

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS  
Campus de Rio Claro

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação  
Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área  
Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

José Angelo Ferreira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao  
Programa de Pós-Graduação em Geociências  
Área de Concentração em Geociências e Meio  
Ambiente, para obtenção do Título de Mestre  
em Geociências.

Rio Claro (SP)

2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS  
Campus de Rio Claro

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação  
Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área  
Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

José Angelo Ferreira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, para obtenção do Título de Mestre em Geociências.

Rio Claro (SP)

2002

551.49 Silva, José Angelo Ferreira da  
S586s       Sistematização e avaliação de técnicas de investigação  
aplicadas à caracterização e diagnóstico de área contaminada  
por hidrocarbonetos de petróleo / José Angelo Ferreira da  
Silva. – Rio Claro : [s.n.], 2002  
138 f. : il., figs., tabs., fots.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Leandro Eugenio Silva Cerri

1. Águas subterrâneas - Poluição. 2. Hidrogeologia. 3. Contaminação.  
I. Título.

Comissão Examinadora

---

PROF. DR. LEANDRO EUGENIO SILVA CERRI

---

PROF. DR. JOSÉ EDUARDO RODRIGUES

---

PROF. DR. JOSÉ EDUARDO ZAINE

---

JOSÉ ANGELO FERREIRA DA SILVA

aluno

Rio Claro, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20 \_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

*À minha esposa Mayra,  
Ao meu filho Leonardo,  
Aos meus irmãos, Fernando (in memorian) e Cláudia,  
Aos meus pais, José (in memorian) e Maria,  
Aos meus avós, Orlando (in memorian) e Solidéa.*

# Agradecimentos

Ao educador, professor e amigo Leandro Cerri. Pelas inúmeras vezes que me incentivou e me disciplinou ao longo destes anos, não permitindo que eu desanimasse diante dos problemas e obstáculos que se apresentassem. Pelo apoio técnico e orientação metodológica, que tanto acrescentaram à minha formação acadêmica, despertando-me o interesse pela busca da essência científica. Mas, principalmente, pela sua presença nos meus momentos mais difíceis.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro, durante o primeiro ano dos trabalhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Meio Ambiente e suas coordenações ao longo destes anos, pela estrutura, oportunidades e dedicação ao aprimoramento educacional e científico.

À minha família. Minha esposa Mayra, meu filho Leonardo, minha mãe Maria, minha irmã Cláudia e minha avó Solidéa, pela compreensão e incentivo, e por sempre terem acreditado nos meus passos. Aos meus tios José e Mírian, pelo carinho e apoio; meus primos Jomir e Kátia, Mariana e André pelas conversas e momentos inesquecíveis. Um agradecimento especial à tia Vera Lúcia, pela sua presença sempre e importante amizade.

Ao Jorge e Keiko pelo apoio e compreensão sempre. À Kayra e ao Marcos, que apesar da distância estiveram sempre presentes.

Aos amigos e colegas da graduação, pelo companheirismo e marcantes lembranças: Marcelo “Jr. Baiano” Cottas, Alessandro “Frangão” Medeiros Silva, Richard “Jaú” Liberatti, Adriano “Rolha” Ferreira da Silva, Maurício-Má e Livia-Lí, Renato “Tupã” Meira Andriguetti, Frederico “Bucos” Vidigal, Maurice “Burrice-Madruga” de Assis Ferreira, Leandro “Biscoito” Reis Vieira, Samara-Sam, Ana Livia “Ruivona” Zeitune, Gustavo “Pira” Sturion Codo, Saulão Nunes, André “Figura” Ferreira, Oswaldo “Barney”, Eduardo “Folgado”, Lucas “Cabelo” Celeri, Patrícia “Pati-Pum” e João Olívio. Ah! Valeu Rafael “Sem Base” Rachid Ajob, grandes lembranças das nossas primeiras experiências profissionais.

Um agradecimento especial ao Fábio Augusto “Jaca-Wally” Gomes Vieira Reis e à Lucília “Liló” pela amizade, companheirismo e hospitalidade ao longo destes anos.

Ao amigo Ricardo Papa (*in memoriam*) pelas poucas mas inesquecíveis lembranças.

Às secretárias Márcia e Elaine (Seção de Graduação), Laura e Eliana (Seção de Pós-graduação) sempre muito prestativas e atenciosas.

À biblioteca e seus funcionários, em especial à Suzi e à Moema.

Aos colegas de trabalho, Wilson “Sushi” Yamamoto, Simone(tis) e Juscelino “Juca” grandes amigos e desenhistas, Daniel “Balô-co”, Fred, Mônica e Carlos, Rogério “Rato”, Fabíola, Carla, Juliana, Carlos Eduardo “Fú”, Guilherme “Mamilo”, Sérgio, Sandra, Odélio, Everton, Sueli “Anômala”, Thiago “Babacu”, Rafael “Placenta”, Vanessa “Larguinha”, Rogério “Carla Perez”, Douglas “Cinco”, Nicolas “Mexinha”, Flávio Hayashi, Marcio, José Cláudio, Fernando, Alex, Rui, Sônia, Léia e Nilma.

As conquistas vêm em etapas, cumpridas uma após a outra, até alcançarmos uma meta maior. O início da minha trilha começou com muitas dificuldades e uma união, um laço muito importante, hoje já desfeito, ajudou-me a chegar aqui com muita dedicação e carinho. Ivete, obrigado.

# Sumário

<b>ÍNDICE</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>4. METODOLOGIA DA PESQUISA</b>	<b>56</b>
<b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>58</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>129</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>131</b>

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	5
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	6
<b>3.1. SOLOS</b>	6
3.1.1. ORIGEM E FORMAÇÃO	6
3.1.2. CLASSIFICAÇÕES: TEXTURAL E GENÉTICA	7
3.1.2.1. Solos Residuais	7
3.1.2.2. Solos Transportados	8
3.1.3. CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS	10
3.1.3.1. Fases Constituintes	10
3.1.3.2. Distribuição das Fases Líquida e Gasosa: Zonas Saturada e Não Saturada	11
3.1.3.3. Propriedades Físicas dos Aquíferos ou Hidráulicas	13
3.1.3.4. Heterogeneidades dos Solos	17
<b>3.2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b>	18
3.2.1. DISTRIBUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	18
3.2.1.1. Zona Saturada: Aquíferos	19
<b>3.3. PETRÓLEO: CONSTITUINTES E PRODUTOS DERIVADOS</b>	21
3.3.1. CONSTITUINTES	21
3.3.2. PRODUTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO	21
3.3.3. HIDROCARBONETOS	23

3.3.3.1. Propriedades Físico-Químicas	24
3.3.3.2. Comportamento e Transporte dos Hidrocarbonetos de Petróleo nos Meios Geológico e Hidrogeológico	29
3.3.3.2.1. Formas de Ocorrência: Fases dos Hidrocarbonetos nas Zonas Não Saturada e Saturada	30
3.3.3.2.2. Mecanismos de Transporte	36
3.3.3.2.3. Fatores Influentes no Transporte e Distribuição dos NAPLs em Subsuperfície	39
3.3.3.2.4. Mecanismos de Redução do Transporte	42
3.3.3.2.5. Mecanismos de Aceleração do Transporte	43
3.3.3.3. Toxicidade e Efeitos à Saúde	45
<b>3.4. TÉCNICAS DE SANEAMENTO E REMEDIAÇÃO</b>	<b>48</b>
3.4.1. TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO	48
3.4.1.1. <i>Ex-Situ</i>	49
3.4.1.2. <i>In Situ</i>	49
3.4.2. EXTRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO (SVE – <i>SOIL VAPOR EXTRACTION</i> )	51
3.4.3. BOMBEAMENTO E TRATAMENTO (PUMP-AND-TREAT)	52
3.4.4. EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE – <i>MULTI-PHASE EXTRACTION</i> ) OU <i>BIOSLURPING</i>	52
3.4.5. TRINCHEIRA	53
3.4.6. CONFINAMENTO GEOTÉCNICO OU COBERTURA	53
3.4.7. INCINERAÇÃO	53
<b>3.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL FEDERAL</b>	<b>54</b>
<b>4. METODOLOGIA DA PESQUISA</b>	<b>56</b>
<b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>58</b>
<b>5.1. ETAPA 1 – TRABALHOS PRÉVIOS</b>	<b>58</b>

5.1.1. LEVANTAMENTO DE DADOS E VISTORIA DETALHADA DA ÁREA	58
5.1.2. DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA INVESTIGADA E HISTÓRICO DE VAZAMENTOS	59
<b>5.2. ETAPA 2 - INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DO SOLO (SOIL GAS SURVEY)</b>	<b>61</b>
<b>5.3. ETAPA 3 - INVESTIGAÇÃO COMPLEMENTAR DE DETALHE DO SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b>	<b>68</b>
5.3.1. SONDAGENS DE RECONHECIMENTO	68
5.3.2. INSTALAÇÃO DE POÇOS DE MONITORAMENTO	77
5.3.3. AMOSTRAGEM DE SOLO	86
5.3.4. AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	89
5.3.5. ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO E DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	94
5.3.6. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO: NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	96
5.3.7. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	96
5.3.8. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	99
5.3.8.1. Monitoramento do Nível d'Água e Fase Livre	103
5.3.8.2. Ensaios de Permeabilidade	104
5.3.9. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E MICROBIOLÓGICA DO SOLO	107
5.3.9.1. Caracterização Microbiológica do Solo e da Água Subterrânea	108
5.3.9.2. Caracterização Granulométrica do Solo	110
<b>5.4. ETAPA 4 - CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: DIAGNÓSTICO AMBIENTAL</b>	<b>113</b>
5.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO	113
5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	120
<b>5.5. ETAPA 5 - PROPOSIÇÕES PARA O SANEAMENTO AMBIENTAL DA ÁREA INVESTIGADA</b>	<b>126</b>
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>129</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>131</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1.</b>	Mecanismos de contaminação das águas subterrâneas (modificado de Fetter, 1999).	4
<b>Figura 3.1.</b>	Perfil de solo residual, modificada de Vargas (1981, <i>apud</i> Pinto, 2000).	8
<b>Figura 3.2.</b>	Distribuição das fases líquida e gasosa no solo (modificada de API, 1993 <i>apud</i> Guiguer, 1996).	11
<b>Figura 3.3.</b>	Relações estruturais entre os hidrocarbonetos (modificado de Potter & Simmons, 1998).	23
<b>Figura 3.4.</b>	Perfil esquemático de solo impactado por vazamento de combustível, proveniente de TASC. Visão de detalhe da distribuição das fases de ocorrência dos hidrocarbonetos de petróleo e o grau de saturação do solo (modificado de Cole, 1994).	31
<b>Figura 3.5.</b>	Diferenças entre as espessuras de fase livre observadas no poço de monitoramento e no solo (modificado de Testa & Winegardner, 1991).	33
<b>Figura 3.6.</b>	Liberação de vapores orgânicos na zona não saturada a partir de vazamento de TASC, modificado de Fetter (1999).	35
<b>Figura 4.1.</b>	Fluxograma da Pesquisa.	57
<b>Figura 5.1.</b>	Arranjo Físico das Instalações da Área Investigada.	60
<b>Figura 5.2.</b>	Levantamento Preliminar do Solo ( <i>Soil Gas Survey</i> ) e Isoconcentração de VOC até 0,90 m de Profundidade.	65
<b>Figura 5.3.</b>	Mapa de Localização das Sondagens a Trado Manual e Índícios de Contaminação.	69
<b>Figura 5.4.</b>	Isoconcentrações de VOCs – Distribuição em Profundidade.	71
<b>Figura 5.5.</b>	Perfil Construtivo do Poço de Monitoramento.	79
<b>Figura 5.6.</b>	Mapa de Localização dos Poços de Monitoramento Instalados.	81
<b>Figura 5.7.</b>	Perfis Litológicos e de VOCs das Sondagens de Reconhecimento e Perfis Construtivos dos Poços de Monitoramento Instalados.	82

---

<b>Figura 5.8.</b>	Mapa Potenciométrico.	100
<b>Figura 5.9.</b>	Seções Hidrogeológicas A-A' e B-B'.	101
<b>Figura 5.10.</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Solo.	117
<b>Figura 5.11.</b>	Resultados Analíticos das Amostras de Água Subterrânea.	122
<b>Figura 5.12.</b>	Pluma de Fase Livre Observada durante as Sondagens de Reconhecimento.	123

---

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 3.1.</b>	Comparação entre as alturas de ascensão capilar em meios porosos granulares de texturas diversas (para $h = 0,3$ ) e em um tubo capilar de raio $r = d_{10}/2$ (Manoel Filho, 1997).	12
<b>Tabela 3.2.</b>	Valores típicos de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para materiais inconsolidados, segundo Fetter (1988, <i>apud</i> Cabral, 1997).	16
<b>Tabela 3.3.</b>	Comparação quantitativa entre alguns compostos constituintes da gasolina e do óleo diesel (fonte: Potter & Simmons, 1998).	22
<b>Tabela 3.4.</b>	Solubilidade e viscosidade para alguns produtos derivados de petróleo a 20 °C (modificado de Riddick <i>et al.</i> 1986, <i>apud</i> Cole, 1994).	26
<b>Tabela 3.5.</b>	Capacidade de retenção de óleo em solos não saturados (CONCAWE, 1979, <i>apud</i> Ferreira & Zuquette, 1998).	41
<b>Tabela 3.6.</b>	Parâmetros toxicológicos e efeitos à saúde humana de alguns hidrocarbonetos de petróleo (fontes: Cole, 1994; TPHCWGS, 1997; ASTM, 1998).	47
<b>Tabela 5.1.</b>	Valores de VOC – <i>Soil Gas Survey</i> , sub-área A.	63
<b>Tabela 5.2.</b>	Valores de VOC – <i>Soil Gas Survey</i> , sub-área B.	64
<b>Tabela 5.3.</b>	Valores de VOC - Sondagens de Reconhecimento, sub-área A.	72
<b>Tabela 5.4.</b>	Características das Sondagens de Reconhecimento, sub-área A.	73
<b>Tabela 5.5.</b>	Valores de VOC - Sondagens de Reconhecimento, sub-área B.	74
<b>Tabela 5.6.</b>	Características das Sondagens de Reconhecimento, sub-área A.	75
<b>Tabela 5.7.</b>	Dados Relativos aos Poços de Monitoramento, sub-área A.	83
<b>Tabela 5.8.</b>	Dados Relativos aos Poços de Monitoramento, sub-área B.	84
<b>Tabela 5.9.</b>	Características das Amostras de Solo, sub-área A.	88
<b>Tabela 5.10.</b>	Características das Amostras de Solo, sub-área B.	89

