Campus de São Carlos

Contribuição ao conhecimento do meio físico
da região do lixão de São Carlos - SP,
através de estudos geológicos, geofísicos,
topográficos e químicos

Cyro Martins Bicudo Álvares

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 9.1.8.0
Ass.:

**Contribuição ao conhecimento do meio físico
da região do lixão de São Carlos - SP,
através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos
e químicos**

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016431

Cyro Martins Bicudo Álvares

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre em Ciências da Engenharia Ambiental

Orientador Prof. Dr. Dante Contin Neto

São Carlos

2000

Cinec.	TESE
Cutt.	0272
	e.1
Tamho	T0158/00

st 1098648

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A473c   Álvares, Cyro Martins Bicudo
Contribuição ao conhecimento do meio físico da região
do lixão de São Carlos-SP, através de estudos geológicos,
geofísicos, topográficos e químicos / Cyro Martins Bicudo
Álvares. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Dante Contin Neto.

1. Lixão - São Carlos. 2. Resíduos sólidos.
3. Geologia. 4. Perfilagem de poços. 5. Caminhamento
elétrico. 6. Sondagem elétrica vertical. 7. Aquífero
Botucatu. 8. Água subterrânea - contaminação. I. Título.

À Juliana, Therezinha, Francisco (gordo),
Semíramis, Alessandra, Marina, César,
Didi e Denise; um pequeno universo pessoal.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Dante Contin Neto, pela orientação exemplar, pelo apoio, pela amizade e pela tranquilidade;

Ao professor Dr. Vagner Roberto Elis, pelo apoio incondicional, nas intermináveis horas de discussão e interpretação das sondagens elétricas verticais e dos caminhamentos elétricos;

Ao geólogo Mário Nascimento Filho da empresa Perfilmaster comércio e serviços de perfilagem Ltda, pela operação da perfilagem geofísica dos poços e pelas discussões interpretativas;

Ao professor Dr. Walter Malagutti Filho, a Francisco Manoel Garcia Barrera (Paco) e a Alan de Oliveira do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP de Rio Claro, pelo apoio logístico e operacional na realização das sondagens elétricas verticais;

Ao matemático Sérgio Sadayoshi Matsuzaki e ao Eng. Romeu Francisco Gadotti pelas informações, pelo constante apoio e pelas discussões frutíferas;

Ao professor Dr. Ricardo Ernesto Schaal, a Paulo Sérgio Batista e a Márcio Albuquerque Silveira do Departamento de Transportes da EESC - USP, pelo apoio no levantamento topográfico das posições dos poços;

A Arnaldo Napolitano Sanchez, pelo apoio computacional e de comunicação eletrônica;

A Gina Luísa Boemer Deberdt, por ser, desde o início, uma motivadora deste trabalho;

Ao geólogo Nelson Zamboni da Hidrogeo por informações de poços da região;

Ao pessoal do laboratório de saneamento: Júlio, Cidinha, Paulo e Miguel (in memorian), pelo apoio em todas as análises químicas;

Aos Senhores Roberto Maramarque e Fernando Filipelli, pelo auxílio nas coletas de água;

A todos os colegas de curso e ao pessoal do CRHEA, sem os quais este trabalho nunca teria sido realizado;

e, finalmente a CAPES, pela concessão de bolsa de estudos,

o meu muito obrigado!

Sumário

<i>Lista de figuras</i>	<i>i</i>
<i>Lista de tabelas</i>	<i>iii</i>
<i>Lista de abreviaturas e siglas</i>	<i>iv</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>v</i>
<i>Resumo</i>	<i>vi</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
1. Introdução	1
2. Revisão bibliográfica	3
2.1 Aquífero e água subterrânea	3
2.2 Utilização das águas subterrâneas	4
2.3 Poluição e contaminação	4
2.4 Qualidade das águas naturais não poluídas	5
2.5 Qualidade das águas subterrâneas não poluídas	7
2.6 Qualidade microbiológica das águas subterrâneas poluídas	8
2.7 Qualidade química das águas subterrâneas poluídas	9
2.8 Padrão de potabilidade de águas	10
2.9 Principais fontes poluidoras das águas subterrâneas	12
2.9.1 Depósitos de lixo	13
2.10 Monitoramento de aquíferos	15
2.10.1 Objetivos do monitoramento de qualidade de águas	15
2.10.2 Dificuldades de amostragens representativas	16
2.10.3 Seleção de padrões analíticos	17
2.10.4 Modificação físico-química das amostras de água subterrânea	17
2.10.5 Transporte e atenuação de contaminantes	19
2.11 Análises químicas	20
2.11.1 Alcalinidade	20
2.11.2 Cloretos	21
2.11.3 Condutividade	22
2.11.4 DQO	22
2.11.5 Fosfatos	23
2.11.6 Metais pesados	23
2.11.7 Nitratos	25
2.11.8 Nitrogênio total	26
2.11.9 Oxigênio dissolvido	26
2.11.10 pH	27
2.11.11 Potencial de oxidação/redução ou potencial redox.	28
2.12 Método da Eletrorresistividade	29
2.12.1 Técnicas de Ensaio e equipamentos utilizados	32

2.13 Perfilagem geofísica de poços	44
2.13.1 Ferramentas de perfilagem geofísica de poços	44
2.14 Geologia Regional	49
2.14.1 Estratigrafia e Litologias	50
2.15 Geologia local	52
2.16 Hidrogeologia	54
2.17 Trabalhos anteriores	58
3. Procedimentos, resultados e discussões	62
3.1 Mapeamento geológico	62
3.2 Levantamento Topográfico	66
3.3 Análises químicas das águas dos poços de monitoramento	70
3.4 Perfilagem geofísica dos poços do lixão	108
3.4.1 Acamamentos siltosos e/ou argilosos	109
3.4.2 Anomalia gama no corpo do lixo	112
3.5 Caminhamento elétrico	136
3.5.1 Interpretação das seções de resistividade aparente	138
3.6 Sondagens Elétricas Verticais	145
3.6.1 Mapa piezométrico	145
3.6.2 Perfis geológicos	147
4. Conclusões	152
6 Referências bibliográficas	154

APÊNDICE 1 Tabelas com os contaminantes e a variação de suas concentrações ao longo do tempo - lixão São Carlos

APÊNDICE 2 Curvas de campo e os modelos interpretados das sondagens elétricas verticais

Lista de figuras

Figura 1 - Localização do lixão de São Carlos - SP	1
Figura 2- Nascente de chorume no lixão de São Carlos	15
Figura 3 - Instabilidade relativa e faixas de concentração dos principais parâmetros de interesse no monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.	18
Figura 4 - Transporte de contaminantes, dispersão e atenuação em aquíferos homogêneos e não consolidados.	20
Figura 5 - Parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica	29
Figura 6 Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos	31
Figura 7 – Equipamento utilizado para os ensaios de resistividade composto de unidade de emissão (a esquerda) e unidade de recepção (a direita).	33
Figura 8– Tipos de curvas de SEV	35
Figura 9 – Esquema de arranjo Schlumberger	36
Figura 10 - Arranjo Wenner.	37
Figura 11 Exemplo de efeito superficial em curva de SEV	38
Figura 12 Curva de campo e modelo geoeletrico interpretado.	40
Figura 13 Arranjo dipolo-dipolo.	42
Figura 14 Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente.	42
Figura 15 Arranjo polo-dipolo.	43
Figura 16 Comportamento das curvas geradas pela perfilagem geofísica de poços - Gama e Indução	45
Figura 17 - Mapa geológico da região do lixão	63
Figura 18 - Mapa topográfico da região do lixão de São Carlos	69
Figura 19 - Mapa dos elementos gráficos dos diversos mapas de concentrações de contaminantes	72
Figura 20 - Gráfico de concentrações de alcalinidade	74
Figura 21 - Mapa de concentrações de alcalinidade	75
Figura 22 - Gráfico de concentrações de cloretos	76
Figura 23 - Mapa de concentrações de cloretos)	77
Figura 24 - Gráfico de condutividades	79
Figura 25 - Mapa de condutividades	80
Figura 26 - Gráfico de demanda química de oxigênio	81
Figura 27 - Mapa de concentrações de demanda química de oxigênio	82
Figura 28 - Gráfico de concentração de ferro	84
Figura 29 - Mapa de concentrações de ferro	86
Figura 30 - Mapa de concentrações de ferro, excluído o poço 30	87
Figura 31 - Gráfico de concentrações de fosfatos	88
Figura 32 - Mapa de concentrações de fosfatos	90
Figura 33 - Mapa de concentrações de fosfatos sem pontos da águas superficiais e E- Cacimbão	91
Figura 34 - Gráfico de concentrações de manganês	92
Figura 35 - Mapa de concentrações de manganês	94
Figura 36 - Gráfico de concentrações de nitratos	95
Figura 37 - Mapa de concentrações de nitratos	96
Figura 38 - Gráfico de concentrações de nitrogênio total	97
Figura 39 - Mapa de concentrações de nitrogênio total	99
Figura 40 - Gráfico de concentrações de oxigênio dissolvido	100
Figura 41 - Mapa de concentrações de oxigênio dissolvido	101
Figura 42 - Gráfico de variações de pH	102
Figura 43 - Mapa de variações de pH	103
Figura 44 - Gráfico de variações de potencial redox	104
Figura 45 - Mapa de variações de potencial redox	105
Figura 46 - Gráfico de concentrações de zinco	106
Figura 47 - Mapa de concentrações de zinco	107
Figura 48 - Equipamento de perfilagem geofísica de poços	109
Figura 49 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 15 (julho de 1998)	114
Figura 50 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 16 (julho de 1998)	115
Figura 51 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 17 (julho de 1998)	116

<i>Figura 52 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 18 (julho de 1998)</i>	117
<i>Figura 53 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 19 (julho de 1998)</i>	118
<i>Figura 54 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 20 (julho de 1998)</i>	119
<i>Figura 55 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 21 (julho de 1998)</i>	120
<i>Figura 56 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 23 (julho de 1998)</i>	121
<i>Figura 57 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 24 (julho de 1998)</i>	122
<i>Figura 58 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 25 (julho de 1998)</i>	123
<i>Figura 59 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 26 (julho de 1998)</i>	124
<i>Figura 60 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 27 (julho de 1998)</i>	125
<i>Figura 61 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 28 (julho de 1998)</i>	126
<i>Figura 62 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 29 (julho de 1998)</i>	127
<i>Figura 63 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 30 (julho de 1998)</i>	128
<i>Figura 64 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 31 (julho de 1998)</i>	129
<i>Figura 65 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 32 (julho de 1998)</i>	130
<i>Figura 66 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 33 (julho de 1998)</i>	131
<i>Figura 67 - Perfil geológico entre os poços 27 e 21 baseado em informações obtidas com a perfilagem geofísica de poços e revisão de trabalhos executados no local.</i>	132
<i>Figura 68 - Perfil geológico entre os poços 29 e 20</i>	133
<i>Figura 69 - Perfil geológico entre os poços 28 e 33</i>	134
<i>Figura 70 - Anomalia gama observada aos 5,5 m de profundidade no poço 30 e os registros gama de todos os demais poços que o circundam.</i>	135
<i>Figura 71 - Mapa de resistividade aparente do nível 20 m de profundidade</i>	137
<i>Figura 72 - Seção de resistividade aparente - linha 1</i>	138
<i>Figura 73 - Seção de resistividade aparente - linha 2</i>	139
<i>Figura 74 - Seção de resistividade aparente - linha 3</i>	140
<i>Figura 75 - Seção de resistividade aparente - linha 4</i>	142
<i>Figura 76 - Seção de resistividade aparente - linha 5</i>	143
<i>Figura 77 - Seção de resistividade aparente - linha 6</i>	144
<i>Figura 78 - Mapa piezométrico da região do lixão de São Carlos (com localizações das sondagens elétricas verticais).</i>	146
<i>Figura 79 - Perfil geológico - SEV 7, 6, 5 e 4 - possibilidade nº 1</i>	148
<i>Figura 80 - Perfil geológico - SEV 3, 2 e 1- possibilidade nº 2</i>	149
<i>Figura 81 - Perfil geológico - SEV 7, 6, 5 e 4 possibilidade nº 2</i>	150

Lista de tabelas

<i>Tabela 1 Impurezas das águas naturais em relação ao tempo de chuva (em mg/l)</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2 Impurezas mais frequentes encontradas nas águas naturais</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 3 Faixa de variação representativa para vários constituintes inorgânicos em chorume gerado em aterros sanitários</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 4 Padrões de potabilidade de água.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 5 Metais pesados e concentrações máximas e mínimas observadas</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 6 Resultados obtidos nos testes de granulometria</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 7 - Coordenadas U.T.M. e cotas dos poços de monitoramento</i>	<i>67</i>

Lista de abreviaturas e siglas

Ago - agosto

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CE - caminhamento elétrico

CRHEA - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

E - leste

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

ESE - leste-sudeste

Fm. - Formação

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Jan - janeiro

N - norte

N.A. - não amostrado

N.A. - nível d'água

NE - nordeste

N.E. - nível estático

OD - oxigênio dissolvido

OMS - Organização Mundial de Saúde

Out - outubro

S - sul

SEV - sondagem elétrica vertical

SW - sudoeste

UTM - Universal Transversa de Mercator

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

USEPA - United States Environmental Protection Agency

W - oeste

WHO - World Health Organization

WNW - oeste-noroeste

Lista de Símbolos

ρ - resistividade	min - minuto
ρ_a - resistividade aparente	ml - mililitro
ΔV - diferença de potencial	mm - milímetro
A - ampère	Mn - manganês
ATM - atmosfera	<i>M</i> - molar ou mol (química)
cm - centímetro	mV - milivolt
DQO - demanda química de oxigênio	n - porosidade
Eh - potencial de oxi-redução	N - nitrogênio
Fe - ferro	<i>N</i> - normal (química)
g - grama	NO_2^- - nitrito
h - hora	NO_3^- - nitrato
I - corrente elétrica	°C - grau Celsius
K - condutividade hidráulica	Ohm - resistência
Km^2 - quilômetro quadrado	pH - potencial hidrogeniônico
l - litro	ppm - partes por milhão
m - metro	Q, q - vazão
m^2 - metro quadrado	s - segundo
m^3 - metro cúbico	V - volt
mA - miliampère	W - watt
mg - miligrama	Zn - zinco
mho - condutância	

Resumo

Álvares, C.M.B. *Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos - SP através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos*. São Carlos, 2000. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

O lixão da cidade de São Carlos foi colocado, aproximadamente por dezessete anos, em uma boçoroca formada em região sedimentar, sobre os arenitos da Formação Botucatu, sem nenhuma espécie de controle prévio, quanto a possibilidade de contaminação do meio físico e, especialmente, da água subterrânea. Dada essa possibilidade de contaminação do aquífero profundo, uma série de estudos são feitos no local, desde a década de 80. Este trabalho vem somar-se aos diversos outros na tentativa de aprofundar o conhecimento das condições em que se encontra o meio físico na região do lixão. Fazendo parte de um projeto maior este trabalho procurou, utilizando as ciências de geologia, geofísica, topografia e química, dar novos elementos e interpretações a esse conhecimento. Geologicamente, detectamos e avaliamos a presença de camadas penetrativas, hidraulicamente menos condutivas, como areias siltsosas e, muito provavelmente, arenito silicificado ou diabásio em profundidade, o que poderia fazer que a contaminação não atingisse o aquífero profundo. Para isso utilizamos o mapeamento geológico e a geofísica em três de suas técnicas: caminhamento elétrico, sondagens elétricas verticais e perfilagem de poços. Quimicamente, avaliamos a contaminação das águas subterrâneas em relação ao sentido do fluxo.

Palavras-chave: Lixão - resíduos sólidos - São Carlos - geologia - perfilagem de poços - caminhamento elétrico - sondagem elétrica vertical - aquífero Botucatu - contaminação - água subterrânea.

Abstract

Alvares, C.M.B. *Contribution to environment's knowledge of the Sao Carlos- SP waste dump area - by geological, geophysical, topographical and chemical studies*. Sao Carlos, 2000. Dissertacao de Mestrado - Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo

For seventeen years, Sao Carlos' solid wastes were placed in a gully formed in a sedimentary area, on the Botucatu Formation (friable sandstone and sands), without any form of control to prevent the contamination of the environment and, especially, of the ground water. Thanks to the possibility of contamination of the deep water source, a series of studies have been made in the area since the eighties. These studies were just another attempt, along with several others, to increase the knowledge of the environmental conditions surrounding the waste dump area. Being part of a greater project, different sciences were used such as geology, geophysics, topography and chemistry, in order to obtain new elements and a more accurate interpretation to the existing knowledge. Geologically, we detected a less hydraulically conductive silty sand layers and, probably, silicified sandstone layers or diabase sill which could protect the deep water sources from being contaminated. Geologic mapping and geophysical techniques such as electric surveys and well logs were performed during the process. Chemically, we evaluated the ground water contamination in relation to the flow's direction.

Keywords: Landfill - waste - Sao Carlos - geology - well log - electric survey - vertical electric survey- Botucatu water source - contamination - ground water.

1. Introdução

O trabalho aqui apresentado deve-se a necessidade do aprofundamento do conhecimento dos problemas ocasionados pelo lançamento de resíduos sólidos urbanos em um lixão na cidade de São Carlos, São Paulo, localizado na antiga estrada de terra São Carlos-Analândia a aproximadamente 3 Km do entroncamento com a Rodovia Washington Luís (na altura do Km 221). Vide localização na Figura 1.

Figura 1 - Localização do lixão de São Carlos - SP

Diferentemente de um aterro sanitário, o lixão em questão não possui sistema coletor dos fluidos produzidos pela degradação do lixo (chorume) e nem há a impermeabilização do

fundo. Ocorre então que os fluidos produzidos são percolados e vem a atingir as águas subterrâneas contaminando-as, como pode ser constatado por MENEZES (1995) e GADOTTI (1997). Existe, ainda, o fato agravante de que o lixão está sobre uma área onde o subsolo é constituído de areias (solo de alteração) e arenitos da Formação Botucatu, ou seja, sobre uma área de recarga de um dos maiores aquíferos do mundo, do maior da Bacia do Paraná e, em consequência, do aquífero mais importante para o Estado de São Paulo.

Concentrando esforços no conhecimento dos componentes de um dos principais fatores de degradação ambiental, que é o lançamento de resíduos sólidos urbanos no meio ambiente, levantamos uma série de novas informações. As ferramentas que foram utilizadas foram basicamente os levantamentos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Aqüífero e água subterrânea

Água subterrânea é a água que encontramos no subsolo. Na maioria dos casos, as águas subterrâneas enchem os poros dos materiais rochosos¹ granulares, tais como areias, arenitos, ou secundariamente as fraturas das rochas compactas, tais como granitos, calcários, basaltos, etc.. A quantidade destes vazios que as rochas possuem fazem com que a água subterrânea seja a maior ocorrência de água doce disponível (97%) nos continentes, a exceção das calotas polares e geleiras. Quando a rocha tem muitos poros ou fraturas interligadas e a maioria é suficientemente grande para deixar a água infiltrar e mover-se facilmente através, diz-se que a rocha é aqüífera. A quase totalidade das águas subterrâneas normalmente utilizadas pelo homem para consumo, ou para desenvolvimento de suas atividades, tem origem meteórica, isto é, são formadas pelas infiltrações no subsolo de águas de chuva, gelo, neve e neblina. Por sua vez, as fontes ou nascentes naturais, são alimentados pelas descargas naturais de águas subterrâneas (REBOUÇAS, 1992).

As águas subterrâneas são caracterizadas, em primeiro lugar, pela falta de luz e comumente pela constância de sua temperatura. A falta de luz implica na ausência de vegetais clorofilados, de modo que suas biocenoses são compostas quase que exclusivamente por animais. O reino vegetal pode ser representado por certas bactérias heterotróficas. Todas as substâncias nutritivas devem, portanto, serem trazidas em forma orgânica de outros locais. A água subterrânea costuma trazer tais substâncias em maior ou menor quantidade, em solução ou como detritos suspensos. Em condições tão extraordinárias poucas espécies nela se adaptaram, sendo a água subterrânea pobre em organismos. Estas então diferem-se muito das águas das nascentes onde a luz tem acesso mais ou menos franco a água e modifica inteiramente as condições do biótopo. Plantas autótrofas podem desenvolver-se; algas e vegetação superior fornecem alimentação orgânica a inúmeros organismos (KLEEREKOPER, 1944). Essas características, ligadas ao fato das águas subterrâneas ocorrerem a uma certa profundidade abaixo da superfície do solo, fazem com que sua principal característica seja sua

potabilidade e constituam uma fonte mais segura do que os rios e outros mananciais de superfície. Porém, a água subterrânea pode se contaminar por bactérias patogênicas e pela poluição química. Esses problemas são gravíssimos na medida que os processos hidrogeoquímicos são invisíveis e muito complexos, ou pouco conhecidos; diferentemente da contaminação de um manancial de superfície onde um problema agudo é visível na mudança da cor da água, na formação de espuma ou no aparecimento de peixes mortos, por exemplo. A contaminação dos aquíferos é invisível e pode tornar-se um problema crônico, na medida em que só venha a ser identificado por meio de seus efeitos na saúde pública (REBOUÇAS, 1992).

2.2 Utilização das águas subterrâneas

Há dezenas de milhares de poços tubulares profundos existentes no Brasil, tendo sido observado um notável incremento de perfurações nas últimas décadas.

Um número bastante expressivo de núcleos urbanos se abastece exclusivamente com águas subterrâneas, ou as utiliza complementarmente as águas superficiais. As melhores rochas aquíferas ocupam cerca de 40% do território brasileiro. No restante do país, predominam rochas cristalinas, em condições desfavoráveis para a extração de águas subterrâneas. A utilização crescente de águas subterrâneas é, sem dúvida, resultado dos esforços que tem sido empreendidos para conhecimento de suas condições de ocorrência e de desenvolvimento de tecnologia de sua captação através de poços tubulares profundos (BARTH, 1987).

O que tem ocorrido em nossa sociedade é que temos explorado em demasia nossos recursos hídricos subterrâneos e, em alguns lugares, explorado mais volume de água do que aquele que é possível ser repostado através das infiltrações nas zonas de recarga dos aquíferos (CORSON, 1993).

2.3 Poluição e contaminação

Concordam os especialistas que a poluição das águas continentais acompanhou a humanidade desde os tempos pré-históricos ou pelo menos desde que ela abandonou seus

hábitos de simples caçadores e coletores de alimentos vegetais. A palavra “poluição” vem do latim *polluere*, que significa manchar ou sujar. Semelhante é o termo contaminação que vem do latim *contaminare* e significa o mesmo manchar e sujar além de infectar ou misturar. Efetivamente iniciou-se o uso destes termos quando não se reconheciam senão os efeitos estéticos e sensoriais do resultado do lançamento de resíduos putrefatos ao ambiente. Atualmente os conceitos são confundidos de maneira geral, mas podemos defini-los separadamente da seguinte maneira: contaminação se refere a simples transmissão pela água de elementos, compostos ou microorganismos que podem prejudicar a saúde do homem ou de animais que a bebem. Neste caso a água desempenha um papel de veículo do agente contaminante, e não de ambiente ecológico alterado. A poluição, por sua vez, se caracteriza muito mais por seus efeitos ecológicos oriundos de transformações do meio ambiente, de modo que este tornaria-se inapropriado para o desenvolvimento normal das populações aquáticas. Normalmente contaminação e poluição estão associadas porque podem ter uma mesma origem: a introdução de resíduos estranhos à natureza do ambiente aquático. Estes resíduos são comumente de natureza complexa e contém substâncias que prejudicam ecologicamente o meio e, ao mesmo tempo, elementos nocivos para a saúde do homem e dos animais terrestres. Devido a isso pode-se dizer que o conceito de contaminação está geralmente associado com o de poluição (BRANCO, 1984).

2.4 Qualidade das águas naturais não poluídas

A água sendo ótimo solvente nunca é encontrada em estado de absoluta pureza. A própria água da chuva, que muito se aproxima de água pura, contém várias impurezas que normalmente se encontram na atmosfera. Percebe-se, somente para efeito de ilustração, (vide Tabela 1) que a água da chuva, mesmo em estudo realizado na década de 60, possuía impurezas. Certamente, na atualidade, estes valores são outros, mais elevados.

O CO₂ existente na atmosfera e também no solo, como resultado da decomposição da matéria orgânica, dissolve-se na água aumentando ainda mais a quantidade de solvente da mesma (PORTO, 1991).

Tabela 1 Impurezas das águas naturais em relação ao tempo de chuva (em mg/l)

Fonte: (NETTO, 1966).

Algumas impurezas	Após 4 horas de chuva	Após 22 horas de chuva
Dureza total (Ca CO ₃)	43	8
Alcalinidade (Ca CO ₃)	19	5
Sódio (Na)	5	0,1
Amônia (NH ₃)	1,5	2,0
Nitratos	1,0	traços

As impurezas mais freqüentes encontradas nas águas naturais podem ser observadas na Tabela 2, onde podem ser vistas, inclusive, as fontes antropogênicas de contaminação.

Tabela 2 Impurezas mais freqüentes encontradas nas águas naturais

Fonte: THOBANOGLIOUS & SCHROEDER, (1987)., apud PORTO et al. (1991)¹.

Origem	Impurezas Dissolvidas	Coloidais	Em suspensão	Gases
Contato da água com minerais, solos e rochas	Cálcio Bicarbonatos Ferro Carbonatos Magnésio Cloretos Manganês Nitratos Potássio Fosfatos Sódio Silicatos Zinco Sulfatos	Argila Sílica Óxido de ferro Óxido de alumínio Dióxido de magnésio	Argila Silte Areia	Gás carbônico
Atmosfera, chuva	Hidrogênio (H ⁺) Bicarbonatos Cloretos Sulfatos		Poeira Pólen	Gás carbônico Nitrogênio Oxigênio SO ₂

¹ THOBANOGLIOUS, G. & SCHROEDER, E.D. (1987). Water Quality: Characteristics, Modeling and Modification. Addison-Wesley Pub. Co. apud PORTO et al. (1991).

Tabela 2 - Impurezas mais freqüentes encontradas nas águas naturais (continuação)

Fonte: THOBANOGLIOUS & SCHROEDER, (1987)., apud PORTO et al. (1991)².

Decomposição de matéria orgânica no meio ambiente	Amônia Cloretos Hidrogênio(H ⁺) Sódio Nitritos Nitratos Sulfitos Radicais orgân.	Cor de origem vegetal Resíduos	Solo orgânico Resíduos orgânicos	Amônia Gás carbônico Gás sulfídrico Hidrogênio Metano Nitrogênio Oxigênio
Organismos vivos		Bactérias Algas Vírus	Algas Zooplâncton Peixes	Amônia Gás carbônico Metano
Fontes antropogênicas	Íons inorgânicos Metais pesados Moléculas orgânicas Cor	Organoclorados Corantes Bactérias Vírus	Sólidos inorgânicos Compostos orgânicos Óleos e graxas	Cloro Dióxido de enxôfre

A natureza e a composição do solo, sobre o qual ou através do qual a água escoar, determinam as impurezas adicionais que ela apresenta (NETTO, 1966).

O conjunto de elementos em solução e em suspensão é responsável pelas características da água sob os pontos de vista físico, químico e organoléptico (BRANCO, 1991).

