade da água doce e $1,025 \text{ g/cm}^3$ a densidade da água salgada, a conhecida expressão de Ghyben-Herzberg (in Castany, 1967) estabelece que a água salgada é encontrada a uma profundidade abaixo do nível do mar 40 vezes maior que a altura da água doce acima do mesmo nível. Esta relação é apenas uma primeira aproximação, válida para certas condições ideais, não consideradas para estudos matemáticos mais complexos do comportamento dos dois líquidos.

O equilíbrio entre as águas doce e salgada nos aquíferos costeiros é função do fluxo de água doce do continente para o oceano. Se se estabelece captações de água doce, reduz o fluxo e essa condição é alterada, provocando uma maior penetração da água do mar, estabelecendo-se, assim, um novo equilíbrio. Se a exploração dos aquíferos costeiros é indiscriminada, e a extração supera a recarga, torna-se impossível restabelecer a

condição inicial e a água do mar penetra lenta, porém continuamente, até alcançar e contaminar o aquífero continental.

Para o consumo humano a água tem que atender a certos padrões de potabilidade já conhecidos e consagrados, que levam em conta, entre outros fatores, a quantidade de sólidos totais dissolvidos. Este parâmetro está intimamente relacionado com o grau de salinidade da água (Quadro V).

Há uma íntima relação entre a resistividade elétrica (ou condutividade) da água, e os sólidos totais dissolvidos, que varia diretamente com a temperatura. Em linhas gerais, a água salgada dos oceanos apresenta uma resistividade média em torno de 0,2 ohm.m, e a água doce em torno de 10 ohm.m.

Este contraste de 50 vezes pode representar uma variação menor, porém bastante significativa, na resistividade das formações aquíferas saturadas com água doce ou com água salgada. Esta variação depende da porosidade das formações, e nos sedimentos arenosos com 20% de porosidade efetiva pode chegar a um contraste de 30 vezes.

Como se vê, a partir da medida da resistividade e/ou condutividade elétrica dos sedimentos recentes predominantemente arenosos e comuns em nossas praias, principalmente as do litoral norte do Estado de São Paulo, é possível estudar o comportamento da interface água doce/água salgada, e mapear a cunha salina, no sentido de permitir um controle e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, objetivando a preservação dos aquíferos costeiros.

4.1 - LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA ÁREA DE ESTUDO

Como área de estudo foi escolhida a região do litoral norte paulista compreendida entre Bertioga e São Sebastião. Neste trecho existem inúmeras praias que correspondem a planícies sedimentares com características geomorfológicas diversas separadas por pontões do embasamento cristalino.

SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS (mg/l)	GRAU DE SALINIDADE	CATEGORIA
zero a 1.000	não salina	água doce
1.000 a 3.000 3.000 a 10.000	levemente salina moderadamente salina	água salobra
10.000 a 100.000 mais que 100.000	salina salmoura	água salgada

QUADRO V - CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA COM BASE NA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS (FONTE: ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE).

Praticamente em todas as praias existem pequenas concentrações urbanas, sendo que as mais numerosas chegam a ter por volta de 10.000 habitantes de população fixa. No entanto, na última década a rápida expansão demográfica gerou uma ocupação desordenada, principalmente após a inauguração da Rodovia Rio-Santos, BR-101, que serve todo este trecho do litoral.

Com o "progresso" chegaram também os problemas relacionados à falta de infraestrutura, cujo aspecto relativo ao saneamento básico é o mais delicado, pois se vê agravado pela escassez de água potável devido a contaminação dos aquíferos continentais pela intrusão da água do oceano.

As previsões futuras quanto ao desenvolvimento da região não são animadoras, pois a desobediência às leis de uso e ocupação do solo e a não observação dos critérios relativos à legislação específica, criam condições para a aceleração do processo de deterioração das condições de vida na região, dos quais um dos principais fatores é o comprometimento do aquífero continental.

Como se não bastasse a importância em si da área escolhida para o estudo quer seja pela preocupação com as condições de vida da população local, ou pelo que ela representa em termos de atividades turísticas, deve-se ressaltar ainda que ela reproduz as condições geológicas, geomorfológicas e sócio-econômicas de grande parte do litoral brasileiro, para o qual os resultados podem ser estendidos, com pequenas adaptações.

Na região em questão as áreas específicas que foram objeto do estudo são as praias de Boracéia, Jaqueí, Baleia, Boiçucanga e Maresias (Figura 38).

4.2 - GEOLOGIA

A zona costeira do Estado de São Paulo está compreendida entre as coordenadas 23° e 25° de latitude sul e 45° e 48° de longitude oeste, inserida no "Complexo Litoral de Sudeste ou

Figura 38 - Mapa geológico simplificado da Região Litorânea com a localização das áreas de estudo (Modificado de IPT, 1981).

Costa Cristalina", adotado na divisão da costa brasileira (Silveira, 1964).

Do ponto de vista geológico esta região é caracterizada por rochas do embasamento cristalino e pelas planícies sedimentares de idade quaternária. Possui duas morfologias distintas: ao sul são encontradas as maiores planícies sedimentares de origem marinha flúvio-lagunar e, ao norte, ocorrem pequenas planícies constituídas por depósitos marinhos e continentais. Essas planícies são separadas entre si por pontões do embasamento cristalino em contato com o mar (Martin & Sugguio, 1976).

A área de estudo está situada nas planícies sedimentares do litoral paulista, entre a Ilha de Santo Amaro e Ilha de São Sebastião, destacando-se as planícies de Bertiooga, Juqueí, Baileia, Boiçucanga e Maresias (Figura 38). Essas planícies recobrem o embasamento cristalino representado pelo Complexo Costeiro, de idade arqueana e Suítes Graníticas Sintectônicas Fácies Cantareira, de idade proterozóica (Almeida et al. 1981).

As planícies sedimentares do litoral de São Paulo são de origem marinha constituídas de sedimentos arenosos, depositados durante o Pleistoceno e Holoceno pelas últimas transgressões glácio-eustáticas.

A planície de Bertiooga tem uma extensão de 45 Km, delimitada pela Ilha de Santo Amaro e a Ponta do Una, com largura variando entre 7 e 8 Km. É composta em sua maior parte por areias marinhas de idade holocênica, sotopostas por aluviões e coluviões nas proximidades do embasamento. Nesta planície foram encontrados vestígios de um "beach-rock" (arenito de praia) numa reentrância do Morro da Enseada, com níveis ricos em fragmentos de conchas que, comparados a composição desses níveis com a dos sedimentos atuais de uma praia próxima, indicou que o nível do mar foi superior a $4,2 \pm 0,5$ m em relação ao atual (Martin & Sugguio, 1976).

As pequenas planícies de Juqueí e Boiçucanga, bem como as demais planícies do litoral norte, são formadas de sedimentos marinhos holocênicos e de sedimentos continentais. Segundo esses autores, existem dois tipos de pequenas planícies no litoral norte de São Paulo.

O tipo Juqueí, onde uma restinga fecha a baía que existia no local da planície atual formando uma laguna com deposição de argilas orgânicas. Com o abaixamento do nível do mar a restinga foi alargada desaparecendo a laguna e possibilitando o recobrimento das argilas orgânicas pelos sedimentos continentais.

Na planície do tipo Boiçucanga não houve a formação de restinga e os sedimentos marinhos e continentais vêm juntos do sopé da Serra do Mar.

O Complexo Costeiro é caracterizado por rochas de diversas litologias que sofreram metamorfismo de fácies granulito e anfibilito, bem como migmatização e granitização (Almeida et al. 1981). Predominam as seguintes litologias: migmatitos de estruturas e paleossomas diversos (xistoso, anfibolítico, gnáissico, quartzítico e calciossilicático), migmatitos de estrutura complexa (policíclicos) de paleossoma predominantemente gnáissico, charnoquitos, kinzigitos e rochas granito-gnáissicas a hiperstênio.

As rochas do Fácies Cantareira são corpos para-autóctones e alóctones que se caracterizam por apresentarem foliação, granulação fina a média, textura porfirítica frequente, contatos parcialmente concordantes e composição granodiorítica a granítica.

4.3 - LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS E PONTOS INVESTIGADOS

A distância a partir da linha de praia em que a cunha salina pode penetrar no aquífero continental depende de diversos fatores, como a topografia, litologia, porosidade e

permeabilidade dos materiais do sub-solo, e, ainda, do nível piezométrico da água doce. É certo porém, que com o aumento da distância, independentemente dos outros fatores, a influência da água salgada dos oceanos tende a diminuir, até desaparecer.

Por este motivo, nas áreas estudadas, os perfis foram dispostos perpendicularmente a partir da linha de praia, até uma distância em que seguramente não se percebia a influência da água salgada nas medições geofísicas, ou então até que houvesse um impedimento físico qualquer, como uma região salgada.

Os perfis foram demarcados a cada 10 metros, com piquetes numerados sequencialmente a cada 50 metros, a partir do primeiro, número 0 (zero), localizado na praia, sempre próximo à linha de arrebentação.

Como nem sempre os perfis correspondiam a ruas ou locais facilmente identificáveis, procurou-se fazer a amarração com a quilometragem da rodovia federal BR-101, Rodovia Rio-Santos.

Os perfis foram numerados de I a VI, no sentido de Bertiooga para São Sebastião. Seus dados estão resumidos no Quadro VI, e os croquis com suas localizações nas Figuras 39 a 44.