<b>Tabela 5.11.</b>	Características das Amostras de Água Subterrânea, sub-área A.	93
<b>Tabela 5.12.</b>	Características das Amostras de Água Subterrânea, sub-área B.	93
<b>Tabela 5.13.</b>	Condutividade Hidráulica - Poços de Monitoramento, sub-área A.	106
<b>Tabela 5.14.</b>	Condutividade Hidráulica - Poços de Monitoramento, sub-área B.	107
<b>Tabela 5.15.</b>	Resultados das Análises Microbiológicas de Solo e de Água Subterrânea, sub-área A.	109
<b>Tabela 5.16.</b>	Resultados das Análises Microbiológicas de Solo e de Água Subterrânea, sub-área B.	110
<b>Tabela 5.17.</b>	Resultados das Análises Granulométricas de Solo, sub-área A.	111
<b>Tabela 5.18.</b>	Resultados das Análises Granulométricas de Solo, sub-área B	112
<b>Tabela 5.19.</b>	Resultados das Análises Químicas de BTXE, TPH (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> /C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> ), e PAH das Amostras de Solo, sub-área A.	118
<b>Tabela 5.20.</b>	Resultados das Análises Químicas de BTXE, TPH (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> /C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> ), e PAH das Amostras de Solo, sub-área B.	119
<b>Tabela 5.21.</b>	Resultados das Análises Químicas de BTXE, TPH (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> /C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> ), e PAH das Amostras de Água Subterrânea, sub-área A.	124
<b>Tabela 5.22.</b>	Resultados das Análises Químicas de BTXE, TPH (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> /C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> ), e PAH das Amostras de Água Subterrânea, sub-área B.	125

## Lista de Fotos

<b>Foto 5.1.</b>	Medidor de Gás Portátil, modelo GASTECH 1238 ME.	66
<b>Foto 5.2.</b>	<i>Soil Gas Survey</i> , equipamentos utilizados no levantamento.	66
<b>Foto 5.3.</b>	<i>Soil Gas Survey</i> , procedimentos de amostragem e leitura.	67
<b>Foto 5.4.</b>	Equipamentos utilizados em sondagens a trado manual.	76
<b>Foto 5.5.</b>	Medição de VOCs em amostra de solo.	76
<b>Foto 5.6.</b>	Poços de monitoramento, materiais construtivos.	84
<b>Foto 5.7.</b>	Poço de monitoramento, montagem.	85
<b>Foto 5.8.</b>	Poço de monitoramento, acabamento final.	85
<b>Foto 5.9.</b>	Amostras de solo coletadas e acondicionadas em frascos de vidro.	87
<b>Foto 5.10.</b>	Amostragem de água subterrânea, materiais e equipamentos para coleta.	91
<b>Foto 5.11.</b>	Amostragem de água subterrânea, equipamentos de medição <i>in situ</i> .	91
<b>Foto 5.12.</b>	Amostragem de água subterrânea, utilizando <i>bayler</i> descartável.	92
<b>Foto 5.13.</b>	Acondicionamento das amostras coletadas.	92
<b>Foto 5.14.</b>	Monitoramento do nível d'água e fase livre, utilizando medidores elétricos tipo <i>Interface Meter</i> .	103
<b>Foto 5.15.</b>	Exemplo de coleta de fase livre utilizando amostrador de acrílico com válvula de retenção.	104

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

A	área total da seção transversal perpendicular à direção de fluxo
AA	amostra de água subterrânea
AB	abastecimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
API	American Petroleum Institute
AS	amostra de solo
ASTM	American Society for Testing and Materials
BTEX	benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH	Constante da Lei de Henry
cm / s	centímetros por segundo
°C	graus Celsius
C	concentração na fase aquosa
C <sub>o</sub>	concentração na fase octanol
C <sub>c</sub>	concentração adsorvida (mg/kg de carbono orgânico do solo)
C <sub>s</sub>	concentração no solo
C <sub>x</sub>	concentração de equilíbrio de um gás dissolvido
C <sub>w</sub>	concentração na fase aquosa
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CWQG	Canadian Water Quality Guidelines
D <sub>d</sub>	coeficiente de difusão
D <sub>L</sub>	coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal
DNAPL	Dense Non Aqueous Phase Liquid
DRO	Diesel Range Organics
D <sub>T</sub>	coeficiente de dispersão hidrodinâmica transversal

EIA	Estudos de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
GC	Gas Chromatography
GRO	Gasoline Range Organics
F	fluxo de massa do soluto
$f_{oc}$	fração de carbono orgânico do solo
g	aceleração da gravidade
h	cota da carga hidráulica
$h_0$	nível da água no poço no início da recuperação
$h_t$	nível da água no poço após o início da recuperação
$h_{fm}$	espessura de fase livre na formação
H	altura da coluna d'água ou a carga hidráulica
$H_L$	Constante da Lei de Henry
i	gradiente hidráulico
J	taxa de descarga de massa
K	condutividade hidráulica
k	permeabilidade intrínseca dos meios porosos
$K_d$	coeficiente de partição solo-água
$K_i (S_i)$	coeficiente de permeabilidade de um meio para um fluido i
$K_i$	condutividade hidráulica do meio poroso
$K_{oc}$	coeficiente de partição carbono orgânico-solo
$K_{ri}$	coeficiente de permeabilidade relativa para o fluido
$K_{ow}$	coeficiente de partição octanol-água
$K_{sw}$	coeficiente de partição solo-água lixiviada
L	comprimento do filtro
LDM	Limite de Detecção do Método
LH	Light Hydrocarbons
LNAPL	Light Non Aqueous Phase Liquid
LOEL	Lowest Observed Adverse Effect Level
MTBE	Methyl Tertiary-butyl Ether
mg / kg	miligrama por kilograma
mg / L	miligrama por litro

Mh	média harmônica
mmHg	milímetros de mercúrio
MW	monitoring well
NA	nível d'água
NAPL	Non Aqueous Phase Liquid
NE	nordeste
NOEL	No Observed Adverse Effect Level
$\eta$	porosidade total
$\eta_e$	porosidade efetiva
P	pressão capilar do fluido
$P_x$	pressão parcial de um gás
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
ppb	parte por bilhão
ppm	parte por milhão
q	descarga específica
Q	taxa volumétrica de fluxo ou vazão
r	raio do poço
R	raio do centro do poço até o material componente do aquífero
$R_e$	raio efetivo de influência do ensaio de variação do nível da água
R	Retardo
RIMA	Relatório de Impacto ao Meio Ambiente
RfD	Reference Dose
RN	Referência de Nível
S	coeficiente de armazenamento
$S_i$	volume de poros ocupados pelo fluido i
$S_r$	saturação residual
SASC	Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustível
SE	sudeste
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SF	Slope Factor
SVOC	Semi-volatile Organic Compound
t	tempo

T	Transmissividade
TAS	Tanque de Armazenamento Subterrâneo
TEL	Tetra Ethyl Lead
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons
TPHCWGS	Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series
TR	trado
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UST	Underground Storage Tanks
u	velocidade média da água
ufc / g	unidade formadora de colônia por grama
v	velocidade
V	volume total
V <sub>b</sub>	volume de água produzido em um aquífero
V <sub>d</sub>	velocidade de Darcy
V <sub>d</sub>	volume total drenado em um aquífero
V <sub>D</sub>	volume de água drenada por gravidade
V <sub>h</sub>	volume de poros ocupados pelos hidrocarbonetos
v <sub>i</sub>	velocidade média linear na direção i
V <sub>t</sub>	volume total de poros
V <sub>v</sub>	volume de vazios
VOC	Volatile Organic Compounds
$\gamma$	peso específico do fluido
$\mu$	viscosidade dinâmica do fluido
$\mu\text{S} / \text{cm}$	micro-Siemmens por centímetro
$\Delta H$	perda de carga hidráulica através da distância $\Delta X$
$\alpha_L$	dispersividade dinâmica longitudinal
$\alpha_T$	dispersividade dinâmica transversal
$\phi$	ângulo de contato
$\sigma_{ns}$	tensão superficial NAPL-sólido
$\sigma_{ws}$	tensão superficial água-sólido
$\rho_b$	densidade do solo

## Resumo

A presente pesquisa tem por objetivo executar estudos sistemáticos para avaliar a qualidade do solo e da água subterrânea. Para tanto, optou-se por utilizar técnicas de investigação aplicadas à caracterização e quantificação do passivo ambiental, tendo por local de estudo uma área que abrange as instalações de uma antiga garagem de ônibus, caminhões e veículos pesados (tratores, empilhadeiras e retroescavadeiras). Essa área apresentou no passado operações envolvendo o armazenamento e distribuição de combustíveis derivados de petróleo, principalmente o óleo diesel. O procedimento metodológico da pesquisa envolveu: a identificação de possíveis fontes de contaminação e delimitação das áreas suspeitas; investigações geológicas e hidrogeológicas; avaliação da qualidade do solo e água subterrânea, por meio de medições em campo de vapores orgânicos voláteis (VOCs) no solo e caracterização dos contaminantes presentes, com a coleta de amostras e interpretação de análises químicas; delimitação de plumas de VOCs e fase livre. Ao final dos trabalhos, com a integração dos dados geológicos e hidrogeológicos e o quadro ambiental diagnosticado, foi possível indicar e dimensionar o grau de alteração do solo e águas subterrâneas, resultantes das antigas operações da garagem, assim como propor ações e planos de monitoramento e/ou saneamento das áreas impactadas, a curto e longo prazo.

*Palavras-chave: Contaminação; Hidrocarbonetos de Petróleo; Água Subterrânea – Poluição; Hidrogeologia.*

## Abstract

This paper proposes systematic investigation to assess the quality of soil and groundwater using techniques applied to the characterization and quantification of the environmental liabilities at a former maintenance facility for busses, trucks and heavy-duty vehicles, which also stored and distributed petroleum-derived fuels, mainly diesel oil. The research method consisted of: the identification of possible source areas and delineation of other suspect areas; geological and hydrogeological surveys; assessment of the quality of soil and groundwater through field measurements of volatile organic compounds in the soil (VOC) and chemical analysis; and delineation of the plumes of VOC and free phase. Through the interpretation of the geological, hydrogeological and chemical data, it was possible to identify and determine the degree of alteration of soil and groundwater resulting from the former operation activities, as well as to propose monitoring and remedial actions for the impacted areas at short and long terms.

*Key words: Contamination; Petroleum Hydrocarbons; Groundwater – Pollution; Hydrogeology.*

## 1. INTRODUÇÃO

Desde há muito tempo se anuncia a importância da proteção ao meio ambiente, incluindo seus componentes abióticos (ar, solo/subsolo e águas subterrâneas/superficiais) e bióticos, devido à existência de contaminantes gerados a partir de atividades antrópicas, sejam eles provenientes da disposição inadequada de resíduos sólidos e líquidos (efluentes) domiciliares e urbanos, industriais e agrícolas ou estéreis e rejeitos de mineração. Outras fontes compreendem os derrames e vazamentos de combustíveis orgânicos (derivados de petróleo), os resíduos radioativos e gases tóxicos (p.ex. compostos de enxofre e nitrogênio) emitidos diretamente à atmosfera.

Conseqüentemente, os contaminantes por meio de sua mobilização no meio ambiente, quer seja por processos naturais e/ou decorrentes de atividades industriais e comerciais, alcançam as águas subterrâneas, comprometendo, muitas vezes, importantes reservas deste precioso bem natural, que representa a maior concentração das reservas de água doce em nosso planeta. A **Figura 1.1.** ilustra alguns dos mecanismos de contaminação das águas subterrâneas.

A CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1997) aponta que o uso das águas subterrâneas para abastecimento público tem aumentado principalmente devido à sua abundância e qualidade, como também em conseqüência da deterioração da qualidade das águas superficiais.

No Brasil, igualmente aos demais países do Primeiro Mundo, mas em menor escala, a industrialização deixou e vem deixando heranças na forma de passivos ambientais. Áreas poluídas e contaminadas, que podem afetar a saúde dos seus habitantes e que para serem saneadas e recuperadas demandam muitas vezes grandes orçamentos.

Poluição ambiental é entendida como a degradação da qualidade ambiental, resultante de atividades que direta ou indiretamente (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1993): 1) prejudicam a saúde, segurança e o bem-estar das populações; 2) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; 3) afetem desfavoravelmente a biota; 4) afetem as condições sanitárias do meio ambiente.

Segundo Gloeden (1999), áreas contaminadas acarretam principalmente riscos à segurança das pessoas e das propriedades, riscos à saúde pública e aos ecossistemas, restrições ao desenvolvimento urbano e a redução do valor imobiliário das propriedades. Como exemplo,

cita o acúmulo de gases em residências, garagens e porões provenientes de solos e águas subterrâneas contaminados por substâncias voláteis em decorrência do vazamento de combustíveis em postos de serviço ou pela existência de gás metano em áreas próximas a locais com depósito de resíduos urbanos.

Rocca (2002) apresenta uma relação de aspectos para o gerenciamento da qualidade de solos e águas subterrâneas conforme o seguinte enfoque:

- Solo “limpo”: é aquele que apresenta substâncias de interesse ambiental em concentrações menores ou iguais ao valor de ocorrência natural (Padrão de Referência de Qualidade);
- Área suspeita de contaminação: são aquelas com a presença de substâncias de interesse ambiental em concentrações que apontam alteração da qualidade do solo e águas segundo os padrões de referência adotados;
- Área seriamente contaminada: são as áreas que apresentam substâncias de interesse ambiental em concentrações que apresentem risco à saúde pública e ao meio ambiente (Valores de Intervenção), necessitando medidas de intervenção;
- Avaliação da necessidade de urgência de intervenção: aspecto que dependerá de análise de risco específica para o local investigado em relação à exposição humana;
- Quando iniciar a intervenção: decisão a ser tomada por autoridades competentes após a avaliação de risco específica para a área impactada;
- Objetivos da intervenção: a remediação da área contaminada deve ser encerrada quando as concentrações dos poluentes alcançarem valores de ocorrência natural ou valores permissíveis, isto é, que não causem dano à saúde pública.

O uso de lista orientadora de padrões de referência de qualidade e valores de intervenção, além de fornecer informações sobre a urgência e os objetivos da remediação em relação à proteção da saúde humana, reduz custos pois fornece previsões quanto à configuração do quadro ambiental, anteriormente à implementação de investigação detalhada e avaliação de risco específica (Rocca, *op.cit.*).