2.5 Qualidade das águas subterrâneas não poluídas

As águas subterrâneas normalmente apresentam-se dentro dos padrões de potabilidade para a população humana e animal. Como foi observado por REBOUÇAS (1980) a bacia sedimentar do Paraná possui vasta literatura que sempre focou os aspectos hidrogeológicos da área de um ponto de vista essencialmente quantitativo, uma vez que não existe, em geral, limitação de qualidade. Seria somente necessária a cloração para que fosse assegurada a qualidade higiênica ao longo da rede de distribuição (SILVA et. al., 1980). Por outro lado foi relatado por FENZL et al. (1980), que em alguns lugares, como a Ilha de Marajó, por exemplo, vem ocorrendo exatamente o oposto. Para ele ficou claro que o problema

² THOBANOGLIOUS, G. & SCHROEDER, E.D. (1987). Water Quality: Characteristics, Modeling and Modification. Addison-Wesley Pub. Co. apud PORTO et al. (1991).

fundamental do abastecimento das diversas comunidades com água potável não é um problema quantitativo mas qualitativo, devido principalmente ao fator da poluição antropogênica, fonte de bactérias, germes e vírus, responsáveis em parte pelo estado precário de saúde da população.

A quantidade de impurezas encontradas nas águas subterrâneas não poluídas é variável, ora em função do enriquecimento em elementos e substâncias oriundos do meio geológico por onde estas percolaram, ora em função de motivos climáticos ou de eventos globais naturais ocorridos (FALCÃO & LEAL, 1980). Com relativa frequência as águas subterrâneas são demasiadamente ricas em impurezas, prejudicando a sua utilização para consumo. As impurezas mais comuns em excesso são ferro e manganês, além de cloretos e de carbonatos (SADALA & GONÇALVES, 1980). Exemplificando, como foi observado por FALCÃO & LEAL (1980), em um estudo das águas subterrâneas na bacia do Riacho do Navio, em Pernambuco, em comparações que mostram a relação dos íons cloro, cálcio, sulfato, magnésio e bicarbonato de sódio + potássio com o resíduo seco, percebeu-se que aqueles que são os elementos mais raros na composição das rochas (cloro, sulfato e magnésio) não sofrem quase alteração nas suas proporções, sugerindo que estes cheguem à superfície da terra em proporções definidas nas águas meteóricas, sofrendo apenas concentrações posteriores em função das condições climáticas. Já os elementos mais frequentes nas rochas afetam sensivelmente a sua relação com o resíduo seco de acordo com o tipo de rocha onde circulam as águas; estes elementos são o carbonato, o sódio e o potássio.

Existe a possibilidade das águas subterrâneas serem ricas em cloretos o que lhes confere um paladar salobro ou salgado por influência direta de água marinha (FRANGIPANI & BOTTURA, 1980), podendo haver influência, também, das massas de ar que forneceriam os sais aerotransportados, onde, de qualquer maneira, o mar seria a fonte; os cloretos podem ainda ser oriundos de transgressões marinhas do passado (FALCÃO & LEAL, 1980).

2.6 Qualidade microbiológica das águas subterrâneas poluídas

Casos de doenças podem ser devidos a ocorrência de água subterrânea contaminada microbiologicamente e o seu consumo sem o devido tratamento. Casos específicos incluem salmonelose, shigelose, hepatite infecciosa, gastroenterite, disenteria amebiana, infecções urinárias (*Pseudomonas aeruginosa*), etc.. Tem sido aceita uma estreita correlação entre a presença de coliformes e a ocorrência de organismos patogênicos. Porém pode ocorrer que

devido a interferências microbiológicas e em parte às limitações dos meios de cultura dos testes, uma pequena quantidade de coliformes detectados não exclua uma provável ocorrência de organismos patogênicos.

Para determinar-se a origem da contaminação, usa-se a relação Coliformes fecais/Estreptococos fecais. Estes últimos são mais numerosos no trato dos animais do que no intestino humano; isso implica que, quanto maior for a relação CF/EF maior é a influência de lixo humano na contaminação e vice-versa (VIGNOLI F^o, 1980).

2.7 Qualidade química das águas subterrâneas poluídas

As águas subterrâneas tem sua concentração aumentada em diversos constituintes, devido, entre outros fatores, a contaminação provocada pelo aporte à massa de água subterrânea dos fluidos percolados oriundos dos corpos de lixo em sítios de rejeitos sólidos urbanos. Embora considerando que o grau de contaminação está sob influência de interações químicas que as substâncias percoladas tem com o meio físico e seus componentes, que, dependendo de suas características, tem o poder de atenuá-la (SCUDINO, 1992), os constituintes que terão suas concentrações elevadas são aqueles que são gerados em altas concentrações nos sítios de rejeitos e que compõe o chorume. Suas características químicas estão discriminadas na Tabela 3.

Tabela 3 Faixa de variação representativa para vários constituintes inorgânicos em chorume gerado em aterros sanitários

Fonte: GRIFFIN et. al. (1976) & LECKIE et. al. (1975) apud FREEZE & CHERRY (1979)³

Parâmetro	Faixa de Variação Representativa (mg/l)
K ⁺	200-1.000
Na ⁺	200-1.200
Ca ²⁺	100-3.000
Mg ⁺	100-1.500

³GRIFFIN, R. A.; CARTWRIGHT, K.; SHIMP, N. F.; STEELE, J. D.; BUCH, R. R.; WHITE, W. A.; HUGES, G. M.; GILKESON, R. H. (1976). *Alteration of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals: Part I. Column leaching and field verification*. Illinois State Geol. Surv. Bull. 78. &

LECKIE, J. O.; PACE, J. G.; HALVADAKIS, C. (1975). *Asselerated refuse stabilization through controlled moisture application*. Unpublished report, Dept. Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, Calif, apud FREEZE & CHERRY (1979)

Tabela 3 Faixa de variação representativa para vários constituintes inorgânicos em chorume gerado em aterros sanitários (continuação)

Fonte: GRIFFIN et. al. (1976) & LECKIE et. al. (1975) apud FREEZE & CHERRY (1979)⁴

Cl ⁻	300-3.000
SO ₄ ²⁻	10-1.000
Alcalinidade	500-10.000
Fe (total)	1-1.000
Mn	0,01-100
Cu	<10
Ni	0,01-1
Zn	0,1-100
Pb	<5
Hg	<0,2
NO ₃ ⁻	0,1-10
NH ₄ ⁺	10-1.000
P (como PO ₄)	1-100
Nitrogênio Orgânico	10-1.000
Carbono Orgânico Dissolvido Total	200-30.000
DQO (Demanda Química de Oxigênio)	1.000-90.000
Sólidos Dissolvidos Totais	5.000-40.000
pH	4-8

2.8 Padrão de potabilidade de águas

No Brasil, o Ministério da Saúde estabeleceu as normas e o padrão de potabilidade de água, para todo o território nacional. Estão listados na Tabela 4 a maioria dos constituintes das águas para os quais são recomendados limites de concentração para fornecimento pelo abastecimento público, segundo a portaria 36/GM de 1990, em vigor atualmente.

⁴GRIFFIN, R. A.; CARTWRIGHT, K.; SHIMP, N. F.; STEELE, J. D.; BUCH, R. R.; WHITE, W. A.; HUGES, G. M.; GILKESON, R. H. (1976). *Alteration of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals: Part I. Column leaching and field verification*. Illinois State Geol. Surv. Bull. 78. & LECKIE, J. O.; PACE, J. G.; HALVADAKIS, C. (1975). *Asselerated refuse stabilization through controlled moisture application*. Unpublished report, Dept. Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, Calif, apud FREEZE & CHERRY (1979)

Tabela 4 Padrões de potabilidade de água.

Fonte: adaptado de DI BERNARDO (1993).

Características Físicas e Organolépticas	
Cor aparente (uH)	15 (*)
Odor	Não Objetável
Sabor	Não Objetável
Turbidez (uT)	5 (**)
pH	6,5 a 8,5
Características Químicas	Limite de concentração (mg/l)
Compostos inorgânicos que afetam a saúde	
Arsênio	0,05
Bário	1,0
Cádmio	0,005
Chumbo	0,05
Cianetos	0,1
Cromo total	0,05
Fluoretos (mg/l - F)	0,6 - 1,7 (***)
Mercúrio	0,001
Nitratos (mg/l - N)	10
Prata	0,05
Selênio	0,01
Características Químicas	Limite de concentração (mg/l)
Compostos que afetam a qualidade organoléptica	
Alumínio	0,2
Agentes tensoativos (reagentes ao azul de metileno)	0,2
Cloretos	250
Cobre	1,0
Dureza total (mg/l - Ca CO ₃)	500
Ferro total	0,3
Manganês	0,1
Sólidos totais dissolvidos	1000
Sulfatos	400
Zinco	5,0
Características Químicas	Limite de concentração (µg/l)
Componentes orgânicos que afetam a saúde	
1,1 Dicloroetano	0,3
1,2 Dicloroetano	10
2,4,6 Triclorofenol	100
2,4-D	100
Aldrin e Dieldrin	0,03
Benzeno	10
Benzo-a-pireno	0,01
Clordano (total de isômeros)	0,03
DDT (total)	1
Endrin	0,2

Tabela 4 Padrões de potabilidade de água. (continuação)

Fonte: adaptado de DI BERNARDO (1993).

Heptacloro + Heptacloro Epóxido	0,1
Hexaclorobenzeno	0,01
Lindanos (gama HCH)	3
Metoxicloro	30
Pentaclorofenol	10
Tetracloreto de Carbono	3
Tetracloroetano	10
Toxafeno	5
Tricloroetano	30
Trihalometanos	100
Substâncias que conferem odor	Limites
Clorobenzenos	0,1 a 3,0 mg/l
Clorofenóis e Fenois	0,1 µg/l
Sulfeto de hidrogênio (não ionizável)	0,025 - 0,250
Características radioativas	Limites
Radioatividade alfa total	0,1 Bq/l (Bequerel por litro)
Radioatividade beta total	1,0 Bq/l

(* e **) em pontos da rede de distribuição. Entrando na rede estes limites seriam de 5 e 1, respectivamente.

(***) o valor recomendado é variável em função das temperaturas médias do ar. Os valores citados são da portaria 56/BSB de 1977, anterior.

O consumo de águas em concentrações superiores a alguns dos limites estabelecidos podem não ser prejudiciais. Em algumas regiões as águas subterrâneas excedem os limites de um ou mais destes parâmetros. Por exemplo, o ferro ou o manganês são requeridos pelo organismo em quantidades superiores aquelas que as águas podem fornecer. Seus limites são ditados pela necessidade de se evitar problemas com manchas e precipitados, porque os óxidos destes metais são relativamente insolúveis.

2.9 Principais fontes poluidoras das águas subterrâneas

Qualquer poluente que entre em contato com o solo pode contaminar as águas subterrâneas (CORSON, 1993). O potencial poluidor da indústria às águas subterrâneas é muito maior do que o da agricultura, apesar de utilizar muito menos água. Da água utilizada, mais de 80% retorna a fonte, e freqüentemente poluída. Os segmentos industriais mais potencialmente poluidores são papel e celulose, química e petroquímica, petróleo, metalurgia, alimentos, têxtil e mineração (REBOUÇAS, 1992).

Além dos metais pesados ou compostos orgânicos que atingem a água subterrânea, através de descargas ou vazamento de efluentes, descarga de detritos industriais tóxicos é a fonte principal da contaminação das águas subterrâneas, através da lixiviação das pilhas de resíduos (REBOUÇAS, 1992). Nos E.U.A., uma inspeção em mais de 8.000 depósitos de detritos industriais revelou que mais de 70% dos depósitos eram desferrados. Cerca de 30% estavam localizados sobre materiais permeáveis, e jaziam sobre lençóis utilizáveis de água; um terço desses depósitos encontrava-se a 1,5 Km de um poço de fornecimento de água (CORSON, 1993).

Focos de contaminação menos danosos, mas ainda assim com relativo potencial poluidor, são os poços (tubulares profundos) mal construídos ou mal utilizados (REBOUÇAS, 1980).

As fontes poluidoras podem ser pontuais ou dispersas. Nas fontes pontuais, percebe-se a ligação direta e imediata entre as fontes de poluição e a concentração de poluentes nas águas subterrâneas. A velocidade de penetração dos poluentes é muito grande, devido a quantidade de água que se infiltra em uma área relativamente pequena. Neste caso os poços que estejam próximos encontrar-se-ão imediatamente em perigo de poluição o que pode obrigar a sua desativação.

Neste caso o volume de água de água que entra em contato com o poluente é pequeno e, com base em técnicas de hidrogeologia, pode-se localizar a parte das águas subterrâneas poluídas e assim evitar um perigo imediato aos usuários. Podemos citar como fontes pontuais: lixões, estocagem de produtos químicos, unidades industriais, concentração de despejo para tratamento ou infiltração, etc.. No caso das fontes dispersas, uma pequena quantidade de poluente entra em contato com uma grande quantidade de água comprometendo uma porção muito grande do aquífero, fazendo com que este tipo de poluição seja de certo modo irreversível. Os exemplos para esse tipo de fonte poluidora são os fertilizantes, agrotóxicos e a própria pecuária de pastagens naturais (não confinada) (SILVA et. al., 1980), (POPPE et. al., 1980).

2.9.1 Depósitos de lixo

A degradação ambiental provocada pelo lançamento de resíduos sólidos no meio ambiente é um problema de grandeza global, afetando países industrializados ou não. O poder público, obrigado a dar soluções aos problemas da sociedade, organiza instrumentos de

controle na tentativa de diminuir o impacto provocado por essa atividade. No Estado de São Paulo a norma P 4.241 da CETESB (/198_/) regulamenta os projetos de aterros sanitários assim como, a nível nacional, a norma NBR 8419 (ABNT, 1985). Ocorre que a maioria dos aterros sanitários foi constituída anteriormente a criação das normas (MENEZES, 1995) e os resíduos sólidos lançados continuam produzindo fluidos contaminantes (chorume) e assim continuarão por décadas ou até mesmo séculos (FREEZE & CHERRY, 1979). A maioria dos sítios de rejeitos sólidos urbanos continua sendo, entretanto, apesar das normas, o meio ambiente despreparado. Na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (1989, apud GAIESKI (1991)⁵, em 1989, 86,4% do lixo produzido em todos os municípios do Brasil eram destinados a vazadouros a céu aberto, 1,8% eram dispostos sobre áreas alagadas, 11,2% eram destinados a diferentes tipos de aterros e somente 1,6% era processado em usinas de compostagem, reciclagem ou incineração.

De acordo com FREEZE & CHERRY (1979) na América do Norte são produzidos cerca de 3 Kg de lixo per capita diariamente. O lixo deveria ser depositado em aterros sanitários onde seriam reduzidos em volume pela compactação e após isso cobertos com terra ao final dos trabalhos, diariamente, mas, na prática, a frequência de cobertura é menor.

Numerosas investigações na América do Norte e na Europa indicam que a presença do corpo de lixo faz com que o nível do lençol d'água fique mais alto, dentro ou sob o corpo do lixo. Essa forma "dômica" assumida pelo nível d'água, faz com que o chorume produzido migre para baixo e para fora do corpo do lixo, formando, na superfície, na periferia do corpo do lixo, nascentes de chorume, e em subsuperfície vindo a ameaçar os recursos hídricos subterrâneos. As nascentes de chorume, como aqui descritas por FREEZE & CHERRY (1979), podem ser observadas no lixão de São Carlos (Figura 2).

Em adição ao problema da geração de chorume, a infiltração de água no corpo do lixo provoca gases que são gerados pela decomposição bioquímica da matéria orgânica. Gases comumente observados são CO₂, CH₄, H₂S, H₂ e N₂. O metano e o gás carbônico são invariavelmente os mais abundantes; no entanto, são inofensivos a qualidade das águas subterrâneas, sendo que o principal problema é a inflamabilidade do metano, o que pode provocar explosões (FREEZE & CHERRY, 1979).

---

⁵IBGE. (1989). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, apud GAIESKI (1991).

Figura 2- Nascente de chorume no lixão de São Carlos

2.10 Monitoramento de aquíferos

2.10.1 Objetivos do monitoramento de qualidade de águas

O principal requisito do programa de monitoramento é determinar a variação espacial da qualidade das águas subterrâneas. Este procedimento visa poder fornecer subsídios para que se possa determinar a distribuição subterrânea da contaminação e as taxas de migração dos contaminantes.

Outro objetivo do monitoramento é a vigilância da qualidade de água que será utilizada em poços à jusante, com o intuito de permitir a introdução de medidas de controle a tempo.

A seleção de locações apropriadas para poços de monitoramento de sítios de rejeitos tem que pesar os dados coletados no campo, laboratório e escritório. A resposta a questão “quanto de monitoramento seria suficiente?” quando perguntado no contexto do número de poços a serem construídos em determinado sítio, é praticamente subjetiva. Em geral, o projetista do sistema de monitoramento tem que assegurar a capacidade básica do sistema de produzir amostras representativas das águas subterrâneas a montante e a jusante do ponto onde se considera poder estar havendo contaminação. Alguns ambientes geologicamente simples podem ser efetivamente monitorados por um sistema mínimo de um poço para verificação a montante e três a jusante.

No entanto este sistema mínimo só tem utilidade em pouquíssimos casos, sendo que normalmente são necessários muitos outros poços. Isso é particularmente verdadeiro quando o sítio de rejeitos está em operação a um longo período de tempo, ou quando ele é composto de várias unidades, ou ainda quando são unidades em expansão. Quando há um controle geológico-estrutural ou mesmo estratigráfico com camadas inclinadas, falhas geológicas, dobras, etc., pode haver uma mudança na taxa e na direção do movimento da água subterrânea, sendo que estes fatores tem que ser levados em consideração pelo projetista do monitoramento (SARA, 1991).

2.10.2 Dificuldades de amostragens representativas

Os sistemas de águas subterrâneas são muito mais complexos e muito menos acessíveis que os corpos de água superficial, o que faz existir uma grande dificuldade para atingir os requisitos ideais de amostragem.

Os programas de monitoramento são igualmente caros e tecnicamente de difícil implementação, o que conduz a termos que aceitar sérias limitações no que diz respeito a representatividade das amostras. É importante que essas limitações sejam reconhecidas na interpretação e aplicação dos resultados.

São dois grupos de razões distintas que conduzem a uma interpretação inadequada das condições das águas no aquífero: aquelas relacionadas com (a) a modificação físico-química da amostra e (b) a complexidade hidrogeológica (FOSTER & GOMES, 1989).

O acesso à água subterrânea se dá por meio de poços. A integridade da amostra é comprometida não só pelo tipo de amostrador, manejo, conservação e transporte das amostras, mas também pelos problemas relacionados a construção e a presença dos próprios poços de monitoramento.

Uma fonte ainda mais grave de erro é o não relacionamento da escala tridimensional da rede de monitoramento com variações espaciais do fluxo, da qualidade e regime de transporte de contaminantes das águas subterrâneas.

2.10.3 Seleção de padrões analíticos

Quando o objetivo do monitoramento é relacionado com a qualidade das águas subterrâneas e/ou com problemas de poluição, a seleção de parâmetros analíticos será normalmente ditada pela interação entre: (a) as restrições impostas pelo principal uso das águas subterrâneas para abastecimento e (b) a possibilidade dos parâmetros serem presentes em concentrações problemáticas como resultado do regime hidrogeoquímico natural e/ou da presença da carga contaminante que esteja sendo descarregada no ambiente (FOSTER & GOMES, 1989).

Tendo em vista a larga gama de parâmetros potencialmente presentes e do elevado custo das análises laboratoriais, em muitos casos será necessário racionalizar o programa analítico para o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas através do uso de parâmetros indicadores (FOSTER & GOMES, 1989).

2.10.4 Modificação físico-química das amostras de água subterrânea

Os erros potenciais causados pelo procedimento analítico, para todos os parâmetros comuns, são muito menos significativos do que os resultantes do processo de amostragem (FOSTER & GOMES, 1989).

Os parâmetros de interesse comum a investigação de águas subterrâneas tem sido classificados em relação ao nível de detecção requerido e sua instabilidade relativa (Figura 3). Esta proporciona uma indicação geral daqueles grupos que requerem precauções especiais.

Figura 3 - Instabilidade relativa e faixas de concentração dos principais parâmetros de interesse no monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

Fonte: Adaptado de FOSTER & GOMES(1989).

Em termos semiquantitativos, para aqueles componentes que tendem a aparecer nas águas subterrâneas na faixa de ppm, a contaminação da amostra não é de grande preocupação na maioria dos procedimentos de amostragem (FOSTER & GOMES, 1989).

Outras modificações são impostas pela instalação dos próprios poços de monitoramento como: a presença de areia, cimento e bentonita podem ocasionar (a) mudanças de pH que afetam a solubilidade de metais pesados e de outros parâmetros (b) a absorção de alguns tipos de contaminantes; a presença de bactérias oriundas do processo de construção podem consumir o oxigênio dissolvido natural das águas subterrâneas (FOSTER & GOMES, 1989).

Alterações podem ocorrer devido aos métodos de amostragem devido a: (a) utilização de materiais não específicos para uso em monitoramento como plásticos, metais, vidros, adesivos, gomas e lubrificantes, etc. Quando é necessário um apuramento muito grande, deve-se utilizar equipamentos de alta qualidade como teflon, aço inoxidável e vidraria especial (de quartzo). Igualmente sempre ocorrem alterações devido a oxigenação das amostras e, o ponto que ocorre o maior risco de modificação físico-química, é na fase de extração das amostras dos poços e na sua conservação antes das análises.

2.10.5 Transporte e atenuação de contaminantes

A variação das propriedades hidráulicas entre as diferentes classes de aquíferos exerce uma grande influência sobre o transporte de contaminantes. O fluxo de água subterrânea é responsável pelo transporte dos contaminantes dentro dos aquíferos. A velocidade do fluxo de águas subterrâneas em uma formação porosa uniforme pode ser expressa simplesmente por:

$$v = \frac{K_x}{n_e} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

onde K_x é a condutividade hidráulica da formação na direção de fluxo (x), dh/dx é o gradiente hidráulico e n_e é a porosidade efetiva da formação. Para que tenhamos uma idéia da ordem de grandeza da condutividade hidráulica, a do arenito Botucatu é da ordem de, aproximadamente, 2m/dia.

NATURAL A água subterrânea contaminada pode ser diluída pela mistura com água subterrânea pura até que as concentrações atinjam os níveis naturais. O processo de mistura causa a

distribuição dos contaminantes no tempo e no espaço e, assim, a concentração na pluma de água subterrânea contaminada decresce com o tempo, enquanto que o volume da pluma aumenta (MATTHES et. al., 1985). Um contaminante persistente e não reativo tenderá a migrar com o fluxo de água subterrânea pela assim chamada advecção. A dispersão (que resulta da mistura mecânica e da difusão molecular desde áreas de elevada a baixa concentração) (FREEZE & CHERRY, 1979) conduz a reduções na concentração do contaminante e a expansão longitudinal de uma frente de contaminantes (Figura 4).

Figura 4 - Transporte de contaminantes, dispersão e atenuação em aquíferos homogêneos e não consolidados.

Fonte: FREEZE & CHERRY, (1979) & FOSTER (1981), apud FOSTER & GOMES (1989) ⁶

2.11 Análises químicas

2.11.1 Alcalinidade

A alcalinidade é a capacidade que as águas tem de neutralizar os ácidos. Essa capacidade é devida à presença de bases fortes ou fracas, de sais de ácidos fracos, como bicarbonatos, boratos, silicatos, fosfatos, de sais da ácidos orgânicos, tais como os ácidos

⁶ FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater* - Prentice - Hall, Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey, USA; BARKER, J. A. & FOSTER, S. S. D. (1981) . *A Diffusion Exchange Model for Solute Movement in Fissured Porous Rock*. Q J Eng. Geol. 14:17-24. apud FOSTER & GOMES (1989).

húmicos. Em águas superficiais a alcalinidade pode ser devida à grande quantidade de algas, pois elas removem o dióxido de carbono da água elevando o pH da mesma.

Embora sejam várias as substâncias que conferem alcalinidade à água, as predominantes são os hidróxidos, os carbonatos e os bicarbonatos. Esta é causada, portanto, por sais alcalinos, principalmente de sódio e de cálcio. As diversas espécies de alcalinidade dependem do valor do pH, composição mineral, temperatura e força iônica

A determinação da alcalinidade é medida a partir da quantidade de ácido usado para neutralizá-la.

Somente poderão ocorrer três casos de alcalinidade, a saber: em pH maior do que 9,4 tem-se os hidróxidos e os carbonatos; em pH entre 9,4 e 8,3 tem-se os carbonatos e os bicarbonatos; em pH entre 8,3 e 4,3 tem-se os bicarbonatos.

Valores de alcalinidade na faixa entre 30 a 500 mg/l de CaCO_3 são aceitáveis para consumo humano e de 85 a 150 mg/l para uso industrial (MENEZES, 1994).

2.11.2 Cloretos

Os cloretos são facilmente encontrados atualmente, pois estão presentes nas águas naturais, podendo ser provenientes de esgotos domésticos, industriais, de resíduos de petróleo e depósitos minerais além de uma infinidade de outras fontes.

A presença de cloretos nas águas é indesejável pois pode, dependendo da concentração em que se encontrar e da composição química da água, emprestar sabor salgado a mesma. Desta forma águas que contenham 250 mg/l de cloretos tem sabor salgado, enquanto que outras contendo 1000 mg/l e muito cálcio e magnésio podem não apresentar esse sabor. O nível de tolerância de uma população submetida ao consumo de uma água rica em cloretos, dependerá de seus hábitos, disponibilidade de água potável e do clima. Em regiões áridas e quentes as concentrações de cloretos podem chegar a 900 mg/l sem efeitos adversos.

Com relação aos sistemas de abastecimento, águas com concentrações excessivas de cloretos podem chegar a prejudicar as canalizações provocando uma ação corrosiva. Na agricultura águas com muitos sais (inclusive cloretos) são indesejáveis para a irrigação pois promovem a salinização do solo e o seu conseqüente empobrecimento, resultando em queda na produtividade.

A determinação de cloretos em conjunto com a determinação de diversas formas de nitrogênio, eram antes do desenvolvimento das técnicas bacteriológicas, usadas como indicadores de contaminação.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) tem como limites máximos recomendáveis e permitidos 200 e 600 mg/l respectivamente.

2.11.3 Condutividade

A condutividade representa a capacidade de condução de corrente elétrica de uma solução aquosa. Essa habilidade depende da concentração total de íons, de suas mobilidades, valências, concentrações relativas e ainda temperatura. Soluções de ácidos, bases e sais inorgânicos que não se dissociam em soluções aquosas conduzem muito pouca corrente elétrica.

A medida física em laboratório da condutividade é usualmente a resistência medida em ohms. A resistência de um condutor é inversamente proporcional a sua área de seção transversal e diretamente proporcional ao seu comprimento. As medidas são utilizadas para o estabelecimento do grau de mineralização, visando principalmente a estimativa da concentração total de íons em equilíbrio químico, o efeito fisiológico sobre plantas e animais e a velocidade de corrosão.

2.11.4 DQO

A DQO ou demanda química de oxigênio, é utilizada para a determinação do equivalente em oxigênio da matéria orgânica contida em uma amostra capaz de sofrer oxidação por um forte agente oxidante. A DQO indica a quantidade de oxigênio que é consumida quimicamente por diversos compostos orgânicos, sem a intervenção de microorganismos, fornecendo, em termos de oxigênio consumido a quantidade de matéria oxidável presente na água. Existem muitos poluentes que, sem serem biologicamente tratáveis, causam demanda de oxigênio nas águas, como, por exemplo, os pesticidas e detergentes.

SCHALCH (1984) a partir de análises em laboratório de amostras de lixo urbano,

mostrou que a DQO do chorume produzido era inicialmente 35.250 mg/l e decorridos sete meses esse valor passou a 6.972 mg/l.