4.4 - INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

Os perfis assinalados foram investigados por sondagens elétricas, sondagens eletromagnéticas e caminhamento eletromagnético. A densidade dos pontos de medida foi sempre maior no início do perfil, onde era clara a influência da água salgada.

As sondagens elétricas foram executadas nos piquetes zero, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 20 e 24, isto é, espaçadas de 50 metros no início do perfil, e 200 metros no final. No Perfil VI foi executada uma sondagem no piquete 7, ao invés de duas nos piquetes 6 e 8 (Quadro VII).

FIGURA 39 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL I.

FIGURA 40 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL II.

FIGURA 41 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL III.

FIGURA 42 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL IV.

FIGURA 43 - CROQUI COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL V.

FIGURA 44 - CROQUI COM A LOCALIZACAO DO PERFIL VI.

PERFIL	LOCAL	EXTENSÃO (m)	FIGURA
I	Praia de Boracéia	800	39
II	Praia de Juqueí	1 200	40
III	Praia da Baleia	1 000	41
IV	Praia de Boiçucanga	700	42
V	Praia de Maresias	600	43
VI	Praia de Maresias	1 500	44

QUADRO VI - DADOS DOS PERFIS INVESTIGADOS

SONDAGEM N°	LOCAL	
	PERFIL	PIQUETE
1	I	0
2	I	1
3	I	2
4	I	3
5	I	4
6	I	6
7	I	8
8	I	12
9	I	16
10	II	0
11	II	1
12	II	2
13	II	3
14	II	4
15	II	6
16	II	8
17	II	12
18	II	16
19	II	20
20	II	24
21	III	0
22	III	1
23	III	2
24	III	3
25	III	4
26	III	6
27	III	8
28	III	12
29	III	16
30	IV	0
31	IV	1
32	IV	2
33	IV	3
34	IV	4
35	IV	6
36	IV	8
37	IV	12
38	V	0
39	V	1
40	V	2
41	V	3
42	V	4
43	V	6
44	V	8
45	V	12
46	VI	0
47	VI	1
48	VI	2
49	VI	3
50	VI	4
51	VI	7
52	VI	12
53	VI	16
54	VI	20
55	VI	24

QUADRO VII - LOCALIZAÇÃO DAS SONDAGENS (REGIÃO LITORÂNEA).

No total foram executadas 55 sondagens elétricas, obedecendo ao arranjo Schlumberger, e com a linha de emissão de corrente espaçada de até 200 metros, ou até que se percebesse na curva de resistividade aparente a influência da rocha sã.

As sondagens eletromagnéticas constaram de 8 medidas de condutividade num mesmo ponto, com a distância entre as bobinas de 3,7 metros (EM-31), 10, 20 e 40 metros (EM-34), e com o eixo das mesmas nas posições horizontal (H) e vertical (V).

O número de sondagens eletromagnéticas foi bem maior que o de sondagens elétricas, porém, para efeito de estudo comparativo dos resultados, serão consideradas apenas as 55 executadas nos mesmos locais.

O caminhamento eletromagnético foi executado separadamente para cada espaçamento entre as bobinas, isto é, para cada arranjo (3,7, 10, 20 ou 40 metros) percorria-se todo o perfil medindo-se a condutividade com o eixo das mesmas nas posições horizontal e vertical.

Devido a facilidade e rapidez das leituras, procurou-se repetir as medidas para todos os arranjos, nos mesmos pontos do perfil, de modo que em todos estes locais locais tivéssemos uma sondagem eletromagnética. No entanto, isto não foi possível ao longo de todos os perfis.

O espaçamento entre os pontos investigados foi definido no campo durante o levantamento, em função da repetitividade das leituras. No início dos perfis, onde os valores de resistividade eram bastante variáveis, as medidas foram feitas a cada 10 metros. À medida que se distanciava da praia os valores iam se tornando mais constantes, e as leituras iam sendo espaçadas até chegar a 50 metros, no final dos perfis.

No entanto, perfil menor como o da praia de Boiçucanga, Perfil IV, foi todo investigado com pontos de medida a cada 10 metros. Os perfis II e III, praias de Juqueí e Baleia, tiveram pontos de medida a cada 10 metros até o piquete 10,

isto é, até 500 metros da praia. Este procedimento foi repetido no Perfil I até o piquete 5, no Perfil V até o piquete 7, e no Perfil VI até o piquete 8.

4.5 - ANÁLISE DOS DADOS

Os dados das sondagens foram interpretados quantitativamente através de programas de computador para ajuste de curvas baseados no processo iterativo descrito por Adil A. R. Zohdy no Geophysics, vol. 38, p. 713-728 (In: Zohdy, 1973).

As inversões usando funções modificadas de Dar Zarrouk permitem uma interpretação comparativa entre os dados de campo e os dados teóricos introduzidos.

A interpretação segue o procedimento de tentativa e erro, onde as disposições em termos percentuais diminuem na medida em que o modelo proposto fornece dados compatíveis com os dados de campo.

Teoricamente o número de camadas só é limitado pelo número de pontos da curva de sondagem. A introdução dos dados é feita utilizando a linguagem Turbo Pascal.

Os dados do caminhamento foram interpretados qualitativamente a partir da elaboração de perfis de condutividade aparente.

Os dados de resistividade aparente medidos nas sondagens elétricas estão, também, apresentados na forma de perfis, porém de condutividade, a fim de permitir um estudo comparativo com os dados do caminhamento eletromagnético. A transformação dos valores de resistividade em condutividade é feita pela simples operação:

$$\sigma_a \text{ (mmho/m)} = 1.000 / \rho_a \text{ (ohm.m)}$$

4.5.1 - SONDAGENS ELÉTRICAS

As curvas de resistividade aparente correspondentes às sondagens elétricas foram interpretadas pelo método descrito anteriormente.

As resistividades muito baixas, normalmente observadas próximo à praia, indicam claramente a influência da água salgada. No Perfil I, por exemplo, ela é notada desde o início até o local da sondagem número 3, como atestam as camadas com resistividade menor que 10 ohm.m. Já no final do perfil, a partir da sondagem número 7, não aparecem camadas com resistividade inferior a 25 ohm.m (Figuras 45 a 54).

Este comportamento foi observado em todos os perfis, porém em extensões variáveis. No Perfil II a influência da água salgada se manifesta desde a praia até o local da sondagem número 16, a 400 metros; na praia da Baleia, ao longo de todo o Perfil III, em Boiçucanga só até o local da sondagem número 2, a 100 metros da praia; em Maresias até o piquete 4, a 200 metros da praia, nos Perfis V e VI.

4.5.2 - SONDAGENS ELETROMAGNÉTICAS

Alguns aspectos negativos estão associados a este procedimento de sondagem. No aspecto prático, sua execução é dificultada pelo trabalho requerido em ligar e desligar as conexões dos cabos de 10, 20 e 40 metros no EM-34. É sabido, também, que os valores de condutividade medidos são bastante influenciados por fatores superficiais, o que exige certos cuidados quando da análise dos dados.

A interpretação das sondagens eletromagnéticas é feita através de programa análogo ao mencionado anteriormente, utilizado para as sondagens elétricas. No entanto, a dificuldade é muito grande para se encontrar um modelo que forneça parâmetros compatíveis com os dados de campo. Por outro lado, os equipamentos disponíveis, EM-31 e EM-34, não permitem a obten

FIGURA 45 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE - SONDAGEM N° 1
(REGIÃO LITORÂNEA).

MODELO DE SONDAGEM SCHLUNBERGER SONDAGEM ER 1:22

ESPACAMENTO	RESISTIVIDADE		% ERRO	Espes. (m) ρ (ohm.m)		
	MODELO	DADO		1	1.5	3
1.0	2.7			1	1.5	3
1.5	2.6			2	3.3	1
2.2	2.4	2.3	5.3	3	1.7	85
3.2	2.2	2.3	-2.7	4 120.0 5		
4.6	2.1	2.2	-3.9			
6.8	2.4	2.3	3.7			
10.0	3.0	3.0	1.5			
14.7	4.0	4.0	0.5			
21.5	5.0	5.3	-4.7	5 1000		
31.6	5.9	6.2	-5.7			
46.4	6.3	6.2	1.9			
68.1	6.3	6.2	0.9			
100.0	6.1	6.2	-2.4			
146.8	6.4	6.4	0.0			
215.4	7.8					
316.2	10.9					
464.2	15.8					
681.3	23.0					

FIGURA 46 - INTERPRETAÇÃO DA SONDAGEM Nº 1 (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 47 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE - SONDAGEM N° 2
(REGIÃO LITORÂNEA).

MODELO DE SONDAGEM SCHLUMBERGER SONDAGEM ER 2: 1

ESPACAMENTO	RESISTIVIDADE		% ERRO
	MODELO	DADO	

1.0	97.9		
1.5	97.7		
2.2	97.1	95.7	1.4
3.2	95.3	94.7	0.6
4.6	90.7	92.5	-2.0
6.8	81.0	79.2	2.2
10.0	65.5	65.0	0.8
14.7	48.1	49.3	-2.4
21.5	33.1	32.9	0.6
31.6	21.0	21.1	-0.5
46.4	12.7	12.4	2.4
68.1	10.9	11.0	-0.8
100.0	14.5		
146.8	21.1		
215.4	30.9		
316.2	45.2		
464.2	66.1		
681.3	96.5		

Espes. (m) ρ (ohm.m)

1	4.8	98
2	13.5	35
3	13.0	2
4	5000	

FIGURA 48 - INTERPRETAÇÃO DA SONDAGEM Nº 2 (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 49 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE - SONDAGEM N° 3
(REGIÃO LITORÂNEA).