Loureiro *et al.* (2002) também citam a importância da aplicação de avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente anteriormente à implementação de ações corretivas, devido aos altos custos e longos prazos envolvidos na remediação de áreas impactadas por combustíveis.

Um tipo específico de contaminação do solo e água subterrânea corresponde aos vazamentos de produtos derivados de petróleo provenientes de Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC). Um SASC compreende as instalações de armazenamento e distribuição de combustíveis dos postos de serviço, como os tanques e tubulações subterrâneas e as bombas de abastecimento. Os vazamentos advêm, na maioria dos casos, da corrosão de elementos do SASC (tanques e tubulações), de irregularidades operacionais durante a comercialização dos combustíveis e de acidentes decorrentes de processos geológicos-geotécnicos, como erosão e colapsividade do solo, resultando em rompimento e/ou deformações de dutos que conduzem os produtos.

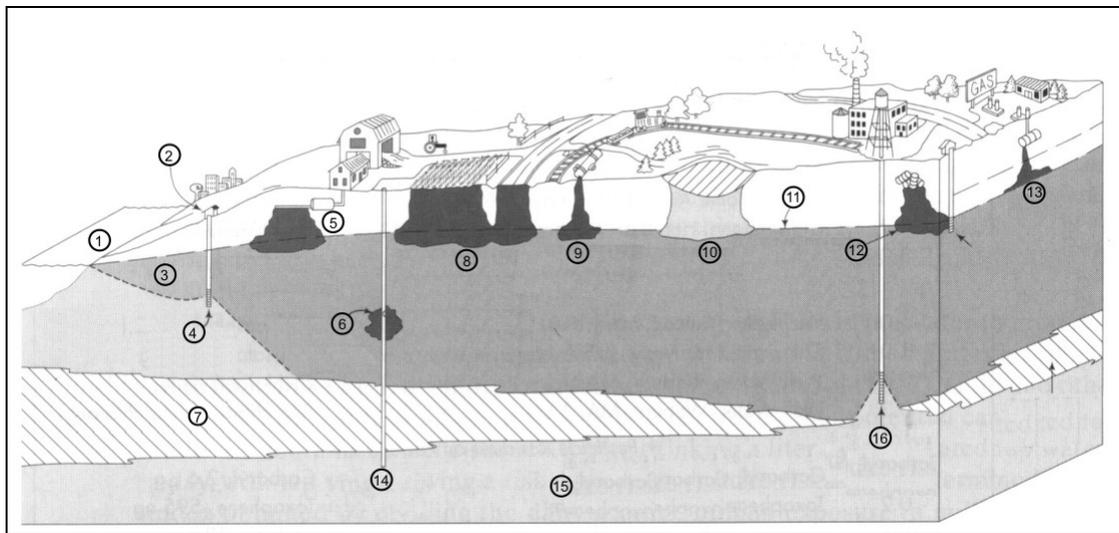
Nos Estados Unidos o Programa UST (*Underground Storage Tanks*), implementado pelo Departamento de Tanques Subterrâneos da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) no início dos anos 90, apresentou um cadastro de milhões de tanques subterrâneos de armazenamento contendo produtos derivados de petróleo ou outras substâncias químicas perigosas, muitos deles com ocorrência de vazamentos.

A CETESB em estudo publicado em 1998, apresenta um cadastro de inúmeros casos de contaminação envolvendo postos de serviço, evidenciando a importância da contribuição dos sistemas de armazenamento de combustíveis, principalmente do tipo subterrâneo, como fontes de contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Oliveira (1999) aponta três impactos principais decorrentes de vazamentos de combustíveis derivados de petróleo: 1) contaminação do solo e água subterrânea por compostos tóxicos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), constituintes da gasolina e óleo diesel; 2) risco de incêndios e explosões devido à presença de combustíveis, nos estados líquido e gasoso, em garagens subterrâneas e outras obras civis; e 3) riscos à saúde humana pela possível ingestão de água contaminada e inalação de vapores dos compostos orgânicos presentes nos combustíveis.

A presente pesquisa aborda um caso de contaminação de solo e águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo em área urbana, decorrente de atividades envolvendo, no passado, armazenagem, em tanques aéreos e subterrâneos, e distribuição de óleo diesel. São aplicados, sob orientação metodológica, trabalhos sistemáticos para avaliar a utilização de técnicas investigativas, como sondagens, amostragens e análises químicas, visando à caracterização e diagnóstico do grau de impacto na área suspeita de contaminação.

Os resultados do diagnóstico ambiental subsidiarão a tomada de decisões com a implementação de medidas corretivas, como a remoção de potenciais fontes de contaminação, aplicação de análise de risco específica, monitoramento, bem como a definição das tecnologias de remediação mais adequadas à reabilitação da área contaminada caso seja necessário.



**Figura 1.1.** Mecanismos de contaminação das águas subterrâneas (modificado de Fetter, 1999). 1) oceano; 2) poço de abastecimento; 3) água doce; 4) intrusão lateral de água salgada; 5) drenagem de tanque séptico; 6) vazamento de óleo por ruptura de revestimento do poço exploratório; 7) unidade confinante; 8) infiltração: de produtos químicos derramados em rodovias, e de pesticidas e fertilizantes aplicados na agricultura; 9) vazamento acidental; 10) infiltração de chorume proveniente de lixão; 11) nível d' água; 12) infiltração de produtos químicos provenientes de resíduos industriais enterrados; 13) vazamento de tanque de armazenamento subterrâneo de combustível (TASC); 14) poço de petróleo abandonado; 15) aquífero (água salgada); 16) infiltração de água salgada devido a bombeamento em poço de abastecimento.

## 2. OBJETIVOS

A presente pesquisa tem por objetivo executar estudos sistemáticos para avaliar a qualidade do solo e da água subterrânea. Para tanto, optou-se por utilizar técnicas aplicadas à caracterização e quantificação do passivo ambiental, tendo por local de estudo uma área que abrange as instalações de uma antiga garagem de ônibus, caminhões e veículos pesados (tratores, empilhadeiras e retroescavadeiras). Essa área apresentou no passado operações envolvendo o armazenamento e distribuição de combustíveis derivados de petróleo, principalmente o óleo diesel.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. SOLOS

#### 3.1.1. ORIGEM E FORMAÇÃO

Conforme Caputo (1975) os solos são materiais resultantes do intemperismo ou meteorização das rochas, seja por desintegração mecânica ou decomposição química, denominados de agentes de alteração.

Os fatores responsáveis pela origem e evolução dos solos, são descritos por Salomão & Antunes (1998) e Pinto (2000):

- **clima:** regula principalmente a ação da água da chuva (precipitação pluviométrica) e da temperatura, atuando diretamente na formação do solo, uma vez que promove a alteração de seus minerais constituintes, ou indiretamente sob os processos advindos da decomposição de material florestal (cobertura vegetal), como a produção, acúmulo e migração do húmus;
- **materiais de origem:** a natureza da rocha-matriz, caracterizada pela sua composição mineralógica/química e grau de fraturamento, irão condicionar diretamente a circulação interna da água, responsável pelo desenvolvimento do solo, alterando-o sob a ação de processos físico-químicos;
- **organismos, vegetais e animais:** componentes pedogenéticos que contribuem no fornecimento de resíduos orgânicos e elementos minerais, indispensáveis para a proteção do solo contra os efeitos da erosão. A ação dos ácidos húmicos resultante da decomposição de restos vegetais e animais, altera os minerais e acelera o processo evolutivo dos solos;
- **relevo:** atua diretamente na dinâmica da água e assim nos processos decorrentes de sua ação, como a erosão e sedimentação;
- **tempo:** determina o grau de evolução de um determinado tipo de solo.

### 3.1.2. CLASSIFICAÇÕES: TEXTURAL E GENÉTICA

A classificação textural ou granulométrica distingue os diferentes tipos de solos segundo o tamanho dos grãos que os compõem. A ABNT, com a Norma Técnica NBR 6502, classifica os solos, segundo a sua granulometria, em:

Fração	Diâmetro da partícula – D (mm)
argila	$D < 0,005$
silte	$0,005 < D < 0,05$
areia fina	$0,05 < D < 0,42$
areia média	$0,42 < D < 2,0$
areia grossa	$2,0 < D < 4,8$
pedregulho	$4,8 < D < 76$

Pastore & Fontes (1998) apontam dois critérios de classificação genética dos solos, o geológico e o pedológico.

Conforme Vaz (1996), a classificação geológica dos solos baseia-se nas características da rocha-matriz e nos processos que levaram à sua transformação, originando o solo, sendo por isso também denominada de classificação genética.

Casagrande (1948 *apud* Vaz, 1996) cita que os dois processos geológicos responsáveis pela formação dos solos são o intemperismo, originando os solos residuais, e a erosão, transporte e a deposição de materiais superficiais, resultando na formação dos solos transportados.

Os solos podem ser classificados segundo sua origem, em dois grandes grupos: solos residuais e solos transportados.

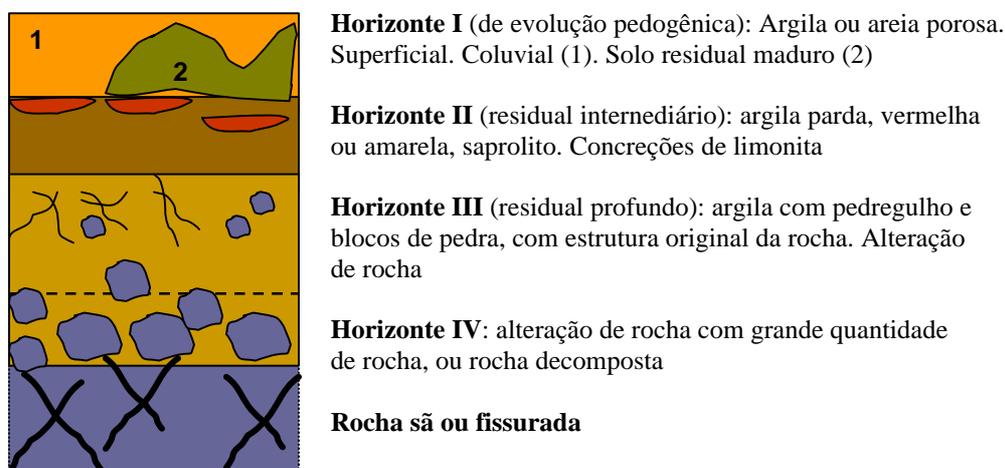
#### 3.1.2.1. Solos Residuais

Correspondem aos solos formados a partir da decomposição das rochas pelo intemperismo, químico e/ou físico, e que permanecem no local da rocha de origem, sem sofrer

qualquer tipo de transporte (Caputo, 1975; Pastore & Fontes, 1998). A **Figura 3.1.** ilustra esquematicamente um perfil típico de solo residual.

Segundo Pinto (2000), para que os solos residuais ocorram, a velocidade de decomposição da rocha deve necessariamente ser maior do que a velocidade de remoção por agentes externos.

A composição física, mineralogia, granulometria, estrutura e espessura, dos solos residuais é condicionada pela natureza da rocha-matriz, por fatores climáticos, vegetação, relevo e tempo (Pinto, 2000; Pastore & Fontes, 1998).



**Figura 3.1.** Perfil de solo residual, modificada de Vargas (1981, *apud* Pinto, 2000).

### 3.1.2.2. Solos Transportados

Solos transportados se referem àqueles que sofreram transporte por agentes geológicos do local onde se originaram até o local onde foram depositados, não tendo ainda sofrido consolidação. Assim como os solos residuais, a maioria dos solos transportados, inconsolidados, se formaram a partir do Cenozóico, podendo estar, ainda, em processo de formação (Pastore & Fontes, 1998).

Vaz (1996) observa que, devido à maior espessura de solo residual e à maior disponibilidade de água, nos climas tropicais a formação de solos transportados é mais freqüente, resultando em espessuras maiores que aquelas observadas em regiões de climas temperado ou seco.

Conforme Caputo (1975), a textura dos solos transportados varia com o tipo de agente transportador e com a distância de transporte.

A seguir são descritos alguns tipos de solos transportados (Pastore & Fontes, 1998; Pinto, 2000):

- **Aluviões:** representam depósitos formados por materiais erodidos, retrabalhados e carregados pelos cursos d'água e depositados nos seus leitos e margens, estando sempre associados a ambiente fluviais.
- **Terraços Fluviais:** correspondem a antigos aluviões, depositados quando o nível do curso d'água encontrava-se em posição superior a atual. Sua litologia é composta geralmente por areia grossa e cascalho.
- **Coluviões:** são depósitos de materiais inconsolidados, formados pela ação da água e principalmente da gravidade, geralmente encontrados recobrimo encostas íngremes.
- **Tálus:** depósitos compostos predominantemente por blocos de rocha de tamanhos variados e em geral arredondados, podendo apresentar matriz areno-silto-argilosa. Formam-se, principalmente, pela ação gravitacional, acumulando-se em sopés das encostas de relevos acidentados (serras e escarpas).
- **Sedimentos Marinhos:** formados basicamente em dois ambientes: 1) de praia: constituindo, em regiões tropicais, depósitos de areia limpas, finas a médias e quartzosas; e 2) de mangue: representando as argilas orgânicas marinhas, formadas com o transporte de sedimentos muito finos e argilosos pelas marés.
- **Solos Eólicos:** constituem depósitos costeiros, formadas pela ação do vento e compostos por areias finas quartzosas, arredondadas, ocorrendo na forma de franjas de dunas, margenando a costa.

### 3.1.3. CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

#### 3.1.3.1. Fases Constituintes

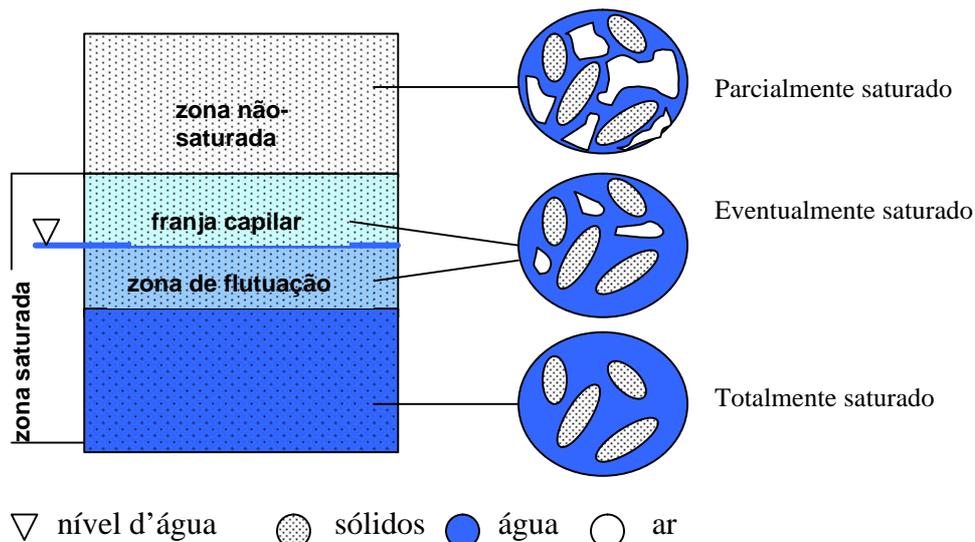
Segundo Pinto (2000), o volume total do solo é constituído por três fases: a sólida, representada por partículas que se acomodam para formar o seu arcabouço estrutural; a líquida e a gasosa, que irão preencher o volume restante do solo, também chamado de vazios. Desta forma, o comportamento de um tipo específico de solo dependerá da quantidade relativa de suas fases (sólida, líquida e gasosa).