2.11.5 Fosfatos

O fósforo ocorre nas águas naturais de diversas formas, em pequenas quantidades, e é proveniente da lixiviação do solo na forma de fosfatos inorgânicos ou de rochas minerais fosfáticas. Outra fonte importante de fosfato nas águas são os despejos de águas residuárias industriais e domésticas.

Os esgotos domésticos são naturalmente ricos em fósforo podendo conter de 4 a 15 mg/l de fósforo total.

Os fosfatos satisfazem as exigências de fósforo para o crescimento de microorganismos. O fósforo é considerado um dos elementos essenciais para o crescimento de protistas e plantas e por isso é conhecido como bioestimulante. É muito importante para o crescimento e reprodução dos microorganismos que promovem a degradação da matéria orgânica presente nos esgotos em geral. O fósforo se encontra nesses esgotos sob a forma de compostos orgânicos, principalmente proteínas e fazendo parte dos compostos minerais principalmente nos polifosfatos e ortofosfatos. Os polifosfatos estão sempre presentes em despejos contendo detergentes sintéticos. Como esses últimos vem sendo cada vez mais utilizados em detrimento dos sabões naturais, a concentração de fósforo nas águas servidas vem crescendo muito (BLUNDI, 1996).

2.11.6 Metais pesados

Metais pesados são elementos metálicos, incluindo os da série de transição, os quais, muitos deles, são necessários para a nutrição animal e vegetal em concentrações de traços, porém que tornam-se tóxicos em concentrações maiores (NIELSEN, 1991).

A sua importância está relacionada ao potencial inibidor ao desenvolvimento dos diversos seres vivos.

Vários metais concentram-se na cadeia alimentar, resultando num grande perigo para os organismos situados nos degraus superiores (GADOTTI, 1997).

O monitoramento dos metais pesados na água contribui para a verificação da influência do percolado do aterro na qualidade das águas subterrâneas e do solo.

Em geral, a respeito da potabilidade das águas subterrâneas, sob o ponto de vista da composição química, as concentração de todos os elementos principais é menor e, as vezes, muito menor do que o máximo permissível ou do que o máximo recomendado, usando-se os padrões estabelecidos pela OMS no International Standards for Drinking Water (Gênova 1963) (DAEE, 1974). Em termos de ferro, o conteúdo máximo recomendado para águas potáveis é de 0,3 mg/l de Fe^{++} (ferroso) ou de Fe^{+++} (férico), as duas espécies de cátions de ferro que ocorrem comumente. Esse limite não é certamente fixado por razões fisiológicas, já que o organismo humano mesmo requer de 5 a 6 mg/dia do mesmo. Teores acima de 0,5 mg/l são incômodos já que podem causar incrustações em tubulações e manchas em roupas e instalações sanitárias. É comum, entretanto, que as concentrações de ferro nas águas subterrâneas cheguem a 1 ou até a 5 mg/l. Em diferentes poços na bacia do Paraná, na região do estudo executado pelo DAEE (op. cit.) (região administrativa 6 - Ribeirão Preto), os teores de ferro foram quase sempre muito menores do que o máximo recomendado, estando ao redor de 0,01 a 0,1 mg/l.

O ferro no estado ferroso é instável na presença do ar e assim, oxida-se tomando-se férico. O íon ferroso pode dissolver-se em quantidade de até 50 mg/l em água neutra e em maior quantidade se esta for levemente ácida. Ao contrário o íon férico é quase completamente insolúvel em água alcalina ou fracamente ácida.

Na análise de percolados de dois aterros experimentais, construídos na região do lixão de São Carlos e com o mesmo lixo a ele destinado, SCHALCH (1992, apud MENEZES, 1994)⁷ encontrou as concentrações de metais pesados que estão listadas na Tabela 5:

---

⁷ SCHALCH, V. (1992). *Análise do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) - EESC, Universidade de São Paulo

Tabela 5 Metais pesados e concentrações máximas e mínimas observadas

Fonte: SCHALCH (1992, apud MENEZES, 1994)

metais	Valor máximo de concentração (mg/l)	Valor mínimo de concentração (mg/l)
Fe	992	5,48
Mn	4,28	0,05
Zn	30,1	0,5
Cr	4,28	0,05
Ni	1,20	0,15
Cu	0,15	0,04

No caso desses aterros um deles sempre apresentou valores inferiores de concentrações de metais em relação ao outro. Para os dois aterros os valores máximos foram observados entre o 3º e o 7º mês de aterramento, ao passo que os valores mínimos entre o 13º e o 15º sugerindo que após o sétimo mês o aterro começou a se estabilizar.

2.11.7 Nitratos

Os nitratos do solo tem muitas origens. Algumas plantas como a alfafa e as leguminosas retiram o nitrogênio do ar para fixá-lo no solo sob a forma de nitrato. O nitrogênio dos detritos vegetais, dos resíduos animais e dos fertilizantes nitrogenados junta-se ao solo. Algumas concentrações de nitratos podem resultar da infiltração direta da águas da superfície rumo a água subterrânea. O estrume contém grande quantidade de nitrogênio orgânico, assim como latrinas e fossas e a presença de nitrato nas águas de poços podem indicar poluição por essas origens. Elevados teores de nitrato servem de advertência para que se analise a água contra bactérias patogênicas.

Acima de 45 mg/l as águas com nitratos podem causar cianose em crianças novas. Apatia, sonolência e pele azulada são os sintomas (CETESB, 1974)

Em DAEE (1974), considerou-se que são normais concentrações de nitratos em torno de 1 mg/l e 5mg/l de nitrogênio (o que equivale de 4,4 a 20 mg/l de nitratos) para os diversos aquíferos da região.

2.11.8 Nitrogênio total

O nitrogênio aparece nos resíduos orgânicos combinado em quatro tipos de compostos: amoniacais, orgânicos, sais nítricos e sais nitrosos. A determinação do nitrogênio total é feita a partir dos teores do elemento N nesses quatro compostos resultando em:

$$N \text{ total} = N \text{ orgânico} + N \text{ amoniacal} + N \text{ nitritos} + N \text{ nitratos}$$

O nitrogênio é essencial para a proliferação e desenvolvimento do meio biológico responsável pela degradação de matéria orgânica presente em despejos.

O carbonato de amônia resulta da hidrólise de uréia; o amoníaco (NH_3) resulta da oxidação biológica da matéria nitrogenada presente que por sua vez se hidrolisa formando hidróxido de amônia ($\text{NH}_4 \text{ OH}$).

O nitrogênio orgânico é encontrado nas moléculas de proteínas ou dos aminoácidos que ainda não foram assimilados. Ainda estão presentes nas águas o N_2 que se dissolve no líquido pela interface com a atmosfera.

Nitrificação é o processo de oxidação da amônia a nitrato, realizada por bactérias aeróbias. As reações de redução de nitrogênio na forma de nitrato para nitrogênio livre liberado para a atmosfera, são realizadas pela ação de bactérias redutoras denitrificantes (denitrificação). O nitrogênio amoniacal é, portanto, o primeiro produto da decomposição, os nitritos (NO_2^-) representam a oxidação parcial da amônia e os nitratos (NO_3^-) a estabilização (BLUNDI, 1996).

2.11.9 Oxigênio dissolvido

O teor de oxigênio dissolvido da água subterrânea de profundidades apreciáveis é bastante baixo. Presume-se que a maior parte do ar dissolvido na água que se infiltra no solo é

consumida na oxidação da matéria orgânica durante a descida através da zona de aeração. Contudo um pouco de oxigênio dissolvido pode ser encontrado a 30 ou mais metros de profundidade. A solubilidade na água a 0°C e sob 1 ATM é cerca de 29 mg/l, dos quais cerca de 10 mg/l cabem ao oxigênio. A solubilidade decresce com a elevação da temperatura, tornando-se nula quando a água entra em ebulição. O oxigênio dissolvido na água corrói o ferro comum. Se o pH for baixo a corrosão é mais intensa, porém, se a condutividade da água for alta, mesmo com o pH alto a corrosão será intensa, podendo atacar não só o ferro como galvanizados e latões.

Sua presença é fundamental para os organismos aeróbios e, então, os processos que os envolvem, como a estabilização da matéria orgânica. Valores bem inferiores a saturação (que é em torno de 9,2 mg/l a 20°C), são indicativos da presença de matéria orgânica.

2.11.10 pH

A acidez ou a alcalinidade de uma solução podem ser especificadas apenas pela concentração de H^+ ou de OH^- . Uma solução 1N de um ácido forte conterá 1M de H^+ , uma solução neutra conterá $10^{-7} M$ de H^+ , e uma solução 1N de uma base forte conterá 10^{-14} de H^+ . Desta forma, toda a gama, desde ácidos fortes até bases fortes, pode ser expressa em termos de (H^+), como uma série de potências de 10. Podemos simplificar ainda mais essa representação descartando os 10 e usando somente o expoente, variando o sinal deste de negativo para positivo. Os números assim obtidos são chamados valores de pH. Uma solução 1N de um ácido forte tem um pH=0, uma solução neutra pH=7 e uma solução 1N de uma base forte pH=14.

Na natureza, a maioria dos pH situa-se entre os 4 e 9. Correntes de água nas regiões úmidas apresentam valores geralmente entre 5 e 6,5. Nas regiões áridas entre 7 e 8. A água do solo pode apresentar um pH de 4 ou até ligeiramente inferior. A água do oceano, entre 8,1 e 8,3 (KRAUSKOPF, 1972). O aquífero Botucatu possui pH entre 4,3 e 8 (CETESB, 1977, apud GADOTTI, 1997)⁸.

---

⁸CETESB (1977) - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo: Estudo preliminar*. São Paulo - SP.

A acidez ou a causticidade podem ser originadas por fatores naturais do terreno ou pela poluição. É uma simples medida que pode ser indicativa das mudanças da qualidade das águas no ambiente. Os resíduos podem ser alcalinos ou ácidos de tal forma que possam afetar a água subterrânea alcalinizando-a ou acidificando-a respectivamente. Por outro lado uma solução proveniente do chorume de um lixão, pode influenciar as águas naturais até a condição de neutralidade. Entretanto, se os contaminantes são somente de origem orgânica, sem possuírem grupos funcionais básicos ou ácidos, o pH não será diagnóstico de sua presença (VITALE et. al., 1991). O pH afeta a capacidade de complexação de metais em água e pode determinar quanto de um metal está precipitado ou dissolvido (GADOTTI, 1997).

SCHALCH (1984) verificou em laboratório, com amostras de lixo urbano, que o pH do chorume produzido inicialmente era de valor 6,43 e decorridos sete meses esse valor passou a 9,29.

2.11.11 Potencial de oxidação/redução ou potencial redox.

A geoquímica da água subterrânea é fortemente influenciada pelo potencial de oxidação/redução (redox). A química dos contaminantes também pode ser influenciada por ele ou pode, por sua vez, influenciá-lo.

O potencial redox pode ser medido diretamente com um eletrodo de platina em milivolts.

Ele é útil no tratamento de problemas que às características gerais de oxidação e de redução de um ambiente geológico. É sabido, por exemplo, que o enxofre dissolvido se acha sob a forma de SO_4^- nas águas de mar aberto e na forma de H_2S nas águas estagnadas de fundos de bacia. Os potenciais redox, também conhecidos pelo símbolo Eh, permitem fazer um refinamento ao ponto de se poder estimar semi-quantitativamente que concentrações dos diversos íons e compostos, podem existir nos diversos ambientes (KRAUSKOPF, 1972).

2.12 Método da Eletorresistividade

Com o método da eletorresistividade é possível medir as resistividades aparentes dos diversos estratos geológicos em subsuperfície, e assim, permitir a determinação das litologias e suas espessuras, além de, muitas vezes, o nível d'água e presença de contaminantes.

Esse método geofísico emprega uma corrente artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim determinar a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica, e pode ser definido como a resistência dos materiais em conduzir a corrente elétrica. Depende da natureza e estado físico do material e pode ser expressa na forma da resistência de um cilindro condutor e homogêneo cuja área e comprimento apresentam unitárias (Figura 5) de acordo com a relação:

$$\rho = R.S/L \quad (2) \quad \text{onde:}$$

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

R = resistência elétrica (ohm)

S = área da seção transversal do cilindro (m^2)

L = comprimento do cilindro (m)

Sendo o cilindro atravessado por uma corrente elétrica (I), será submetido a uma diferença de potencial (ΔV) e sua resistência será:

$$R = \Delta V/I \quad (3)$$

Figura 5 - Parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica

Fonte: ELIS (1998)

Dessa forma, ao se aplicar numa superfície plana de um semi-espço homogêneo e isotrópico, um dispositivo arbitrário de quatro eletrodos, sendo dois para aplicar a corrente (A e B) e dois para medir a diferença de potencial (M e N), a resistividade é assumida como constante e pode ser calculada através da expressão:

$$\rho = K \cdot \Delta V / I \quad (4) \quad \text{onde:}$$

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B

O fator K depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado através da fórmula geral:

$$K = 2\pi / [(1/AM) - (1/AN) - (1/BM) + (1/BN)] \quad (5)$$

A resistividade elétrica (e seu inverso, a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais, sendo que condutividade em solos e rochas pode ser devida a presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, o que é denominado de condutividade eletrônica, ou devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, o que é denominado de condutividade eletrolítica.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global.

A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

- composição mineralógica;
- porosidade;
- teor em água;
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Devido a essa série de fatores, o parâmetro resistividade varia entre largos limites, mesmo para um único tipo de rocha, como pode ser observado na Figura 6.

A determinação da resistividade nas rochas pode ser feita em laboratório, em ensaios em amostras de rocha ou de testemunhos de sondagem, e “in situ”, ao longo de furos de sondagem ou através de técnicas de medidas realizadas na superfície. Nesse último caso, deve-se atentar para o fato de que para uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade, a resistividade determinada pelo quadripolo AMNB na superfície será aparente, a medida que os eletrodos de corrente, através de um maior espaçamento, amostram mais de uma camada em subsuperfície. O valor encontrado será então influenciado pelas resistividades de todas as camadas investigadas. A resistividade aparente é considerada como sendo uma média ponderada das resistividades reais dos estratos separadamente, dentro da profundidade de penetração da resistência medida (CETESB, 1974).

Material	Resistividade (ohm.m)
ar	∞
águas doces superficiais	$10 - 10^3$
águas marinhas	0,2
argilas	$10 - 10^2$
areias	$10^2 - 10^4$
areia saturada com água mineral	$10^{-1} - 10$
aluvião	$10 - 10^3$
conglomerados	$10 - 10^4$
arenitos	$10 - 10^8$
margas arenosas	$10 - 10^2$
calcários	$10^2 - 10^4$
basaltos	$10^2 - 10^5$
granitos	$10^2 - 10^5$
xistos	$10 - 10^3$
gnais	$10^2 - 10^4$

Figura 6 Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (Orellana, 1972, apud ELIS 1998)⁹

⁹ ORELLANA, E. - 1972 - *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.

Como o subsolo não se comporta como um meio homogêneo, a resistividade aparente (ρ_a) é a que expressa os resultados das medidas no método da eletrorresistividade, e é a que se toma como base para a interpretação. As variações nas medidas de resistividade aparente são interpretadas, então, como desvios em relação a um meio totalmente uniforme, em função da estratificação geoeétrica do meio investigado.

2.12.1 Técnicas de Ensaio e equipamentos utilizados

Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aplicação dos ensaios. São divididas basicamente em técnicas de sondagem elétrica e caminhamento elétrico, dentro das quais existe uma grande variedade de configurações eletródicas possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade. Nesse texto serão descritas apenas as técnicas de ensaio mais comuns e as utilizadas neste trabalho.

Os equipamentos utilizados consistem basicamente de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores para a corrente e a voltagem geradas. No presente trabalho foi utilizado um sistema resistivímetro norte americano marca Bison, modelo 2390 Signal Enhancement Earth Resistivity System (Figura 7).

Sondagem Elétrica Vertical

A técnica de sondagem elétrica vertical caracteriza-se por uma série de determinações de resistividade aparente, efetuadas com o mesmo tipo de dispositivo eletródico (são possíveis vários dispositivos, como será descrito a seguir) e separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção. Esse procedimento permite a observação dos valores de resistividade aparente, em um ponto fixo, a profundidades cada vez maiores, através da separação crescente entre os eletrodos A e B de corrente.

Os valores de resistividade aparente obtidos nas SEV são representados, em relação as distâncias entre os eletrodos de corrente, através de uma curva construída sobre uma base bilogarítmica. Esse gráfico é normalmente denominado de curva de sondagem elétrica vertical e é o que se toma como base para interpretação quantitativa do ensaio.

Figura 7 – Equipamento utilizado para os ensaios de resistividade composto de unidade de emissão (a esquerda) e unidade de recepção (a direita).

Tipos de Curvas de SEV

Para caracterizar um meio estratificado são usados os valores de resistividade (ρ_i) e espessura (e_i) obtidos para cada estrato individualizado, enumerando-os de cima para baixo, ou seja, começando pelo mais superficial. Cada estrato determinado é denominado de estrato geoeletrico e o conjunto de estratos, de perfil geoeletrico. Um perfil geoeletrico de n camadas é representado por um conjunto de n valores de resistividade e $n-1$ valores de espessura, pois a espessura do último estrato não pode ser determinada já que o fluxo de corrente não o atravessa.

Os perfis geoeletricos são classificados em função do número de camadas e das relações de desigualdade entre essas camadas. As curvas de duas camadas são apenas de dois tipos: $\rho_1 > \rho_2$ e $\rho_1 < \rho_2$. A classificação das curvas de três camadas é extremamente útil e serve de base para a interpretação através de ábacos, como será referido mais adiante. Existem

quatro tipos de curvas de três camadas, designadas pelas letras H, K, Q e A. Os quatro perfis geoeletricos possíveis são:

1. Tipo H: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
2. Tipo K: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
3. Tipo Q: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
4. Tipo A: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

A Figura 8 mostra as curvas para cada tipo de perfil geoeletrico.

Os perfis de mais de três estratos são compostos por combinações de curvas de três camadas. Por exemplo um perfil com $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ é denominado de HK, pois é constituído por uma curva tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) e uma curva tipo K ($\rho_2 < \rho_3 > \rho_4$).

Dispositivos Eletrodicos

Arranjo Schlumberger

O arranjo de campo Schlumberger é o mais utilizado em SEV, devido a qualidade das curvas de campo, facilidade e rapidez na execução do ensaio e menor susceptibilidade as variações laterais de resistividade e ruídos, como correntes naturais no subsolo.

O arranjo compreende uma configuração onde utiliza-se quatro eletrodos, sendo 2 para aplicar a corrente (A e B) e 2 para a leitura de diferença de potencial (M e N), todos dispostos no terreno de acordo com um mesmo alinhamento. A principal característica desse arranjo é que a distância MN deve ser bastante pequena em relação a AB, procurando sempre satisfazer a relação $MN \leq AB/5$ (Figura 9). Na prática, quando o sinal ΔV medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realiza-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB e assim por diante, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial e mantendo a relação $MN \leq AB/5$. Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo. A resistividade aparente pode ser calculada através da fórmula:

$$\rho = K \cdot \Delta V / I \quad \text{já descrita, onde:}$$

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B

Figura 8– Tipos de curvas de SEV

(ρ = resistividade aparente e E = espaçamento entre eletrodos).

Fonte: ELIS (op.cit.)

O fator geométrico para a técnica de SEV pode ser calculado através da fórmula simplificada:

$$K = \pi/2 \cdot [(AB/2)^2 - (MN/2)^2] / (MN/2)$$

Figura 9 – Esquema de arranjo Schlumberger

Fonte: ELIS (op.cit.)

O ponto de atribuição do ensaio é sempre localizado no centro geométrico do arranjo. A profundidade teórica de investigação (h) pode ser relacionada a distância AB , e normalmente é considerada como:

$$h \cong AB/5 = 0,2 AB$$

Arranjo Wenner

Assim como o arranjo Schlumberger, utiliza os eletrodos AB de emissão de corrente e MN de medida de potencial, dispostos no terreno segundo uma mesma linha reta. A diferença está na distância entre os eletrodos, que é igual entre todos (distância “ a ”) para todas as medidas do ensaio (Figura 10). Na prática, a cada nova leitura todos os eletrodos são afastados do centro do arranjo, mantendo entre eles a mesma distância “ a ”.

Figura 10 - Arranjo Wenner.

Fonte: ELIS (1998)

A resistividade aparente para esse arranjo pode ser calculada através de:

$$\rho = 2a \cdot \Delta V / I \quad \text{onde:}$$

ρ = resistividade aparente (ohm.m)

a = distância entre os eletrodos (m)

ΔV = diferença de potencial entre M e N (mV)

I = intensidade de corrente (mA)

O ponto de atribuição da sondagem é o centro do arranjo, e a profundidade de investigação é aproximadamente a metade da distância “a”, ou seja

$$h \cong a / 2$$

Levando-se em consideração que a distância AB é igual a 3a, podemos escrever a relação em função de AB

$$2h \cong AB/3, \text{ ou}$$

$$h \cong AB/6 = 0,16 AB$$

Uma desvantagem do arranjo Wenner em relação ao Schlumberger é que, como no arranjo Wenner todos os eletrodos são movimentados simultaneamente, não é possível a realização de embreagem. Isto torna a SEV arranjo Wenner suscetível ao efeito de heterogeneidades laterais em camadas superficiais, o que pode ser evitado com a embreagem, como é mostrado na Figura 11.

Interpretação de SEV

Os valores de resistividade aparente obtidos são plotados em relação aos valores da distância AB/2, fornecendo a curva de resistividade aparente, a qual é passível de interpretação quantitativa.

Figura 11 Exemplo de efeito superficial em curva de SEV

Fonte: Adaptado de Orellana (op. cit.).

A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição espacial dos estratos com diferentes resistividades no subsolo, partindo dos dados de resistividade aparente medidos na superfície. A seguir é feita a interpretação do significado geológico dos estratos com diferentes resistividades.

A interpretação da curva de SEV baseia-se em leis físico-matemáticas, o que a torna um processo trabalhoso e de difícil execução. Inicialmente, as curvas obtidas em campo são interpretadas pelo método da superposição e ponto auxiliar de Ebert (IPT, 1988), através de modelos matemáticos convencionais - ábacos ou curvas padrão - disponíveis, para obter-se um modelo inicial. Posteriormente, o refinamento do modelo encontrado é feito através de softwares específicos, a partir do método das aproximações sucessivas ou de inversão usando regressão em cadeia. Neste trabalho, foi utilizado um programa russo. Ele é de uso público e pode ser obtido na Internet no endereço <http://www.geol.msu.ru/deps/geophys/>. Seu nome é IPI. O programa, a partir do modelo inicial, realiza a inversão dos dados da curva de campo, buscando o melhor ajuste para o modelo. É importante ressaltar que esse modelo deve ser baseado na geologia local, sendo o ajuste controlado pelo intérprete. A Figura 12 mostra uma curva de SEV e o modelo geoeletrico interpretado.

Técnica de Caminhamento Elétrico

A técnica de caminhamento elétrico consiste em obter a variação lateral de resistividade a profundidades aproximadamente constantes. Isso é obtido fixando-se um espaçamento de eletrodos e caminhando-se com os mesmos ao longo de perfis efetuando as medidas de resistividade aparente. O procedimento de campo consiste em manter constante o arranjo entre os eletrodos e medir o diferença de potencial (ΔV) gerada pela passagem da corrente (I) no terreno. A resistividade aparente é calculada por $\rho_a = K \cdot \Delta V / I$.

O caminhamento elétrico é aplicado em casos onde é importante a observação de variações laterais de resistividade, como por exemplo na detecção de contatos geológicos laterais ou inclinados, mudanças laterais de fácies ou estruturas, como falhas e fraturas, além da avaliação de contaminação de aquíferos a partir de fontes poluidoras, prospecção de aquíferos em meio fissurado, prospecção de areia e cascalho, e aplicações na prospecção de sulfetos.

Figura 12 Curva de campo e modelo geoeletrico interpretado.

Dispositivos Eletródicos

Assim como na técnica de SEV, existem vários arranjos de eletrodos que podem ser aplicados. Os arranjos Schlumberger e Wenner, já descritos, são exemplos de dispositivos aplicados. São também utilizados os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, descritos a seguir.

Arranjo Dipolo-Dipolo

Com o dispositivo eletródico dipolo-dipolo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos $X=AB=MN$. A profundidade de investigação cresce com o espaçamento (E), e

teoricamente corresponde a $E/2$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas a intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° (Figura 13). A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X , os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma seção de resistividade aparente, como ilustrado na Figura 14. O fator geométrico K para o arranjo dipolo-dipolo pode ser calculado pela fórmula:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot X, \text{ onde}$$

$$G = 1 / [(1/n) - (2/n+1) + (1/n+2)]$$

Arranjo Polo-Dipolo

Esse dispositivo é constituído por três eletrodos móveis B, M e N, sendo o eletrodo A mantido fixo e situado a uma distância do restante do arranjo de forma que sua influência nas medidas de resistividade aparente torna-se desprezível. É convencional mencionar que o eletrodo está no “infinito”.

O espaçamento (E), que é definido pela distância entre o eletrodo B e o centro do dipolo MN, determina a profundidade de investigação, que é assumida como $E/2$ (Figura 15). A abertura entre os eletrodos M e N é denominada de X .

O fator geométrico K pode ser calculado pela fórmula simplificada:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot X \quad \text{onde}$$

$$G = 1 / [(1/n) - (1/n+1)]$$

Figura 13 Arranjo dipolo-dipolo.

Fonte: ELIS (op.cit.)

Figura 14 Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente.

Figura 15 Arranjo polo-dipolo.

Fonte: ELIS (op. cit.)

Interpretação de Dados de Caminhamento Elétrico

Os ensaios realizados através da técnica de CE permitem a construção de perfis ou seções, onde podem ser observadas as variações de resistividade aparente para uma ou mais profundidades.

Esses produtos descritos acima permitem uma interpretação qualitativa das variações laterais de resistividade, que podem estar relacionadas a contatos geológicos, níveis de alteração mais profundos, zonas de intenso fraturamento ou pluma de contaminação de aquíferos. Apesar de na maioria das vezes a interpretação ser apenas qualitativa, tem-se notado, a partir da análise de trabalhos já realizados, que a técnica mostra-se viável na solução de inúmeros problemas, como prospecção de água em meios fissurados e prospecção de materiais de construção, por exemplo.

2.13 Perfilagem geofísica de poços

Pela perfilagem geofísica de poços, as propriedades físicas das rochas, das águas subterrâneas e dos resíduos sólidos são determinadas. Os levantamentos somente são válidos para as vizinhanças próximas aos poços. Todos os poços devem ser investigados desde que isso é o que permite a interpretação acurada dos dados geofísicos de campo e ajuda no reconhecimento da contaminação a partir da superfície.

As ferramentas de perfilagem geofísica existem em grande número e não é necessário utilizar-se de todas em um único poço. Deve-se escolher a melhor combinação entre elas para que possam fornecer informações a respeito dos objetos específicos a que se queira estudar, como, por exemplo, problemas ambientais particulares.

O registro dos dados são gravados continuamente enquanto a ferramenta corre o perfil a uma velocidade constante. Essa velocidade é limitada pela necessidade de resolução e pelo tempo necessário para que seja efetuada uma medida.

Os resultados gráficos do comportamento das curvas geradas pela perfilagem geofísica de poços, para as ferramentas de indução (que medem a resistividade) e de raios gama, que captam a radiação gama natural (ferramentas que foram utilizadas neste trabalho), de alguns meios geológicos de interesse são apresentados na Figura 16.