MODELO DE SONDAGEM SCHLUMBERGER SONDAGEM ER 3: 2

ESPACAMENTO	RESISTIVIDADE		% ERRO
	MODELO	DADO	

1.0	1851.3		
1.5	1764.5		
2.2	1564.5	1624.8	-3.7
3.2	1210.9	1185.8	2.1
4.6	786.4	758.5	3.7
6.8	473.7	472.7	0.2
10.0	333.2	330.0	1.0
14.7	270.4	276.4	-2.2
21.5	204.0	196.6	3.8
31.6	120.6	119.0	1.3
46.4	51.3	51.6	-0.6
68.1	22.2	21.5	2.9
100.0	20.8		
146.8	29.2		
215.4	42.7		
316.2	62.7		
464.2	91.9		
681.3	134.8

Espes. (m) ρ (ohm.m)		
1	1.8	1900
2	14.0	300
3	50.0	10
4		5000

FIGURA 50 - INTERPRETAÇÃO DA SONDAGEM Nº 3 (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 51 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE - SONDAGEM N° 7
(REGIÃO LITORÂNEA).

SCHLUMBERGER MODELO DE SONDAGEM SONDAGEM ER 7: 3

ESPAÇAMENTO	RESISTIVIDADE MODELO DADO	% ERRO
-------------	------------------------------	-----------

1.6	966.9	
1.5	923.8	
2.2	857.1	859.1
3.2	785.4	790.6
4.6	731.5	732.9
6.8	698.2	697.8
10.0	671.7	665.0
14.7	630.3	598.5
21.5	545.0	513.1
31.6	395.0	383.3
46.4	214.0	221.9
68.1	86.6	82.0
100.0	45.2	45.0
146.8	50.0	47.4
215.4	70.9	
316.2	103.5	
464.2	151.2	
681.3	220.4	

1000

FIGURA 52 - INTERPRETAÇÃO DA SONDAGEM N° 7 (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 53 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE - SONDAGEM N° 8
(REGIÃO LITORÂNEA),

SCHLUMBERGER MODELO DE SONDAGEM SONDAGEM ER 8: 17

ESPACIMENTO	RESISTIVIDADE MODELO	DADO	% ERRO
-------------	-------------------------	------	-----------

1.0	382.9		
1.5	388.4		
2.2	402.0	392.2	2.5
3.2	429.8	425.7	1.0
4.6	472.0	470.3	0.4
6.8	518.1	518.4	-0.1
10.0	551.1	550.0	0.2
14.7	553.0	553.6	-0.1
21.5	503.7	477.5	4.8
31.6	377.9	360.9	4.7
46.4	215.6	222.4	-3.1
68.1	93.3	95.9	-2.7
100.0	50.1	48.0	4.3
146.8	54.2	55.8	-2.9
215.4	76.3		
316.2	111.2		
464.2	162.4		
681.3	236.6		

1000

Espes. (m) ρ (ohm.m)		
1	2.0	380
2	16.0	650
3	78.0	28
4		10000

FIGURA 54 - INTERPRETACAO DA SONDAGEM N° 8 (REGIÃO LITORÂNEA).

ção de uma curva de boa qualidade, visto que ela é traçada com base em uma densidade de pontos muito pequena - apenas oito. As tentativas de correlação entre os dados da interpretação quantitativa dos dois tipos de sondagem não apresentaram resultados positivos.

Qualitativamente, a única correlação segura é quanto à morfologia das curvas, como pode ser observado ao se lançar no gráfico da curva de resistividade aparente, os valores de resistividade calculados a partir da condutividade medida na sondagem eletromagnética, em função da profundidade de investigação para os diferentes espaçamentos entre as bobinas.

Nas Figuras de números 55 a 63 são mostradas correlações entre as curvas das sondagens elétricas e eletromagnéticas do Perfil I, estando representado em ordenada a resistividade aparente e em abscissa, a distância $AB/2$, para a sondagem elétrica (SER) e a profundidade de investigação para a sondagem eletromagnética (SEM). Esta profundidade equivale a 0,75 e 1,5 vezes a distância entre as bobinas, com o eixo horizontal e vertical, respectivamente.

Nota-se que a maior densidade de pontos permite o traçado de uma curva mais suave para as sondagens elétricas, produzindo resultados mais confiáveis. Pode-se, ainda, observar que as medidas das sondagens eletromagnéticas sofrem forte influência dos fatores superficiais, pois analisando-se os dados obtidos, verifica-se que a curva calculada correspondente às medidas da SEM apresenta valores maiores que os medidos na SER, fato observado no início dos perfis, próximo à praia, onde os valores de resistividade envolvidos são muito baixos. Porém, apesar dessa diferença no comportamento, a morfologia das curvas apresenta tendência bastante semelhante.

Distanciando-se da praia e à medida que as camadas passam a apresentar resistividade superior a 100 ohm.m, a diferença se inverte, isto é, a curva da SEM tende, a partir daí, a apresentar valores menores. Esse comportamento foi constatado em todos os perfis estudados.

FIGURA 55 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 56 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 57 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 58 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 59 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 60 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 61 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

FIGURA 62 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA),

FIGURA 63 - CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS DE SONDAGEM ELÉTRICA (SER) E SONDAGEM ELETROMAGNÉTICA (SEM) (REGIÃO LITORÂNEA).

4.5.3 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO

O caminhamento eletromagnético mostrou ser o procedimento mais adequado em termos de sensibilidade para mapear a presença da cunha salina. O contraste de condutividade entre os materiais saturados com água salgada e água doce chega a ser superior a 10. Esta vantagem é ressaltada ainda mais pela rapidez do levantamento.

Os dados estão apresentados em perfis, onde os valores de condutividade aparente medidos estão em escala logarítmica, e as distâncias a partir da praia em metros. Em cada figura estão agrupados os dados de um único espaçamento entre bobinas, com o eixo nas posições horizontal (H) e vertical (V). Deste modo, para cada perfil estudado, podem ser apresentados 4 perfis de condutividade correspondentes às medidas com o EM31, EM34-10m, EM34-20m e EM34-40m.

As figuras 64 a 67 mostram estes perfis de condutividade do Perfil I, praia de Boracéia.

Estes resultados estendem a área de influência da água salgada até pouco mais de 200 metros, a partir da praia. Pelos dados da interpretação das sondagens elétricas, esta influência só é notada até 100 metros.

Isto pode ser explicado pelo fato de em Boracéia, como nas outras praias estudadas, ser comum a presença de cordões litorâneos com cotas de até 3 metros acima do nível do mar, e que funcionam como verdadeiros divisores de água da planície costeira. Estes cordões impõem às drenagens, um traçado paralelo à costa, com a foz geralmente situada no canto das planícies junto aos pontões do embasamento que separam as praias, por onde a água salgada penetra, durante as altas marés, e vai contaminar as águas subterrâneas além dos cordões.

Outro fato observado é que com o aumento da profundidade investigada, o contraste de condutividade diminui, de onde se

FIGURA 64 -- PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

FIGURA 65 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

FIGURA 66 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

FIGURA 67 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

conclui que, os arranjos com espaçamento entre bobinas que permitem investigar menores profundidades (EM31 e EM34-10m) são os mais adequados para o levantamento. O aumento de condutividade dos materiais mais profundos nos dois terços finais do perfil se deve à presença de camadas de argila orgânica e aumento dos teores de ferro na água, e não à influência da água salgada do oceano. Chega-se a esta conclusão a partir das informações dos moradores da região, segundo os quais, os poços para abastecimento de água potável não podem ter profundidade maior que 15 metros, aproximadamente, para não captar água de má qualidade, amarelada e exalando mau cheiro, porém não água salgada.

Ainda com relação ao Perfil I, a anomalia condutora observada no final do perfil, para todos os arranjos de bobinas, em torno do ponto 700 metros, se deve à presença nas proximidades, de uma oficina mecânica para caminhões e máquinas pesadas, responsável pela grande quantidade de óleo diesel e outras substâncias espalhadas na área.

No Perfil II, praia de Jukeí, os perfis de condutividade aparente para o EM31 e EM34-10m (Figuras 68 e 69) confirmam plenamente a informação obtida a partir da interpretação das sondagens elétricas, segundo as quais a influência da água salgada se manifesta até 400 metros a partir da praia.

Este fato está bem claro no perfil do EM34-10m, e menos no EM31, principalmente para as medidas com o eixo horizontal. Isto se deve ao fato de que, com esta disposição a profundidade investigada esteja situada em torno de 2,8 metros apenas, e neste caso, os materiais não-saturados tenham uma influência muito grande nos valores de condutividade medidos.

Na extremidade final do perfil, a anomalia de baixa condutividade é devido a um aumento brusco na cota do local das medidas, e da presença de solo de alteração de rocha.

FIGURA 68 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

FIGURA 69 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

No Perfil III, os dados do caminhamento eletromagnético confirmaram as informações das sondagens elétricas, mostrando que a cunha salina avança até o final do perfil.