Coelho (2000) caracteriza as fases constituintes do solo, associando-as à importância que exercem em relação à presença de contaminantes:

- **Sólida:** é formada principalmente pelos minerais constituintes do solo e em menor expressão pela matéria orgânica eventualmente presente. Esses minerais apresentam distintas composições químicas e estruturas cristalinas que influenciarão diretamente na interação do solo com os contaminantes presentes.
- **Líquida:** preenche os espaços intergranulares vazios, adere-se à superfície dos grãos e está presente na constituição dos minerais e adsorvidos a eles. A força e intensidade da associação fluido-sólido depende de vários fatores como a natureza da superfície de contato, área da superfície específica do grão, carga elétrica do fluido, entre outros. Assim, podem coexistir no mesmo solo águas de constituição (presente na composição química da fase sólida), adesiva ou adsorvida (envolve a partícula sólida), higroscópica (associada aos grãos da porção seca do solo), água livre (preenchendo os vazios do solo), água capilar (presentes nos interstícios granulares do solo, atraindo os grãos entre si). A fase líquida é a principal transportadora e acumuladora dos elementos contaminantes nos solos.
- **Gasosa:** preenche os espaços intergranulares vazios ou parcialmente vazios do solo, podendo estar dissolvida na água ou adsorvida à estrutura cristalina dos minerais presentes na constituição da fase sólida.

### 3.1.3.2. Distribuição das Fases Líquida e Gasosa: Zonas Saturada e Não Saturada

As fases líquida e gasosa, conforme a proporção relativa do espaço poroso que ocupam em subsuperfície, no solo e nas formações geológicas, são divididas em zonas saturada e não saturada. A **Figura 3.2.** apresenta a distribuição das fases líquida e gasosa no solo.



**Figura 3.2.** Distribuição das fases líquida e gasosa no solo (modificada de API, 1993 *apud* Guiguer, 1996).

#### Zona não saturada

Conforme Cleary (1989), a zona não saturada apresenta água e gases, principalmente ar e vapor d'água, nos espaços intergranulares e a água nesta região se encontra sob pressão negativa devido ao potencial de sucção, pressão capilar ou tensão capilar. Compreende a faixa de solo que vai da superfície até o topo da franja capilar.

À zona não saturada são atribuídas diferentes terminologias como zona de aeração (Fetter, 1988 e Manoel Filho, 1997b), zona parcialmente saturada (Freeze & Cherry, 1979) e zona vadosa (Cleary, 1989).

## Franja Capilar

A franja capilar separa a zona não saturada da zona saturada e apresenta espessura variável, variando de alguns centímetros em materiais grosseiros como cascalho, até atingir alguns metros em texturas mais argilosas (Cleary, 1989).

Segundo Cleary (*op.cit.*), a capilaridade, processo responsável pela formação da franja capilar e que ocorre nas proximidades do nível d'água, resulta da ação de duas forças de atração atuantes sobre as moléculas de água: uma ascendente, devido à tensão superficial da interface ar-argila (ascensão capilar) e a outra exercida pelas moléculas das fases líquida e sólida. A **Tabela 3.1.** compara a distribuição da umidade na zona não saturada em diferentes materiais, estabelecendo o conceito de franja capilar.

Manoel Filho (1997b) apresenta a expressão de Polubarinova-Kochina (1952) que permite estimar a altura de ascensão capilar em função do diâmetro efetivo dos grãos e da porosidade, para um meio poroso granular e de texturas diversas:

$$h_c = \frac{0,45 (1 - h)}{d_{10} \times h}$$

onde:  $h_c$ , altura máxima de ascensão capilar;  $h$  = porosidade efetiva;  $d_{10}$  = diâmetro efetivo dos grãos

Material	Diâmetro Efetivo (cm)	Altura de Ascensão Capilar (cm)
Cascalho Fino	1	1
Areia Grosseira	0,2	5
Areia Média	0,05	21
Areia Fina	0,025	42
Areia Muito Fina	0,010	105
Silte	0,005	210

**Tabela 3.1.** Comparação entre as alturas de ascensão capilar em meios porosos granulares de texturas diversas (para  $h = 0,3$ ) e em um tubo capilar de raio  $r = d_{10}/2$  (Manoel Filho, 1997b).

## **Zona Saturada**

A zona saturada, também chamada de zona de saturação, situa-se abaixo da superfície freática e apresenta água em toda a totalidade dos poros do solo, num estado de pressão positiva (Cleary, 1989; Manoel Filho, 1997b). Compreende a faixa de solo que vai da franja capilar até os limites inferiores do nível freático (Guiguer, 1996).

### **3.1.3.3. Propriedades Físicas dos Aquíferos ou Hidráulicas**

São apresentadas a seguir as propriedades físicas do solo que mais influem no comportamento de hidrocarbonetos de petróleo, eventualmente presentes.

#### **Porosidade Total ( $h$ ) e Efetiva ( $h_e$ )**

**Porosidade Total ( $h$ ):** Corresponde à proporção entre o volume de espaços vazios no solo ou rocha e o volume total da matriz do solo e seus valores são expressos em porcentagem. A porosidade dependerá do tamanho e formato das partículas constituintes do solo, bem como do arranjo dessas partículas (Pinto, 2000; Cabral, 1997). É definida pela expressão:

$$h = V_v / V \text{ (multiplica-se por 100, para expressar valores em porcentagem)}$$

onde:  $h$  = porosidade total;  $V_v$  = volume de vazios;  $V$  = volume total

Guiguer (1996) apresenta valores típicos de porosidade para alguns tipos de solos:

- Areia ou cascalho: 25 a 40 %;
- Areia e cascalho, misturados: 25 a 35 %;
- Sedimentos glaciais: 10 a 20 %;
- Argila: 33 a 60 %.

Considerando que a porosidade depende do tamanho e formato das partículas do solo, bem como do arranjo e da seleção por tamanho dessas partículas, Guiguer (*op.cit.*) explica que a porosidade de um solo composto por partículas bem arredondadas e de tamanho igual, será maior que a porosidade de um solo contendo partículas subarredondadas ou arredondadas, mas de tamanhos variáveis, pois neste caso os vazios entre as partículas maiores podem estar preenchidos pelas partículas menores;

**Porosidade Efetiva ( $h_e$ ):** é definida como a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberada por gravidade de uma amostra de rocha porosa saturada e o volume total. Assim como a porosidade total, a porosidade efetiva é uma grandeza adimensional, podendo ser expressa em porcentagem (Cabral, 1997). É definida pela expressão:

$$h_e = V_D / V$$

onde:  $h_e$  = porosidade efetiva;  $V_D$  = volume de água drenada por gravidade;  $V$  = volume total

Guiguer (1996) aponta que apesar das argilas e de alguns solos orgânicos apresentarem uma porosidade total elevada, os vazios intergranulares e a porosidade efetiva destes solos são menores, quando comparados a tipos litológicos mais grosseiros.

### **Permeabilidade Intrínseca (k)**

A permeabilidade intrínseca (**k**), ou permeabilidade específica é função do tipo de material poroso, de sua granulometria e de sua disposição estrutural. É expressa em  $\text{cm}^2$  ou em Darcy ( $1 \text{ Darcy} = 0,987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ ).

Cabral (1997) cita algumas conclusões de pesquisas realizadas em sedimentos inconsolidados para se determinar fórmulas de cálculo da permeabilidade intrínseca: quanto maior tamanho médio dos grãos do solo, maior a permeabilidade (porque os vazios são maiores); quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade (o aumento do desvio padrão indica maior variação dos tamanhos dos grãos, com os grãos pequenos ocupando os espaços vazios entre os grãos grandes); amostras com um tamanho de grão dominante apresentam maior permeabilidade.

### **Condutividade Hidráulica (K)**

A condutividade hidráulica representa uma propriedade não somente do meio poroso, mas também do fluido que o atravessa (Cleary, 1989; Cabral, 1997). Cleary (1989) explica ainda, que a tendência ao se tentar relacionar a condutividade hidráulica, a porosidade e a distribuição dos grãos é de que materiais geológicos muito porosos, porém preenchidos com materiais de baixa condutividade, resultarão em condutividades hidráulicas menores para o conjunto. A condutividade hidráulica pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}g / \mathbf{m}$$

onde: **K**, condutividade hidráulica (L/T); **k**, permeabilidade intrínseca do meio poroso (função do diâmetro dos grãos) ( $L^2$ ); **g** e **m**, representam as características do fluido, respectivamente peso específico e viscosidade dinâmica;

Assim quanto mais permeável o material geológico, maior o valor da condutividade hidráulica (Cleary, 1989), conforme mostra a **Tabela 3.2**.

<b>Material</b>	<b>Permeabilidade Intrínseca (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Condutividade Hidráulica (cm/s)</b>
Argila	10 <sup>-14</sup> - 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-6</sup>
Silte; Silte arenoso	10 <sup>-11</sup> - 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Areia argilosa	10 <sup>-11</sup> - 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Areia siltosa; Areia fina	10 <sup>-10</sup> - 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup>
Areia selecionada	10 <sup>-8</sup> - 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-1</sup>
Cascalho selecionado	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>0</sup>

**Tabela 3.2.** Valores Típicos de Permeabilidade Intrínseca e Condutividade Hidráulica para Materiais Inconsolidados, segundo Fetter (1988, *apud* Cabral, 1997).

Guiguer (1996) explica que o volume de água presente no solo e as características e concentrações dos constituintes dos hidrocarbonetos de petróleo podem influenciar significativamente o comportamento dos combustíveis líquidos no solo. Cita como exemplo, um solo que próximo da superfície apresente uma baixa taxa de umidade e um elevado teor de matéria orgânica, tenderá a reter os constituintes de peso molecular maior durante um vazamento de hidrocarbonetos.

A Lei de Darcy apresentou pela primeira vez o coeficiente K, denominado de coeficiente de proporcionalidade ou condutividade hidráulica. Segundo a teoria de Darcy o fluxo que atravessa um meio poroso homogêneo e isotrópico apresenta velocidade constante, perdendo carga de forma proporcional em função do tipo de material constituinte (Azevedo & Albuquerque Filho, 1998). A equação a seguir define a Lei de Darcy sendo válida para fluxos saturados e não saturados (Cleary, 1989):

$$V_d = q = Q/A = - K \times DH/DX$$

onde: V<sub>d</sub>, velocidade de Darcy (L/T); q, descarga específica (L<sup>3</sup>/T/L<sup>2</sup>); Q, taxa volumétrica de fluxo (L<sup>3</sup>/T); A, área total da seção transversal perpendicular à direção de fluxo (L<sup>2</sup>); K, condutividade hidráulica (L/T); ΔH, perda de carga hidráulica (L) através da distância ΔX (L).

## **Transmissividade (T)**

Segundo Cleary (1989) a transmissividade relaciona-se diretamente à condutividade hidráulica (K) e representa a vazão transmitida através de uma secção de largura unitária e altura igual à espessura b (saturada) do aquífero, sob gradiente igual a 1, é expressa em m<sup>2</sup>/dia:

$$T = K \times b$$

## **Coefficiente de Armazenamento (S)**

Representa o volume de água liberado ou armazenado por um aquífero, por unidade de área superficial do aquífero e por unidade de variação no componente da carga normal àquela superfície (Cleary, 1989). Expressa a relação entre as variações no volume de água armazenado no aquífero e as oscilações correspondentes do nível freático (Azevedo & Albuquerque Filho, 1998):

$$S = Vb/Vd$$

onde: S, coeficiente de armazenamento (adimensional); Vb, volume de água produzido; Vd, volume total drenado em um aquífero.

### **3.1.3.4. Heterogeneidades dos Solos**

Guiguer (1996) cita que devido às heterogeneidades dos solos, que envolvem variações na estrutura e no tipo e no tamanho das partículas que os compõem, são observadas taxas de porosidade e condutividade hidráulica também diferentes, tanto dentro como entre as várias camadas constituintes do perfil de solo. O contato entre estas camadas podem ser contínuos e gradativos ou descontínuos e definidos.

Segundo Cabral (1997) os aquíferos heterogêneos, de ocorrência mais comum, são constituídos por tipos litológicos de diferentes condutividades hidráulicas. Nos aquíferos sedimentares as heterogeneidades resultam da superposição de diferentes estruturas.

As características das várias camadas de um solo irão influenciar diretamente as vias de percolação dos combustíveis provenientes de vazamentos (Guiguer, 1996).

## **3.2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

A água doce representa apenas 3% do total da água existente na natureza. Os restantes 97% encontram-se nos oceanos e mares salgados. A maior parte da água doce, aproximadamente 2,3% dos 3% existentes, está congelada nas calotas polares e geleiras, ou em lençóis subterrâneos muito profundos. (Branco *et al.*, 1991).

A água subterrânea é considerada atualmente a segunda matéria-prima geológica mais importante, superada somente pelo petróleo. No Brasil a dependência deste recurso natural assume relativa importância uma vez que atende 61% da população (Rebouças, 1996).

Manoel Filho (1997a) cita que a origem da quase totalidade das reservas de água subterrânea está no ciclo hidrológico, que é controlado por inúmeros fatores como a ação da gravidade, tipo e densidade da cobertura vegetal e fatores climáticos (temperatura e umidade relativa do ar, ventos e insolação), estes influenciando mais diretamente a atmosfera e as superfícies líquidas, como os rios, lagos e oceanos.