A seguir, serão descritas algumas ferramentas de perfilagem geofísica de poços e suas aplicações.

2.13.1 Ferramentas de perfilagem geofísica de poços

Gama natural (GR - de Gamma Ray)

A sonda de raio gama mede a radiação natural, que é originada a partir do decaimento radioativo do isótopo potássio ^{40}K e dos isótopos das séries de decaimento do urânio e do tório (REPSOLD, 1989), (VOGELSANG, 1995). Essa ferramenta permite a diferenciação entre camadas de argilas e areias; mesmo o conteúdo de argila dos sedimentos argilosos pode ser estimado, sendo, então, auxiliar na determinação do volume de argila em rochas reservatório, já que esses isótopos são componentes essenciais dos argilominerais e estão usualmente presentes em proporções fixas.

Figura 16 Comportamento das curvas geradas pela perfilagem geofísica de poços - Gama e Indução

Fonte: Adaptado de REPSOLD (1989)

Nos sedimentos, geralmente as argilas e os folhelhos apresentam altas contagens raio gama. Os xistos e, principalmente, os filitos, entre as metamórficas, também as apresentam.

Anomalias raios gama podem ser provocadas por potassa, rochas vulcânicas, granitos, águas com sais radioativos dissolvidos ou, ocasionalmente, argilas derivadas de granitos com altas proporções de urânio.

Dentre suas características, as que seguem são de muita utilidade no levantamento geológico:

- Sua acuidade possibilita uma alta resolução do acamamento;
- Possibilitam uma boa correlação de poço para poço; os acamamentos são facilmente identificáveis;
- É uma das poucas ferramentas que funcionam através do revestimento dos poços, servindo, então, para correlacionar poços já revestidos e outros ainda sem revestimento (COLUMBIA, 1999).

As sondas possuem cintilômetros (que contam as cintilações produzidas pela radiação em cristais, usualmente de NaI) e podem ser utilizadas, inclusive, em poços secos ou revestidos. A velocidade da ferramenta, ao ser corrida no poço, não pode exceder os 5m/min. Camadas tão finas quanto 0,3m podem ser detectadas.

A contagem medida com a ferramenta raios gama é dependente dos seguintes fatores:

- a radioatividade das rochas das formações adjacentes;
- o tamanho do cristal do cintilômetro;
- o diâmetro do poço;
- o tipo de fluido (de perfuração, ou água);
- o tipo e a espessura do revestimento do poço
- a posição da ferramenta no poço (centrada ou não);

Uma conclusão quantitativa e reproduzível da radioatividade da rocha a partir da contagem do cintilômetro não é, portanto, imediata. Para isso uma correção do poço e uma checagem da ferramenta de raios gama com uma fonte calibradora são executadas. Somente a partir desse momento a contagem de raios gama pode ser compreendida universalmente. Anteriormente a padronização existiam nos Estados Unidos nove companhias diferentes que utilizavam sete unidades diferentes de medida (REPSOLD, op. cit.).

A unidade usual de contagem da ferramenta de raios gama é cps (contagens por segundo) para medidas feitas com sondas não calibradas e unidades API*¹⁰ (estritamente, API Gamma Ray Units) para medidas feitas com sondas calibradas.

A calibração foi entendida como útil para que, feita a perfilagem raios gama, pudéssemos diretamente comparar os diversos perfis executados e, a partir deles, obtermos a quantidade de argila das formações. Para tanto um poço de calibração foi construído em Houston, Texas, com lama e diâmetro normalmente usados pela indústria do petróleo (perfuração em 8 polegadas e fluido de perfuração de bentonita). Foram analisados mais de 200 tipos de argilitos e rochas metassedimentares. Descobriu-se que a radiação origina-se quase que exclusivamente do decaimento radioativo do urânio e do tório e do radioisótopo potássio 40. Uma argila média continental possui algo em torno de 6 ppm de urânio, 12 ppm de tório e 2% de potássio 40. Enquanto o urânio tem uma atividade raio gama de

$A_u = 2.8 \cdot 10^4$ fótons/s, gU e o tório uma de

$A_{th} = 1.0 \cdot 10^4$ fótons/s, gTh, o potássio 40 tem apenas

$A_p = 3.4$ fótons/s, gP.

Uma mistura de concreto com substâncias radioativas contendo o dobro daquela quantidade observada na argila média continental, ou seja, com 12 ppm de urânio, 24 ppm de tório e 4% de potássio 40, foi utilizada para a completação do poço de teste, alternando-se essa camada de concreto com a da argila média continental. A atividade gama observada nesse acamamento de teste foi dividida em 200 unidades API. O concreto com as características descritas registra, então, 200 API enquanto que a atividade gama da argila média continental foi definida como 100 unidades API.

A calibração em unidades API para as medidas de raios gama em sedimentos argilo-arenosos, que são os mesmos que compõe o entorno do lixão e são o objeto de estudo neste trabalho é a seguinte: com a sonda em um poço de cinco polegadas, com fluido aquoso, os sedimentos arenosos registram uma contagem em torno de 10 a 20 API, e argilas compactas em torno de 140 a 160 API.

---

¹⁰ * API - American Petroleum Institute, Houston/Texas, que funciona como instituição de padronização nos Estados Unidos para o setor de petróleo.

Indução (IEL de Induction Electrical Log ou IES de Induction Electrical Survey)

A resistividade da rocha pode ser medida a partir da mensuração da condutividade da mesma. Esta último é o valor recíproco do da resistividade; sua unidade de medida é mho por metro (o que significa $1/\text{ohm.m}$), entretanto as escalas são calibradas em mmo/m (mili-mho/m).

As medidas são tomadas quando ondas eletromagnéticas, na maior parte das vezes com frequências da ordem de 20 kHz, são transmitidas para as rochas adjacentes por uma bobina transmissora na sonda. De acordo com a condutividade da rocha, correntes maiores ou menores (sua grandeza é diretamente proporcional a condutividade da rocha) são nela, então, geradas. Essas, por sua vez, produzem campos magnéticos os quais induzem voltagens em uma bobina detectora que é situada na sonda a certa distância (muitas em torno de 1m) da bobina transmissora. A condutividade é registrada a partir das amplitudes e determinação das fases dessas voltagens induzidas (REPSOLD, op. cit.).

A principal aplicação da ferramenta de indução é a determinação da resistividade verdadeira da rocha, naqueles casos onde a resistividade desta é menor do que a da lama ou do fluido que preenche o poço. Essas condições podem mesmo ocorrer em rochas com resistividades moderadas quando lamas fracamente condutivas são utilizadas (como água superficial).

Uma grande vantagem da ferramenta de indução sobre as demais que se prestam a medir a resistividade das rochas, é a de que esta não necessita que exista um meio condutivo entre a sonda e a rocha. Assim as medidas podem ser mesmo efetuadas quando não há água no poço (poço seco) e mesmo podem ser efetuados registros onde os poços possuam revestimento, desde que estes sejam de plástico (pvc), o que não é possível se o mesmo for metálico.

Temperatura (TEMP)

A temperatura dos fluidos dos poços é continuamente monitorada por um termômetro de resistência elétrica em relação a profundidade. A acuidade das medidas atinge 0,01 graus Celsius. Devido a variação sazonal das temperaturas, o aumento natural de temperaturas (que aumenta com a profundidade, devido ao calor natural do centro do planeta) só pode ser observado a partir de 20m de profundidade. O gradiente geotérmico é, em média, de

3°C/100m. Variações em relação a esse padrão podem indicar movimentação da água subterrânea. Isso pode ser muito pronunciado quando de influxos de água e, assim, os registros de temperatura podem exibir picos. Especialmente em depósitos de resíduos sólidos, as anomalias nos poços podem indicar reações exotérmicas químicas ou biológicas entre os materiais depositados que ocorrem nas proximidades do poço.

Como qualquer movimentação artificial da água pode misturar águas de diferentes temperaturas, o seu registro deve ser feito no sentido descendente (ao ir descendo a ferramenta em sentido ao fundo do poço), e deve ser a primeira ferramenta a ser utilizada, no caso do emprego de diversas em uma mesma etapa de investigação.

A temperatura que é representativa do que ocorre na rocha adjacente, pode usualmente ser medida somente onde haja fluido, pois na região superior ao nível d'água uma considerável circulação de ar pode ocorrer, fazendo com que os registros sejam mascarados.

2.14 Geologia Regional

Generalidades

A região de São Carlos, situa-se na borda oriental da Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica que ocupa, no Brasil, uma área de cerca de um milhão de Km², estendendo-se ainda pelo Paraguai, Uruguai e Argentina. Abrange parte dos estados de Goiás, Minas Gerais e grandes áreas do estado de Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O eixo da bacia é o rio Paraná, que a divide quase simetricamente.

A espessura total dos sedimentos no centro da bacia não é ainda bem conhecida, sendo estimada em cinco mil metros. Na parte do Brasil os primeiros registros sedimentares datam do Devoniano (grupo Paraná), assentado em discordância com o embasamento cristalino, seguindo-se os grupos Tubarão, Passa Dois, São Bento e Bauru.

A última transgressão marinha deu-se no Devoniano, marcando o Grupo Paraná como único com sedimentos marinhos, sendo todos os demais de ambiente continental. A bacia foi afetada por tectonismo, principalmente do tipo falhamento em bloco, por intensa atividade vulcânica e manifestações de soerguimento e subsidência. Particularmente nessa borda oriental, efeitos de soerguimento e erosão determinaram um registro sedimentar incompleto na área.

2.14.1 Estratigrafia e Litologias

Na descrição que se segue abordaremos as rochas do mesozóico em diante, pois que são as de interesse para a área em estudo.

Grupo São Bento

O grupo São Bento de idade Triássico-Cretáceo é dividido em três formações aqui apresentadas da mais antiga para a mais nova ou da de maior profundidade para a de menor: Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

Formação Pirambóia

Os arenitos Pirambóia datam do Triássico-Jurássico, tendo sido depositados em ambiente fluvial. São arenitos de granulação variável, predominantemente de muito finos a médios, muito a pouco argilosos, consistentes, com variação de litologia na vertical, intercalando finas camadas de lamitos argilosos, exibindo estratificação cruzada planar e acanalada e plano-paralela. Possui na região espessura entre 100 e 150m.

O seu membro inferior é mais argiloso com predominância de estratificação plano-paralela e estratificação cruzada acanalada de pequeno porte. O membro superior é caracterizado pela disposição de bancos de arenito pouco argiloso, sucedidos por bancos de arenitos muito argilosos, lamitos e argilitos arenosos, numa clara repetição cíclica, cujos ciclos são denominados respectivamente de fácies canal e fácies de transbordamento.

De forma geral pode-se dizer que o teor de argila dentro da formação aumenta de cima para baixo, sendo o membro inferior mais argiloso do que o superior (DAEE, 1974)

Formação Botucatu

Esta formação está imediatamente sotoposta a Formação Pirambóia. Ela é constituída por um pacote de arenitos de granulação fina a média predominantemente, com estratificação

cruzada de grande a médio porte, muito friáveis ou silicificados apresentando, na parte basal, corpos de arenitos conglomeráticos. O pacote sedimentar foi depositado pelo vento em extenso deserto com campos de dunas. Este ambiente se manteve até as manifestações vulcânicas (da Formação Serra Geral). Após os primeiros derrames as areias continuaram a ser movimentadas, recobrindo-os com finos e às vezes extensos lençóis, formando os arenitos interderrames. Logo após as primeiras manifestações vulcânicas, e sobre a superfície dos derrames, localmente formaram-se lagos onde se depositaram siltes e argilas, constituindo uma fácies lacustre. A idade da formação vai de Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior.

Distingue-se três fácies na Formação Botucatu: 1) torrencial, na base, apresentando-se como corpos lenticulares, descontínuos, de arenitos conglomeráticos com espessura inferior a 10m e extensão limitada a poucos quilômetros; 2) eólica, mais comum, que possui notável homogeneidade de suas propriedades texturais e mineralógicas e 3) lacustre, localizada, com pequena extensão e espessura.

Uma das características marcantes do arenito Botucatu na região é a formação de escarpas verticais a subverticais, sustentadas por arenitos intensamente silicificados que originam desníveis topográficos superiores a 200m (NISHYAMA, 1991). Segundo PARAGUASSU (1972, apud NISHYAMA op. cit.)¹¹, a silicificação dos arenitos Botucatu é um processo recente, resultando da precipitação da sílica a partir da água subterrânea.

A espessura da Formação Botucatu, na área de estudo é em torno de 100m (DAEE, 1974).

Formação Serra Geral

Incluem-se na Formação Serra Geral os derrames basálticos e os arenito eólicos interderrames.

A formação constitui-se de sucessivos derrames de basalto toleítico (assim como sills e diques de diabásio intrudidos nas diversas formações), cuja espessura aumenta a partir da borda de ocorrência para oeste. Assim, em Araraquara, a espessura de cada derrame está em torno de 30 metros e, em Novo Horizonte, 60 metros. A espessura total do conjunto de derrames aumenta de leste e sudeste para oeste: Em Araraquara está por volta de 150 metros.

---

¹¹ PARAGUASSU, A. B. (1972). *Experimental Silicification of Sandstone*. Geological Society of America Bulletin, v.83, p. 2853-2858

Grupo Bauru

O grupo Bauru, na área de estudo, está representado pela Formação Marília, mais particularmente pela litofácies Itaqueri (SOARES et. al., 1980).

Formação Marília - litofácies Itaqueri.

A Formação Marília é uma unidade composta por arenitos grosseiros a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspatos, minerais pesados e minerais instáveis; ocorrem em bancos com espessura média entre 1 e 2m, maciços ou com acamamento incipiente subparalelo e descontínuo, raramente apresentando estratificação cruzada de médio porte, com seixos concentrados nos estratos cruzados; raras camadas descontínuas de lamitos vermelhos e calcários são encontradas. Os arenitos de Itaqueri (Serra de Itaqueri), São Carlos (planalto de São Carlos), planalto de Franca e Matão, constituídos de arenitos de granulação fina a grosseira e conglomerática, mal selecionados, com grãos angulosos, maciços, com cimento silicoso possivelmente substituindo o cimento carbonático são uma fácies pouco calcífera, as vezes com um cimento silicoso, que passa lateralmente, no sentido Oeste, para a fácies de arenitos calco-conglomeráticos da Formação Marília. Estes sedimentos são referidos como litofácies Itaqueri.

O contato sobre a Formação Serra Geral é freqüente em Itaqueri, São Carlos e Franca. O contato é por discordância erosiva, com mais de um metro de conglomerado com abundantes seixos de basalto, quartzito, arenito e ágata, acima do qual ocorrem arenitos grosseiros e conglomeráticos da fácies Itaqueri. Localmente, sobre estruturas dômicas pré-Bauru, o contato é uma discordância angular, podendo assentar-se sobre o Botucatu, Pirambóia ou mesmo sills de diabásio.

Sua idade é atribuída ao Cretáceo Superior, tendo sido depositado em ambiente flúvio lacustre sobre as rochas da Formação Serra Geral.

2.15 Geologia local

A Formação Pirambóia aflora em pequenas regiões, mostrando arenitos de coloração amarelada, com predominância de finos. Encontra-se muitas vezes encoberta e seu grau de

intemperismo é semelhante ao da Formação Botucatu (ZUQUETTE, 1981 apud FREITAS, 1996)¹².

A Formação Botucatu aparece na área representada por arenitos de granulometria fina a média, variando de coloração amarelo claro até avermelhado. Esta pode se apresentar de duas maneiras principais: 1) como rocha sã, nas encostas, com inclinação superior a 20%, na forma de corpos compactos cobertos por seu solo residual de espessura geralmente inferior a 1 metro e, 2) totalmente recoberta por sedimentos cenozóicos e somente passível de observação em alguns cortes de estrada. Em São Carlos essa formação possuiria até 150m de espessura, como pode ser constatado através de poços tubulares profundos.

A Formação Serra Geral expõe magmatitos básicos, podendo aparecer em escarpas inclinadas, bastante fraturadas, recobertas por solo residual. Ocorrem também em locais planos sob uma cobertura de sedimentos cenozóicos, quando é possível observá-los quase totalmente intemperizados. Aparece na região com espessuras da ordem de 165m.

O grupo Bauru aflora ao norte da região e, na sua maior parte, encontra-se recoberto por sedimentos cenozóicos. Na área está representado por arenitos não cimentados, de granulometria fina e coloração amarelada a avermelhada, e, em alguns lugares, mostra siltitos róseos e lentes de conglomerados. Podem ser encontradas estratificações cruzadas de pequeno porte e plano-paralelas. Suas espessuras na região podem atingir até 30m.

Os sedimentos cenozóicos estão em depósitos aluvionares e coluvionares. A granulometria areia é a mais importante, com quantidades apreciáveis de silte e argila, não possuindo material cimentante. Não são raros veios de quartzo e quartzito, as vezes limonitizados. Sua coloração varia de avermelhado a amarelo e sua espessura varia de 5 a 50cm.

O material coluvionar do arenito Botucatu se desenvolve em escarpas predominantemente de declividades entre 5 a 10%. É formado por areia fina, com presença marcante de finos e blocos de arenito, assim como, em menor quantidade, de basalto (AGUIAR, 1989 apud FREITAS op. cit.)¹³.

---

¹² ZUQUETTE, L.V. (1981). *Mapeamento geotécnico preliminar da Região de São Carlos - SP*. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

¹³ AGUIAR, R.L. (1989). *Mapeamento geotécnico da área urbana de Região de São Carlos - SP: contribuição ao planejamento*. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

2.16 Hidrogeologia

Algumas das formações geológicas antes mencionadas, constituem, na região, aquíferos de água subterrânea, ou seja, reservatórios de água que se renovam naturalmente pelas chuvas ou pelos rios.

O principal aquífero potencial na região é constituído pelo arenito da Formação Botucatu, seguido pelo aquífero subjacente, a Formação Pirambóia. De importância secundária quanto ao potencial de produção existem as formações basálticas e os sedimentos do grupo Bauru.

Aquífero Botucatu

Suas camadas arenosas, saturadas de água, mergulham para oeste, abaixo dos derrames de basalto. A Formação Pirambóia, subjacente, pode ser encarada como uma barreira semi-impermeável, assim como os sills de diabásio que encontram-se entre o Botucatu e o Pirambóia. O seu limite superior é o basalto que constitui-se um aquífero devido a sua baixa transmissividade em relação ao arenito.

Devido à cobertura do basalto sobre o arenito, encontra-se a maior parte do aquífero em condições de confinamento e somente sua parte descoberta é freática. Nas partes confinadas os poços são naturalmente artesianos e às vezes jorantes. Porém pode ocorrer em determinadas regiões sob o basalto em que o arenito Botucatu seja freático e, por outro lado, será possível a ocorrência de um leve confinamento no Botucatu, na região freática, no caso de se sobreporem ao mesmo, camadas de argilas recentes ou produtos sedimentares do basalto.

Verifica-se da baixa relação entre a pequena espessura da camada e da grande extensão horizontal (que atinge centenas de quilômetros) que, na realidade, reinam no aquífero condições de fluxo natural horizontal, ou seja, o seu componente vertical é desprezível em comparação ao componente vertical (DAEE, 1974).

O meio poroso desse aquífero pode ser definido como relativamente permeável e, portanto, todo o aquífero é classificado de médio a bom, para fins de produção de água. De fato em 1974 (DAEE, op. cit.) de toda a água subterrânea explorada na região, 70% provinha desse aquífero.

Em DAEE, (op. cit.), levantou-se, com cálculos executados a partir de testes de bombeamento em dezenas de poços, que o valor do coeficiente de permeabilidade ou

condutividade hidráulica é de $K = 3,5$ m/dia e observou-se que, comparando-se os testes de permeabilidade horizontal e vertical que o aquífero é isotrópico. Entretanto SUGUIO (1973) informa que a permeabilidade no arenito Botucatu paralelamente a estratificação é 1,6 vezes maior do que perpendicularmente a mesma.

Aquífero Pirambóia

Dos 300 metros de espessura de toda a formação, os 100 - 200 primeiros metros (os imediatamente subjacentes aos arenitos da Fm. Botucatu) podem ser classificados como de média qualidade, devido ao ainda pequeno teor de finos na areia. Sua transição no topo para o arenito Botucatu é de difícil distinção. Em alguns estudos localizados encontram-se uma camada de alguns metros de areia grossa a seixo de 4 a 5mm no topo do Pirambóia, que define o limite aparente entre ambos os aquíferos. A parte inferior da formação é principalmente argilosa e definida como um aquícludo (impermeável) e, apesar de não ser encarado como importante fonte regional de água, pode resolver problemas locais através de pequenos poços.

Em DAEE (1974), tomamos a informação que a condutividade hidráulica das unidades arenosas do aquífero Pirambóia é da ordem de $K = 2$ a 3 m/dia. Obviamente que nas seções mais siltosas e argilosas o K é menor.

Aquífero Bauru

Sua capacidade de produzir água subterrânea é bastante baixa. Alguns poços, entretanto, que penetram algumas unidades arenosas podem chegar a produzir dezenas de m^3/h .

De um modo geral o nível freático acompanha o relevo, porém em alguns casos se encontra sob pressão principalmente em subaquíferos arenosos cativos entre argilas e lentes cimentadas.

A condutividade hidráulica do aquífero Bauru foi determinada em DAEE (1974), como sendo de média de $K = 0,5$ m/dia, porém ressaltou-se que esse coeficiente é certamente menor do que os das próprias unidades arenosas e bem mais elevado do que o das argilas completamente impermeáveis.

Aquífero Serra Geral

A captação de água em poços nesta formação é relacionada às fraturas, à proximidade de regiões de fraturamento e falhas e à ocorrência de basalto vesicular no teto dos derrames, bem como a ocorrência de areia intercalada entre os derrames de basalto (arenitos intertrapeanos).

Quanto as propriedades hidrogeológicas e como fonte de água, o basalto é considerado como de qualidade inferior em comparação ao Botucatu. Não é homogêneo na distribuição de sua porosidade, e não é contínuo como aquífero, em comparação ao Pirambóia e ao Bauru. Apesar disso é conveniente, em muitos casos, o uso da água dessa formação.

Presume-se que os lençóis de água no basalto se encontrem nas partes superiores e desagregadas ou entre derrames, bem como em lentes de areias intertrapeanas. Na maioria dos casos a água satura toda a seção e o nível se conserva elevado próximo à superfície. Porém as vezes ocorrem também dois ou mais níveis separados, sendo que em muitos poços são observados quedas d'água ligando esses diversos níveis; daí a pressuposição de que o aquífero basalto não seja homogêneo na seção vertical e em escala local. Essas noções são apoiadas também em análises estatísticas realizadas sobre a relação ente a profundidade dos poços no basalto e suas vazões, que não encontrou qualquer correlação característica aos aquíferos homogêneos.

Como esse aquífero é fraturado a sua condutividade hidráulica é muito variável de ponto para ponto, dependendo do grau de fraturamento. Esse valor pode variar de 0,0066 m/dia a 0,63 m/dia, sendo que a média é de $K = 0,13$ m/dia, entretanto, não se pode utilizar esse coeficiente para previsões de produção de um campo de bombeamento local e limitado (DAEE, 1974).

Aquíferos Quaternários

No fundo dos grandes vales da região ocorrem sedimento do quaternário e recentes, compostos, entre outros, de areia siltosa, argila, cascalhos e conglomerados. Apesar de suas áreas reduzidas eles representam bons aquíferos para exploração por meio de poços. Suas espessuras são de até algumas dezenas de metros. A importância desses aquíferos decorre do

fato e que eles se encontram interligados a rios que os atravessam e dependem, em grande medida, do regime hidrológico desses rios. Prevê-se que o nível d'água nesses aquíferos seja freático, ocorrendo também, o nível confinado profundamente sob argilas; porém, de qualquer forma, se encontrará muito próximo ao nível d'água dos rios. Em alguns lugares onde a água do rio é poluída, utiliza-se água dos poços aluviais que apresentam uma qualidade muito boa.

Funções do aquífero

Os aquíferos desempenham duas importantes funções: a de armazenamento e a de transmissão. Os interstícios e poros (que são as espécies de vazios com que tratamos em nosso trabalho), fendas, juntas e fraturas, além de seqüências de canais e cavernas de um aquífero servem tanto para a acumulação de água como para seu movimento, funcionando como uma rede de condutos. Na realidade a água subterrânea está em constante movimento formando por vezes extensos percursos, desde as zonas de reabastecimento até as zonas de descarga. Contudo esse movimento é muito lento, de tal maneira que, normalmente, suas velocidades são medidas em centímetros ou metros por dia ou mesmo por ano.

Conceitos fundamentais:

Porosidade

A porosidade (n) de uma formação aquífera é a parte de seu volume ocupada pelas aberturas e poros, ou a percentagem do volume da rocha ocupada pelos vazios. É um índice da quantidade de água que pode ser armazenada no material saturado; ela é definida matematicamente pela equação:

$$n = V_v / V_T \cdot 100$$

onde V_v é o volume de vazios e V_T é o volume total e n é a porosidade expressa em percentagem.

Permeabilidade

É definida como a capacidade de um meio poroso transmitir a água. Henry Darcy, engenheiro francês, mostrou, em 1856, que o escoamento de água através de uma coluna de areia saturada é proporcional a diferença de pressão hidráulica nos extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna. Isso é conhecido como lei de Darcy, ainda hoje utilizada como princípio básico do fluxo de água subterrânea. É expressa matematicamente pela fórmula:

$$q = -K \, dh / dx$$

onde q é a velocidade de escoamento (velocidade de Darcy), dh é a diferença das pressões hidráulicas, dx é a distância entre os pontos onde as pressões foram medidas e K é uma constante que depende das características do material poroso atravessado pela água e que é chamado de condutividade hidráulica ou de coeficiente de permeabilidade.

Velocidade do Fluxo de Água Subterrânea

A velocidade da água subterrânea é usada para determinar quão rapidamente a mesma ou constituintes dissolvidos nela, estão migrando no sistema. O método que determina a velocidade de fluxo, que é relacionado com a condutividade hidráulica dá-se através da seguinte equação:

$$v = K/n \cdot dh/dx$$

onde v é a velocidade média da partícula de água subterrânea (SEVEE, 1991).

2.17 Trabalhos anteriores

MATSUZAKI (1998) aplicou um modelo computacional no estudo do escoamento de água subterrânea na região do lixão de São Carlos. Com a aplicação de informações providas dos níveis d'água dos piezômetros do lixão, de poços tubulares profundos da região

(todos dentro da bacia do ribeirão do Feijão, do qual o córrego São José é afluente) e informações geológicas, pode determinar que a pluma de contaminantes caminha preponderantemente na direção SW. Experimentando reduzir a área de estudo para coordenadas menos abrangentes de modo a obter maior precisão nas informações para as regiões mais próximas do lixão, observou uma tendência de que as cargas constantes (originadas pelas presenças de pântanos e lagos) “puxassem” as linhas de fluxo e, em consequência, as partículas de água subterrânea do lixão para esses ambientes de carga constante; assim, propôs que o critério de carga constante, na utilização do programa computacional, fosse evitado.

GADOTTI (1997) avaliou a contaminação das águas subterrâneas e das águas superficiais adjacentes ao lixão. Concluiu que existe um deslocamento das águas subterrâneas no sentido SW. Observou ^{DE ADRIE} que de todos os parâmetros analisados, apenas as concentrações de bário, nitratos e cloretos excederam o limite de potabilidade, em alguns pontos de amostragem. Para a região do lixão estudada os elementos como cromo, cobre, níquel, zinco, fósforo, boro, cádmio e chumbo, não foram detectados.