No Perfil IV, a influência da água salgada se manifesta até pouco mais que 50 metros, segundo os dados do caminhamento eletromagnético apresentados nas Figuras 70 e 71.

A anomalia condutora em torno do ponto 500 metros, observada em todas as medidas, não pode ser explicada com clareza, mas certamente não está relacionada à presença de água salgada. Talvez se deva à interferência nas medidas causada pela rede elétrica, ou tubulações enterradas.

Nos Perfis V e VI, praia de Maresias, os dados dos caminhamentos eletromagnéticos correspondentes confirmaram as informações das sondagens elétricas de que a cunha salina penetra até 200 metros aproximadamente, a partir da linha da praia.

Por último, os valores de resistividade aparente (ohm.m) medidos nas sondagens elétricas foram transformados em condutividade (mmho/m) e com eles traçados perfis para diferentes arranjos de eletrodos, denominados Caminhamento Elétrico.

Nas Figuras 72 a 75 estão lançados os valores de condutividade aparente calculados a partir das resistividades medidas nas sondagens elétricas ao longo do Perfil I.

A correlação com os dados do caminhamento eletromagnético é bastante satisfatória, apesar da menor densidade de pontos investigados, o que dá maior credibilidade a estes dois procedimentos de trabalho.

FIGURA 70 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

PERFIL IV - EM34 10m
BOISSUCANGA

FIGURA 71 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE.

PERFIL I - CAMINHAMENTO ELETRICO
BORACEIA

FIGURA 72 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO.

PERFIL I - CAMINHAMENTO ELETRICO
BORACEIA

FIGURA 73 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO.

PERFIL I - CAMINHAMENTO ELETRICO
BORACEIA

FIGURA 74 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO.

PERFIL I - CAMINHAMENTO ELETRICO
BORACEIA

FIGURA 75 - PERFIS DE CONDUTIVIDADE APARENTE - CAMINHAMENTO ELÉTRICO.

5 - MAPEAMENTO E MONITORAMENTO DETALHADO DE UMA ÁREA INDUSTRIAL COM PROBLEMAS DE POLUIÇÃO E CONTAMINAÇÃO

Para o mapeamento e monitoramento detalhado de uma área poluída e contaminada foi escolhido o parque industrial de uma empresa multinacional situada aproximadamente 5 Km a leste de São José dos Campos, próximo à Via Dutra, BR-116.

O histórico desta indústria, que processa substâncias químicas de alta periculosidade, pode ser estendido a muitas outras multinacionais instaladas não só no importante eixo Rio-São Paulo, mas em vários outros complexos industriais.

Implantadas há algumas décadas no país, valendo-se de incentivos fiscais, esses grandes grupos adquiriram extensas áreas reservando-as para futuras expansões.

Nas fases iniciais de operação, devido ao não cumprimento das leis vigentes à época, as áreas sub-utilizadas eram, em geral, aproveitadas inadequadamente para servir como aterros de lixo e resíduos industriais ou como lagoas de tratamento dos efluentes. Por serem mal construídos e/ou operados, esses reservatórios sofriam vazamentos poluindo com diferentes graus de intensidade o sub-solo, inclusive as águas subterrâneas.

Mais recentemente, com a maior rigidez na fiscalização por parte dos órgãos responsáveis, tem sido exigido das indústrias a despoluição e descontaminação dessas áreas, como condição para a aprovação de projetos de implantação de novas unidades.

Esse fato ocorreu com a indústria em questão, que, no final de 1986, solicitou ao CEPAS-IG/USP um estudo para caracterizar e avaliar a intensidade e extensão dos processos poluentes do sub-solo, decorrentes da infiltração e vazamento de efluentes industriais. Este estudo foi desenvolvido segundo orientação baseada em levantamento geofísico detalhado da área.

5.1 - GEOLOGIA

A área de estudo está situada na extremidade SW da Bacia Sedimentar de Tuabaté. Esta bacia, de idade cenozóica, constitui-se numa unidade geológica que tem sido estudada por vários autores, haja vista apresentar características geológicas, tectônicas e deposicionais bastante peculiares.

Está entalhada no Complexo Cristalino Pré-Cambriano do leste de São Paulo, entre a Serra da Mantiqueira, ao norte, e o Planalto da Bocaina, ao Sul; e entre as serrarias da região de Arujá, a oeste, e de Queluz, a leste (Figura 76). Tem cerca de 173 Km de comprimento e até 20 Km de largura, com extensão aproximada de 2400 km² (Hasui & Ponçano, 1978).

A Bacia Sedimentar de Taubaté é representada pelo Grupo de mesmo nome, subdividido nas Formações Tremembé (inferior) e Caçapava (superior).

A Formação Tremembé é constituída, predominantemente, de siltitos e argilitos intercalados com folhelho pirobetuminosos, areias e arenitos, apresentando coloração verde-oliva, cujas tonalidades variam conforme o teor de umidade. Uma característica marcante dessa formação é seu conteúdo fossilífero bastante rico e diversificado. A sedimentação desta formação está relacionada a ambiente lacustre (Carneiro et al., 1976).

A Formação Caçapava é composta de camadas alternadas de argilas, areias e conglomerados. Esta formação se constituiu sob condições fluviais, de canais e planícies de inundação de rios anastomosados (Suguio, 1969 in Carneiro et al., 1976).

A espessura dos sedimentos das duas formações é muito variável e pouco conhecida, pois dificilmente se consegue fazer a distinção entre eles, mesmo com a existência de perfis de sondagens para pesquisa de folhelho pirobetuminoso, bem como de poços tubulares para exploração de água subterrânea.

Figura 76- Mapa geológico simplificado da Bacia Sedimentar de Taubaté (Modificado de VESPUCCI, 1984)

Petri & Fúlfaro (1983) admitem espessuras superiores a 200 metros para os sedimentos da Formação Caçapava em alguns locais da bacia. Em conjunto com a Formação Tremembé, o pacote sedimentar pode chegar a apresentar até 520 metros de espessura, no centro da bacia, segundo dados de poços perfurados para exploração de água subterrânea.

Na área de estudo existem dois poços profundos que abastecem a indústria, e que atingiram as rochas do embasamento cristalino a 130 e 102 metros, como mostra a Figura 77. Como pode ser observado, a descrição dos perfis não chega a fornecer elementos que permitam caracterizar as duas formações, o que não autoriza a afirmar que a Formação Tremembé ocorre em profundidade, ou que a Formação Caçapava foi depositada diretamente sobre o embasamento no local em questão.

No entanto, esta indefinição é relevante para os objetivos do trabalho, pois, em linhas gerais, pode ser admitido o mesmo comportamento hidrogeológico dos sedimentos das duas formações face ao fluxo das soluções poluentes observadas na área de estudo.

5.2 - LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Considerando a amplitude da área, do sistema de escoamento e tratamento dos efluentes e dos possíveis focos de poluição subterrânea, iniciou-se o mapeamento geofísico cobrindo de uma forma generalizada toda a extremidade NW da área, em torno das lagoas de tratamento, que por estar situada em cotas mais baixas recebe todo o fluxo das águas subterrâneas que percolam o complexo industrial (Figura 78).

Em função do pouco espaço disponível devido ao grande número de edificações, optou-se por iniciar os trabalhos medindo a condutividade dos materiais do sub-solo com os equipamentos EM31 e EM34, já que as medidas de resistividade requerem um espaço livre maior.

Figura 78 - Planta da área industrial com a localização do levantamento geofísico.

As medidas foram feitas em pontos espaçados de 10 metros, ao longo de perfis dispostos nas áreas definidas como potencialmente problemáticas (áreas do levantamento eletromagnético). Mesmo nesta fase considerada preliminar, os perfis foram estendidos de forma a se obter valores normais que pudessem ser considerados como "back-ground" regional. Neste primeiro levantamento foram feitas medidas ao longo de aproximadamente 5000 metros de perfis.

De modo a facilitar a apresentação dos resultados obtidos, a área foi dividida em vários setores considerando as áreas das lagoas e o norte da planta.

Os setores definidos como os mais problemáticos foram os W, E, ENE e NE, que foram alvo de um levantamento detalhado com pontos de medida distanciados de 5 metros e perfis espaçados de, no máximo, 10 metros.

Os dados de campo estão apresentados na forma de dB de condutividade, com o objetivo de ampliar os pequenos contrastes e minimizar os grandes picos ($\text{dB} = 20 \cdot \log \text{valor medido} / \text{valor do "back-ground"}).$

No setor W foram feitas medidas com EM31 e EM34-10 e EM34-20 metros.

As figuras 79, 80 e 81 mostram os resultados destas medidas, indicando uma anomalia condutora muito acentuada em sua extremidade norte, devendo corresponder à grande concentração de agentes poluentes condutores. No levantamento com o EM34-10m, ela chega a 20 dB.

No setor S as Figuras 82, 83 e 84, correspondentes ao levantamento com o EM31, EM34-10m e EM34-20m, respectivamente, mostram anomalias até 10 dB de contraste, localizadas no extremo SE e na parte W do setor.