### **3.2.1. DISTRIBUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Como já exposto no item 3.1.3.2. a água contida em subsuperfície, no solo e nas formações geológicas, também denominada de fase líquida do solo, distribui-se na vertical basicamente em duas zonas horizontais, a não saturada e a saturada, conforme a proporção relativa do espaço poroso que divide com a fase gasosa do solo. Neste item será abordada a questão mais detalhadamente, com ênfase à zona saturada e a formação de aquíferos.

### 3.2.1.1. Zona Saturada: Aquíferos

Diferentes tipos de aquíferos podem ser caracterizados em função do grau de porosidade, dimensões e interconexões dos poros que o constituem, fatores que permitem a movimentação das águas com menor ou maior facilidade (Azevedo & Albuquerque Filho, 1998).

#### **Aquíferos**

Conforme Cleary (1989), um aquífero é uma formação geológica que apresenta suficientes permeabilidade e porosidade capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos naturais. A maioria dos aquíferos desenvolvidos em todo o mundo e que apresentam vazões elevadas, são constituídos por areias e cascalhos inconsolidados, armazenados em depósitos aluvionares e glaciais e formações costeiras.

Os aquíferos se classificam em confinados e não-confinados dependendo da presença ou não da superfície freática (Cleary, 1989).

Segundo Manoel Filho (1997b), os aquíferos livres têm o seu limite superior de saturação em contato com o ar e como conseqüência a influência da pressão atmosférica. Os aquíferos não-confinados ou livres se referem àqueles situados próximos à superfície e assim a superfície freática não está confinada ou impedida de sofrer oscilações ascendentes ou descendentes através de materiais menos permeáveis, como as argilas (Cleary, 1989).

O aquífero ou lençol suspenso representa um tipo específico de aquífero livre que se forma sobre uma camada impermeável ou semipermeável com extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno, comumente com existência temporária (Manoel Filho, 1997b; Azevedo & Albuquerque Filho, 1998).

Quando o aquífero estiver envolvido nas suas porções superior e inferior por materiais relativamente mais impermeáveis (camadas confinantes), retardando a percolação da água, e apresentar em toda a sua extensão a presença de pressões mais elevadas que a atmosférica, este será chamado de aquífero confinado ou sob pressão (Cleary, 1989; Manoel Filho, 1997b). A recarga nestes aquíferos ocorre pela infiltração d'água no solo em pontos de recarga ou pela migração lenta através da camada confinante.

---

### **Aqüiclude**

Formado por materiais porosos com capacidade para armazenar água, atingindo em alguns casos o grau de saturação máximo, mas é incapaz de transmiti-la em condições naturais. Correspondem a formações impermeáveis, como as camadas de argila, (Manoel Filho, 1997b; Azevedo & Albuquerque Filho, 1998)

### **Aqüitardo**

Formado por uma camada ou rochas semi-permeáveis, delimitada no topo e/ou na base por camadas de permeabilidade muito maior. Apesar de armazenarem água em quantidades significativas, não permitem a sua circulação com eficiência. Incluem-se as argilas siltosas ou arenosas (Manoel Filho, 1997b; Azevedo & Albuquerque Filho, 1998)

### **Aqüífugo**

Correspondem a materiais impermeáveis, com baixo grau de porosidade, que nem armazenam nem transmite água. Como exemplo citam-se as rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas, sem fraturamento ou alteração (Azevedo & Albuquerque Filho, 1998).

### **3.3. PETRÓLEO: CONSTITUINTES E PRODUTOS DERIVADOS**

#### **3.3.1. CONSTITUINTES**

O petróleo bruto ou óleo cru representa a fonte primária de quase todos os derivados de petróleo e é formado por uma mistura de hidrocarbonetos de peso molecular variável apresentando em média 84,5% de carbono, 13% de hidrogênio, 1,5% de enxofre, 0,5% de nitrogênio e 0,5% de oxigênio (Solomons, 1996; Potter & Simmons, 1998; Fetter, 1999).

Conforme Hunt (1979, *apud* Fetter, 1999) podem ser identificados no petróleo mais de 600 hidrocarbonetos, sendo aproximadamente: 25% alcanos (parafinas), 50% cicloalcanos, 17% aromáticos, incluindo os aromáticos policíclicos, e 8% compostos asfálticos, constituídos por cadeias carbônicas de peso molecular elevado, com mais de 40 átomos de carbono.

#### **3.3.2. PRODUTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO**

A partir do óleo cru, por meio de destilação fracionada, são produzidas misturas combustíveis, caracterizadas pelos seus respectivos intervalos de temperatura e pressão. Outros processos, como o craqueamento (*cracking*) e reforma (*reforming*) alteram a composição dos hidrocarbonetos das frações obtidas com a destilação, objetivando otimizar a produção de diferentes derivados conforme a aplicação desejada, como por exemplo os combustíveis gasolina e óleo diesel (Potter & Simmons, 1998). Os combustíveis derivados de petróleo recebem ainda aditivos como o chumbo tetraetila (TEL) e o MTBE).

A gasolina é uma mistura complexa de hidrocarbonetos com diferentes graus de volatilização, como compostos alifáticos (alcanos, cicloalcanos, alquenos), aromáticos (BTEX) e aditivos, com cadeias carbônicas compreendidas na faixa de 5 a 10 átomos de carbono por molécula. Álcoois e éteres, compostos oxigenados, são adicionados na gasolina para reduzir a poluição atmosférica. Suas características físico-químicas definirão o seu comportamento e o dos seus constituintes no ambiente. Como regra, a composição da gasolina dependerá do óleo cru de origem, do processo e época do refinamento, bem como dos aditivos que recebe para melhorar o seu desempenho (Potter & Simmons, 1998; Ferreira & Zuquette, 1998).

Os hidrocarbonetos aromáticos (BTEX - benzeno, tolueno, etilbenzenos e xilenos) são produzidos durante o processo de destilação e são associados aos derivados de petróleo como a gasolina e o óleo diesel (Robbins *et al.*, 1993, *apud* Ferreira & Zuquette, 1998).

O óleo diesel é composto principalmente por hidrocarbonetos de cadeias carbônicas simples, não ramificadas, compreendidas na faixa de 14 a 18 átomos de carbono por molécula. As diferenças mais importantes entre a gasolina e o *diesel* estão no tamanho das cadeias, no número de carbono existente na estrutura, no peso molecular, na pressão de vapor e na menor quantidade de hidrocarbonetos aromáticos (BTEX) no óleo diesel (Ferreira & Zuquette, 1998; Fetter, 1999).

A **Tabela 3.3.** apresenta uma comparação quantitativa entre alguns compostos presentes na gasolina e no óleo diesel.

<b>Composto</b>	<b>Número de Carbonos</b>	<b>Gasolina (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>) % peso</b>	<b>Diesel (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) % peso</b>
<b>ALCANOS</b>			
n-Pentano	5	5,75 – 10,92	-
n-Octano	8	0,36 – 1,43	0,1
n-Dodecano	12	0,04 – 0,09	1,0 - 2,5
n-Heptadecano	17	0,31 – 1,96	1,4 – 2,9
n-Pentadecano	15	-	1,9 – 3,1
<b>AROMÁTICOS</b>			
Benzeno	6	0,12 – 3,50	0,003 – 0,10
Tolueno	7	2,73 – 21,80	0,007 – 0,70
Etilbenzeno	8	0,36 – 2,86	0,007 – 0,20
Xilenos (orto, meta e para)	8	3,22 – 8,31	0,037 – 1,109
<b>POLIAROMÁTICOS</b>			
Naftaleno	10	0,09 – 0,49	0,01 – 0,80
Benzo(a)pireno	20	0,19 – 2,8 mg/kg	0,000005 – 0,00084
Pireno	16	-	0,000018 – 0,015

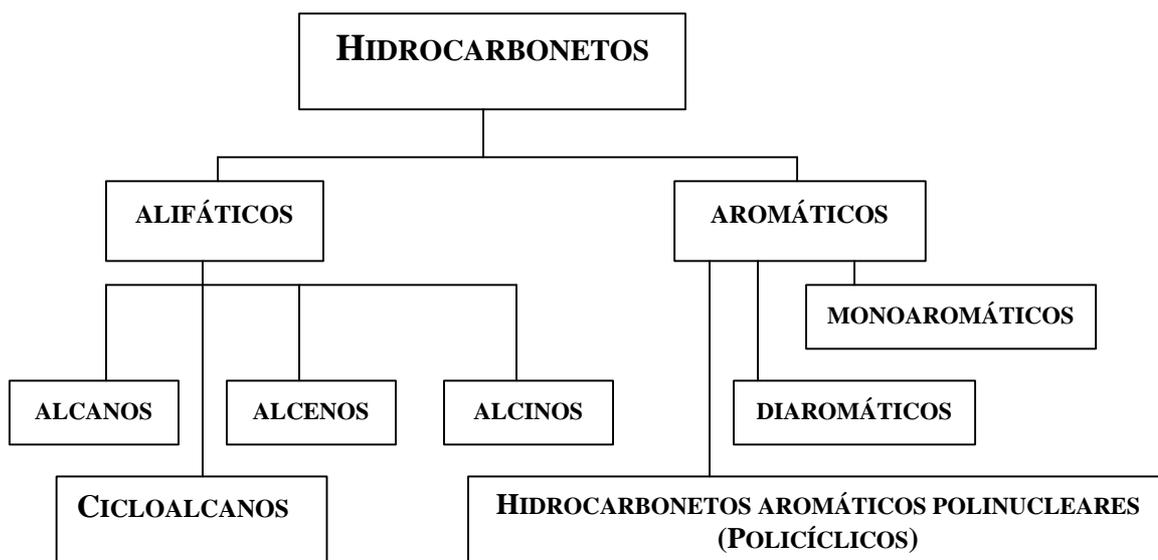
(-) não quantificado, segundo as fontes consultadas

**Tabela 3.3.** Comparação quantitativa entre alguns compostos constituintes da gasolina e do óleo diesel (fontes: Gustafson *et al.*, 1997; Potter & Simmons, 1998).

### 3.3.3. HIDROCARBONETOS

Hidrocarbonetos são compostos orgânicos constituídos por átomos de carbono e hidrogênio arranjados em configurações estruturais variadas. De modo geral são divididos em alifáticos e aromáticos e diferem pelo padrão de ligações carbônicas. A **Figura 3.3.** apresenta as relações estruturais entre os hidrocarbonetos.

Os hidrocarbonetos aromáticos diferenciam-se dos alifáticos por apresentarem um ou mais anéis de benzeno como componentes estruturais. O padrão de ligação entre as estruturas aromáticas contribuem para a polaridade que apresentam, ocorrendo o oposto com os compostos alifáticos que são apolares ou muito pouco polares. A polaridade das estruturas dos hidrocarbonetos explica como as moléculas desses compostos interagem entre si e com a água: com o incremento da polaridade, a solubilidade na água e o ponto de ebulição também se elevam (Potter & Simmons, 1998).



**Figura 3.3.** Relações estruturais entre os hidrocarbonetos (modificado de Potter & Simmons, 1998).

Os hidrocarbonetos alifáticos compreendem o grupo dos alcanos (cicloalcanos), alcenos, e alcinos, conforme o tipo de ligação apresentada entre os átomos de carbono, respectivamente simples, dupla ou tripla ligação. Os alcanos também apresentam estrutura

cíclica, sendo assim chamados cicloalcanos, também conhecidos como cicloparafinas ou naftenos.

Os hidrocarbonetos aromáticos são representados pelos monoaromáticos, como os compostos do grupo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), e os poliaromáticos (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - PAH), formados pela fusão de 2 ou mais anéis de benzeno. Como exemplo citam-se os compostos policíclicos antraceno, pireno e fenantreno, entre outros.

### 3.3.3.1. Propriedades Físico-Químicas

Dentre os diferentes tipos de líquidos imiscíveis com a água, também denominados de NAPLs (*Non Aqueous Phase Liquid*), diferenciam-se aqueles menos densos que a água, os LNAPLs (*Light Non Aqueous Phase Liquid*), grupo em se enquadram os hidrocarbonetos de petróleo constituintes de combustíveis como a gasolina e óleo diesel (p. ex. hidrocarbonetos mono e poliaromáticos), e aqueles mais densos que a água, os DNAPLs (*Dense Non Aqueous Phase Liquid*), grupo que abrange os hidrocarbonetos alifáticos clorados (p. ex. percloroetano, tricloroetano), conforme Fetter (1999).

Segundo Cole (1994), a remediação de áreas contaminadas com combustíveis constituídos por hidrocarbonetos de petróleo, quando comparada a outros tipos de contaminantes (p. ex. mercúrio e pesticidas), apresenta alguns aspectos positivos por formarem uma classe homogênea de compostos, serem menos densos do que a água, (USEPA, 1992a) e representarem compostos sensíveis à degradação pela ação de bactérias presentes no solo.

Cole (*op.cit.*) completa e cita que, contrastando com aspectos favoráveis, os hidrocarbonetos de petróleo podem não ser relativamente tóxicos ao meio ambiente e à saúde humana, mas podem apresentar eventualmente risco à explosão e incêndio, particularmente a gasolina, por ser constituída de compostos muito voláteis e portanto propiciar o acúmulo de gases inflamáveis.

As propriedades físico-químicas e o particionamento entre as fases líquida, vapor e sólida dos hidrocarbonetos são influenciados pela pressão e temperatura do ambiente e do tipo e quantidade de outras espécies de compostos.

Uma fase imiscível formada por vários compostos adquire propriedades que refletem a contribuição agregada de todos hidrocarbonetos existentes de acordo com a proporção de suas frações molares. Essas propriedades podem influenciar a mobilidade e a retenção dos combustíveis líquidos no solo (Guiguer, 1996; ASTM, 1998; Fetter, 1999).

### **Solubilidade em Água**

Quando um hidrocarboneto solúvel puro é continuamente adicionado a um volume de água, uma fase líquida orgânica aparecerá ao ser excedido o limite de solubilidade desse hidrocarboneto. Essa fase líquida orgânica constituirá a fase imiscível, também denominada fase livre, ou NAPL. Os constituintes de hidrocarbonetos que apresentam solubilidade maior são os aromáticos leves, como o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno e o xileno (Guiguer, 1996). A solubilidade é aproximadamente inversamente proporcional ao peso molecular do composto (Cole, 1994).

Um constituinte líquido orgânico pode se volatilizar e passar para a fase de vapor, neste caso a solubilidade é indicada pela pressão de vapor desse composto. Uma mistura do tipo da gasolina, em fase líquida, irá apresentar uma proporção de volatilização que dependerá das pressões de vapor dos seus constituintes, assim quanto maior for a pressão de vapor, maior será a sua capacidade de volatilizar-se (Guiguer, 1996; Fetter, 1999). Os fatores que influenciam o movimento do vapor e variações na sua pressão abrangem a temperatura do produto, sua densidade, os variados gradientes de concentração, variações na pressão atmosférica e o movimento de infiltração da água (Guiguer, 1996).