FREITAS (1996) construiu uma série de poços de monitoramento e amostragem, em número de quatorze, na área do lixão de São Carlos, que tinham por objetivo a caracterização do aquífero Botucatu na região. Esses poços foram construídos seguindo normas ditadas pela CETESB. Como uma série de poços havia anteriormente sido construída pelos pesquisadores da UFSCar e estes poços terminaram no poço de número 14, foi dada seqüência e os poços foram construídos do número 15 (L15) até o número 33 (L33). Para a locação desses poços e para que houvesse possibilidade de correlação de informações foi executado uma série de ensaios geofísicos, caminhamentos elétricos, que cruzaram perpendicularmente o corpo do lixo e foram em número de seis, desde as áreas à montante até aquelas à jusante.

Determinou que, com base nos ensaios geofísicos, levantamento geológico e de granulometria, há a presença de solos coluvionares da Formação Botucatu e com possíveis contribuições de solo residual da mesma.

Determinou com base em ensaios de bombeamento realizados no local, que o aquífero na região do lixão comporta-se como um meio heterogêneo e anisotrópico e os valores encontrados para transmissividade ficam entre 187,16 a 285,21 m²/dia, condutividade hidráulica horizontal de 2,08 a 5,43 m/dia e porosidade específica de 0,16 a 0,56.

Analizou granulometricamente os sedimentos de cinco pontos, sendo quatro poços de monitoramento e um ponto de amostragem de solo (p.a.s.) para ensaio de permeabilidade. Essas informações estão na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados obtidos nos testes de granulometria

Fonte: FREITAS (1996)

Ponto	Profundidade (m)	Argila %	Silte%	Areia fina%	Areia média%	Areia grossa%
p.a.s.	1,2	15,24	33,35	42,46	8,53	0,74
27	10	20,45	14,63	30,69	30,02	4,38
24	10	23,35	54,11	29,29	8,28	-
23	2	17,71	24,67	48,80	8,48	0,34
16	6	18,23	21,45	31,02	28,98	-

MENEZES (1995) realizou um estudo considerando as características do meio físico e a qualidade das águas superficiais e das águas subterrâneas. Considerou o local inadequado para a disposição de resíduos sólidos, segundo atributos definidos por ZUQUETTE & GANDOLFI (1991),¹⁴ apud MENEZES (1995) principalmente pelo potencial de erosão ser muito alto, o nível d'água subterrânea ser inferior a 8m e a região ser zona de recarga de aquífero. Outros fatores que tornam a área desfavorável a disposição dos rejeitos:

- a) A declividade do terreno, indo em direção à cabeceira é superior a 10%;
- b) O coeficiente de permeabilidade que varia de 10^{-4} a 10^{-6} ;
- c) A forma do terreno, por estar próximo ao contato entre superfícies com traços físicos diferentes;
- d) Litologicamente, constituída de arenitos permeáveis;
- e) Os materiais inconsolidados são predominantemente arenosos;
- f) O coeficiente de troca catiônica varia entre 2,71 e 7,3 meq/100g, quando o atributo favorável seria algo superior a 10 meq/100g.

Constatou que as águas do córrego que nasce do lixão está realmente contaminada pelo mesmo. Verificou a diluição dessas águas pela afluência com o córrego São José. Constatou a poluição em poços de monitoramento: Em um poço próximo (L12 - UFSCar), na direção das linhas de fluxo observou-se as maiores concentrações de poluentes e em um poço mais afastado (L14 - UFSCar) a jusante do primeiro a contaminação foi menor, o que foi atribuído aos poluentes serem algo atenuados pelo substrato geológico.

¹⁴ ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. (1991). *Análise da relação entre disposição de rejeitos de baixa periculosidade e meio geológico receptor*. In: SIMP. SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISP. DE RESÍDUOS, Rio de Janeiro, 1991. *Anais*. Rio de Janeiro, ABMS. p.221-232

BOSSOLAN (1993) realizou estudos sobre a contaminação das águas subterrâneas no local. Determinou que vários parâmetros, como pH, oxigênio dissolvido, Fe, Mn e Ca estavam alterados devido a influência direta do líquido percolado do aterro nas águas do lençol freático superficial local tomando-as impróprias para captação em locais próximos e alertando para o perigo em potencial do aterro na contaminação das águas subterrâneas e das águas superficiais e profundas da região. Constatou poluição fecal em diversos pontos e, especialmente no poço L12.

GONÇALVES et.al. (1992) construíram uma série de dez piezômetros no local do lixão, e, a partir dos mesmos determinaram o sentido do fluxo de água subterrânea como sendo NW. Ressaltaram que a alta permeabilidade do substrato local poderia indicar que grande parte do chorume produzido devesse estar infiltrando para o aquífero profundo. MENEZES (1995) observa, entretanto, principalmente em períodos chuvosos, “uma grande quantidade de percolado que deságua superficialmente a jusante do aterro, nas nascentes que vão se juntar ao córrego... ..S. José”.

Na análise de percolados de dois aterros experimentais, construídos na região do lixão de São Carlos e com o mesmo lixo a ele destinado, SCHALCH (1992, apud MENEZES, 1995)¹⁵ encontrou diversas concentrações de metais pesados. O comentário sobre suas observações foi feito em capítulo específico (2.11.6).

ELLERT et.al. (1992)¹⁶ apud FREITAS (1996) realizaram ensaios geofísicos na região do lixão de São Carlos empregando os métodos de eletrorresistividade e eletromagnético indutivo para determinar a pluma de poluentes, além de sísmica para determinar o comportamento da geologia local. Concluíram existir uma pluma de contaminantes rumando para WNW e que existem zonas silicificadas em subsuperfície.

---

¹⁵ SCHALCH, V. (1992). *Análise do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) - EESC, Universidade de São Paulo

¹⁶ ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J.M.B.; MARTINS, E. (1990). *Mapeamento geofísico do lixão de São Carlos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6., Porto Alegre, ABAS. P.82-88.

3. Procedimentos, resultados e discussões

3.1 Mapeamento geológico

O lixão de São Carlos foi assentado em uma boçoroca que se instalou sobre os solos coluvionares e solos residuais dos arenitos da Formação Botucatu. Como essa formação é considerada o melhor aquífero da bacia do Paraná, muitas críticas foram geradas dada a instalação do lixão no local onde se encontra. Os argumentos são que sendo extremamente permeável e situando-se em uma área de recarga do aquífero, o local é bastante inadequado a presença do lixão pois este, com seu poder contaminante, poderia levar as águas subterrâneas à contaminação.

Observa-se, dado o esboçado nas linhas acima, a importância da caracterização da geologia local tanto para executar projetos de novos aterros sanitários, quanto para o conhecimento das condições do ambiente dos antigos lixões já instalados. Procurando atuar no sentido de contribuir ao conhecimento da geologia local procedemos um mapeamento geológico na região. Esse mapeamento, contudo, não espera ser definitivo e vem somente somar-se aos já executados procurando, cada vez mais, aproximar o observado da realidade natural.

Para a sua execução foi realizada interpretação de fotografias aéreas da região, de propriedade do Departamento de Geotecnia da EESC - USP, utilizando estereoscópio desse departamento. Em campo utilizamos bússola Brunton. Foram realizadas excursões investigativas ao campo, em duas etapas de levantamento de dados seguidas de uma terceira, de fechamento. Foram, ao todo, visitados quarenta e sete pontos de afloramento, sendo que, o de número 47 fica cerca de 200m fora da área mapeada e serviu para identificação e confirmação de litologia interna a área.

Os mapas topográficos utilizados foram os do IGC (SF-23-Y-A-I-I-NE-C, NE-D, NE-E e NE-F) de escala 1:10.000.

O fruto desse mapeamento geológico encontra-se no mapa da Figura 17. Este mapa foi apresentado com escala gráfica para que possa ser fotocopiado sem prejuízo da correta determinação das distâncias.

Figura 17 - Mapa geológico da região do lixão

Geologia local

Das ocorrências locais temos da base para o topo:

Formação Botucatu

A Formação Botucatu mostra-se na área quase sempre através do seu solo residual que tem as características de serem formados, assim como suas rochas, de areias muito bem arredondadas e esféricas e relativamente bem selecionadas, situando-se quase sempre na granulometria de areia fina, porém com ocorrências de areias médias. Por vezes não encontra-se tão bem selecionada e apresentam partículas até submilimétricas, situando-se na faixa de areia grossa/ muito grossa. Sua coloração é intermediária entre o bege e o marrom ou bege e amarelo, com uma tonalidade avermelhada.

Materiais biotransportados provenientes dos sedimentos não aflorantes (que no caso não deveriam exceder poucos metros de profundidade) revelam níveis eventuais de materiais siltico/argilosos de coloração róseo/alaranjada.

A ocorrência mais evidente da Formação Botucatu, é, entretanto, a sua porção silicificada que sustenta o relevo marcante, assemelhado a escarpas de cuevas, que toma todo o lado oriental (Leste) da área do lixão. Nessas porções silicificadas, e mesmo nas não silicificadas, observa-se estratificações cruzadas de grande porte.

Por vezes, em afloramentos de arenito não muito silicificado, observa-se acamamento com arenito preto e concordantemente com o acamamento, dendritos de pirolusita.

Nos sopés das escarpas encontra-se um solo que varia de granulometria muito fino a fino, por vezes argiloso, com grãos de bom arredondamento e esfericidade, de coloração marrom, com fragmentos de rocha básica (basalto/diabásio), de arenito, de quartzito e, raramente, drusas de ágata. Essas porções são colúvios que ocorrem nitidamente na região sudeste (SE) do lixão e, principalmente, ao longo das margens do córrego São José, entre a Fazenda Itaguassu e o Sítio Macuco, porção onde o mesmo é denominado também, em mapa topográfico (IGC - SF-23-Y-A-I-1-NE-D) córrego da Invernada.

Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral apresenta-se representada localmente por corpos de, no máximo, quarenta metros de espessura. Suas litologias variam de diabásios faneríticos a muito localmente rochas afaníticas. São observados, em alguns pontos, disjunções colunares, raros fenocristais de olivina milimétricos inseridos em matrizes afaníticas e, muito raramente, amígdalas isoladas. A disjunção esferoidal ocorre em todos os afloramentos onde haja o processo de intemperismo instalado.

Apesar de não terem sido vistos em afloramento mas manifestando-se como blocos rolados foram localizadas porções até mesmo gabróides, com cristais de vários milímetros de dimensão.

Essas rochas apresentam teores de magnetita suficientes para inviabilizar o uso da bússola em contato com a rocha.

Suas relações de contato são muito mascaradas pelo grau de intemperismo avançado, entretanto, nota-se tanto nos sedimentos subjacentes quanto nos sotopostos, linhas de seixos de quartzitos e mesmo no corpo da rocha ígnea, quando muito alterada, proximamente aos contatos, observam-se drusas de ágata e seixos de quartzito.

Faltou-nos elementos para podermos identificar os possíveis diversos corpos de rochas básicas, como, por exemplo, relações de contato bem definidas. Porém, dada sua granulometria, quase sempre fanerítica, sugerimos que a maioria das ocorrências locais sejam intrusivas, ou seja, diabásios.

Formação Marília - litofácies Itaqueri

As rochas da litofácies Itaqueri, da Formação Marília, encontram-se completamente intemperizadas e manifestam-se, então, por seu solo residual. É um solo ora arenoso, ora areno/argiloso (na maioria das vezes), mal selecionado, com grânulos até milimétricos (1 a 2 mm), com grãos submaturos, quase nada esféricos e pouco arredondados, possui seixos centimétrico de arenito laterítico e cristais milimétricos de quartzo. Sua coloração é de ferrugem ou marrom com tendência ao rosado/alaranjado. Possui linhas de seixos na base.

Sedimentos Cenozóicos

A sedimentação Cenozóica, ocorre principalmente nas margens do córrego São José na porção compreendida entre a fazenda Itaguassu e a rodovia Washington Luís. Esses sedimentos estão associados ao ambiente pantanoso que ocorre no local. Dada a grande influência do aporte de sedimentos oriundos da Formação Botucatu, esses sedimentos são constituídos, basicamente, de areias finas a médias, inconsolidadas.

3.2 Levantamento Topográfico

Com o auxílio técnico e logístico do Departamento de Transportes - Laboratório de Mensuração da EESC - USP, utilizando equipamento conhecido como estação total, marca Zeiss, executamos a irradiação das informações de coordenadas UTM, assim como das cotas, de todos os poços de monitoramento da pesquisa, incluindo os poços L5 1 e 2 da UFSCar (os únicos, que ainda estavam preservados até então) e da estação climatológica existente, na ocasião, no local. As irradiações foram feitas a partir de duas estações de coordenadas e cotas conhecidas, no poço 23 e na estação climatológica, informações que foram levantadas com a utilização de GPS de precisão (de erro centimétrico na vertical). Estas coordenadas e cotas estão disponíveis, na Tabela 7.

Esse levantamento das cotas dos poços levou-nos a construção de um simples mapa unindo essas informações com outras provenientes de digitalização de mapa topográfico em escala de 1:10.000, dada a pequena disponibilidade de informações novas para a construção de um mapa topográfico totalmente novo. Estes mapas que foram digitalizados por equipe do projeto, são os do IGC (SF-23-Y-A-I-1-NE-(C, D, E e F)).

Esta união, portanto, das informações dos mapas topográficos antigos com a situação real atual, não foi perfeita. Dado que provavelmente havia o emboçorocamento na região, na época do desenho dos mapas antigos (o que se faz sentir analisando-os) e atualmente essa boçoroca foi completamente preenchida com lixo, algumas formas resultantes dessa união parecem bizarras. Havia a possibilidade de não apresentá-lo, porém, efetuando-se análises cuidadosas e tendo as informações sobre a cautela a ser tomada dada essa união de dados, este mapa pode ser útil. É sem dúvida, apesar de bizarro, o mapa que mais reflete a realidade topográfica na região do lixão hoje disponível. Este pode ser apreciado na Figura 18.

Tabela 7 - Coordenadas U.T.M. e cotas dos poços de monitoramento

Ponto (poços)	Coordenada N-S (m)	Coordenada E-W (m)	Cota (m)
15	7555212	209988	790.886
16	7555127	210113.7	796.428
17	7554943	210203.5	806.156
18	7554826	210242.2	812.866
19	7554730	210274.3	818.482
20	7554654	210297.6	827.769
21	7554621	210250.1	828.449
23	7554708	210190	819.82
24	7554905	210085.5	803.55
25	7555100	209905.3	786.001
26	7555167	209814.7	781.211
27	7555209	209783.9	777.287
28	7555232	209797.4	775.043
29	7555264	209813.8	777.125
30	7555210	209849.5	780.419
31	7555159	209973.3	788.62
32	7555026	210099.4	798.471
33	7554932	210117.4	804.575
Estação climatológica	7555176	209988.7	790.311
L51 (UFSCar)	7555160	210078.2	796.468
L52 (UFSCar)	7555156	210078.5	796.035

As informações contidas nas regiões fora do limite traçado pelos poços são mais confiáveis e verdadeiras; refletem os mapas topográficos originais. Os poços que parecem estar em “morrinhos” como os de número 23, 24, 33, etc., representam mais verdadeiramente a cota naquele determinado ponto e os “morrinhos” não existem. Na verdade toda a topografia em redor está mais elevada até aquela cota, devido ao preenchimento com o lixo e às movimentações de terra.

Os desenhos característicos da boçoroca, visivelmente a W do poço 18, internamente ao triângulo formado pelos poços 25, 31 e 32 e pelos poços 26, 30 e 31, são resíduos dos mapas antigos. Hoje, constata-se, no local, um relevo de pequena declividade em toda a

extensão do lixão, desde os poços 20 e 21 até os poços 26 e 30. Os poços 27, 28 e 29 realmente ficam um pouco separados dos poços 26 e 30 por uma inclinação mais acentuada. As informações numéricas dos mapas, das cotas dos poços e de suas coordenadas, são, entretanto, verdadeiras.

Havia sido executado um levantamento topográfico da região do lixão (FREITAS, 1996). Porém, tendo as informações recentes dos posicionamentos dos poços verificamos que aquele mapa não estava correto, se considerarmos que os mapas do IGC, para o entorno, estivessem exatos, assim como essas novas informações que levantamos (bastante coincidentes com as do IGC). As cotas daquele mapa parecem em média 15 metros mais altas, ou seja em cotas numericamente 15 m maiores do que as reais.

Graças a esse levantamento o posicionamento relativo dos poços pode ser melhor determinado. Em relação ao mapa antigo, notadamente as posições relativas dos poços 30; 15 e 31; e 24, 32 e 33, em planta estão diferentes.

Legenda

- Piezômetros ou poços de monitoramento
- Limites dos corpos do lixo
- Norte da quadrícula

Baseado nos mapas IGC folhas
SF-23-Y-A-I-1-NE-(C, D, E e F) de escala 1:10.000
com contribuição de levantamento topográfico local

Figura 18 - Mapa topográfico local do lixão de São Carlos

3.3 Análises químicas das águas dos poços de monitoramento

Fizemos as análises das águas dos poços de monitoramento no laboratório de saneamento da EESC - USP. Essas análises foram úteis para que determinássemos as condições de contaminação em subsuperfície e pudéssemos observar o comportamento dos diversos contaminantes em relação a sua posição em área e em relação ao corpo do lixo.

Para podermos visualizar este comportamento relativo fizemos mapas de concentrações dos contaminantes, com as médias das concentrações de três coletas, feitas em agosto de 1996, julho do mesmo ano e janeiro de 1997.

Percebe-se, nesta etapa, que o tratamento dado as informações é de significativa importância, especialmente quando procura-se utilizar um programa de computador que interpola e extrapola as mesmas, para a construção de mapas de isovalores.

Queremos sugerir que o tratamento dado às águas superficiais e subterrâneas seja em conjunto, desde que o aquífero em questão seja livre, as informações sejam parcas ou má distribuídas e quando pretende-se utilizar de programa de computador com as características já descritas, como faz o que utilizamos (SURFER, 1996). Ele constrói uma malha com as informações e, como o limite para as suas extrapolações somente pode ser feito na horizontal e na vertical, e os mapas produzidos algumas vezes possuem grandes extensões diagonais (já que são retangulares) e, como no caso do lixão, muitas informações estão disponíveis apenas em uma diagonal (no lixão a diagonal de direção NW-SE - que é a direção do corpo do lixo onde concentram-se as informações, pois os poços de monitoramento foram construídos ao longo do mesmo), a diagonal perpendicular a esta (que no caso do lixão seria a de direção NE-SW) apresenta uma representação falseada da realidade a ser esperada. Por esse motivo, quanto maior o número de informações a serem utilizadas para a confecção de tais mapas, maior será a sua precisão e, por isso, resolvemos tratar das águas superficiais e subterrâneas em conjunto, aproveitando-nos do fato de que as águas superficiais e as águas subterrâneas estão, muitas vezes, senão sempre, em contato muito direto, já que, como sugerimos, a grosso modo, nesta região, o aquífero comporta-se como sendo livre. Existem situações observadas que sugerem ligeiro confinamento, mas, ainda assim, como as informações ainda não são muitas resolvemos, para traçar tais mapas, utilizarmos de todas as disponíveis.

Ainda que utilizemos todas as informações disponíveis, a diagonal NE-SW é muito pobre em informações e deve ser desconsiderada na avaliação dos mapas e na sua utilização para a previsão de condições futuras. A região dos mapas que podem ser tratadas com alguma segurança, e consideradas algo verdadeiras, são aquelas que estão interiores aos pontos de

amostragem e preferencialmente, interiores aos pontos de amostragem nos poços de monitoramento. Para visualizar esta problemática observe o mapa da Figura 19.

Este primeiro mapa é somente uma apresentação para mostrar os elementos gráficos gerais dos diversos mapas, quais sejam: os poços de monitoramento, os demais pontos de coleta de água (A - Represa - em uma represa no córrego São José, anteriormente a contaminação provocada pelo lixão; B - Rio - no córrego São José já após a afluência da nascente do lixão e, portanto, já contaminado; C - Córrego - em um corretozinho proveniente do alto das escarpas locais. Suas águas ainda não encontraram as outras contaminadas pelo lixão e são, portanto, ainda relativamente limpas; D - Rio - na drenagem que é uma nascente proveniente do lixão ou pouco rio abaixo, na localização do vertedor, portanto extremamente contaminada; E - Cacimbão - uma cacimba (poço caipira) abandonada (devido a contaminação) junta as margens da drenagem da nascente do lixão; F - Cacimba - uma cacimba em utilização, para uso em pecuária, situada a meio morro, a aproximadamente 15-20 metros acima do nível do córrego São José, aparentemente mais contaminada pela atividade agrícola e pecuária; e G - Posto - Poço tubular profundo do posto Castelo que não consta do mapa de concentrações dada a sua grande distância dos demais pontos; porém a qualidade de suas águas foi considerada nas inter/extrapolações. Pode-se ver neste mapa que alguns poços ali presentes não apresentam água. Eles constam dos mapas para que se possa fazer comparações entre as diversas atividades que foram executadas neste trabalho. Outros elementos são as drenagens de águas superficiais (a maior é o córrego São José), a delimitação do corpo do lixo (um grande corpo e um pequenino), as linhas de isovalores das concentrações de contaminantes, preenchidas com cores, e, finalmente, as linhas de curvas de nível da superfície piezométrica, que serve a constataremos que, localmente, o fluxo da água subterrânea é no sentido a jusante dos rios (ou, se quiserem, NW). Esta representação da superfície piezométrica nos serve a visualizar o sentido do fluxo conjuntamente com as diversas concentrações. Esta superfície foi determinada a partir a partir dos níveis dos poços de monitoramento, dos níveis das águas superficiais e dos níveis d'água detectados pelas sondagens elétricas verticais.

Percebe-se, neste mapa, uma expansão para sul, de determinado contaminante a partir do poço 25. Essa expansão não é nada mais do que a extrapolação feita pelo programa, dado

Linhas de curvas de nível da superfície piezométrica

Linhas de isovalores das concentrações de contaminantes
(com intervalos preenchidos com cores)

Corpo do lixão

Águas superficiais

Norte da quadrícula

- Pontos de coleta de amostras de água exteriores a rede de poços de monitoramento
- ◇ Poços de monitoramento com análises de água
- Poços de monitoramento que estão secos

Figura 19 - Mapa dos elementos gráficos dos diversos mapas de concentrações de contaminantes.

que nos poços 15 e 31 as concentrações do contaminante são baixas e no poço 25 é alta. Agora, observando-se a superfície piezométrica, percebe-se que a contaminação do poço 25 provém na realidade do corpo do lixo a Sudeste e não do Norte como pode parecer a primeira vista. Da mesma forma a Nordeste percebemos concentrações abaixo de zero, o que é igualmente falso e se deve as mesmas extrapolações. Porisso deve-se considerar somente, como algo corretas, aquelas várias regiões citadas dos mapas, e desconsiderar especialmente a Sudoeste e a Nordeste.

Dados todos estes fatos e observando que o sentido do fluxo da água subterrânea na região restrita ao lixão é NW, concordamos com GONÇALVES et. al. (1992), quando, analisando diversos níveis d'água de piezômetros no lixão, determinaram como sendo este mesmo o sentido. Em uma análise rápida pode-se ter a impressão de que, dado o acima explicado, o sentido do fluxo d'água subterrânea seja SW e não NW como realmente ocorre.

Foram também organizados gráficos com as concentrações dos contaminantes nos diversos pontos de coleta em relação as datas de amostragem para que, se possível, observássemos variações sazonais nas concentrações dado que as coletas iniciaram-se na época seca e terminaram na época chuvosa.

Alcalinidade:

As informações das concentrações da alcalinidade dos diversos pontos de coleta foram organizadas nos gráficos da Figura 20 (a, b e c) e no mapa da Figura 21. Como, nos gráficos, dividimos as amostras em grupos de maior a menor concentração, para que fosse possibilitada a melhor visualização do comportamento das curvas, foi possível tirarmos algumas conclusões relacionando as águas superficiais com as águas subterrâneas.

Figura 20a - Gráfico de concentrações de alcalinidade

Figura 20b - Gráfico de concentrações de alcalinidade

Figura 20c - Gráfico de concentrações de alcalinidade

Podemos observar a importante contribuição do lixão ao aumento da alcalinidade das águas. O primeiro gráfico mostra com uma concentração acima de 400 mg/l de alcalinidade, o ponto de coleta D - rio. Esse ponto fica imediatamente a jusante do lixão e recebe diretamente a afluição dos contaminantes presentes no mesmo. Cerca de 250m rio abaixo, porém em terra firme, no ponto E - cacimbão (que é, lembramos, uma cacimba abandonada) as concentrações são menores do que no ponto D - rio mas ainda assim muito maiores do que as dos demais outros pontos. Podemos observar que suas concentrações são, inclusive superiores a poços que estão inseridos no corpo do lixo, como os de número 32, 30 e 31.

Figura 21 - Mapa de concentrações de alcalinidade

Nota-se, porém, o poder de neutralização natural do ambiente em relação alcalinidade observando-se o seguinte dado: a alcalinidade no ponto B - rio (que é resultante de uma

confluência das águas provenientes do lixão (ponto D - rio) e das águas do córrego São José - menos alcalina), possui uma alcalinidade compatível com aquela do ponto C - córrego, em torno de 50 mg/l, sendo que estas últimas são águas que estão anteriores a contaminação pelo lixão, ou seja, a montante do mesmo e serão, posteriormente, contaminadas por ele.

Cloretos

A análise dos gráficos e mapas de concentrações de cloretos (Figura 22 a, b e c, abaixo) nos permite verificar que há uma relação muito direta entre a contaminação que ocorre no poço de número 25 e no ponto D - rio de amostragem. Como os cloretos são muito móveis e as concentrações, assim como as variações entre os dois pontos de coleta são quase exatamente iguais, sugerimos haver uma comunicação bastante facilitada entre as águas dos dois pontos.

Figura 22a - Gráfico de concentrações de cloretos

Figura 22b - Gráfico de concentrações de cloretos

Figura 22c - Gráfico de concentrações de cloretos

Figura 23 - Mapa de concentrações de cloretos

Observa-se, igualmente que as concentrações nos poços 32, 25, 26 e ponto D - rio, são bastante próximas e há um alinhamento dos mesmos na direção do fluxo da água subterrânea. Inclusive percebe-se que o poço 32, que está inserido no corpo do lixo possui uma concentração algo inferior aos acima citados que estão fora do mesmo corpo, significando que as águas que alimentam o aquífero sob o lixo (e no poço 32), vindo da região mais a SE, tem importante papel na diluição dessa concentração nesse poço. Esse papel pode ser observado também nos poços 30 e 31 que são interiores ao corpo do lixo mas recebem águas de ESE, com baixas concentrações. Da mesma forma as baixas concentrações nos poços 27, 28 e 29 podem ser explicadas por esse aporte de águas mais puras. De algum modo proximamente ao ponto D - rio, as águas subterrâneas são facilitadas a aflorar e as concentrações dos diversos contaminantes indicadores de fluxo de água subterrânea, como os cloretos, neste ponto, são, normalmente, as mais altas em comparação aos demais pontos de amostragem.

Condutividade

Como a condutividade é dependente da concentração de sólidos solúveis em água, o comportamento da condutividade é muito semelhante ao da concentração de cloretos e as águas mais condutivas são aquelas que possuem maiores concentrações desses sais. Perceba como não há, aparentemente, um comportamento previsível das condutividades em função das variações sazonais. Os pontos D - rio e poço 25 apresentam quase a mesma concentração de cloretos e entretanto sua condutividade é algo diferente, bastante maior no ponto D. Perceba, então como essa condutividade maior no ponto D deve ser bastante influenciada pela sua concentração em alcalinidade (de bicarbonatos), bastante maior neste ponto do que no ponto 25.