No setor N não foi detectado nenhuma anomalia condutora significativa, sendo que os maiores contrastes foram da ordem de 3 dB de condutividade.

dB CONDUTIVIDADE AREA W EM31

FIGURA 79 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO,

dB CONDUTIVIDADE AREA W EM34 - 10M

FIGURA 80 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA W EM34 - 20m

FIGURA 81 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA S EM31

FIGURA 82 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA S EM34 - 10M

FIGURA 83 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA S EM34 - 20M

FIGURA 84 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

No setor SE o levantamento foi feito com EM31 e EM34-10m e os resultados também não apresentaram anomalias condutoras significativas.

No setor ENE o levantamento executado com o EM31 indicou duas grandes anomalias na parte central e na extremidade sul do setor. Os dados do EM34-10m confirmaram estas anomalias (Figuras 85 e 86).

No setor assinalado como RUA, os levantamentos não acusaram anomalias importantes e no setor SETAL as medidas foram prejudicadas pela grande quantidade de ferramentas e tubos espalhados pelo local.

No setor NE as medidas tiveram a finalidade de verificar a presença de anomalias provocadas por produtos advindos da unidade $P_2 O_5$. Os resultados do levantamento apresentados nas Figuras 87 e 88, indicaram a presença de uma anomalia na parte central onde se constatou corresponder a tubulações ali enterradas, e uma outra na extremidade NE que deve estar correlacionada à presença de substâncias condutoras.

Os dados obtidos com esse levantamento revelaram a presença de áreas anômalas que deverão ser alvo de investigação direta e detalhada.

5.3 - METODOLOGIA EMPREGADA

Os dados revelados através do levantamento geofísico apontaram, dentro do complexo industrial estudado, algumas áreas com anomalias bastante significativas, levando à execução de um trabalho sistemático, abrangendo as etapas detalhadas a seguir.

5.3.1 - AMPLIAÇÃO DA REDE DE POÇOS

A partir do resultado do mapeamento geofísico, foram selecionados dez locais considerados estratégicos do ponto

dB CONDUTIVIDADE AREA ENE EM31

FIGURA 85 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA ENE EM34 - 10M

FIGURA 86 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA NE EM31

FIGURA 87 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

dB CONDUTIVIDADE AREA NE EM34 - 10M

FIGURA 88 - LEVANTAMENTO ELETROMAGNETICO.

de vista da infiltração e/ou vazamento de poluentes para o sub-solo com a finalidade de construir poços de monitoramento.

Os furos foram executados pelo método de percussão de caçamba amostradora, com profundidades variando entre 6 e 8 metros. Esses poços de monitoramento foram perfurados em diâmetro de 8" e revestidos com tubos de PVC de 4", encasalhados e com proteção sanitária.

Os dez novos poços construídos (nºs. 11, 12, 13, 19, 21, 25, 27, 32, 43 e 44) completam a rede existente na indústria, totalizando 44 pontos de monitoramento e amostragem. Não há informações sobre os perfis litológicos e construtivos dos 34 poços de monitoramento já existentes.

Vale salientar que existem dentro da área de estudo dois poços tubulares profundos para abastecimento de água da indústria, cujos perfis litológicos e construtivos foram apresentados na Figura 77.

5.3.2 - MONITORAMENTO

Entre março e maio de 1987 foram coletadas e analisadas amostras de água dos 44 poços da rede de monitoramento. Os parâmetros medidos foram: cota relativa do nível da água, condutividade elétrica, pH, teor em cloro, teor em P_2O_5 e teor em carbono orgânico total (TOC). O Quadro VIII apresentado a seguir mostra os valores médio dessas amostras para cada parâmetro considerado.

5.3.3 - PERMEABILIDADE "IN SITU"

Objetivando avaliar a permeabilidade do meio não saturado, foram realizados ensaios de permeabilidade nos furos recém-construídos, utilizando-se a técnica de carga variável em furos sem revestimento. Para realização desses ensaios, a profundidade dos furos foi de 2 metros.

RESULTADO MEDIO DAS AMOSTRAS ANALISADAS (março-maio/1987)						
POÇO	COTA RELATIVA DO NÍVEL D'ÁGUA (m)	CONDUTIVIDADE ($\mu\text{mho}/\text{m}$)	pH	CLORO (mg/l)	P205 (ppm)	TOC (mg/l)
1	96.17	158.50	5.33	10.30	isento	754.00
2	96.14	147.38	5.19	8.50	isento	703.00
3	96.21	244.39	5.50	9.47	isento	849.00
4	94.86	195.00	6.14	3.68	isento	21.10
5	94.93	211.63	6.31	2.50	2.96	28.80
6	95.13	212.75	6.20	2.00	isento	7.20
7	95.11	234.13	6.31	2.77	isento	9.10
8	95.25	322.00	5.90	6.03	164.96	5.70
9	95.51	130.00	6.50	7.17	13.67	7.90
10	95.95	97.25	6.76	5.22	3.13	0.00
11	95.09	322.00	6.09	4.65	115.00	17.00
12	95.41	115.75	6.00	4.93	5.90	11.00
13	93.77	339.13	5.79	7.60	130.51	5.10
14	94.90	218.75	6.14	3.38	60.60	7.10
15	94.81	1570.00	6.09	33.95	24.30	70.00
16	92.52				isento	0.00
17	93.45	100.25	5.61	4.00	isento	5.20
18	93.74	120.00	5.20	7.32	isento	0.60
19	93.60	1592.50	6.34	27.73	79.30	34.50
20	94.10	388.00	6.91	12.00	10.50	1.30
21	94.13	94.13	5.65	3.32	7.10	0.00
22	94.16	112.00	5.95	4.20	isento	0.00
23	92.90	160.63	6.04	5.70	6.50	0.00
24	92.73	2546.25	7.19	53.18	72.96	261.50
25	93.18	1017.50	6.39	26.63	116.00	73.90
26	91.74	2098.75	6.94	51.57	119.21	167.30
27	92.34	3906.25	7.61	40.03	174.53	340.90
28	91.39	242.50	5.55	13.02	9.40	3.00
29	91.14	222.39	5.89	14.93	25.65	7.90
30	91.74	363.00	5.96	37.42	29.12	23.50
31	92.19	339.00	6.29	5.43	7.40	14.30
32	91.59	2701.25	4.95	339.62	isento	239.00
33	89.89	130.25	6.04	16.15	isento	8.50
34	90.47	110.13	5.16	5.03	isento	21.10
35	90.30	67.63	5.43	4.20	isento	6.50
36	89.41	272.75	5.98	10.73	isento	14.60
37	89.86	132.00	5.71	2.00	isento	11.90
38	90.03	1540.25	6.36	93.93	isento	17.50
39	90.30	274.00	5.95	2.63	isento	26.70
40	90.98	347.75	6.05	8.02	isento	17.70
41	90.17	120.00	5.00	3.20	isento	0.00
42	90.01	73.50	5.53	2.52	isento	2.50
43	89.71	2775.00	6.24	206.20	13.26	100.10
44	89.78	665.25	5.93	104.68	isento	10.50

QUADRO VIII - DADOS DOS POÇOS (ÁREA INDUSTRIAL).

Os valores de permeabilidade medidos na área variaram de 1 a 9 cm/s, cujo intervalo é coerente com a heterogeneidade dos sedimentos no local.

5.3.4 - PERFILAGEM ELÉTRICA

Considerando que os agentes poluentes podem ter diversas formas de miscibilidade, bem como serem fortemente condicionados pela geologia local, gerando assim zonas de maior ou menor concentração por meio de medidas geoeletricas (resistividade) foram feitas perfilagens dos poços perfurados.

O arranjo utilizado constou de 4 eletrodos que foi descido no furo e a cada 5 cm foi determinada a resistividade. Os resultados obtidos, Figuras 89 e 90, mostram uma relativa homogeneidade da solução dentro dos furos. Por outro lado, percebeu-se uma variação de resistividade entre os furos, evidenciando os diferentes graus de contaminação detectados pelo mapeamento geofísico e demais resultados obtidos.

5.3.5 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Este caminhamento foi realizado com o objetivo de se obter valores representativos do "back-ground". Considerando a forma de ocupação da área (tubulações subterrâneas, efeitos de poluição e linhas de alta tensão) foi possível realizar as medidas na área verde, no local assinalado na figura 78.

Foram utilizados os equipamentos EM31 e EM34, sendo as medidas feitas com as bobinas nas posições vertical e horizontal.

Nas medidas com o EM31 o espaçamento entre as bobinas é de 3,7m o que permite uma prospecção a profundidades aproximadas de 3 a 6 metros.

FIGURA 89 - PERFILAGEM ELÉTRICA (ÁREA INDUSTRIAL).

FIGURA 90 - PERFILAGEM ELÉTRICA (ÁREA INDUSTRIAL).

Nas medidas com o EM34 utilizou-se espaçamento entre as bobinas de 10 e 20m o que possibilita a investigação de profundidades entre 7 e 15 metros e 15 e 30 metros, respectivamente.

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 91 verificando-se uma relativa homogeneidade geoeétrica no sentido horizontal e uma variação vertical, certamente associada ao crescente grau de umidade da camada prospectada em função da profundidade.

Nessas condições, o "back-ground" da área não contaminada situa-se entre 5 e 15 mmho/m.

As anomalias observadas nas extremidades do perfil se devem a influências das tubulações existentes no início, e proximidade de linhas de alta tensão na sua extremidade final.