### **Viscosidade Dinâmica ou Cinemática**

Representa a medida da resistência de um fluido ao seu escoamento (resistência ao fluxo) e é aproximadamente paralela à pressão de vapor, recebendo influência direta da temperatura, (Cole, 1994; Guiguer, 1996). A **Tabela 3.4.** apresenta valores de solubilidade e viscosidade para alguns produtos derivados de petróleo à temperatura de 20 °C.

<b>Produto Derivado de Petróleo</b>	<b>Solubilidade (ppm)</b>	<b>Viscosidade (cST, centistokes)</b>
Gasolina	50 - 100	0,5 – 0,6
Benzeno	1,791	0,5
Tolueno	515	0,5
Etilbenzeno	75	0,6
Xilenos (média da mistura dos isômeros)	150	0,6
Querosene	< 1	1,5 - 2
Óleo Diesel	< 1	2 - 4
Óleo Lubrificante	< 1 (ppb)	400 - 600
Metanol (incluso para comparação)	> 100.000	< 0,1

**Tabela 3.4.** Solubilidade e viscosidade para alguns produtos derivados de petróleo a 20 °C (modificado de Riddick *et al.*, 1986 *apud* Cole, 1994).

### Densidade

É dada pela razão entre a massa de um determinado volume de uma substância pela massa do mesmo volume de água. Se apresentar valor menor que 1,0 flutuará na água, caso contrário, se for maior que 1,0 a substância afundará na água. Na maioria das vezes, quanto maior for o peso molecular e grau de halogenação (Cl, Br), maior será a densidade do composto.

### Tensão Interfacial

A tensão interfacial corresponde à energia de contato entre um líquido e outra substância, que pode ser um sólido, um líquido imiscível ou gás. Tal energia, por exemplo, pode ser explicada pela diferença do grau de atração entre as moléculas de uma substância A e a superfície de um determinado líquido, quando comparado com o grau de atração entre as moléculas da substância B e a superfície do mesmo líquido (Fetter, 1999).

## **Pressão de Vapor e a Constante de Lei de Henry ( $H_L$ )**

A pressão de vapor é uma medida da tendência de uma substância passar de um estado sólido ou líquido para o estado gasoso (Fetter, 1999).

A solubilidade de um gás em água é descrita pela Lei de Henry. A constante de Henry ( $H_L$ ) representa a razão entre a concentração de um composto químico específico na fase vapor e a concentração deste composto na fase líquida, dada pela equação (Fetter, 1999):

$$H_L = P_x / C_x$$

onde:  $P_x$ , pressão parcial do gás (atms numa dada temperatura);  $C_x$ , concentração de equilíbrio do gás dissolvido (mol / m<sup>3</sup> de água);  $H_L$ , Constante da Lei de Henry em atm (mol / m<sup>3</sup> de água)

Segundo a USEPA (1992b), um NAPL pode ser classificado como volátil e semi-volátil se apresentar à temperatura de 20 °C uma pressão de vapor maior que 1 mmHg e entre 1 e 10 mmHg, respectivamente.

## **Ponto de Ebulição**

Este parâmetro fornece uma indicação da medida de volatilidade de um fluido em relação ao ponto de ebulição normal de água (100°C), classificando-se em líquidos com baixo ponto de ebulição (<100°C) e alto ponto de ebulição (>100°C). Cole (1994) explica que apenas os produtos derivados de petróleo com alta pressão de vapor apresentarão uma fase vapor, em caso em contato com os poros da zona vadosa ou de aeração do solo. Para compostos orgânicos com a mesma estrutura básica, o ponto de ebulição será tanto maior quanto for o incremento do número de átomos de carbono, determinando um aumento no peso molecular (Fetter, 1999).

## Constante Dielétrica

A constante dielétrica indica a capacidade de um fluido em conduzir a corrente elétrica. A maioria dos NAPLs apresentam baixa constante dielétrica e comportamento isolante, características importantes na interação com solos argilosos, promovendo o aumento da condutividade hidráulica (Ogihara, 2000).

## Coefficientes de Partição

Octanol-Água ( $K_{ow}$ ): quantifica a tendência de uma substância orgânica ser dissolvida em água ou em solventes orgânicos. Quanto maior o valor deste coeficiente, maior a tendência do contaminante ser dissolvido em líquidos orgânicos do que em água (Gustafson *et al.*, 1997; Fetter, 1999). É expresso pela seguinte equação:

$$K_{ow} = C_o / C$$

onde:  $C_o$ , concentração na fase octanol (mg/L);  $C$ , concentração na fase aquosa (mg/L)

Solo-Água ( $K_d$ ): coeficiente que quantifica a tendência de um composto químico ser adsorvido pelo solo ou sedimento. É expresso pela seguinte equação:

$$K_d = C_s / C_w$$

onde:  $C_s$ , concentração no solo (mg/kg) ;  $C_w$ , concentração na fase aquosa (mg/L)

Carbono Orgânico ( $K_{oc}$ ): coeficiente que quantifica a tendência de um composto orgânico ser adsorvido pela fração de carbono orgânico do solo (Gustafson *et al.*, 1997). É expresso pela seguinte equação:

$$K_{oc} = C_c / C_w \quad \text{ou} \quad K_{oc} = K_d / f_{oc}$$

onde:  $C_c$ , concentração adsorvida (mg/kg de carbono orgânico do solo);  $C_w$ , concentração na fase aquosa (mg/L);  $K_d$ , coeficiente de partição solo-água;  $f_{oc}$ , fração de carbono orgânico do solo.

### 3.3.3.2. Comportamento e Transporte dos Hidrocarbonetos de Petróleo nos Meios Geológico e Hidrogeológico

Os hidrocarbonetos de petróleo representam um tipo de líquido não miscível em água, também chamado de NAPL (*Nonaqueous Phase Liquid*) e mais especificamente, por ser menos denso que a água ( $< 1 \text{ g/ml}$ ), sob a denominação de LNAPL (*Light Nonaqueous Phase Liquid*). Quando a densidade do líquido for maior que a da água ( $> 1 \text{ g/ml}$ ) este será um DNAPL (*Dense Nonaqueous Phase Liquid*), como exemplo citam-se os solventes orgânicos compostos por hidrocarbonetos halogenados.

Após a contaminação do solo e águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo, em decorrência de vazamento de tanque de armazenamento subterrâneo (TAS), rompimento de dutos ou outra forma que coloque o combustível em contato com o meio ambiente, o comportamento destes compostos dependerá principalmente das suas características físico-químicas e da sua relação naqueles ambientes. O entendimento das formas como estes compostos orgânicos ocorrem nas zonas saturada e não saturada do solo é importante para a caracterização de um vazamento e sua extensão vertical e horizontal, bem como para orientar a aplicação de tecnologias de remediação mais adequadas (LaGrega *et al.* 1994; Guiguer, 1996; Ferreira & Zuquette, 1998; Fetter, 1999).

Ao serem derramados em superfície, os LNAPs, representados no presente estudo pelos hidrocarbonetos de petróleo, migram verticalmente pela zona vadosa sob a influência das forças gravitacional e capilar, podendo haver também alguma expansão horizontal devido à atuação de forças capilares. Esta dispersão em subsuperfície não ocorre então de forma uniforme e homogênea, mas sim sob a forma de acumulações discretas que dependem das propriedades químicas e físicas do meio e do fluido percolante (Guiguer, 1996; Fetter, 1999; Dehaini, 2001).

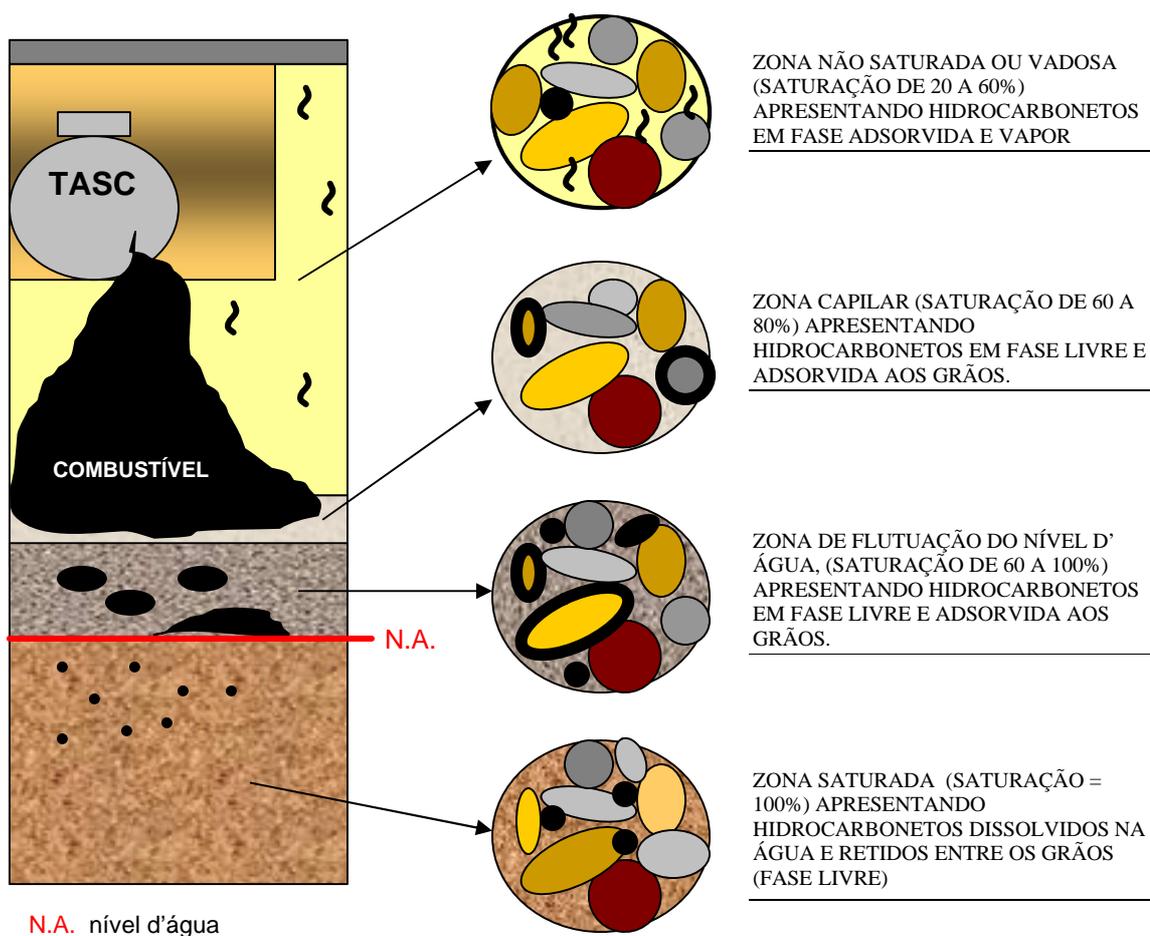
Segundo Lindorff (1979, *apud* Spilborghs, 1997), as características geológicas e hidrogeológicas de um local impactado determinarão a extensão da área em subsuperfície afetada pelos contaminantes. Como exemplo, cita que uma potencial contaminação na área de recarga de um aquífero poderá comprometer o reservatório, principalmente se a geologia presente apontar para sedimentos de granulometria maior ou fraturamento rochoso, elementos favoráveis à aceleração da migração dos contaminantes em subsuperfície.

### 3.3.3.2.1. Formas de Ocorrência: Fases dos Hidrocarbonetos nas Zonas Não Saturada e Saturada

Um aquífero contaminado por LNAPL pode apresentar as seguintes fases: 1) gasosa ou vapor, com contaminantes sob forma de vapores; 2) fase aquosa ou dissolvida, na qual uma parte dos compostos orgânicos pode estar dissolvida na água, dependendo da sua solubilidade; 3) fase imiscível ou livre, quando os contaminantes estão presentes como uma fase imiscível; 4) fase sólida, adsorvida ou retida, quando as moléculas dos hidrocarbonetos aparecem adsorvidas na superfície dos sólidos (Guiguer, 1996; Ferreira & Zuquette, 1998).

Na zona não saturada a contaminação por hidrocarbonetos de petróleo se distribuirá e poderá originar um sistema com quatro fases, compreendido pelas fases vapor, adsorvida ou retida, dissolvida e livre, enquanto que na zona saturada a ausência de poros do solo preenchidos por ar não permite o acúmulo da fase vapor. Portanto, neste meio existem somente 3 fases, a adsorvida ou retida, a dissolvida e a livre.

A seguir são apresentadas as principais características e comportamento de cada uma das quatro fases, vapor, retida ou adsorvida, dissolvida e livre. A **Figura 3.4.** apresenta um perfil esquemático de solo impactado por vazamento de combustível, proveniente de TASC (Tanque de Armazenamento Subterrâneo de Combustível), ilustrando a distribuição das fases de ocorrência dos hidrocarbonetos de petróleo e o grau de saturação do solo



**Figura 3.4.** Perfil esquemático de solo impactado por vazamento de combustível, proveniente de TASC (Tanque de Armazenamento Subterrâneo de Combustível). Visão de detalhe da distribuição das fases de ocorrência dos hidrocarbonetos de petróleo e o grau de saturação do solo (modificado de Cole, 1994).

### Hidrocarbonetos em Fase Livre

Corresponde ao produto puro (LNPL) localizado nas porosidades da zona não saturada ou saturada, e sobrenadante à franja capilar, que não foi adsorvido pelas partículas do solo (Oliveira, 1992; LaGrega *et al.*, 1994).

Logo após o vazamento de um combustível líquido para o solo este migrará descendentemente, até atingir o nível d'água, segundo forças capilares e gravitacional. Nyer

(1992) cita que durante esta migração do LNAPL poderá ocorrer: 1) a sua adsorção pelas partículas do solo, 2) a interrupção do movimento vertical, obrigando-o a caminhar lateralmente, seja pela presença de uma camada de solo mais impermeável ou barreiras como tubulações ou o encontro do produto com o nível freático, caracterizando a fase livre (Oliveira, 1992).

Atingindo a zona saturada, os LNPLs irão formar uma pluma de contaminação de fase livre e migrar no sentido do fluxo d'água subterrâneo. Esta pluma representa a extensão lateral do vazamento e a velocidade de seu deslocamento dependerá da velocidade do fluxo, volume de combustível presente, bem como da condutividade hidráulica do aquífero impactado.