Vejamos como é difícil estabelecermos um padrão. A condutividade dos poços 15 e 18 parece estar bem relacionada com a alcalinidade dos mesmos, enquanto que a do poço 27, ligada aos dois fatores e a do poço 30 parece estar mais ligada aos cloretos. Certamente muitos fatores a estão influenciando.

Figura 24a - Gráfico de condutividades

Figura 24b - Gráfico de condutividades

Figura 24c - Gráfico de condutividades

Figura 25 - Mapa de condutividades

DQO

A demanda química de oxigênio ocorrendo mais intensamente nos pontos D- rio, E - cacimbo, B - rio e poços 32 e 25 além de vários outros pontos e poços em menor escala, demonstram que a carga de matéria orgânica oxidável presente, deve-se fundamentalmente a presença do lixão. A matéria orgânica em solução migra acompanhando o fluxo de água subterrânea, como pode ser evidenciado analisando-se o comportamento da DQO nos pontos supracitados.

Figura 26a - Gráfico de demanda química de oxigênio

Figura 26b - Gráfico de demanda química de oxigênio

Figura 26c - Gráfico de demanda química de oxigênio

O poço 31, interno ao corpo do lixo, apresenta DQO relativamente menor, evidenciando que as suas águas provêm de região menos contaminada, comprovando o fluxo local de sentido poço 16 - poço 31 (ou WNW).

De modo geral as DQO dos vários pontos de amostragem variaram diminuindo de agosto para outubro e aumentando de outubro para janeiro evidenciando a importância da sazonalidade nas variáveis desse parâmetro.

Mapa de demanda química de oxigênio considerando todos os pontos de amostragem

Figura 27 - Mapa de concentrações de demanda química de oxigênio

A maior variação observada foi no ponto C - córrego, o que evidencia a importância da atividade antrópica atualmente operante na contaminação orgânica das águas superficiais, dado que esse córrego provém das regiões de cotas superiores a quebra positiva de relevo onde mantém-se as atividades agrícola e pecuária. A mesma variação, entretanto, não pode ser observada nas águas superficiais do ponto A - represa, o que pode ser relacionado a

capacidade do ambiente lacustre de, dadas suas características ecológicas particulares, atuar como um local de decaimento, ou seja, de retenção de nutrientes e de matéria orgânica pelas macrófitas (WETZEL, 1990, apud SONODA & MATSUMURA-TUNDISI, 1997).¹

Ferro

As quantidades de ferro presentes nas águas subterrâneas e mesmo nas águas superficiais amostradas na região são quase sempre superiores aos padrões de potabilidade. Entretanto, eventualmente, como parece ser o caso do poço 15, a presença de ferro na água parece ter muito maior relação com a qualidade natural da água subterrânea do que com contaminação pelo lixo, já que suas águas proviriam, de acordo com a análise do mapa piezométrico, de regiões não contaminadas. Parece razoável que a origem dessa concentração de ferro seja a presença de rochas máficas que proveriam a água subterrânea desse elemento em abundância. Na região, a menos de 500 metros à montante do poço 15, é a partir de onde se encontram tais rochas.

Sua presença nos poços à montante (15, 16, 18 e 19) pode ser relacionada as análises de amostras de solo executadas durante as perfurações dos poços de monitoramento por FREITAS (1996), que diz: “um material arenoso... com lentes amareladas... mostra grande resistência a pressão da sonda... pode representar um nível onde o arenito Botucatu possui cimentação de óxidos e hidróxidos de ferro, ainda com algumas lentes bem preservadas.” E ainda, existem no poço 18, fragmentos de arenito silicificado ao lado de fragmentos de basalto alterado e seixos de quartzo rolado, e nos poços 17 e 19 fragmentos e prováveis blocos de arenito silicificado evidenciando a presença de um colúvio no local, que, apresentando fragmentos de basalto e, certamente, solo de alteração transportado do mesmo, pode ser o provedor dessa quantidade de ferro observada nesses poços (dos quais exclui-se o poço 17, por apresentar baixa concentração).

É notável como a concentração de ferro nas águas subterrâneas aumenta de outubro para janeiro em muitos poços, principalmente aqueles mais à jusante ou internos ao lixo. Os poços 15 e 16 ao contrário exibem quedas nestas concentrações.

---

¹ WETZEL, R.G. (1990). *Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators*. Verh. Internat. Verein. Limnol. 24: 6-24

Figura 28a - Gráfico de concentração de ferro do poço 30

Figura 28b - Gráfico de concentrações de ferro

Figura 28c - Gráfico de concentrações de ferro

Figura 28d - Gráfico de concentrações de ferro

O comportamento do ferro no poço 30 foi surpreendente. GADOTTI (1997) observou concentrações médias de 2,6 e máxima de 8 mg/l de ferro neste poço. As análises de outubro foram feitas repetidamente confirmando o resultado. Porém acreditamos que não pode ser descartada a possibilidade de ter havido contaminação da amostra pela garrafa de amostragem (que possuía tampa de ferro e com oxidação incipiente). Por esse motivo são apresentados

dois mapas de concentrações de ferro, o último deles desconsiderando os dados do poço 30 (Figura 29 e Figura 30).

Figura 29 - Mapa de concentrações de ferro

Mapa de concentração de ferro considerando todos os pontos de amostragem, excluído o poço 30.

Figura 30 - Mapa de concentrações de ferro, excluído o poço 30

Fosfatos

É nítido o relacionamento a ser feito entre a presença da contaminação por fosfatos nos pontos amostrados ser muito mais devida as demais atividades antrópicas, como a agricultura do que a presença do lixo. As principais concentrações encontram-se nos corpos d'água superficiais além de dois pontos em água subterrânea (E - cacimbão e poço 27). Esses últimos são fronteiros com uma atividade agrícola local que situa-se a montante dos mesmos (um goiabal).

Figura 31a - Gráfico de concentrações de fosfatos

Figura 31b - Gráfico de concentrações de fosfatos

Figura 31c - Gráfico de concentrações de fosfatos

Figura 31d - Gráfico de concentrações de fosfatos

O poço 31 apresenta grande concentração o que poderia significar uma contaminação muito localizada, pelo lixo. Entretanto, percebe-se uma variação em suas concentrações semelhante a que ocorre nas águas superficiais e diferentemente do que ocorre nos demais poços a não ser no seus poços vizinhos de número 16 e 15. Esses também tem uma variação semelhante ao poço 31 e aos demais pontos nas águas superficiais. Isso certamente pode relacionar essa contaminação, mais uma vez, com a atividade agrícola, dado que os poços 15 e 16 ficam aquém da influência contaminadora do lixo e evidencia que a fonte de

contaminação por fosfatos pode ser considerada puntual, mas por pontos de contaminação tão generalizadamente dispersos quantas são dispersas as diversas culturas e propriedades, ou seja, a contaminação que ocorre nos pontos 15, 16 e 31 parecem ter uma fonte, enquanto a que ocorre nos pontos E - cacimbão e poço 27, outra. O mesmo, anteriormente descrito, ocorrendo, obviamente, com os pontos A - represa e C - córrego.

A diminuição observada nas concentrações das águas superficiais e dos poços a elas correlacionáveis, acima descritos, no período entre outubro e janeiro, pode simplesmente estar relacionado a economia de fertilizante, pois em ocasiões chuvosas evita-se o emprego destes pois é sabido antieconômico, dado que as chuvas carreiam esses materiais para os cursos d'água.

Mapa de concentração de fosfatos considerando todos os pontos de amostragem

Figura 32 - Mapa de concentrações de fosfatos

Aqueles fosfatos que são observados nos poços que possuem menor concentração, por sua vez, tem sua concentração aumentada no mesmo período. Esse fato pode igualmente estar relacionado ao período de chuvas que teria propiciado maior dissolução aos fosfatos que já

estivessem presentes, disseminados no lixo e sedimentos, fazendo-os manifestarem-se nas águas subterrâneas apesar de em concentrações muito baixas.

Como a concentração no ponto E - cacimbão é muito maior do que as dos demais pontos, mostramos um segundo mapa de concentrações de fosfatos, onde a sua presença, e dos demais pontos de águas superficiais, foram suprimidas para que as concentrações dos demais ficassem mais evidentes (Figura 33).

Figura 33 - Mapa de concentrações de fosfatos sem pontos da águas superficiais e E-Cacimbão

Manganês

As concentrações de manganês, são perfeitamente relacionáveis com a presença do lixo pois ele não é detectado em vários pontos onde ocorrem águas naturais (ou menos contaminadas), como nos pontos C -córrego, G - poço, 15, 16, 19, 27 e ocorrem em lugares com influência do lixo.

Figura 34a - Gráfico de concentrações de manganês

Figura 34b - Gráfico de concentrações de manganês

É interessante notar como as menores concentrações variam mais abruptamente. Destas destacam-se as dos poços 17, 31 e 32 que tem comportamento muito semelhante e possuem alguma proximidade em campo (ao menos são servidos das águas subterrâneas de Leste ou Leste-Sudeste).

A presença de manganês é muito marcante no poço 29, que é influenciado fortemente por chorume dos zero aos 2 metros de profundidade segundo FREITAS (1996), mostrando que esse parâmetro pode ter uma influência muito localizada. Ele é largamente utilizado em pilhas e baterias o que pode justificar sua presença em concentrações elevadas em certos pontos do lixo. A sua ocorrência, entretanto, no ponto F - cacimba em uma concentração de 0,24 mg/l é de certa forma surpreendente, pois essa cacimba não aparenta ser contaminada pelo lixo. Pode ocorrer que contaminações locais tenham acontecido. O que pode vir a ser um problema já que o padrão de potabilidade da portaria 36/GM de 1990 do Ministério da Saúde (DI BERNARDO, 1993) recomendado para manganês é de apenas 0,1 mg/l. Essa presença, entretanto, pode, ao que parece, contribuir somente em detrimento da qualidade organoléptica da água, a não ser nos casos onde ela ultrapasse demais este padrão.

Figura 35 - Mapa de concentrações de manganês

Nitratos

Considerando-se as recomendações dos padrões de potabilidade de água, todos os poços e pontos de amostragem encontram-se com concentrações bem inferiores. Ainda assim pode observar que as águas superficiais tem pouquíssima concentração de nitratos, o lixo pouco contribui com essa contaminação e, positivamente, as concentrações maiores observadas devem estar relacionadas principalmente aos rejeitos orgânicos da atividade pecuária e eventualmente de adubação na região oeste do lixão onde encontra-se um goiabal.

Figura 36a - Gráfico de concentrações de nitratos

Figura 36b - Gráfico de concentrações de nitratos

Figura 36c - Gráfico de concentrações de nitratos

Mapa de concentração de nitratos considerando todos os pontos de amostragem

Figura 37 - Mapa de concentrações de nitratos

Analisando-se as concentrações de nitrogênio total, percebe-se que o lixo é, de fato, rico em compostos nitrogenados, mas as condições ambientais anaeróbias dentro do corpo do lixo não devem permitir a nitrificação, ou formação de nitratos, que é um processo movido por bactérias aeróbias. Estes parâmetros serão melhor discutidos abaixo, conjuntamente, no item nitrogênio total.

Nitrogênio total

Evidencia-se a presença bastante elevada de compostos nitrogenados derivados do lixo. No ponto D -rio evidencia-se como o nitrogênio deve estar em sua formas anteriores a formação de nitratos, pois é grande a concentração de nitrogênio total neste ponto (como em diversos outros pontos no lixo) e a concentração de nitratos é relativamente baixa. Percebe-se que as reações de nitrificação poderiam vir a acontecer fora da área de estudo, quando as condições aeróbias fossem, então, estabelecidas. Poderia ocorrer, portanto, que as águas do córrego São José, mais a jusante possuíssem teores que já ultrapassem o recomendado pelos padrões de potabilidade de águas. Ocorre que no ponto B - rio, já não se evidenciam maiores concentrações nem de nitrogênio total e tampouco de nitratos, significando que o processo do ciclo biogeoquímico somado a diluição provocada pela afluência de águas provenientes das cabeceiras do córrego São José (ponto A - represa) foram capazes de eliminar esse risco. As possibilidades são, pelo menos, do nitrato sofrer o processo de denitrificação quando liberaria nitrogênio para a atmosfera e/ou fazerem parte da síntese de proteínas por vegetais que por sua vez, alimentariam bactérias e animais (ODUM, 1988), todos os três podendo sair do sistema carregando nitrogênio na forma de matéria orgânica. Apesar do exposto, nas posições intermediárias, entre os pontos D - rio e a confluência com o córrego São José, o risco de contaminação por nitratos é iminente.

Figura 38a - Gráfico de concentrações de nitrogênio total

Figura 38b - Gráfico de concentrações de nitrogênio total

Figura 38c - Gráfico de concentrações de nitrogênio total

A imaturidade das águas contaminadas pelo lixão em termos de decomposição biológica dos compostos nitrogenados, pode ser evidenciada pela grande proximidade observada entre os mapas de nitrogênio total e de DQO e pela grande diferença observada entre o primeiro e o mapa de nitratos.

Já nos pontos de amostragem E - cacimbão e F - cacimba, o processo de nitrificação parece encontrar o seu auge pois todo o nitrogênio disponível mostra-se na forma de nitratos,

que, apesar de perigosos, encontram-se em concentrações muito abaixo daquelas recomendadas pelos padrões de potabilidade de águas.

Figura 39 - Mapa de concentrações de nitrogênio total

Oxigênio dissolvido

Não há dúvida quanto o relacionamento da quantidade de oxigênio dissolvido com a qualidade das águas. As águas superficiais à montante do lixão sempre apresentam valores positivos de concentração em oxigênio dissolvido.

Valores nulos de oxigênio dissolvido são encontrados em diversos pontos sob influência do chorume mas também no ponto F - cacimba, onde devem estar relacionados com

contaminação local. O processo de nitrificação dessa água mostra-se em seu auge, certamente, pois não há nem mais condições de oxigenação para a atuação de bactérias aeróbias. Não pode ser descartada a hipótese, contudo, de os nitratos serem de origem agrícola.

São pouquíssimos os pontos de coleta que possuem algum oxigênio dissolvido. Por isso foi possível organizar as informações em um único gráfico (Figura 40)

Figura 40 - Gráfico de concentrações de oxigênio dissolvido

Mapa de concentração de oxigênio dissolvido considerando todos os pontos de amostragem

Figura 41 - Mapa de concentrações de oxigênio dissolvido

Potencial hidrogeniônico (pH)

Percebe-se aqui, como foi descrito por VITALE et. al. (1991), que a presença do lixo, tendo em sua composição, como pode ser observado dadas as concentrações de alcalinidades, sais alcalinos, como carbonatos e principalmente bicarbonatos de sódio e cálcio, vem contribuir para a neutralização das águas subterrâneas que possuem naturalmente um pH ligeiramente ácido. Percebe-se que, nos pontos de coleta menos contaminados, como nos poços 15, 16 e 17, os pH são inferiores. Já nas porções mais contaminadas ele atinge um pH de mais de 6,6, como no poço 32.

Figura 42a - Gráfico de variações de pH

Figura 42b - Gráfico de variações de pH

Figura 42c - Gráfico de variações de pH

O pH dos poços 25 e 26, mostra-se muito semelhante aos das águas dos poços menos contaminados, apesar de encontrarem-se, normalmente, sob forte influência de outros contaminantes.

Já nas águas superficiais, nos pontos C - córrego e no A - represa, os valores de pH são próximos a 6,4, valor que possui também o ponto B - rio, posteriormente a uma contaminação pelo lixão. A presença de pH mais alcalinos no ponto E - cacimbão, aliados aos dos pontos imediatamente supracitados, sugerem que a fonte desses sais estejam predominantemente ligadas a atividade agrícola (adição ao solo de corretivos de acidez - calcário) em lugar de contaminação provocada pelo lixo.

Figura 43 - Mapa de variações de pH

Potencial de oxidação/redução ou potencial redox.

Pode-se notar como as águas subterrâneas dos poços interiores ao lixo são, em geral, muitíssimo mais redutoras do que as que podem ser encontradas nos diversos outros pontos de coleta, com exceção do poço 31, algo mais oxidante, que foge a regra. Por sua vez, os pontos de amostragem que possuem águas menos contaminadas invariavelmente apresentaram condições mais oxidantes. O comportamento da variação do potencial redox ao longo da linha de fluxo de água subterrânea parece indicar que o estabelecimento de uma condição mais ou menos oxidante ou redutora em determinado ponto, depende muito mais das circunstâncias em redor do mesmo do que das emprestadas por uma contaminação que tenha ocorrido anteriormente, ou, em outras palavras, parece indicar que com o fluxo a água subterrânea contaminada pelo lixo passa paulatinamente de mais redutora a mais oxidante.

Figura 44a - Gráfico de variações de potencial redox

Figura 44b - Gráfico de variações de potencial redox

Figura 44c - Gráfico de variações de potencial redox

Potencial de oxirredução considerando todos os pontos de coleta

Figura 45 - Mapa de variações de potencial redox

Zinco

As concentrações de zinco nas diversas águas representam muito pouco em termos de contaminação, já que situam-se muitíssimo abaixo do recomendado pelo padrão de potabilidade de águas, que é 5,0 mg/l. Porém sua escassez nos diversos pontos, que não os poços na região compreendida pelos limites do lixão, com exceção do poço 18, indicam a contribuição do lixão para essas concentrações. A presença desse contaminante é localizada e muitas vezes ficando, suas concentrações, abaixo do mínimo possível de ser determinado pelo equipamento de análise química de absorção atômica (que é de 0,01 mg/l).

Figura 46 - Gráfico de concentrações de zinco

Figura 47 - Mapa de concentrações de zinco

3.4 Perfilagem geofísica dos poços do lixão

Foram realizadas, com o total apoio técnico, logístico e de recursos da empresa Perfil Master - Comércio e Serviços de Perfilagem Ltda., da cidade de Araraquara - SP, uma série de perfilagem geofísicas dos poços de monitoramento instalados no lixão de São Carlos. Em cada poço foram corridas as ferramentas Gama Natural (Gama), Indução e Temperatura. As características de cada ferramenta estão descritas em capítulo específico, mas, lembramos que a ferramenta Gama mede as radiações naturais emitidas pelo meio físico circundante ao poço, tendo a característica principal de identificação de camadas de argilas, diferenciando-as das de areias; a ferramenta Indução, mede a condutividade e a resistividade real dos diversos estratos e a ferramenta Temperatura, a temperatura do fluido interno ao poço.

Estas perfilagens foram executadas em duas etapas: a primeira em maio de 1998 e a segunda em julho de 1998. Na primeira etapa, foram perfilados os poços 16, 26, 27, 28, 29 e 30. Sabidamente a ferramenta indução não funciona em poços com revestimento metálico e, igualmente, no caso de poço não revestido ou com revestimento plástico (como é o caso dos poços do lixão) pode não funcionar com a presença de metais ao longo do perfil. Com a perfilagem dos poços 28 e 31, começaram a manifestar-se comportamentos aparentemente anormais nos registros tanto da condutividade como da resistividade. Como não sabíamos os reais motivos que levavam a aqueles comportamentos demos por encerrada a etapa de perfilagens, com o objetivo de pesquisarmos as causas e possíveis soluções para o problema. Para a segunda etapa tínhamos as informações de que o metal presente no lixo realmente é muito mais do que suficiente para inviabilizar as medidas nos níveis em que este estivesse presente. Além dessa informação, experimentamos utilizar um “peixe”, um aterramento, em torno de cada poço amostrado na tentativa de minimizar os efeitos dos metais. O resultado não foi nada animador. Dois meses após a primeira etapa de levantamentos, a segunda etapa revelou perfis de valores e comportamentos rigorosamente iguais, a não ser no caso da temperatura que, dada a sazonalidade, apresentava, em alguns poços, medidas diferentes.

Observe na foto número 3 a perua com os equipamentos de perfilagem na ocasião dos levantamentos. Note sendo carregada a ferramenta conjunta Indução, raios gama e temperatura. Observe também o recalque do lixo provocando a aparente elevação da lage de proteção sanitária do poço de monitoramento (poço 30).

O resultado prático das perfilagens são a determinação do acamamento dos sedimentos atravessados pelos poços que foram perfilados, ou seja, obtém-se o perfil litológico local.

Essa atividade de leitura dos resultados das ferramentas é bastante interpretativa. Procuramos sempre somar informações disponíveis quanto ao meio físico local, aquelas que já foram descritas em outros trabalhos e mesmo outras que levantamos. A interpretação dos perfis não é exata, mas é uma maneira de buscar informações em subsuperfície. Muitas vezes são necessários inúmeros retornos ao material já estudado e já preparado para que se possa verificar se os novos modelos, oriundos de novas informações que vão surgindo com a própria interpretação do conjunto de perfis, não são mais adequados do que os antigos.

O resultado da interpretação que demos aos perfis da perfilagem geofísica dos poços do lixão podem ser avaliados no conjunto das Figuras de número 49 a 66 que seguem.

Figura 48- Equipamento de perfilagem geofísica de poços

3.4.1 Acamamentos siltsos e/ou argilosos

O principal resultado que pudemos obter com a interpretação dos perfis, foi a descoberta de acamamentos siltsos e, as vezes, argilosos que tem ocorrência bastante penetrativa em toda a região. Esses acamamentos siltsos foram observados durante a perfuração dos diversos poços de monitoramento mas a sua penetratividade não estava confirmada. As condições insalubres, muitas vezes, do material perfurado, as vezes rico em chorume e com terrível mau cheiro, provavelmente inviabilizaram algumas manipulações dos

materiais perfurados e, assim, o correlacionamento entre os diversos poços ficara muito prejudicado devido a falta de informações.

FREITAS (1996) descreveu as amostras de calha das perfurações. O poço 31 não apresenta descrição das litologias. Referências às litologias dos poços 32 e 33 são feitas em termos de cores (material (sic) negro, amarelado ou amarelo acinzentado). Em FREITAS (1995), encontra-se, a respeito do poço 30: “Até aproximadamente 10 metros a cor da formação é fortemente influenciada pela infiltração do chorume... ...A partir de 13,5m aparece um material muito fino, de granulometria silte/argila, de cor branco puro”.

Esses materiais, como siltes e argilas, são constantemente descritos nos diversos perfis como pequenos acamamentos, por vezes centimétricos.

Ainda segundo FREITAS (1996), os poços foram construídos com a seguinte orientação: “De um modo geral os poços foram perfurados 6m abaixo do nível estático e foram utilizados quatro metros de filtro, deixando um metro entre a base do filtro e o fundo do poço perfurado. O primeiro filtro foi sempre colocado um metro abaixo do nível estático. O espaço entre o revestimento e filtros e a formação foi preenchido com pré-filtro até um metro acima do N.E. aproximadamente. Sobre o pré-filtro foi feito um selo de bentonita de um metro de espessura, e acima deste, depositado o material da própria formação. Nos poços construídos no “lixo” o procedimento seguido foi colocar o filtro três metros abaixo do contato entre o depósito e a formação, independente da altura do N.E., se este último alcançasse os resíduos. Foi adicionado um selo de cimento no contato da base do “lixo” aterrado com a formação, além do selo de bentonita”.

O conhecimento desse procedimento somado a análise dos perfis construtivos dos poços durante a fase de interpretação das perfilagens, nos fez depararmos com o seguinte problema: muitas das curvas oriundas da ferramenta de raios gama, especialmente as anomalias gama a serem tratadas como acamamentos mais siltosos ou argilosos, poderiam não ser nada mais do que a leitura, pela ferramenta, da radiação emitida pelas bentonitas dos selos de proteção; de fato, isto ocorre.

A questão era diferenciar as influências das bentonitas das radiações naturais dos sedimentos do meio físico do lixão. Graças ao detalhamento das informações oferecidas em FREITAS (1996) e a coincidência de, das quatro análises granulométricas dos sedimentos de poços executadas naquele trabalho, uma delas, em um poço praticamente completamente arenoso, a amostra tomada para análise foi justamente a de um nível siltoso/argiloso e que, por sorte, não tem sua posição disfarçada pelo selo de bentonita, que situa-se metros abaixo (poço 24). Essa análise granulométrica nos evidencia as características que poderemos

considerar como médias para estes acamamentos siltosos (dada a comparação feita em termos de emissões de radiação gama): argilas 23,35%; silte 54,11%; areia fina 29,29%; areia média 8,28% (poço 24). Por sua vez, a análise de uma amostra que representa bem as seqüências arenosas mais contínuas e espessas nos informa: argilas 17,71%; silte 27,67%; areia fina 48,80%; areia média 8,48% (poço 23).

Uma característica dos selos de bentonita é que eles dão, via de regra, registros de baixas resistividades e altas condutividades (obviamente) (esta característica física que é a resistividade é na prática (na perfilagem) utilizada conjuntamente com o seu inverso, que é a condutividade, para que sejam mais visíveis as variações da mesma, que, graficamente, ficam evidenciadas) formando aspectos facilmente reconhecíveis nas curvas, o que não ocorre com freqüência (porém não é regra), como observamos, nos sedimentos siltosos/argilosos do meio físico do lixão.

Um problema enfrentado foi o freqüente faceamento entre os selos de bentonita e as camadas siltosas naturais. Muitas vezes o deslocamento da posição do selo de bentonita do evento completo de anomalia gama, possibilitaram a identificação das mesmas, que estariam, de outra forma, mascaradas. Outra característica interessante desse faceamento é que os registros das radiações gama se referem a somatória das radiações captadas pelo sensor (cintilômetro) e, então, nestas situações, as anomalias gama mostram-se anormalmente grandes, como pode ser observados nos poços 16, 31, 32 e 33. Esse comportamento serviu-nos para, inclusive, identificar o faceamento do selo de bentonita com camadas siltosas, onde, havendo coincidência absoluta entre suas posições relativas, essa determinação, de outra forma, seria impossível (como é o caso no poço 16, onde os sedimentos como um todo já emitem muita radiação gama).

O faceamento, aparentemente acima do normal, entre o selo de bentonita e as camadas siltosas/argilosas nos poços 30, 31, 32 e 33 tem, entretanto, razões simples. O modo como foram construídos os poços relativizava toda a atividade de perfuração e completação dos mesmos, em termos de tamanhos e profundidades, ora com o nível d'água ora com a profundidade do contato lixo/sedimentos. No caso dos poços perfurados no lixo os filtros eram colocados três metros abaixo do contato. O pré filtro era colocado do fundo do poço até entre 1 e 1,4 metros acima do topo do filtro. O selo de bentonita, finalmente, foi colocado sobre o pré-filtro em espessuras que variaram entre 1,20 e 1,47 metros. Operacionalmente os poços foram perfurados da seguinte maneira: Um trado rosca mecanizado perfurava o sedimento seco e no máximo com alguma umidade até que não fosse mais possível arrastar material para a superfície (por desmoronamento e falta de coesão do sedimento molhado, que

escorria). Dias depois uma sonda de fundações terminava o serviço, pois com caçambeamento, era capaz de perfurar e colher o material molhado.

Em muitos poços foi observado artesianismo, após a segunda etapa de perfuração, como pode ser visto nos comentários sobre os níveis estáticos variáveis em vários poços, como os 15, 16, 17, 18, 27, 28, e 29 em FREITAS (1995), indicando claramente a presença de confinamento e, como causas, camadas confinantes.