5.3.6 - INSTALAÇÃO DE CÁPSULAS POROSAS

A instalação das cápsulas porosas teve a finalidade de retirar amostras de água da faixa não saturada, de modo a facilitar a caracterização de eventuais níveis de poluição no sub-solo.

Os pontos escolhidos para a instalação das referidas cápsulas foram aqueles onde havia suspeita de infiltração superficial de soluções poluidoras. Em cada um desses pontos foram colocadas duas cápsulas a 1 e 2 metros de profundidade, distanciadas, no mínimo, um metro entre si.

5.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com os dados obtidos no decorrer do trabalho, foi possível evidenciar setores com níveis de poluição distintos levando em conta as diferentes fontes dos agentes, potencialmente, poluidores. Assim, a área de estudo foi subdividida em três setores: Gliphosate, P_2O_5 e Lagoas (Figura 92).

FIGURA 91 - CAMINHAMENTO ELETROMAGNÉTICO.

Figura 92 - Planta da área industrial com a localização dos poços e setores de monitoramento.

5.4.1 - SETOR GLIPHOSATE

Neste setor encontram-se poços de monitoramento de n^{os}. 14, 15, 16 e 17, com profundidades entre 4,86 e 6,67 metros e níveis de água entre 4, 14 e 6,11 metros (06/06/87). A camada arenosa está situada no intervalo entre 5 e 7 metros de profundidade.

Considerando os parâmetros medidos nos furos (pH, condutividade elétrica, Cl, P₂O₅ e TOC), verificou-se que as águas desses furos estão sendo contaminadas, provavelmente, por infiltração de efluentes. As Figuras 93, 94, 95 e 96 mostram alteração nos valores medidos, onde o pH se mantém praticamente no furo 15, variando ligeiramente nos furos 14 e 17. Os teores de Cl variam no poço 15 e quase se mantêm constante nos poços 14 e 17. O valor de condutividade elétrica e TOC apresentam uma pequena variação apenas no poço 15. O aumento simultâneo de Cl e TOC no poço 15 (Quadro VIII) sugere uma contaminação por organoclorado.

5.4.2 - SETOR P₂O₅

Os poços de monitoramento de n^{os}. 8, 9, 10, 11, 12, 13 estão concentrados neste setor. As profundidades variam entre 6,3 e 8 metros. Os níveis da água situam-se entre 3,91 e 5,98 metros (15/06/87).

Os efeitos de infiltração das águas residuais despejadas no setor e/ou um provável transbordamento do tanque de decantação do sulfato de arsênio, são observados nos furos de monitoramento, notadamente no número 13. As Figuras 97, 98, 99 e 100 apresentam e mostram esta tendência.

Os teores de TOC no poço 12 e de P₂O₅ nos poços 8 e 13 (Quadro VIII) também sugerem uma infiltração devido ao vazamento do tanque e/ou disposição de resíduos contaminados no setor, em épocas anteriores.

FIGURA 93 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 94 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 95 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 96 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 97 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS,

FIGURA 98 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 99 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 100 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

Considerando os dados disponíveis da pesquisa, é provável que existam, neste setor, duas formas principais de poluição: uma, proveniente do empoçamento das águas residuárias de lavagem do complexo industrial da produção do ácido fosfórico, evidenciada pelos poços de monitoramento 9, 10 e 11; uma outra, pelo transbordamento e/ou vazamento subterrâneo do tanque de decantação de sulfato de arsênio. Os poços de monitoramento 8, 12 e 13 detectam essa influência.

5.4.3 - SETOR DAS LAGOAS

Estão implantados 27 poços de monitoramento (nºs. 18 a 44), uma vez que a complexidade desse setor é maior que os anteriores. As profundidades dos poços variaram entre 3,02 a 8,30 metros enquanto que os níveis d'água variaram entre 1,31 a 5,10 metros.

Os poços de monitoramento 28, 30 e 40 apresentam teores em TOC e Cl mais elevados que os outros poços do setor. Esse fato pode sugerir um vazamento esporádico ou acidental advindo das lagoas de tratamento.

Esses dados levam a concluir que o Setor das Lagoas é o mais problemático da área de estudo. Os poços 25 e 27 detectaram um vazamento do sistema condutor de efluente, além de vazamento subterrâneo das lagoas de tratamento evidenciado, também, nos poços 28, 30 e 32. Os poços 38, 43 e 44 revelaram um extravazamento das lagoas e/ou do sistema de transporte de efluente.

Os valores médios de pH, teores de Cl, condutividade elétrica e TOC, Figuras 101, 102, 103 e 104, respectivamente, indicam anomalias muito elevadas, principalmente nos poços 22, 24, 25, 26, 27, 32, 38 e 43. Outras fontes de poluição foram detectadas em, praticamente, todo o Setor das Lagoas.

FIGURA 101 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

FIGURA 102 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

CONDUTIVIDADE MÉDIA - ÁREA LAGOAS

FIGURA 103 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

T O C MÉDIO - ÁREA LAGOAS

FIGURA 104 - DADOS DE MONITORAMENTO DOS POCOS.

Os efeitos dessas fontes poluidoras atingem o lençol freático, conforme verificado no ponto de observação nº 21 em que o pH está situado entre 4,62 e 4,87, mais baixo do que na água, cujos valores situam-se entre 5,5 e 5,9. Os teores em cloro também são baixos em superfície, entre 0,84 e 3,87 contra valores de 2,9 e 4,7 ppm em profundidade. O P_2O_5 diminui gradativamente com a profundidade, desaparecendo na água do freático.

5.5 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise dos dados disponíveis obtidos através dos trabalhos desenvolvidos, permitiram diagnosticar as características gerais da área de estudo sob o ponto de vista hidrogeológico e, principalmente, localização e identificação das principais formas e fontes de poluição do solo e do sub-solo, atingindo as águas subterrâneas.

Apesar do período de monitoramento ter sido relativamente curto, os dados revelaram a existência de fontes de poluição e contaminação constantes, atingindo todos os setores da área. Destacam-se como pontos geradores de poluição e/ou contaminação, os vazamentos nos sistemas de condução dos efluentes; águas residuais de lavagem de instalações industriais e/ou de depósitos de produtos químicos; extravazamentos das lagoas dos sistemas de tratamento de efluentes e perdas de produtos durante o transporte, estocagem e manuseio.

A despoluição e a descontaminação da área de estudo requer, outras fases de trabalho, com uso de simulação matemática dos processos hidrodinâmicos e físico-químicos de transporte de poluentes, para que os níveis de limpeza sejam compatíveis, no mínimo, com a legislação ambiental em vigor.

6 - CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos geofísicos descritos no presente trabalho permitem concluir pela viabilidade da aplicação de técnicas geofísicas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.

O método da eletrorresistividade, tradicionalmente utilizado na pesquisa de águas subterrâneas, e o método eletromagnético indutivo, que mais recentemente vem desenvolvendo equipamentos portáteis para medir diretamente a condutividade dos materiais do sub-solo, com o auxílio das modernas técnicas analíticas e de processamento de dados, têm se mostrado os mais versáteis e os que apresentam respostas mais rápidas e confiáveis nos estudos de poluição subterrânea.

As informações obtidas através das duas metodologias se completam, sendo que em alguns casos particulares podem ficar evidenciadas as vantagens da utilização de uma delas com relação à outra. Através dos casos relatados neste trabalho é possível tirar-se algumas conclusões sobre o assunto:

- de uma maneira geral os dados da eletrorresistividade permitem uma interpretação quantitativa mais precisa, através do procedimento de sondagem;

- a interpretação qualitativa dos perfis e mapas de isovalores de resistividade ou condutividade, obtidos a partir do procedimento de caminhamento, se equivalem em termos de precisão e nível de informação, porém as medidas de condutividade pelo método eletromagnético indutivo são extremamente mais rápidas, o que representa uma grande vantagem com relação ao binômio custos-prazos, fundamental em qualquer atividade comercial ou de pesquisa;

- no estudo de problemas como os enfocados neste trabalho, que não requerem grande profundidade de investigação, o método eletromagnético indutivo (EM) apresenta uma grande

vantagem sobre a eletrorresistividade (ER), pois a operação de seus equipamentos exige a participação de no máximo duas pessoas, enquanto o outro método pode exigir até cinco;

- nas medidas de condutividade com o EM não é necessário o contato de eletrodos com o solo, a corrente é induzida pela bobina transmissora, o que lhe confere algumas vantagens, pois elimina a resistividade de contato, possibilita um registro contínuo das leituras e as torna bem mais rápidas;

- as leituras com o equipamento ER sofrem interferência de correntes telúricas, de grande intensidade nas bordas de bacias sedimentares e no litoral, e exige uma fonte bastante potente para possibilitar boas leituras de ΔV quando baixas resistências do solo estão envolvidas;

- as medidas com equipamentos EM perdem a linearidade em locais de alta condutividade porque são influenciadas mais fortemente por feições superficiais do que profundas;

- as duas metodologias são vulneráveis a interferências naturais e artificiais, aéreas ou profundas (tempestades magnéticas, linhas de alta tensão, proximidade de veículos e objetos de metal, fugas de corrente, objetos de metal enterrados, etc.);e

- tanto o ER quanto o EM medem propriedades físicas dos materiais do sub-solo (resistividade e condutividade) diretamente afetadas por substâncias poluentes.