O espalhamento vertical dos hidrocarbonetos presentes na franja capilar sofrerá influência direta das flutuações do nível freático, movendo-se descendentemente caso o nível d'água abaixe e ascendentemente quando houver nova recarga do aquífero.

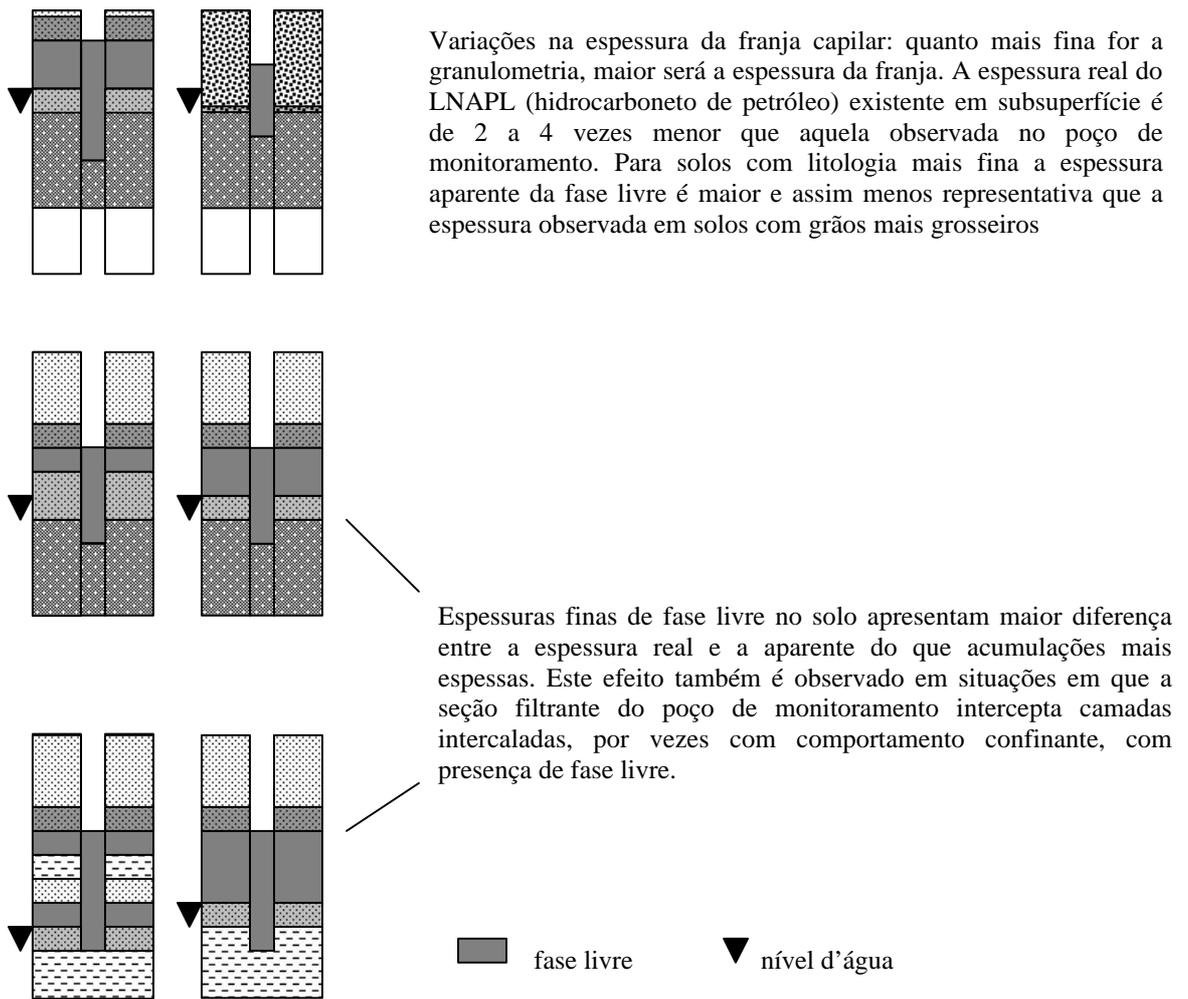
Chapelle (1992) cita que a persistência do hidrocarboneto em fase livre na água subterrânea caracterizará uma fonte permanente de contaminação, uma vez que o produto será continuamente adsorvido pelos sedimentos e dissolvido na água subterrânea em decorrência de eventuais oscilações verticais e horizontais do nível freático devendo, portanto, ser imediatamente removido (Cole, 1994).

Segundo Oliveira (1992) à temperatura de 15°C as densidades da água, gasolina e óleo diesel são respectivamente 0,998 g/ml, 0,729 g/ml e 0,827 g/ml.

### Fase Livre: Espessura Real x Espessura Aparente

Um problema freqüente na quantificação da fase livre de hidrocarbonetos refere-se à sua espessura aparente quando observada em poços de monitoramento (Oliveira, 1992).

Testa & Winegardner (1991) apresentam alguns fatores que explicam esta diferença, conforme ilustra a **Figura 3.5**.



**Figura 3.5.** Diferenças entre as espessuras de fase livre observadas no poço de monitoramento e no solo (modificado de Testa & Winegardner, 1991).

A espessura aparente da fase livre pode ser explicada ainda por outros fatores (Testa & Winegardner, 1991 e 1993; Bedient *et al.*, 1994 *apud* Dehaini, 2001): 1) ausência da atuação de forças capilares no interior do poço de monitoramento; 2) diferença de densidade entre os líquidos (por exemplo água e LNAPL ou hidrocarboneto), o que resulta no maior espaço que o líquido menos denso ocupará no poço para que o equilíbrio hidrostático seja atingido; 3) flutuações do nível d'água sazonais ou induzidas por bombeamento; e 4) a diferença entre a espessura aparente da fase livre, observada em poços de monitoramento, e a presente no aquífero tenderá a ser maior quanto mais longe do centro da acumulação o poço estiver.

### **Hidrocarbonetos em Fase Adsorvida ou Retida**

Representa a fase em que o composto orgânico (NAPL) permanece retido na superfície dos grãos ou nos interstícios (poros) que compõem o solo, sedimento ou substrato rochoso situado nas zonas não saturada e saturada (Fetter, 1999; Maximiano, 2001). Esta forma de ocorrência é explicada por processos de adsorção química, absorção e ligações fracas (pontes de hidrogênio e *Van der Waals*).

### **Hidrocarbonetos em Fase Dissolvida**

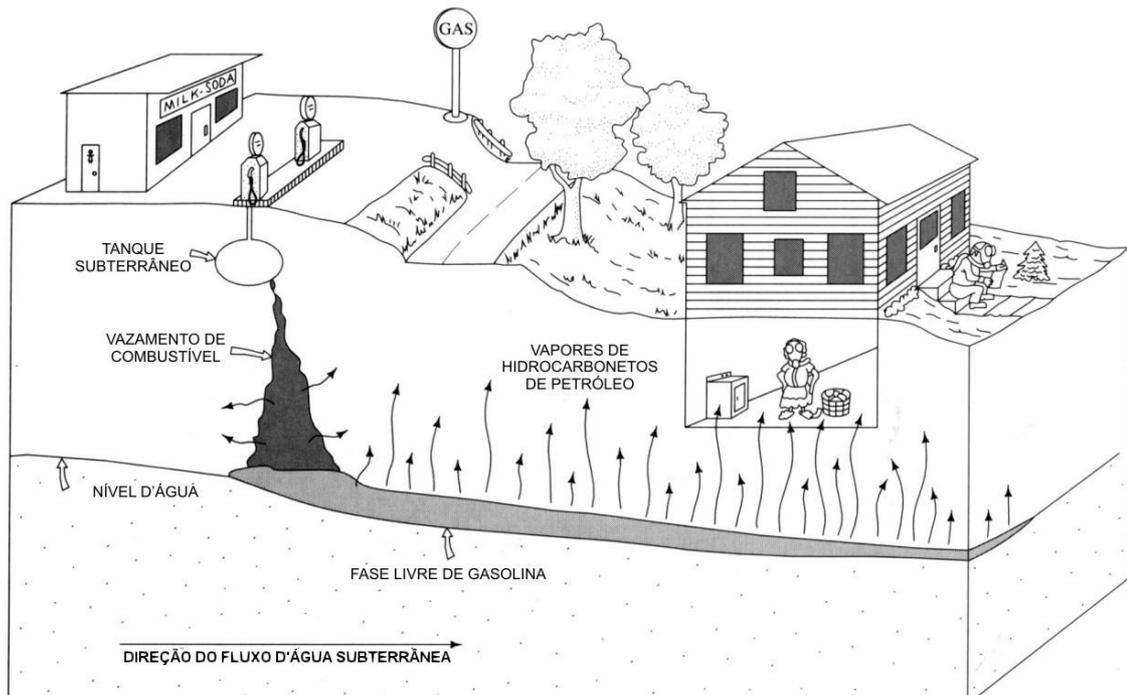
Ocorre toda vez que houver compostos orgânicos solubilizados na água das zonas não saturada e saturada, resultando portanto do contato entre a água da sub-superfície e os hidrocarbonetos em fase líquida. Dentre as fases de hidrocarbonetos, a dissolvida representará a de maior volume em função da maior mobilidade dos compostos dissolvidos na água, em contrapartida a maior parte do composto se apresentará em fase livre e adsorvida ao solo (Maximiano, 2001).

Conforme Oliveira (1992), a quantidade de compostos orgânicos que se dissolve na água subterrânea depende principalmente de sua solubilidade e do grau de mistura entre a fase livre e a água subterrânea. As concentrações dos hidrocarbonetos dissolvidos e a capacidade de transferência de compostos em fase livre para o lençol freático dependerá ainda da profundidade e flutuações do lençol, da condutividade hidráulica do solo, da pluviosidade, da velocidade do fluxo d'água subterrâneo e temperatura da água.

### **Hidrocarbonetos em Fase Vapor**

Correspondem aos hidrocarbonetos que são volatilizados a partir das fases livre, dissolvida e adsorvida e se alojam nos vazios existentes no solo (Oliveira, 1992; Maximiano, 2001). A migração da fase vapor se dá em função das propriedades físicas e químicas do composto contaminante (como pressão de vapor, solubilidade, concentração, densidade e viscosidade) e das características do aquífero (como condutividade hidráulica, profundidade do nível estático, direção do fluxo d'água subterrâneo, porosidade), conforme Oliveira (1992).

A **Figura 3.6.** ilustra a migração de vapores orgânicos através da zona não saturada.



**Figura 3.6.** Liberação de vapores orgânicos na zona não saturada a partir de vazamento de TASC (Tanque de Armazenamento Subterrâneo de Combustível), modificado de Fetter (1999).

### 3.3.3.2.2. Mecanismos de Transporte

Uma síntese dos mecanismos de transporte do LNAPL, representado neste estudo pelos hidrocarbonetos de petróleo, através das zonas não saturada e saturadas do solo é apresentada em Ferreira & Zuquette (1998), da qual destacamos:

O transporte do LNAPL nas zonas não saturadas e saturadas do solo depende da quantidade de LNAPL liberado no meio:

- 1) pequenos volumes atingirão, ao fluírem através da zona não saturada, o estado de saturação residual. Por dissolução a água presente nos poros do solo levará os componentes mais solúveis do LNAPL (por exemplo o benzeno, o tolueno e o xileno) até a zona saturada, onde a distribuição desta fase dissolvida se fará por difusão e advecção. A partição da fase gasosa formada pelos compostos mais voláteis distribuirá esses vapores no solo e no ar, e sua mobilidade através do aquífero se dará por difusão molecular.
- 2) quando volumes maiores de LNAPL são liberados no solo seu deslocamento descendente os coloca na zona de capilaridade próximo à zona saturada. Neste momento, os componentes mais solúveis do produto infiltrado são carreados mais rapidamente que os menos solúveis. No topo da zona de capilaridade, onde a água satura um grande volume de poros do solo, o produto acumulado causa uma redução na permeabilidade relativa do meio e fica impedido de mover-se para baixo. Em função de sua baixa densidade, o LNAPL então tende a se espalhar e flutuar sobre o topo da franja capilar, constituindo uma fase livre imiscível, passando a fluir na mesma direção do fluxo da água subterrânea.

Ao atravessar a zona não saturada o movimento do LNAPL se dá sob ação da força gravitacional e, ao atingir a zona saturada, a fase livre movimentada-se juntamente com o fluxo d'água subterrâneo (Bonazountas, 1991 *apud* Maximiano, 2001; Guiguer, 1996).

Na zona não saturada os vapores dos compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis apresentam uma tendência de se movimentarem das áreas de maior para as de menor pressão (Bonazountas, 1991 *apud* Maximiano, 2001). A fase vapor dos hidrocarbonetos de petróleo por demonstrarem grande mobilidade são freqüentemente utilizados na detecção de vazamentos.

O movimento de solutos dissolvidos na água subterrânea explica como os contaminantes constituídos por hidrocarbonetos de petróleo são distribuídos na zona saturada. O transporte envolve três processos básicos, segundo Fetter (1988 e 1999), a difusão molecular ou difusão, a advecção e a dispersão mecânica.

### **Transporte por Gradientes de Concentração: Difusão Molecular**

A difusão ocorre quando as moléculas e íons dos solutos dissolvidos na água subterrânea apresentam mobilidade segundo um gradiente de concentração que é dirigido do meio mais concentrado para o de menor concentração (Weber, 1988 apud Finotti, 1997; Fetter, 1999). Este coeficiente relaciona o fluxo e o gradiente de concentração para uma determinada concentração inicial dentro de um sistema em equilíbrio dinâmico. A massa do fluido em difusão molecular é proporcional ao gradiente de concentração, sendo expressa pela Primeira Lei de Fick, em uma dimensão (Fetter, 1999):

$$F = - D_a (dC / dx)$$

onde: F, fluxo de massa do soluto por unidade de área e por unidade de tempo;  $D_a$ , coeficiente de difusão ( $L^2/T$ ); C, concentração do soluto ( $M/L^3$ );  $dC/dx$ , gradiente de concentração ( $M/L^3/L$ ).

Para sistemas onde as concentrações do soluto variam com o tempo aplica-se a Segunda Lei de Fick, em uma dimensão (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 1999):

$$\partial C / \partial T = D_a \partial^2 C / \partial x^2$$

onde:  $\partial C / \partial T$  varia em concentração com o tempo ( $M/L^3/T$ )

A difusão molecular pode ocorrer mesmo não havendo significativo fluxo d'água subterrâneo, representando para materiais com baixa permeabilidade o principal meio de transporte de sólidos dissolvidos (Fetter, 1999).