O lixo foi instalado dentro de uma boçoroca. Uma boçoroca somente evolui, a partir de uma simples erosão, quando o nível de base é atingido e as paredes da erosão não mais se sustentando, desmoronam formando superfícies de alta inclinação. Esse nível de base poderia ser tanto devido a superfície piezométrica regional, no caso de o aquífero ser livre ou, como acreditamos, ser devido a um aquífero suspenso sustentado pelos sedimentos siltosos/argilosos que seriam as mesmas camadas confinantes que, em cotas menores, provocam o artesianismo. Daí os poços do meio do lixo apresentarem a surpreendente coincidência entre selos de bentonitas e formações de areias siltosas e/ou argilosas: o posicionamento dos filtros, do pré filtro e do selo de bentonita (além de concretagem) foi em função da profundidade da base do lixo que por sua vez, é naturalmente em função da profundidade das camadas mais siltosas.

Foram construídos perfis para possibilitar a visualização dos acamamentos existentes. Estes perfis são, entretanto, assim como são os resultados das perfilagens, interpretativos. Essencialmente acamamentos mais e menos siltosos intercalam-se sendo que a presença dos últimos é muitíssimo maior. As camadas siltosas possuem dimensões decimétricas e, no máximo métricas. Para apreciá-los, observe-os nas Figuras 67, 68, e 69. Os perfis não são retilíneos em planta; eles ligam os poços que ficam nos vértices. Foi utilizada uma sobrelevação 10 e mostra-se o modelo sem sobrelevação, igualmente, na mesma figura. As camadas que parecem espessas e inclinadas não o são. A inclinação das camadas no local é, aproximadamente, pouco superior a dois graus, na direção dos perfis.

3.4.2 Anomalia gama no corpo do lixo

Somente a título de registro, pois foge completamente a alçada do presente trabalho, foi constatada na perfilagem do poço de número 30 a cerca de 4,65 m de profundidade, uma anomalia de radiação gama dentro do corpo do lixo, que registrou 450 unidades gama API. As perfilagens gama dos diversos outros poços em redor do poço 30 não apresentam nada de

anormal. A comparação do comportamento dessas curvas pode ser feito observando-se o gráfico da Figura 70 .

Observamos que as argilas médias continentais, utilizadas para a construção dos poços de calibração das ferramentas em unidades API, possuem 6 ppm de urânio, 12 ppm de tório e 2% de potássio 40 e registram uma radiação gama de 100 API e o concreto utilizado no mesmo poço de calibração foi enriquecido com 12 ppm de urânio, 24 ppm de tório e 4% de potássio 40 para, em uma escala centígrada, registrar 200 API.

Entretanto essa fonte radioativa não deve provocar efeitos danosos em superfície dado que a radiação gama é contida paulatinamente ao atravessar os diversos materiais. Uma camada de argila de poucos metros de espessura tem essa capacidade. Além disso não se registram radiações gama altas a mais de um metro do ponto 4,65 m, tanto acima quanto abaixo.

Figura 49 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 15 (julho de 1998)

Figura 50 - Perfisagens geofísicas e perfil geológico Poço 16 (julho de 1998)

Figura 51 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 17 (julho de 1998)

Figura 52 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 18 (julho de 1998)

Figura 53 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 19 (julho de 1998)

Figura 54 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 20 (julho de 1998)

Figura 56 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 23 (julho de 1998)

Figura 57 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 24 (julho de 1998)

Figura 58 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 25 (julho de 1998)

Figura 59 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 26 (julho de 1998)

Figura 60 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 27 (julho de 1998)

Figura 61 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 28 (julho de 1998)

Figura 62 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 29 (julho de 1998)

Figura 63 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 30 (julho de 1998)

Figura 64 - Perfis geofísicas e perfil geológico Poço 31 (julho de 1998)

Figura 65 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 32 (julho de 1998)

Figura 66 - Perfilagens geofísicas e perfil geológico Poço 33 (julho de 1998)

Figura 67 - Perfil geológico entre os poços 27 e 21 baseado em informações obtidas com a perfuração geofísica de poços e revisão de trabalhos executados no local.

Figura 68 - Perfil geológico entre os poços 29 e 20

Figura 69 - Perfil geológico entre os poços 28 e 33

Perfilagem Gama (NAT) dos poços circunvizinhos
ao poço 30 e deste inclusive

Figura 70 - Anomalia gama observada aos 4,65 m de profundidade no poço 30 e os registros gama de todos os demais poços que o circundam.

3.5 Caminhamento elétrico

Durante as operações de instalação de infraestrutura para a continuidade dos estudos na região do lixão, após o trabalho de MENEZES (1995), foi realizado por FREITAS (1996) e GADOTTI (1997), com apoio técnico e logístico do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP de Rio Claro, uma série de seis caminhamentos elétricos com arranjo dipolo-dipolo.

Estes ensaios geofísicos tiveram sentido NE-SW ou E-W (linha 3). O espaçamento dos eletrodos foi de dez metros e a profundidade de investigação atingiu 30 metros. O comprimento máximo atingido por um caminhamento foi de 200m (linha 1) e os demais tiveram as seguintes dimensões: 110m (linha 2), 140m (linha 3), 150m (linha 4), 160m (linha 5) e 120m (linha 6). Sua distribuição espacial está registrada no mapa de resistividades aparentes, Figura 71.

O mapa de resistividades aparentes foi construído utilizando-se as resistividades aparentes de todos os pontos de amostragem do caminhamento elétrico do nível 20m. Esse nível foi escolhido pois em todas as seções de resistividade ele demonstrou alguma contaminação. Perceba que este mapa é a representação do nível de 20m de profundidade a partir da superfície topográfica, sendo, então, uma superfície inclinada paralela a esta.

Duas interpretações das seções de resistividade aparente foram executadas, uma por FREITAS (op. cit.) e outra por GADOTTI (op. cit.). Procurando extrair novos elementos, desses caminhamentos elétricos, de modo a podermos relacioná-los com as diversas outras atividades que executamos em nosso trabalho, demos, conjuntamente com ELIS (1999)¹, novo tratamento aos dados.

Os resultados podem ser apreciados tomando-se em mãos perfis que encontram-se nas Figuras 72 a 77.

Foram colocados, nas seções de resistividade aparente, o posicionamento dos poços de monitoramento em relação as linhas e, no caso do poço 33, foi aproveitada sua proximidade da linha para que pudesse somar-se aos elementos de análise, porém, estritamente, esse poço não está contido na linha do caminhamento elétrico.

A barrinha horizontal que se vê nas representações dos diversos poços são o posicionamento aproximado do nível estático, medido nos mesmos.

---

¹ ELIS, V.R. (1999). (USP, Instituto Astronômico e Geofísico - São Paulo) *Pessoalmente*.

Mapa das resistividades aparentes (ohm.m)
do nível 20m de profundidade

Legenda

⊕ Piezômetros ou poços de monitoramento

● Pontos da linha de caminhamento elétrico

Região a desconsiderar

Limites dos corpos do lixo

Norte da quadricula

Figura 71 - Mapa de resistividade aparente do nível 20 m de profundidade

3.5.1 Interpretação das seções de resistividade aparente

As linhas de caminhamento elétrico cruzaram transversalmente o corpo do lixo. Percebe-se como as suas laterais já mostram um aumento nas resistividades aparentes, indicando que as zonas mais críticas foram cruzadas em toda a sua largura. Isso demonstra que não pode ser percebido nenhuma espécie de deslocamento expressivo para fora, a partir dos centros das seções, ou seja, não se observa fluxo vultoso de água subterrânea, no sentido saindo do corpo do lixo, na direção das linhas de caminhamento, ou seja, NE-SW ou mesmo E-W.

Figura 72 - Seção de resistividade aparente - linha 1

Observando-se as seções percebe-se que não há diferença significativa, verticalmente, entre as resistividades das porções ocupadas pelo lixo, das zonas imediatamente inferiores, que seriam as zonas de percolação e as zonas saturadas. Na verdade as resistividades aparentes mostram uma leve tendência a diminuir com a profundidade, nas seções das linhas 1, 2, 3 e 4 (Figuras 72, 73, 74 e 75)

Figura 73 - Seção de resistividade aparente - linha 2

A situação, entretanto, nas linhas 5 e 6 (Figuras 76 e 77) é radicalmente diferente. Já se observa que as zonas de menores resistividades estão mais elevadas nestas seções. São desta forma diferentes basicamente por um motivo: a distância entre as linhas 4 e 5 é aproximadamente duas vezes maior do que as observadas entre quaisquer outras linhas adjacentes. Isso é devido ao fato de não ter sido realizado ensaio geofísico no local, pois este mesmo local, na ocasião da realização dos ensaios, estava em operação de colocação de lixo, inviabilizando a atividade.

Uma linha de caminhamento elétrico entre as linhas 4 e 5 certamente mostraria uma transição entre as mesmas.

Figura 74 - Seção de resistividade aparente - linha 3

Não se deve esquecer que a resistividade aparente é uma somatória das resistividades de todos os materiais que se encontram em subsuperfície e não somente da água subterrânea.

A explicação para as resistividades aparentes estarem menores, em zona mais superficial, na região dos poços a jusante do lixão, poderia dever-se a, basicamente, dois fatores: o fato do nível d'água estar muito mais próximo da superfície e/ou as concentrações de íons na água subterrânea, que quanto maiores, menores fariam as respostas em termos de resistividade aparente. Ocorre que, cruzando essas informações com as das análises químicas, verificamos que não há esse relacionamento direto entre concentração de íons (aqui oriundos de sais, como os cloretos e os bicarbonatos) e as pequenas resistividades aparentes verificadas nas seções. Observa-se que os poços 25 e 26, por exemplo, possuem concentrações de cloretos bastante superiores àquelas dos poços 30 e 31, assim como a condutividade das suas águas são bem maiores e, apesar disso, não é possível ser feita uma correlação com as resistividades aparentes do caminhamento elétrico. Conclui-se do exposto que as resistividades aparentes observadas na zona sob o lixo são resultado da interação entre o meio físico, com suas camadas mais ou menos arenosas, siltosas e argilosas, com o lixo e os fluidos percolados, sendo que o lixo é muitíssimo determinante para essas pequenas resistividades.

Percebe-se que, para o caso do lixão, o lixo, o percolado e suas interações imediatas com o meio físico, são muito mais determinantes para a ocorrência de baixas resistividades aparentes determinadas pela técnica do caminhamento elétrico do que as águas contaminadas pelo mesmo e suas interações com o meio. SCHALCH (1992)² apud MENEZES (1995), observou (em termos de condutividade) que a resistividade do percolado, nos aterros experimentais que estudou, ficou entre 0,23 e 0,41 ohm/m. Isso demonstra que a água subterrânea mesmo para as regiões muito próximas do corpo do lixo, como é o caso do poço 25, sofre intenso processo de filtragem e atenuação dos seu contaminantes ao migrar através dos sedimentos locais. Os sais solúveis, como cloretos e bicarbonatos (que se expressam aqui em termos de alcalinidade), teriam, entretanto, muito maior facilidade de migração e devem ser considerados bons traçadores das frentes mais avançadas das plumas de contaminação.

A presença de grandes quantidades de metais nos lixões devem ser consideradas, igualmente, como fatores de grande diminuição da resistividade de lixões. As respostas, por exemplo, da ferramenta de indução, da perfilagem geofísica de poços, respondem registrando fundo de escala quando a ferramenta está face a face com o lixo, ou seja, são porções muitíssimo pouco resistivas.

FREITAS (1996) conclui que, tendo feito análises granulométricas no poço 24 (mais a montante) e no poço 27 (mais a jusante), nas porções mais topograficamente superiores predominam solos de granulometria silte (54,11%) enquanto que na porção junto a descarga do chorume são as frações areia fina e areia média em igual importância (em torno de 30% cada). Para que possamos concluir nossa interpretação a respeito das seções de resistividades aparentes, temos que esclarecer o seguinte: com base nas perfilagens geofísicas que realizamos no local, pudemos constatar que a amostra tomada para análise granulométrica foi tomada justamente no nível mais silteoso de todo o perfil e que, considerando os perfis como um todo, o que se observa é rigorosamente o contrário: Os sedimentos onde foram perfurados os poços 26, 27, 28 e 29, são mais silteosos e, às vezes, bastante mais silteosos do que os do poço 24, e mesmo do que os dos poços 20, 21, e 23.

---

² SCHALCH, V. (1992). *Análise do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Seção de resistividade aparente (ohm.m) - Lixão de São Carlos Linha 4

Figura 75 - Seção de resistividade aparente - linha 4

Listamos alguns fatos: a) esses sedimentos mais próximos a descarga do chorume, sendo mais siltsosos, possuem menor condutividade hidráulica; b) ocorre no local, uma diminuição do gradiente hidráulico; c) os sedimentos da região, sob o lixão, estão dispostos em um acamamento onde se alternam camadas mais ou menos siltsosas de maior ou menor espessura, algumas delas com muita penetratividade, sendo que uma camada mais siltsosa é constatada em quase todos os poços, justamente aquela analisada granulometricamente por FREITAS (op. cit.); d) foi identificada, através de sondagem elétrica vertical, em cotas menos elevadas na região do lixão, em profundidade, o que seria subjacentemente aos acamamentos de sedimentos aqui tratados, uma camada de alta resistividade, com vários metros de espessura que estamos interpretando como sendo um arenito silicificado ou um sill de diabásio; e) o lixão foi instalado em uma boçoroca e sabidamente, esta evoluiu a partir de uma erosão simples e tomou sua forma final após as encostas da mesma terem se aprofundado até o nível de base. Verificando os perfis geológicos construídos a partir das perfilagens geofísicas executadas nos poços, percebe-se que o corpo do lixo está assentado sobre a camada siltsosa mais penetrativa atravessada pelos poços, ou seja, nível d'água era, como atualmente, superior ao topo dessa camada mais siltsosa; f) a região da descarga de chorume é o limite entre a zona de recarga e a zona de descarga.

Figura 76 - Seção de resistividade aparente - linha 5

Traçamos esse panorama para sugerir que a somatória desses diversos fatores, especialmente a siltosidade crescente com conseqüente diminuição da condutividade hidráulica, a diminuição do gradiente hidráulico e a aproximação da superfície topográfica em sentido ao nível freático e às camadas mais impermeáveis ao fundo, promovem um acúmulo de água no local, em subsuperfície, fazendo que o nível d'água não somente seja, naturalmente, percebido como mais alto, em relação a superfície do terreno, mas também que os percolados e as águas mais contaminadas, que encontravam-se em profundidades maiores (seções de resistividade aparente 1, 2, 3 e 4) aproximem-se da superfície topográfica, fazendo-se registrar nas seções de resistividade aparente de número 5 e 6 como menores resistividades. A continuação desse processo em sentido a jusante da bacia faz que essas águas, naturalmente, como observado, aflorem, bastante contaminadas.

Acreditamos na possibilidade de que a água que chega ao lixão, proveniente das microbacias a montante do mesmo somadas as águas meteóricas conjuntamente com as águas armazenadas do aquífero, tendo uma velocidade horizontal muitíssimo maior do que a vertical (dada a presença das barreiras siltosas e da rocha resistiva) possam aflorar quase que, senão totalmente, na zona de descarga do chorume na forma de escoamento superficial. Se isso fosse verdade, estaria descartada a possibilidade de contaminação do aquífero profundo, que praticamente não ocorreria no local.

Seção de resistividade aparente (ohm.m) - Lixão de São Carlos Linha 6

Figura 77 - Seção de resistividade aparente - linha 6

3.6 Sondagens Elétricas Verticais

Realizamos na região do lixão de São Carlos uma série de sete sondagens elétricas verticais com o apoio do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP de Rio Claro e com coordenação técnica e operacional de ELIS (1999)¹.

Há, na região do lixão de São Carlos, relativa abundância de informações a respeito da geologia e das características hidrogeológicas locais, entretanto, entendemos por bem realizar tais sondagens para vir cobrir algumas lacunas que eram encontradas; citamo-las:

a) obtenção do nível d'água nas regiões das cristas a sudoeste (SW) do lixão e no vale do córrego São José a noroeste (NW) do mesmo, nas duas possíveis localizações do rumo do fluxo da pluma de contaminantes. Estes diferentes rumos foram sugeridos pelos trabalhos de GONÇALVES et. al. (1992), que determinou o sentido NW, e GADOTTI (1997) e MATSUZAKI (1998) que afirmaram este rumo ser SW.

b) levantamento das características da geologia de subsuperfície. A região, sendo palco de contatos entre rochas como os arenitos da Formação Botucatu, que sustentam as escarpas na região, e as rochas básicas da Formação Serra Geral, é muito interessante, pois desses fatores e de outros talvez ainda não revelados, nascem situações como o artesianismo na região (poço tubular profundo artesianismo jorrante do posto Rubi - Graal).

Os dois objetivos foram alcançados. Foram frutos destas sondagens:

- a) um mapa piezométrico de escala intermediária aos apresentados nos trabalhos de GONÇALVES (op. cit.) e de MATSUZAKI (op. cit.);
- b) perfis geológicos de subsuperfície, das regiões da crista e do vale;

3.6.1 Mapa piezométrico

O mapa piezométrico foi feito considerando-se que as águas de subsuperfície do lixão estão contidas no aquífero Botucatu, na sua porção livre (não confinada). Para somarem-se aos dados, juntamos informações dos níveis d'água dos poços do lixão, vários pontos de água superficial, nos rios da região, e as sondagens elétricas verticais (SEV).

Este mapa (vide Figura 78) vem confirmar que, para a região estrita do lixão a água subterrânea contaminada pelo mesmo flui em direção ao córrego São José, corroborando o

¹ ELIS, V.R. (1999). (USP. Instituto Astronômico e Geofísico - São Paulo) *Pessoalmente*

MAPA PIEZOMÉTRICO

Legenda

Equidistância das curvas de nível piezométrico: 5m

- ◆ Poços tubulares profundos
- + Pontos de medidas de nível nos rios
- ▼ Sondagens elétricas verticais - SEV
- ◆ Piezômetros ou poços de monitoramento
- Rodovia
- Estradas de terra
- Drenagens principais
- Corpo principal do lixão

Norte da quadrícula

Baseado nos mapas IGC folhas
SF-23-Y-A-I-1-NE-(C, D, E e F) de escala 1:10.000

Figura 78 - Mapa piezométrico da região do lixão de São Carlos (com localizações das sondagens elétricas verticais).

levantado por GONÇALVES (op. cit.). Percebemos que, como se trata de aquífero livre, conforme o tamanho da região a ser analisada, poderíamos dar inúmeros sentidos ao fluxo de água subterrânea proveniente do lixão dependendo de que ponto em diante no caminho percorrido pelo fluxo tomássemos o seu rumo. Na ordem de grandeza do tamanho do corpo do lixo, o fluxo seria NW; ao atingir o vale do córrego São José, o fluxo passaria a ter um rumo

WNW, e assim por diante, ou seja, conforme as superfícies piezométricas das regiões. Rumaria, se persistente fosse, em sentido ao rio Jacaré Guaçu (aí para SW) e assim sucessivamente.

Geologicamente, consideramos principalmente duas possibilidades: a primeira (nº 1) é a de que as altas resistividades aparentes observadas em diversas sondagens (especialmente as de número 3 e 7) serem devidas ao posicionamento das mesmas na área de influência do cone de depressão formado pelo poço tubular profundo do posto de combustíveis Castelo, na rodovia Washington Luís (no mapa poço número 2). Essa proximidade com o referido poço pode fazer que os sedimentos mais superficiais, ainda que originalmente fossem saturados e condutivos, atualmente estejam secos e resistivos, devido ao rebaixamento do aquífero localmente. Estes níveis atuais, nas duas sondagens (3 e 7) estariam então a, aproximadamente 12m e 9m respectivamente. Esta informação é condizente com o nível estático do poço tubular profundo do motel Maxim's, também na rodovia Washington Luís (no mapa poço número 1), onde o nível estático é de 12m. Fica, desta forma explicado o nível profundo da superfície piezométrica observado no referido mapa no local das sondagens de número 3 e 7. Praticamente, a água do córrego São José estaria localmente contribuindo para a recarga do aquífero, mais especificamente, àquela porção explorada pelo poço tubular profundo do posto Castelo.

A segunda possibilidade (nº 2) é de que os níveis d'água nestas sondagens sejam quase superficiais devido a existência de aquíferos suspensos limitados em sua base por camadas de rochas altamente resistivas, como os arenitos silicificados. Neste caso, o nível estático do poço tubular profundo do motel Maxim's, seria aquele do aquífero explorado e não do aquífero mais superficial. A presença destas rochas, em alguma profundidade, pode também ser sugerida pela ocorrência de artesianismo no poço tubular profundo do posto Rubi-Graal situado a 1 Km de distância, que foi perfurado exclusivamente no arenito Botucatu.

3.6.2 Perfis geológicos

Com base nas resistividades aparentes do meio físico em subsuperfície foi possível traçar os seguintes perfis geológicos (Figuras 79, 80 e 81). Eles não são retilíneos em planta mas contém os diversos pontos de sondagem nos vértices e nas pontas.

O primeiro perfil geológico que apresentamos contém as sondagens de número 4, 5, 6, e 7. Este foi contruído com base na possibilidade nº1, de que as altas resistividades dos

sedimentos nas sondagens 3 e 7 sejam devidas ao nível d'água estar artificialmente deprimido pela exploração pelo poço tubular profundo do posto Castelo. O acunhamento sugerido para o possível sill de diabásio é a explicação para a sua não constatação durante a perfuração dos dois poços tubulares profundos (de número 1 e 2 no mapa) e igualmente a presença de camada de rocha resistiva em profundidade nas posições das sondagens de números 4, 5 e 6, em região em que os níveis d'água são nitidamente pouco profundos (da ordem de 4, 2 e 3,5 m de profundidade, respectivamente - levando-se em conta esta possibilidade nº 1).

Considerando-se ainda a possibilidade nº 1, não apresentamos o perfil geológico das sondagens de número 1, 2 e 3 por não haverem elementos de relevância para serem exibidos graficamente, já que apresentariam-se como sedimentos arenosos em quase sua total extensão com acamamentos infinitamente representados em sua espessura, além de não penetrativos, de outros materiais (como areno-argilosos).

Figura 79 - Perfil geológico - SEV 7, 6, 5 e 4 - Possibilidade nº 1

Figura 80 - Perfil geológico - SEV 3, 2 e 1 - Possibilidade n° 2

Os perfis foram feitos utilizando-se, além do já explicitado, informações geológicas que possuíamos em superfície, como é o caso da ocorrência do diabásio no perfil da Figura 80 - Perfil geológico - SEV 3, 2 e 1 - Possibilidade n° 2, que não foi detectado pela sondagem (a sondagem não foi executada sobre o corpo desta rocha), e de outras informações de subsuperfície. Sabíamos que os poços tubulares profundos perfurados na região eram essencialmente perfurados no aquífero Botucatu, entretanto, nenhum perfil construtivo dos poços (pois muito incompletos) citou a ocorrência de arenito silicificado em suas perfurações. Demos esta interpretação, aos perfis da possibilidade n° 2, devido a ocorrência de arenitos silicificados na região, somada a ocorrência de artesianismo no poço tubular profundo do posto Rubi-Graal e as altas resistividades das camadas pesquisadas que, na situação de

entorno que se encontram, somente poderiam ser de duas naturezas: arenito silicificado ou diabásio. Não está descartada a possibilidade do último ser a rocha resistiva em que encontramos em profundidade, mesmo no caso da possibilidade nº 2 que, no entanto, sinalizamos como sendo arenito silicificado. Esta rocha, igualmente, não foi detectada nos poços tubulares profundos, porém a presença de diabásio nos poços seria digna de nota, ao contrário do arenito silicificado que, do modo incompleto como são descritos os perfis geológicos de poços tubulares profundos, constariam, sem maiores considerações, no conjunto “arenitos da Formação Botucatu”.

Figura 81 - Perfil geológico - SEV 7, 6, 5 e 4 - Possibilidade nº 2

FREITAS (1996), informa que o poço de monitoramento do lixão de número 22 não foi completado por causa de encontrarem, em profundidade “rocha dura, impedindo o prosseguimento dos trabalhos de perfuração” e “de 9,5 a 11,6m de profundidade “rocha resistente, provável arenito Botucatu silicificado”.

As curvas de campo e os modelos interpretados das sondagens elétricas verticais para as duas possibilidades propostas podem ser avaliados no Anexo 2.

Aproveitamento das águas subterrâneas - Poços tubulares profundos

Praticamente, caso seja confirmada a possibilidade nº 2, consideramos que esta possível camada de arenito silicificado venha a dar suporte a um aquífero suspenso na região e toda a região pantanosa das margens do córrego São José, estaria sobre esta rocha. Caso isto se confirme como sendo verdade, o lixão de São Carlos poderia não estar contaminando o aquífero profundo e, suas águas contaminadas escoariam superficialmente. Da mesma forma, caso fosse necessário, pode ser que as águas subterrâneas encontradas a profundidades maiores do que a base desta rocha sejam perfeitamente potáveis.

Caso seja confirmada a possibilidade nº 1, da mesma maneira haveria alguma proteção ao aquífero profundo, apesar de, nesta possibilidade, a penetrabilidade da camada impermeabilizante ser menor, dado ao possível acunhamento do suposto sill de diabásio na região compreendida entre as sondagens 6 e 7.

Poços tubulares profundos poderiam ser construídos para utilização das águas dos aquíferos mais profundos. Estes poços, entretanto, não podem ser construídos de modo a não considerar a possível contaminação que os mesmos possam levar às águas subterrâneas profundas, pois, mal construídos, poderiam servir de dutos para a contaminação descer às zonas profundas. Deveriam ser revestidos com tubos de PVC do tipo Geomecânico, de grande espessura e resistência (as maiores disponíveis no mercado) e o espaço anular deveria ser cimentado de modo a isolar as águas mais superficiais. A perfuração deveria ser executada por profissionais extremamente capacitados e rápidos de modo a evitar que durante o processo de construção a contaminação ocorra. A escolha do fluido de perfuração deve levar em consideração a possibilidade de reações do mesmo com os contaminantes provenientes do lixão, especialmente cloretos e bicarbonatos. É possível que os melhores fluidos de perfuração para uma situação como esta sejam realmente aqueles a base de bentonita, descartando o uso dos polímeros orgânicos. A perfuração com sonda rotopneumática (ar comprimido), mesmo que somente seja capaz de perfurar as camadas mais superficiais, devido a inconsistência do material em profundidade, não deve ser permitida em nenhuma hipótese dado que a perfuração não causaria nenhum tipo de constrangimento ao fluxo vertical de água e certamente levaria a contaminação às regiões inferiores.

Não poderão haver poços abandonados, sem manutenção. Ao fim da vida útil de um poço como este ele deveria ser completamente cimentado ou utilizar técnicas ainda mais avançadas de tamponamento.

4. Conclusões

Os dados levantados a partir dos trabalhos realizados na região do lixão, nos permitem chegar as seguintes conclusões:

a) Existem em profundidade, sob o corpo do lixo e provavelmente em toda a microbacia do lixão ao pé das escarpas, em profundidade, acamamentos que se alternam entre arenosos puros e areno siltosos ou mesmo até argilosos. Esses acamamentos areno siltosos possuem espessuras que variam de decímetros a metros. A própria boçoroca onde instalou-se o lixão deve ter atingido o nível de base que, provavelmente, apoiava-se sobre estes sedimentos. O corpo do lixo, devido a essa situação, estaria assentado sobre um acamamento areno siltoso. Isso possibilitaria, talvez, uma proteção ao risco de contaminação dos aquíferos profundos, fazendo com que a água subterrânea contaminada pelo lixão escoasse quase, senão totalmente, na forma de escoamento superficial, vindo contaminar muito pouco as águas subterrâneas, porém muito contaminando as águas do córrego São José e, em consequência, as da bacia do ribeirão do Feijão. Esses fatos foram levantados através de análises granulométricas e amostragens de solo já realizadas ^{antes} trabalhos anteriores e a partir de perfilagem geofísica de poços, que aplicamos aos poços do lixão;

b) Existe, em profundidade, uma camada ou diversos acamamentos paralelos de rocha bastante resistiva que sinalizamos com duas possibilidades: constituírem-se de arenito silicificado ou de sill de diabásio. Se esta existência for confirmada e for determinada sua penetrabilidade, este seria um fator de proteção das águas subterrâneas do aquífero profundo.