As duas metodologias se completam, com a eletrorresistividade apresentando vantagens na determinação do número de camadas, suas espessuras e resistividade até grandes profundidades sob um ponto determinado do terreno, através de sondagens elétricas, e o eletromagnético indutivo no mapeamento e medidas de direção de fluxo de manchas poluentes por meio de caminhamentos eletromagnéticos.

O mapeamento da influência de aterros sanitários e áreas de infiltração de vinhaça nos materiais do sub-solo deverão continuar sendo feitos de maneira como o foi nos casos relata dos neste trabalho, com a utilização dos dois métodos citados, numa proporção ditada pelas particularidades de cada caso.

No caso do mapeamento da cunha salina para controle de intrusão marinha nos aquíferos costeiros, notadamente junto a pequenos centros urbanos onde os já parcos recursos finan ceiros dificilmente são destinados a obras de prevenção, os estudos poderão ser conduzidos como os realizados na região litorânea estudada, onde os perfis foram dispostos perpendi cularmente à praia. Nestes perfis devem ser executadas algumas sondagens elétricas preliminares com o objetivo de determinar as camadas elétricas, suas espessuras e resistividade, buscan do correlacionar estes dados com a litologia, profundidade do nível d'água, qualidade da água de saturação e profundidade do topo rochoso.

O caminhamento eletromagnético deve ter maior densidade de pontos de medida próximo à praia, e se estender ao longo do perfil até não ser mais notada a influência da água salgada nas leituras de condutividade. A partir daí os pontos investi gados poderão ser mais espaçados, e as medidas deverão conti nuar a serem tomadas até se obter um valor constante correspon dente ao "back-ground".

O tempo requerido para o levantamento de um perfil de 1.000 metros, com estas características é estimado em no máximo 3 dias, com a participação de um técnico e dois bra çais, apenas.

Assim, a repetição das medidas, em dois ou mais perfis de uma mesma área litorânea, em períodos de 6 meses a 1 ano, ou maiores dependendo do caso, poderão determinar a posi ção relativa da interface água doce/água salgada e com isso mapear o avanço da cunha salina, permitindo medidas de prevenção e

controle da contaminação dos aquíferos costeiros causados pela super-exploração dos mesmos.

Normalmente os parques industriais com problemas de poluição apresentam poucas e reduzidas áreas disponíveis para execução de investigações geofísicas, devido o grande número de edificações. Neste caso deve ser dada preferência ao método eletromagnético indutivo, que é mais versátil e requer menos espaço físico para ser aplicado, como aconteceu na área industrial estudada.

As sondagens elétricas, neste caso, devem ser locadas nos pontos que possibilitem a maior extensão possível do arranjo de eletrodos, para que a interpretação das curvas correspondentes permitam tirar conclusões sobre a litologia, profundidade do nível d'água, espessura das camadas e profundidade do topo rochoso. Na área industrial objeto de estudo deste trabalho, não foi necessário esta prática pois já existiam no local dois poços tubulares profundos com dados técnicos confiáveis, a partir dos quais se obteve essas informações.

Um levantamento preliminar deverá ser executado com um equipamento que investigue pequenas profundidades (EM31), sem uma preocupação maior com a amarração dos pontos. Medidas do "back-ground" devem ser efetuadas em locais seguramente não afetados pelo problema, geralmente a montante da área pesquisada.

Uma vez definida(s) a(s) área(s) problema(s) o levantamento deverá ser efetuado segundo uma malha regular com pontos espaçados de no máximo 5 metros, e com equipamentos que possibilitem a investigação de profundidades maiores que as da mancha de poluição.

A localização dos piezômetros e poços de amostragem é fundamental para as etapas seguintes do estudo, e devem ser feitas com base nas anomalias condutoras detectadas no levantamento geofísico.

Os poços de monitoramento deverão ser perfilados eletricamente para identificar as variações verticais de resistividade, que são causadas por zonas de maior ou menor concentração dos agentes poluentes. Como elas são fortemente condicionadas pela geologia do local, os poços perfilados deverão ter revestimento de PVC rígido, de modo a facilitar a introdução de sondas bem justas na parte interna do revestimento, perfurado para permitir a medida de resistividade das paredes do furo.

Outras metodologias devem ser aplicadas no monitoremto, dependendo das características particulares de cada caso, sempre segundo a orientação do estudo geofísico executado na primeira fase, e o acompanhamento através de outras medições executadas paralelamente ao monitoramento.

7 - BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.F.M., et al. Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000., vol 1 - Publicação IPT nº 1184. Nota Explicativa e Anexos. São Paulo, 1981.
- ALMEIDA, M.A. et al. Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camburiú, 1980. Anais... São Paulo, SBG, 1980, p. 2799-2812.
- AMARAL e SILVA, C.C. do Confinamento de vinhoto em áreas de sacrifício. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE PROBLEMAS E OPORTUNIDADES NO APROVEITAMENTO DE VINHOTO, Rio de Janeiro, 1982. 29 p.
- AMARAL e SILVA, C.C. do; AMIR, Y.; PENNA, Y.M. de A.D. Controle da poluição das águas subterrâneas na região do Vale do Rio Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 49-69.
- ARAÚJO, J.R. de; SANTOS, J.P. dos; MISTRETA, G. Posição da interface água doce/água salgada na região de Natal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 94-110.
- AUCOTT, W.R. & SPEIRAN, G.K. Groundwater flow in the coastal plain aquifers of south Carolina. Ground Water, Ohio-USA, vol. 23, nº 6, p. 736-745, novembro-dezembro, 1985.
- BEAR, J. Hydraulics of groundwater. New York, McGraw Hill, 1979, 567 p.

- CABRAL, J.J.S.P. Posição da interface entre água salgada e água doce, uma análise numérica pelo método de elementos de contorno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1. p. 263-276.
- CAMARGO, O.A. de; VALADARES, J.M.A. da S.; GERALDI, R.N. Características químicas e físicas do solo que recebeu vinhaça por longo tempo. Boletim Técnico do Instituto Agronômico, Campinas, 76:1-30, 1983.
- CAMERON, D. R. et al. Mapping salinity using resistivity and eletromagnetic inductive techniques. Canadian Journal of Soil Science, Canada, vol. 61, p. 67-78, 1981.
- CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. Estrutura da Bacia de Taubaté na região de São José dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. Anais..., São Paulo, SBG, 1976. p. 247-256.
- CARTWRIGHT, K. & McCOMAS, M.R. Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in northeastern Illinois. Ground Water, Ohio-USA, 6:23-40, 1968.
- CASTANY, G. Traité pratique des eaux souterraines. Paris, DUNOD, 1967. 661 p.
- CASTRO NETO, P.P. et al. Aterro industrial da Cyanamid Química do Brasil Ltda. (Fábrica Resende). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo ABAS, 1984, v. 2, p. 144.
- CETESB Avaliação do impacto ambiental provocado por locais de disposição de resíduos sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 13, Maceió, 1985. Anais..., Rio de Janeiro, ABES, 1985.

- CLEARY, R.W. & MILLER, D.W. Aspectos fundamentais e monitoramento de poluição de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 313-330.
- COLUMBUS, N; MARIANO, I.V.; TEISSEDRE, J.M. Desenvolvimento de água subterrânea na região do Vale do Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 299-302.
- CUSTODIO, J.E. & LLAMAS, M.R. Hidrologia subterrânea. Barcelona, Ed. Omega, 1976, vol. II, seccion 13, 2359 p.
- CUSTODIO, J.E. Recarga artificial de aquíferos. Boletín de Informaciones Y Estudios. Serviço Geológico - Ministério de Obras Públicas Y Urbanismo, Barcelona, vol. nº 45, 135 p. Fevereiro, 1986.
- DAVINO, A. Estudo por eletrorresistividade do potencial hidrogeológico de dois distritos industriais do nordeste: Cabo-PE e Cabedelo-PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais..., São Paulo, SBG, 1978, v. 6, p. 2885-2898.
- DAVINO, A.; SINELLI, O.; GONÇALVES, N.M.M. Determinação do contato água doce-água salgada na Ilha Comprida, Município de Iguape-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Balneário de Camboriú, 1980. Anais..., São Paulo, SBG, 1980, p. 915-924.
- DIGILIO, A. O petróleo, a sociedade e a ecologia. Cent. Imp. Bras. Ltda., 1986. 222 p.

- DUARTE, U. & KANESHISA, M.S. Captações rasas em zonas urbanas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1, p. 237-250.
- ELLERT, N. Sobre a aplicação de eletrorresistividade na baixada santista (São Paulo). Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, 17, nº 1, 77-84, 1968.
- ELLERT, N. et al. A geofísica aplicada na identificação da poluição do sub-solo por depósitos de rejeitos urbanos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1, p. 353-363.
- ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.P.; SINELLI, O. Mapeamento eletromagnético (condutividade) de zonas contaminadas por rejeitos de usinas de álcool e açúcar. Exemplo: Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. In: PRIMEIRA CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA SOBRE HIDROGEOLOGIA URBANA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS, Cochabamba, Bolívia, 1987. (no prelo).
- ELLERT, N. & MENDES, J.M.B. Aplicação de geofísica na prospecção de água subterrânea em meios fissurados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, Salvador, 1982. Anais..., São Paulo, ABAS, 1982, v. 1, p. 227-232.
- FENZI, N. et al. Interpretação, classificação e apresentação de dados hidroquímicos para uso humano e agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 85-97.