Os acamamentos de rocha em questão foram detectados através da técnica de sondagem elétrica vertical;

c) Quanto a perfilagem geofísica de poços acreditamos que ela deve ser usada, sempre que possível, antes da completação de poços de monitoramento como os do lixão. Isso porque, as normas técnicas de construção de poços de monitoramento sugerem que sejam seladas as

porções contaminadas e a bentonita é utilizada para esse fim. Ocorre que a bentonita responde a perfilagem geofísica de poços, especialmente na ferramenta raios gama, como se fosse parte integrante das formações geológicas, prejudicando a interpretação.

Obviamente a utilização dessa ferramenta anteriormente a completação dos poços pode ser utilíssima, senão fundamental, para somar elementos aos dos projetos dos poços, como, por exemplo, a determinação do posicionamento das seções filtrantes;

d) A contaminação do aquífero até as profundidades atingidas pelos poços do lixão foi, mais uma vez, confirmada. O sentido do fluxo das águas subterrâneas no local é, de fato no sentido do escoamento das águas superficiais dado que o aquífero contaminado pelo lixão é, principalmente, livre e a zona onde o lixão se posiciona é no limite entre a zona de recarga e de descarga do aquífero local;

e) Os mapas geológicos, em geral, apresentam nas posições das escarpas, rochas da Formação Serra Geral. Elas realmente existem no local, sotopostas ou intrudidas nos arenitos da Formação Botucatu, ou mesmo entre estes e os do Grupo Bauru. Porém estas escarpas são sustentadas, na verdade, por arenitos silicificados da Formação Botucatu.

6 Referências bibliográficas

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1985) NBR 8419 - Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro - RJ.
- BARTH, F. T. (1987). Fundamentos Para Gestão de Recursos Hídricos. In: Modelos Para Gerenciamento de Recursos Hídricos - Coleção ABRH de Recursos Hídricos- Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BLUNDI, C. E. (1996). Roteiros de laboratório, da disciplina técnicas experimentais em saneamento ambiental - Departamento de hidráulica e saneamento - EESC - USP
- BOSSOLAN, N.R.S. (1993). Aspectos ecológicos das populações bacterianas em águas subterrâneas sob efeito de um aterro controlado - São Carlos - SP. São Carlos. 120p. Dissertação (mestrado) - Centro de ciências biológicas e da saúde, UFSCar.
- BRANCO, S. M. (1984). Limnologia Sanitária, Estudio de La Polucion de aguas Continentales. Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos - Programa de Desarrollo Científico y Tecnológico - Washington, D.C.
- BRANCO, S. M. (1991). Caracterização e Alterações da Qualidade da Água. In Hidrologia Ambiental, Rubem La Laina Parto (org.). - Editora da Universidade de São Paulo - Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- CETESB (1974) - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Água Subterrânea e poços tubulares tradução de Ground water and wells - UOP Johnson division, Saint Paul, Minnesota. São Paulo - SP.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (/198_/). Norma P 4.241 - Norma Para Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. São Paulo - SP.
- COLUMBIA (1999). The University of British Columbia - geop421 well logging 2 - <http://www.science.ubc.ca/~geop421/well-logs/logs2.htm> (25 dezembro)
- CORSON, W. H. (1993). Manual Global de Ecologia - 1ª Edição Brasileira, Editora Augustus, São Paulo - São Paulo.

- DAEE (1974) Departamento de águas e energia elétrica - Estudo de águas subterrâneas Região administrativa 6 - Ribeirão Preto.
- DI BERNARDO, L. (1993) Métodos e Técnicas de Tratamento de Água - vol. 1 - Rio de Janeiro - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- ELIS, V.R. (1998) Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos - Tese (doutorado)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista.
- FALCÃO, T. C. C.; LEAL, J. M. (1980). Estudo Hidroquímico da Bacia do Riacho do Navio - PE. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- FENZL, N.; RIJO, L.; PIUCI, J.; GUIMARÃES, P. B. M. (1980). Interpretação, Classificação e Apresentação de Dados Hidroquímicos Para Uso Humano e Agrícola. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- FOSTER, S.; GOMES, D. C. (1989). Groundwater Quality Monitoring: An Appraisal of Practices and Costs. - Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS). - Lima - Peru.
- FRANGIPANI, A.; BOTTURA, J. A. (1980). Estudos Hidrogeológicos e Hidroquímicos da Região de Sobradinho, Município de Luiz Correia - PI. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. (1979). Groundwater - Prentice - Hall, Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- FREITAS, A. L. S. (1995). Relatório preliminar dos poços de monitoramento e amostragem Relatório Interno - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- FREITAS, A. L. S. (1996). Caracterização do Aquífero Botucatu na Região do Lixão de São Carlos - SP - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- GADOTTI, R.F. (1997). Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos. - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

- GAIESKI, A. A. (1991). Curitiba: O Gerenciamento dos Resíduos Sólidos. Passado, Presente e Perspectivas. Florianópolis. 360 p. Dissertação (Mestrado) - Dep. de Geociências - Universidade Federal de Santa Catarina.
- GONÇALVES, A.R.L.; BOSSOLAN, N.R.S.; ORLANDO M.J.G (1992). Determinação da direção de fluxo de freático no aterro sanitário de São Carlos. In Anais do 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - Belo Horizonte - MG. p. 114-118.
- JORBA, A. F.; ROCHA, G. A. (1982). Manual de Operação e Manutenção de Poços. 2ª Edição. Governo do Estado de São Paulo - Secretaria de Obras e do Meio Ambiente - Departamento de Águas e Energia Elétrica. São Paulo.
- KLEEREKOPER, H. (1944). Introdução ao Estudo de Limnologia - Serie didática nº 4 - Serviço de Informação Agrícola - Ministério da Agricultura.
- KRAUSKOPF, K.B. (1972). Introdução à geoquímica - São Paulo -Polígono - Editora da USP - Universidade de São Paulo
- LUDWIG, R. L. (1988) Ecological Effects of Metropolitan Growth on Water Resources - Expert Group Workshop on River/Lake Basin Approach to Environmentally Sound Management of Water Resources -United Nations Centre for Regional Development; International Lake Environment Comitee; United Nations Environment Programme - Otsu and Nagoya, Japan.
- MATSUZAKI, S.S. (1998) Aplicação de modelo computacional de escoamento de água subterrânea no lixão de São Carlos - São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- METTHES, G.; FOSTER, S.S.D.; SKINNER, A. Ch. (1985) Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection zones. - International Contributions to Hydrogeology: vol 6.- UNESCO - IUGS - International Association of Hydrogeologists.
- MENEZES, D. B. (1995). Diagnóstico dos Impactos do Lixão de São Carlos no Meio Físico. São Carlos. 101p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NETTO, J. M. A. (1966). Tratamento de Águas de Abastecimento. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- NISHIYAMA, L. (1991) Mapeamento Geotécnico Preliminar da Quadrícula de São Carlos - SP. São Carlos. 228p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

- ODUM, E.P. (1988) Ecologia - Editora Guanabara Koogan s.a. - Rio de Janeiro - RJ
- PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. (1976). Hidrologia Básica. São Paulo, Edgard Blucher; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar.
- POPPE, L. P. M.; LOPES, J. C.; NEGRÃO, F. I. (1980). Determinação de Áreas Prioritárias para o Controle da Poluição das Águas Subterrâneas. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- PORTO, M. F. A.; BRANCO, S. M.; LUCA, S. J. (1991). Caracterização da Qualidade de água. In Hidrologia Ambiental, Rubem La Laina Parto (org.). - Editora da Universidade de São Paulo - Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- REBOUÇAS, A. C. (1980). Potencial Hidrogeológico da Bacia do Paraná - Brasil. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- REBOUÇAS, A. C. (1992). Impactos Ambientais nas Águas Subterrâneas. In Anais do 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - Belo Horizonte - MG.
- REPSOLD, H. (1989). Well logging in groundwater development. UNESCO; - DVGW (Deutscher Verein des Gas - und Wasserfaches) - International Contributors to Hydrogeology; vol 9.
- SADALA, J.; GONÇALVES, R. L. F. (1980). Experiência da COPASA - MG na Utilização de Água Subterrânea para Abastecimento Urbano. In 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- SARA, M. N. (1991). Ground-Water Monitoring System Design. In: Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. Lewis Publishers. Michigan. USA.
- SCHALCH, V. (1984). Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano. São Carlos. - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- SCUDINO, P. C. B. (1992). Avaliação Hidrogeológica em Área de Disposição de Resíduos Sólidos, com Riscos de Poluição de Aquíferos. In Anais do 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - Belo Horizonte - MG.

- SEVEE, J. (1991). Methods and procedures for defining aquifer parameters. In: NIELSEN D.M. Practical handbook of ground-water monitoring - Lewis Publishers - Michigan - USA. Cap. 10, p.397-447
- SILVA, C. C. A.; AMIR, Y.; PENNA, Y. M. A. D. (1980). Controle de Poluição das Águas Subterrâneas Na região do Rio Paraíba. In 1^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. (1980). Ensaio de Caracterização Estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo 10 (3): p. 177-185.
- SONODA, S. L.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (1997). Importância da região litorânea e das áreas alagadas para os ecossistemas aquáticos - In: II SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL E IV SIMPÓSIO DO CURSO CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL - anais. São Carlos - SP - CRHEA - EESC - USP p.35-37.
- SUGUIO, K. (1973). Introdução à sedimentologia - São Paulo, Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo
- SURFER (1996). Surfer Version 6.02 - Jan 1 1996 - Surface Mapping System - Golden Software, Inc. - Golden, Colorado - EUA
- VIGNOLI F^o, O. (1980). A Contaminação das Águas Subterrâneas em Regiões Semi-Áridas e Úmidas e Seu Relacionamento com Indicadores Biológicos Usuais. In 1^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Recife - Pernambuco. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. ABAS - Núcleo Nordeste.
- VITALE R.J.; BRAIDS O.; SCHULLER R. (1991). Ground-water sample analysis. In: NIELSEN D.M. Practical handbook of ground-water monitoring - Lewis Publishers - Michigan - USA. Cap. 12, p.501-539
- VOGELSANG, D. (1995). Environmental geophysics - a practical guide. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p.41-54.

**APÊNDICE 1 - TABELAS COM OS CONTAMINANTES E A
VARIAÇÃO DE SUAS CONCENTRAÇÕES
AO LONGO DO TEMPO - LIXÃO SÃO CARLOS**

Alcalinidade em mg/l

ponto	Alcalinidade	Alcalinidade	Alcalinid
	ago 96	out 96	jan 97
15	8.4	35.28	13.72
16	21	20.16	21.28
17	9.24	12.88	14
18	78.96	49.84	81.2
19	56.28	49.84	45.92
25	148.4	140	57.68
26	15.4	14.56	14
27	49.56	25.76	26.6
28	49.84	20.16	22.68
29	99.96	95.76	92.96
30	74.48	122.08	107.8
31	42.28	50.4	38.08
32	187.04	173.6	197.68
A Represa	23.8	35.28	28.84
B Rio	26.88	66.64	75.6
C Córrego	N.A.	54.88	40.32
D Rio	N.A.	460.88	444.92
E Cacimbão	N.A.	233.8	221.2
F Cacimba	N.A.	49.84	N.A.
G Poço	N.A.	17.36	11.76

Cloretos em mg/l

ponto	Cloretos	Cloretos	Cloretos
ponto	ago 96	out 96	jan 97
15	6.6	1.1	0.9
16	1.5	1.5	0.7
17	1.7	0.8	0.9
18	72	5	2.1
19	1.7	2	1.3
25	133	126	51
26	62	59	73
27	10.7	0.9	0.5
28	3	1.1	0.8
29	1.7	3.3	1.7
30	1.2	3.8	2.7
31	6.6	6.9	4.7
32	24	48	42
A Represa	1.6	1.1	1
B Rio	1.1	11.5	5.1
C Córrego	N.A.	0.6	0.1
D Rio	N.A.	116	64
E Cacimbão	N.A.	28	8
F Cacimba	N.A.	2	N.A.
G Poço	N.A.	0.2	0

Condutividade em mmho/m

ponto	Condutividade	Condutividade	Condutividade
	ago 96	out 96	jan 97
15	2.354839	3.37963	3.42723
16	3.411215	2.851563	3.989071
17	2.807692	3.560976	3.52657
18	11.55063	10.99398	13.51852
19	9.759358	10.89552	11.7175
25	74.48978	77.24868	65.17857
26	46.79487	26.64234	28.29457
27	8.968059	4.899329	4.74026
28	3.882979	4.345238	4.345238
29	14.09266	14.45545	14.6
30	11.49606	17.63285	16.66667
31	5.887097	10.73529	10.57971
32	39.24731	45.625	59.83607
A Represa	3.443396	4.219653	4.506173
B Rio	4.101124	11.7175	9.240506
C Córrego	N.A.	5.703125	6.403508
D Rio	N.A.	102.8169	110.6061
E Cacimão	N.A.	48.02631	50.34483
F Cacimba	N.A.	10.89552	N.A.
G Poço	N.A.	2.073864	2.115942

DQO em mg/l

Ponto	DQO	DQO	DQO
	Ago/96	Out/96	Jan/97
15	1.09	0	16.98
16	30.22	0	6.39
17	6.39	3.74	27.57
18	101.72	0	6.39
19	22.28	0	30.22
25	67.29	30.22	27.57
26	24.92	0	22.28
27	11.68	6.39	27.57
28	3.74	0	14.33
29	27.57	9.04	11.68
30	11.68	6.39	22.28
31	14.33	3.74	22.28
32	27.57	30.22	56.7
A Represa	6.39	6.39	9.04
B Rio	54.05	1.09	19.63
C Córrego	N.A.	0	62
D Rio	N.A.	75.24	83.18
E Cacimão	N.A.	32.87	48.76
F Cacimba	N.A.	1.09	N.A.
G Poço	N.A.	0	1.09

Ferro em mg/l

Ponto	Ferro Ago/96	Ferro Out/96	Ferro Jan/97
15	1.03	1.31	0.45
16	0.53	0.26	0.01
17	0	0	0.13
18	0.09	0.21	0.44
19	0.41	0.27	0.3
25	0	0.08	0.41
26	0.17	0	0
27	0	0	0
28	0	0.03	0.34
29	0.47	3.4	5.2
30	1.28	40	3.5
31	0.34	0.22	1.75
32	1.82	1.84	6.5
A Represa	0.35	0.73	1.3
B Rio	1.23	3.06	1.9
C Córrego	N.A.	0.05	0.1
D Rio	N.A.	4.75	5.7
E Cacimvão	N.A.	0.9	0.54
F Cacimba	N.A.	0.11	N.A.
G Poço	N.A.	0	0

Fosfatos em mg/l

Ponto	Fosfatos Ago/96	Fosfatos Out/96	Fosfatos Jan/97
15	0.124	0.081	0.058
16	0.109	0.105	0.051
17	0.026	0.041	0.07
18	0.074	0.057	0.086
19	0.062	0.083	0.073
25	0.074	0.076	0.074
26	0.03	0.054	0.087
27	0.485	0.08	0.085
28	0.098	0.1	0.11
29	0.015	0.028	0.058
30	0.02	0.04	0.046
31	0.222	0.141	0.08
32	0.081	0.07	0.14
A Represa	0.097	0.224	0.074
B Rio	0.062	0.422	0.181
C Córrego	N.A.	0.5	0.28
D Rio	N.A.	0.181	0.122
E Cacimvão	N.A.	2.335	1.178
F Cacimba	N.A.	0.036	N.A.
G Poço	N.A.	0.036	0.051

Manganês em mg/l

Ponto	Manganês ago/96	Manganês out/96	Manganês jan/97
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0.13	0	0
18	0.02	0.07	0.1
19	0	0	0
25	0.16	0.05	0.08
26	0	0.1	0.18
27	0	0	0
28	0.01	0	0
29	1.33	1.25	1.27
30	0	0.18	0.2
31	0.11	0.02	0.01
32	0.1	0.03	0.04
A Represa	0	0.03	0.05
B Rio	0.02	0.08	0.11
C Córrego	N.A.	0	0
D Rio	N.A.	0.54	0.4
E Cacimão	N.A.	0.25	0.15
F Cacimba	N.A.	0.24	N.A.
G Poço	N.A.	0	0

Nitratos em mg/l

Ponto	Nitratos Ago/96	Nitratos Out/96	Nitratos Jan/97
15	1.474	0.395	0.551
16	2.114	0.969	0.722
17	1.999	4.719	1.348
18	1.16	0.859	0.269
19	6.304	5.302	4.744
25	3.317	4.165	7.225
26	6.431	6.742	6.182
27	1.695	1.53	0.994
28	4.711	1.701	1.092
29	1.209	0.818	0.452
30	1.637	0.848	0.495
31	1.427	4.977	3.018
32	1.877	2.052	1.711
A Represa	0.801	0.395	0.495
B Rio	1.263	0.557	0.454
C Córrego	N.A.	0.779	0.607
D Rio	N.A.	3.666	2.715
E Cacimão	N.A.	4.085	5.122
F Cacimba	N.A.	5.302	N.A.
G Poço	N.A.	1.063	0.765

Nitrogênio Total em mg/l

Ponto	Nitrogênio Total Ago/96	Nitrogênio Total Out/96	Nitrogênio Total Jan/97
15	0	0.68	0
16	0	0	0
17	0.05	13.22	6.32
18	2.56	5.7	0
19	4.44	3.81	0
25	28.27	25.77	11.34
26	0	0	0
27	0.68	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0.05
30	0	0	0
31	0	1.31	0
32	25.77	28.27	32.04
A Represa	0	0.68	0
B Rio	0	1.93	2.56
C Córrego	N.A.	1.31	0
D Rio	N.A.	82.21	61.52
E Cacimão	N.A.	1.93	3.81
F Cacimba	N.A.	3.81	N.A.
G Poço	N.A.	0	0

Oxigênio dissolvido em mg/l

Ponto	Oxigênio dissolvido Ago/96	Oxigênio dissolvido Out/96	Oxigênio dissolvido Jan/97
15	0.5	0	0
16	1.7	0	0
17	4.1	4.1	4.7
18	0	0	0
19	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	2.8	2.6	3.5
28	2.8	2.6	4
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
A Represa	6.4	5.5	6.4
B Rio	0	0	0
C Córrego	N.A.	3	6.5
D Rio	N.A.	0	0
E Cacimão	N.A.	0	0
F Cacimba	N.A.	0	N.A.
G Poço	N.A.	5.7	6.5

pH (adimensional)

Ponto	pH	pH	pH
	Ago/96	Out/96	Jan/97
15	5.3	4.7	4.7
16	5.5	5.2	5.45
17	4.7	5.6	5.1
18	5.8	5.8	5.7
19	5.7	5.9	5.6
25	5.9	5.8	5.6
26	5	5.1	5
27	6.4	6	5.6
28	5.7	5.9	5.9
29	6.1	6.1	5.9
30	6.1	6.6	6.1
31	5.7	5.8	5.7
32	6.5	7	7
A Represa	6.3	6.5	6.2
B Rio	6	6.6	6.4
C Córrego	N.A	6.6	6.4
D Rio	N.A	6.9	6.8
E Cacimbão	N.A	7.2	6.8
F Cacimba	N.A	5.9	N.A
G Poço	N.A	5.9	5.7

Potencial redox em milivolts

ponto	Redox	Redox	Redox
	ago 96	out 96	jan 97
15	131	188	100
16	157	160	100
17	195	190	170
18	166	160	70
19	197	220	200
25	117	172	190
26	173	110	140
27	100	100	150
28	125	120	220
29	-24	40	30
30	-100	-50	-50
31	93	110	55
32	-30	-150	-140
A Represa	172	210	90
B Rio	-14	-90	15
C Córrego	N.A.	180	170
D Rio	N.A.	-50	-80
E Cacimbão	N.A.	40	70
F Cacimba	N.A.	220	N.A.
G Poço	N.A.	140	140

Zinco em mg/l

Ponto	Zinco	Zinco	Zinco
	Ago/96	Out/96	Jan/97
15	0.01	0	0
16	0	0	0
17	0.04	0	0
18	0.06	0	0
19	0.02	0	0
25	0.01	0	0
26	0.02	0	0.01
27	0.02	0	0
28	0.02	0	0
29	0.05	0	0
30	0.02	0	0
31	0.04	0	0
32	0	0	0
A Represa	0	0	0
B Rio	0	0	0
C Córrego	N.A.	0	0
D Rio	N.A.	0	0
E Cacimão	N.A.	0	0
F Cacimba	N.A.	0	N.A.
G Poço	N.A.	0	0

APÊNDICE 2 - CURVAS DE CAMPO E OS MODELOS INTERPRETADOS DAS SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	520
2	610
3	825
4	890
5	820
6	800
8	760
10	745
12	750
15	790
20	800
25	760
30	660
40	500
50	400
60	320
80	240
100	190
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,1	0,0	404	Solo superficial
2	0,5	1,1	5170	Sedimento arenoso seco ou arenito silicificado
3	1,8	1,6	238	Sedimento argilo arenoso seco
4	8,1	3,4	1455	Sedimento arenoso seco
5	4,0	11,4	733	Sedimento arenoso acima n.a.
6	?	15,4	149	Sedimento arenoso (zona saturada)
			n.a. = 15,35	Erro de ajuste = 6,54%

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,0	0,0	404	Solo superficial
2	0,3	1,0	5515	Arenito silicificado
3	4,4	1,3	491	Arenito
4	2,2	5,7	4258	Arenito silicificado
5	4,7	7,9	678	Arenito acima do N.A.
6	?	12,6	163	Arenito (zona saturada)
			n.a. = 12,6	Erro de ajuste = 5,9 %

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	870
2	780
3	750
4	760
5	770
6	810
8	1050
10	1400
12	1550
15	1680
20	1900
25	1950
30	1960
40	1850
50	1650
60	1800
80	1350
100	950
150	550

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,1	0,0	959	Solo superficial
2	2,4	1,1	474	Sedimento arenoso/argiloso
3	8,0	3,5	6992	Sedimento arenoso seco
4	2,1	11,5	1985	Sedimento arenoso acima do N.A.
5	?	13,6	491	Sedimento arenoso (zona saturada)
			n.a. = 13,64	Erro de ajuste = 5,82 %

N.A.

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,1	0,0	959	Solo superficial
2	2,4	1,1	474	Solo arenoso/argiloso
3	8,0	3,5	6992	Arenito silicificado
4	2,1	11,5	1985	Arenito silicificado
5	?	13,6	491	Arenito (zona saturada)
			n.a. = 13,64	Erro de ajuste = 5,82 %

N.A.

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	645
2	685
3	800
4	1000
5	1100
6	1180
8	1280
10	1650
12	2250
15	2400
20	2600
25	3050
30	3150
40	3225
50	3180
60	2900
80	1800
100	1500
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,2	0,0	579	Solo superficial
2	3,2	1,2	1080	Sedimento arenoso seco
3	7,9	4,4	14934	Sedimento arenoso seco
4		12,3	426	Sedimento arenoso (zona saturada)
			n.a. = 12,28	Erro de ajuste = 6,48%

N.A.

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	2,1	0,0	620	Solo superficial
2	2,1	2,1	1635	Arenito silicificado
3	9,8	4,2	10262	Arenito silicificado
4	4,5	14,0	1550	Arenito silicificado
5	?	18,5	705	Arenito
			n.a. = 0	Erro de ajuste = 6,7%

N.A.

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	75
2	72
3	100
4	122
5	135
6	148
8	165
10	170
12	170
15	165
20	145
25	125
30	140
40	165
50	180
60	190
80	195
100	180
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,6	0,0	62	Sedimento Cenozóico
2	2,3	1,6	590	Sedimento arenoso seco
3	6,6	3,8	42	Sedimento arenoso (zona saturada)
4	17,6	10,4	862	Diabásio ou arenito silicificado
5		28,0	30,3	Arenito saturado
			n.a. = 3,82	Erro de ajuste = 4,53 %

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	0,7	0,0	77	Solo superficial
2	1,0	0,7	49	Solo arenoso (zona saturada)
3	1,4	1,7	1230	Arenito silicificado
4	4,7	3,1	33	Arenito
5	12,0	7,8	1067	Arenito silicificado
6	?	19,8	66	Arenito
			n.a. = 0,7	Erro de ajuste = 8,5 %

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	
2	500
3	640
4	700
5	700
6	660
8	750
10	760
12	700
15	600
20	580
25	530
30	500
40	400
50	330
60	290
80	230
100	200
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1				
Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,1	0,0	308	Sedimento Cenozóico
2	1,0	1,1	3330	Sedimento arenoso seco
3	9,4	2,1	420	Sedimento arenoso (zona saturada)
4	9,2	11,5	834	Diabásio ou arenito silicificado
5		20,7	130	Arenito saturado
			n.a. = 2,05	Erro de ajuste = 5,99%

N.A.

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2				
Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,0	0,0	333	Solo arenoso (zona saturada)
2	0,5	1,0	1437	Arenito silicificado
3	0,2	1,5	1153	Arenito silicificado
4	2,0	1,7	1437	Arenito silicificado
5	15,2	3,7	544	Arenito silicificado
6	?	18,9	172	Arenito
			n.a. = 0	Erro de ajuste = 7,6%

N.A.

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	160
2	180
3	240
4	320
5	370
6	420
8	550
10	635
12	650
15	625
20	570
25	520
30	505
40	510
50	500
60	475
80	350
100	240
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1				
Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,2	0,0	119	Sedimento Cenozóico
2	2,2	1,2	3164	Sedimento arenoso seco
3	4,7	3,4	144	Sedimento arenoso (zona saturada)
4	5,7	8,1	2743	Diabásio ou arenito silicificado
5	?	13,8	75	Arenito saturado
			n.a. = 3,44	Erro de ajuste = 6,99%

N.A.

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2				
Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	1,1	0,0	105	Solo arenoso (zona saturada)
2	3,7	1,1	1767	Arenito silicificado
3	2,0	4,8	170	Arenito silicificado
4	17,0	6,8	752	Arenito silicificado
5	?	23,8	149	Arenito
			n.a. = 0	Erro de ajuste = 9,9%

N.A.

Dados usados na construção da curva de SEV

AB/2	Rho (ohm.m)
1,5	140
2	140
3	150
4	175
5	210
6	250
8	340
10	450
12	560
15	650
20	820
25	960
30	1050
40	1100
50	1020
60	900
80	515
100	420
150	
200	
250	

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 1

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	2,4	0,0	122	Solo superficial
2	1,9	2,4	2549	Sedimento arenoso seco
3	5,1	4,3	7682	Sedimento arenoso seco
4	?	9,4	18,5	Sedimento arenoso (zona saturada)
			n.a. = 9,4	Erro de ajuste = 11,8%

N.A.

MODELO INTERPRETADO - possibilidade 2

Camada	Espessura (m)	Prof. do topo (m)	Resistividade (ohm.m)	Material
1	2,4	0,0	122	Solo arenoso (zona saturada)
2	4,4	2,4	8751	Arenito silicificado
3	8,1	6,8	402	Arenito silicificado
4	?	14,9	59	Arenito
			n.a. = 0	Erro de ajuste = 12%

N.A.