- FONSECA, N.M.R. & BISCHOFF, J.H. Um sistema eletro-magnético para prospecção de água subterrânea. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, Salvador, 1982. Anais..., São Paulo, ABAS, 1982, v. 1, p. 233-241.
- FREEZE, A. & CHERRY, J.A. Groundwater. New Jersey. Prentice-Hall Inc., 1979. 601 p.
- GIMENA, E.C. et al. Caracterização química do fluxo de água subterrânea na região costeira de Olinda - Goiana, Pernambuco. Águas Subterrâneas, São Paulo, 3-53-80, ago. 1981.
- GREENHOUSE, J.P. & HARRIS, R. Migration of contaminants in groundwater at a landfill. A case study. DC, VLF, and Inductive Resistivity Surveys. Journal of Hydrology, Amsterdam, vol. 63, p. 177-197, 1983.
- GREENHOUSE, J.P. & WILLIAMS, M.M. Geophysical monitoring of groundwater contamination around waste disposal sites. Groundwater Monitoring Review, Water Well Journal Publishing Co., Dublin, Irlanda, 1985.
- GREENHOUSE, J.P. et al. Geophysical studies of groundwater contamination at two studies in São Paulo State, Brasil. In: PRIMEIRA CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA SOBRE HIDROGEOLOGIA URBANA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS, Cochabamba, Bolívia, 1987. (no prelo).
- GUIGUER Jr., N. Poluição de águas subterrâneas por aterros sanitários: uma abordagem matemático-experimental. São Paulo, 1987. 250 p. (Dissertação-Mestrado, Escola Politécnica da USP).
- GUPTA, A.D. Approximation of salt-water interface fluctuation in unconfined coastal aquifer. Ground Water, Ohio-USA, vol. 23, nº 6, p. 783-794, novembro-dezembro, 1985.

- GURGEL, E.A. Determinação dos sólidos e cátions totais dissolvidos a partir da condutividade elétrica em água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, Salvador, 1982. Anais..., São Paulo, ABAS, 1982. v. 1, p. 305-315.
- HASUI, Y. & PONÇANO, U.L. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais..., São Paulo, SBG, 1978. p. 368-381.
- HENRY, H.R. Salt intrusion in freshwater aquifers. Journal of Geophysical Research, New York, 64 (11) : 1911-1919, novembro, 1959.
- HESPANHOL, I. Os efeitos do Programa Nacional do Alcool sobre o meio ambiente. DAE, São Paulo, p. 23-45, 1978.
- HUBBERT, M.K. The theory of groundwater motion. The Journal of Geology. vol. 48, nº 8, parte I, Chicago, novembro-dezembro, 1940, p. 785-944.
- KELLY, W.E. Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. Ground Water, Ohio-USA, vol. 14 (1): 6-10, 1976.
- KOBAYASHI, C. & RIJO, L. Eletroresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea no município de Soure. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 71-84.
- LEÃO, M.I. O uso do modelo Hele-Shaw vertical para o estudo de aquíferos costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 247-267.

- LOBATO, E.J.V. Variação da condutividade hidráulica de um solo tratado com vinhaça. Piracicaba, 1984. 126 p. (Dissertação-Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da USP).
- LOUREIRO, R.V. Conversão de aterro a "ceû aberto" em aterro sanitário. Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 15:487-492, 1976.
- MARCELINO, S. & CHANDRA, U. Avaliação geohidrológica do local para armazenamento dos rejeitos de baixo nível de radioatividade do IPEN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, Salvador, 1982. Anais..., São Paulo, ABAS, 1982. p. 535-544.
- MARQUES, A.A.F. et al. Eletorresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea na Chapada do Araripe-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v.2, p. 269-284.
- MARQUES, A.A.F. Contribuição da eletorresistividade na locação de poços tubulares em terreno cristalino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1, p. 353-363.
- MARTIN, L. & SUGUIO, K. O quaternário marinho do litoral do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Belo Horizonte, 1976. Anais..., São Paulo, SBG, 1976. p. 281-293.
- MUNIS, M.B. & MORAIS, J.B.A. de Sondagens elétricas verticais na pesquisa de água subterrânea na praia do futuro - Fortaleza-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 285-299.

- OLIVEIRA, I.B. de & LIMA, O.A.L. de. Estudo das condições hidrogeológicas e hidroquímicas dos aquíferos da região Biritinga-Pataiba (BA) utilizando métodos geofísicos elétricos. Revista Brasileira de Geociências. São Paulo, 2:176-186, junho 1986.
- PACHECO, A. Análise das características e da legislação para uso e proteção das águas subterrâneas em meio urbano (Município de São Paulo). São Paulo, 1984. 174 p. (Tese-Doutoramento, Instituto de Geociências da USP).
- PACHECO, A. & COELHO, P.E. Disposição de resíduos sólidos e as implicações ambientais. Seminário apresentado na disciplina Geologia Ambiental e Recursos Hídricos, Curso de Pós-Graduação do IG-USP.
- PALACKY, G.J. & KADEKARU, K. Efeito do intemperismo tropical nos levantamentos eletromagnéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978, Anais..., São Paulo, SBG, 1978, v. 5, p. 2323-2335.
- PETRI, S & FULFARO, V.J. Geologia do Brasil. Editora USP, São Paulo, 1983. 631 p.
- POPPE, L.P.M.; LOPEZ, J.C.; NEGRÃO, F.I. Determinação de áreas prioritárias para o controle da poluição das águas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 235-245.
- PORSANI, M.J. et al. Métodos geofísicos aplicados à prospecção de água subterrânea na região do lago Arari, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 269-284.

- RANZANI, G. Consequência da aplicação do restilo ao solo. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 12:57-68, 1956.
- REBOUÇAS, A. da C. Aspectos hidrogeológicos no planejamento da ocupação urbana na Grande São Paulo. In: MESA REDONDA ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS NA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, São Paulo, 1980a. Anais..., São Paulo, ABGE/SBG, 1980a. p. 129-138. Publicação Especial.
- REBOUÇAS, A. da C. Estágio atual dos conhecimentos sobre as águas subterrâneas no Brasil. Águas Subterrâneas, São Paulo, 1:1-9, abril 1980b.
- REBOUÇAS, A. da C. Potencial hidrogeológico da Bacia do Paranã - Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, Recife, 1980c. Anais..., São Paulo, ABAS, 1980, v. 1, p. 35-47.
- REBOUÇAS, A. da C. et al. Efeitos da infiltração de vinhoto de cana no aquífero Bauru - Resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1, p. 184-193.
- REBOUÇAS, A. da C. Prevenção e controle da poluição em águas subterrâneas. São Paulo, "Controle da Poluição Hídrica", ABEC - Associação Brasileira de Engenharia Química, 1987. 36 p. il.
- SANTOS, J.P. das. Problemática de aquíferos costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 331-342.

- SILVA, W.F. Investigações geofísicas para exploração de água subterrânea na região de Icapara-Iguape, São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 259-268.
- SILVEIRA, J.D. Morfologia do litoral. In: Azevedo, H. Brasil, a Terra e o Homem. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 1964. Capítulo IV, p. 253-305.
- SOARES, P.C. et al. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, 10(3):177-185, 1980.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. A Formação Bauru no Estado de São Paulo e regiões adjacentes: mesa redonda. São Paulo, SBG, 1980. 129 p. (Publicação Especial).
- STEIN, D.P. et al. Geologia de parte dos vales dos rios Paranã e Paranapanema. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, Rio Claro, 1979. Atas..., São Paulo, SBG, 1979, v. 2, p. 291-306.
- SUGUIO, K. & MARTIN, L. Mecanismo de gênese das planícies sedimentares quaternárias do litoral do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. Anais..., São Paulo, SBG, 1976. p. 294-305.
- TEISSEDRE, J.M. Contribuição da hidrogeologia ao conhecimento estrutural do litoral paulista. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1981. Atas..., São Paulo, SBG, 1981. p. 369-380.
- TODD, D.K. & McNULTY, D.E.O. Polluted groundwater: a review of the significant literature. New York, Water Information Center Inc., 1976. 179 p.

VASQUES, R.C.; GOMES, M.R.B.; MARINHO, J.M.L. Utilização de eletrorresistividade na prospecção de água subterrânea em área do I Distrito Industrial do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, Brasília, 1986. Anais..., Brasília, ABAS/DNAEE/DNPM, 1986, v. 1, p. 120-132.

VESPUCCI, J.B.O. Sistemas deposicionais e evolução tectônico-sedimentar da Bacia de Taubaté-SP. São Paulo, 1984. 98 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências - USP).

VIGNOLI FILHO, O. Observação sobre a contaminação de águas subterrâneas em Minas Gerais. Águas Subterrâneas. São Paulo, 3:15-26, ago. 1981.

WOLMER, F.A. Aterro sanitário implantado no município de Mogi-Guaçu. Uma solução simples e prática para disposição do lixo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3, Fortaleza, 1984. Anais..., São Paulo, ABAS, 1984, v. 2, p. 157-177.

ZOHDY, A.A.R. A computer program for the automatic interpretation of Schlumberger sounding curves over horizontally stratified media. Geological Survey, Denver, Colorado, 1973. Reproduced by NTIS, U.S. Department of Commerce.