Segundo Guiguer (1996) a dispersão dos hidrocarbonetos em fase dissolvida causada por difusão molecular é irrelevante, uma vez que ocorre principalmente sob condições relativamente estáticas, a condutividades hidráulicas e velocidades de fluxo muito baixas.

## Transporte por Advecção

Processo em que os sólidos dissolvidos se movimentam segundo a média da velocidade linear da água subterrânea que os contém, acompanhando o fluxo. É também chamado transporte advectivo ou convecção (Fetter, 1999).

Segundo Mackay *et al.* (1985, *apud* Finotti, 1997) a advecção é o principal processo no transporte de sólido dissolvidos em aquíferos predominantemente arenosos. É expresso pelas equações:

$$\mathbf{J} = \mathbf{Q} \times \mathbf{C}$$

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{T}} = -\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{x}}$$

onde: J, taxa de descarga de massa (M / T); Q taxa de fluxo volumétrico; u, velocidade média da água; x, distância (L);  $\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{T}$  varia em concentração com o tempo (M / L<sup>3</sup> / T).

## Dispersão Mecânica e Hidrodinâmica

Ao longo do caminho que o fluido contendo partículas percorre haverá o encontro e mistura com o fluido sem sólidos dissolvidos, resultando na diluição da concentração desses sólidos ao longo do caminho do fluxo. Este fenômeno é conhecido como dispersão mecânica, podendo resultar em dois tipos: longitudinal, quando a dispersão paralela ao fluxo principal e transversal, quando se dispersar perpendicularmente ao fluxo principal (Fetter, 1988 e 1999).

Os fatores responsáveis pela dispersão longitudinal em escala de poros individuais (Fetter, 1999) são: 1) o fluido tende a se mover mais rapidamente no centro dos poros do que junto às suas margens; 2) algumas das partículas contidas no fluido percorrerão um caminho de fluxo mais longo do que outras para se deslocar em uma distância linear similar; e 3) alguns poros são maiores do que outros permitindo que o fluxo do fluido se mova mais rapidamente.

A dispersão hidrodinâmica se apresenta como a combinação dos processos de difusão molecular e dispersão mecânica, sendo expressa pelas fórmulas (Fetter, 1999):

$$D_L = \alpha_L v_i + D$$

$$D_T = \alpha_T v_i + D$$

onde:  $D_L$ , coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal;  $D_T$ , coeficiente de dispersão hidrodinâmica transversal;  $\alpha_L$ , dispersividade dinâmica longitudinal;  $\alpha_T$ , dispersividade dinâmica transversal;  $v_i$ , velocidade média linear na direção  $i$  (L / T).

### 3.3.3.2.3. Fatores Influentes no Transporte e Distribuição dos NAPLs em Subsuperfície

#### Molhabilidade e Espalhamento

Na zona não saturada o NAPL tende a cobrir os grãos com um filme ao redor dos poros. Este filme eventualmente se desenvolve ocupando todos os espaços dos poros, caso haja uma quantidade suficiente de NAPL. Isto ocorre porque dos dois fluidos existentes na zona não saturada (ar e NAPL), o NAPL é o que apresenta maior atração aos sólidos do solo. Essa afinidade é definida como grau de molhabilidade e se refere ao espalhamento preferencial de um fluido, denominado fluido molhante, como o ar, água ou NAPLs, sobre superfícies sólidas (Schwille, 1988; EPA, 1991a e 1991b; Ferreira & Zuquette, 1998).

Conforme Mercer & Cohen (1990) os principais fatores que afetam a molhabilidade são a mineralogia, a presença de matéria orgânica, a composição do NAPL e a química da água presente nos poros do solo.

Segundo Adamson (1982, *apud* Ogihara, 2000) a molhabilidade é uma função da tensão interfacial representada pelo ângulo de contato entre dois fluidos imiscíveis com uma superfície sólida, expressa pela equação de Young:

$$\cos \phi = \frac{\sigma_{ns} - \sigma_{ws}}{\sigma_{nw}}$$

onde:  $\phi$ , ângulo de contato,  $\sigma_{ns}$ , tensão superficial NAPL-sólido;  $\sigma_{ws}$ , tensão superficial água-sólido.

O transporte de NAPLs por espalhamento é predominante na zona não saturada, na qual se comporta como o fluido molhante, espalhando-se para os poros adjacentes, atingindo a zona saturada e impactando o aquífero. Geralmente, na zona saturada o NAPL comporta-se como um fluido não molhante, pois o meio poroso se encontra completamente preenchido por água, e portanto apresentando menor concentração residual.

## Grau de Saturação

Segundo Ferreira & Zuquette (1998) dependendo das porcentagens relativas do volume de poros ocupados por diferentes líquidos, o grau de saturação e o coeficiente de permeabilidade do meio poroso serão diferentes daqueles se os poros fossem ocupados por um único líquido. Tais diferenças influenciam significativamente o transporte e a distribuição dos NAPLs.

## Saturação Residual

A saturação residual é definida como o volume de hidrocarbonetos (ou qualquer outro tipo de NAPL) armazenado nos poros, em relação ao volume total de poros, e expressa pela equação (USEPA, 1991; Ferreira & Zuquette, 1998):

$$S_r = V_h / V_t \times 100$$

onde:  $S_r$ , saturação residual;  $V_h$ , volume de poros ocupados pelos hidrocarbonetos;  $V_t$ , volume total de poros.

Durante a migração da contaminação em subsuperfície, a saturação residual é explicada pelo grau de saturação no qual o NAPL torna-se descontínuo e é imobilizado por forças de capilaridade (Mercer & Cohen, 1990; Guiguer, 1996). A porcentagem relativa de silte e argila nas paredes dos poros e a permeabilidade do meio desempenham um papel mais importante do que as propriedades do fluido no controle da saturação residual (Hasan, 1996 *apud* Ferreira & Zuquette, 1998). A **Tabela 3.5.** apresenta alguns valores de retenção de óleo para diferentes tipos litológicos.

A presença de hidrocarbonetos de petróleo sob forma residual atua como permanente fonte de contaminação em subsuperfície, devendo portanto ser removida (Nadim *et al.*, 2000).

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Capacidade de Retenção de Óleo (1/m<sup>3</sup>)</b>
Rocha, areia grossa	5
Cascalho, areia grossa	8
Areia grossa, areia média	15
Areia média, areia fina	25
Areia fina, silte	40

**Tabela 3.5.** Capacidade de retenção de óleo em solos não saturados (CONCAWE, 1979, *apud* Ferreira & Zuquette, 1998).

### **Permeabilidade Relativa ( $K_{ri}$ )**

O coeficiente de permeabilidade relativa representa uma redução no coeficiente de permeabilidade do solo, e é definido como a taxa de permeabilidade para um fluido a uma dada saturação em relação a esta permeabilidade para uma saturação igual a 100%. A permeabilidade relativa situa-se em um intervalo de 1,0 para a completa saturação e 0 para não saturado (Ferreira & Zuquette, 1998). Este coeficiente é expresso pela fórmula:

$$K_{ri} = K_i (S_i) / K_{si}$$

onde:  $K_{ri}$ , coeficiente de permeabilidade relativa para o fluido;  $S_i$ , volume de poros ocupados pelo fluido  $i$ ;  $K_i (S_i)$ , coeficiente de permeabilidade de um meio para um fluido  $i$  em uma saturação;  $S_i$ ;  $K_{si}$ , coeficiente de permeabilidade do meio quando ele está completamente saturado com o fluido  $i$ .

Num meio poroso ocupado por água e NAPL a permeabilidade em relação aos dois líquidos será diferente e menor se houvesse um único líquido, uma vez que nem o NAPL nem a água preenchem o volume total dos poros (Ferreira & Zuquette, 1998).

### 3.3.3.2.4. Mecanismos de Redução do Transporte

#### Retardamento

O retardamento se refere às variações dos níveis de concentrações inicial e final dos contaminantes dissolvidos (solutos) em relação ao movimento da água subterrânea, como resultado de processos de sorção (adsorção, absorção e troca iônica) e filtração (LaGrega *et al.*, 1994; Fetter, 1999). Caracterizam processos reversíveis pois os compostos orgânicos não sofrem transformações, podendo reaparecer em solução, após terem sido removidos a partir de sua fases livre, dissolvida ou vapor, conforme variações nas condições de concentração (Ferreira & Zuquette, 1998).

Segundo Schoor (1996, *apud* Finotti, 1997) a sorção compreende a mais importante reação que um contaminante pode sofrer no subsolo.

O retardo consiste na diferença entre o movimento do contaminante em relação ao movimento da água em decorrência de processos de sorção do composto. Na ausência de sorção representa um número adimensional igual a 1, e é expresso pelas equações:

$$R = v_{\text{água}} / v_{\text{solutos}} \quad \text{ou} \quad R = 1 + k_d \times r_b / n$$

onde: R, retardo; v, velocidade;  $\rho_b$ , densidade do solo; n, porosidade efetiva do solo;  $k_d$ , coeficiente de partição solo-água.

Os compostos químicos em geral apresentam fatores de retardamento específico diferentes segundo a variação de porosidade do meio em estão presentes. Assim, uma pluma de contaminação constituída por uma mistura de compostos (por exemplo um vazamento de gasolina) dissolvidos na água subterrânea, apresentará uma distribuição diferenciada das concentrações conforme o retardamento de cada um destes compostos.

A adsorção se refere ao processo pelo qual a partícula de um composto (por exemplo hidrocarboneto de petróleo) se ligará à superfície do material geológico, podendo ser resultante de forças eletrostáticas ou reações químicas. Em materiais geológicos com maiores quantidades de matéria orgânica, como as turfas, a taxa de adsorção será muito mais significativa do que em solos e rochas que contenham menos que 1% de carbono (Ferreira & Zuquette, 1998).

A filtração é um processo físico pelo qual as fases dissolvida, livre e vapor dos compostos orgânicos ficam retidas em porções isoladas do material geológico de subsuperfície, em determinados poros que não se comunicam com os demais (LaGrega *et al.*, 1994).

### **Atenuação**

Difere-se da retardação por ser um processo irreversível, havendo redução de massa dos compostos orgânicos presentes em subsuperfície. A atenuação ou atenuação natural pode se dar por reações de óxido-redução química ou biológica, hidrólise e volatilização (LaGrega 1994; Fetter, 1999).

Dentre os processos de atenuação dos contaminantes orgânicos, como os hidrocarbonetos de petróleo, as reações de óxido-redução biológicas ou biodegradação é a mais importante. A volatilização também apresenta importância significativa pois grande parte dos compostos constituintes da gasolina, óleo diesel e outros derivados de petróleo apresentam alta pressão de vapor à temperatura ambiente, perdendo-se para atmosfera.

Maximiano (2001) cita que a hidrólise não representa um processo de atenuação significativa para compostos orgânicos quando comparado aos demais processos, por exemplo a biodegradação.

No item 3.4.1. a atenuação natural é tratada mais detalhadamente.

### **3.3.3.2.5. Mecanismos de Aceleração do Transporte**

#### **Co-solvência**

Processo no qual são adicionados solventes orgânicos ao subsolo (por exemplo o etanol e o metanol), aumentando a solubilidade e conseqüentemente a interação entre o hidrocarboneto de petróleo e a água subterrânea, uma vez que diminui a adsorção dos compostos ao solo (Schwarzenbach *et al.*, 1993 *apud* Maximiano, 2001).

Os efeitos da co-solvência do etanol, adicionado à gasolina e ao óleo diesel, aumentando a solubilidade em água dos Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH – Total Petroleum Hydrocarbon) presentes naqueles combustíveis são apresentados em diversos trabalhos como Finotti (1997), Corseuil *et al.* (1999) e Kaipper *et al.* (2001 e 2002).

O etanol altera o comportamento físico-químico dos combustíveis derivados de petróleo, podem passar a apresentar tanto no solo como na água subterrânea diferentes solubilidade, mobilidade e degradação, interferindo nos modelos tradicionais de transporte dos hidrocarbonetos (Finotti, 1997).

Em testes de laboratório, Kaipper *et al.* (2002) demonstrou que o efeito da co-solvência do etanol, aumentando a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo presentes no óleo diesel, é mais pronunciada nos compostos mais voláteis como os aromáticos (por exemplo o benzeno, tolueno e naftaleno) e em menor expressão nos compostos alifáticos (por exemplo os alcanos).

### **Dissolução**

Neste processo os compostos orgânicos em fase livre ao serem dissolvidos na água subterrânea aumentam sua mobilidade e seu espalhamento em subsuperfície (Maximiano, 2001).

### 3.3.3.3. Toxicidade e Efeitos à Saúde

Os hidrocarbonetos são considerados perigosos uma vez que (Cole, 1994): 1) são produtos inflamáveis, apresentando risco de incêndio e explosões (por exemplo a gasolina); 2) são tóxicos e prejudiciais à saúde humana; e 3) podem causar impactos ambientais, especialmente às águas subterrâneas e de superfície.

O acúmulo de vapores de hidrocarbonetos em residências, garagens e porões, provenientes da contaminação de solos e águas subterrâneas, em decorrência do vazamento de combustíveis em postos de serviço, caracteriza uma situação de risco à explosão e incêndio Gloeden (1999).

Muitos trabalhadores que rotineiramente estão expostos aos vapores orgânicos de hidrocarbonetos podem apresentar insuficiência renal crônica e outros efeitos prejudiciais à saúde. Sintomas como tonturas, perda de coordenação e inconsciência também são sinais de intoxicação por hidrocarbonetos, tendo sido observados com frequência em trabalhadores envolvidos em escavações de áreas contaminadas com gasolina, como remoção de tanques subterrâneos e remediação de áreas (Cole, 1994).

A exposição dermal ao óleo diesel apresenta potencial prejuízo aos rins. Este derivado do petróleo inclui na sua composição altas porcentagens de PAHs, como naftaleno, acenaftaleno, antraceno e fenantreno (Cole, 1994).

Aditivos utilizados na gasolina para aumentar a sua performance, como o MTBE e o chumbo tetraetila (TEL), também causam sérios danos à saúde humana. O MTBE quando inalado em altas concentrações provoca tontura, sonolência e dor de cabeça, náusea e vômitos e o chumbo é neurotóxico.

A toxicidade dos hidrocarbonetos é avaliada em função do tipo de exposição, que está relacionado ao caminho de entrada do composto no organismo pode ser aguda, crônica e subcrônica, diferenciando-se pela quantidade e tempo de exposição em relação ao grupo de indivíduos observados.

O tempo necessário para avaliar os efeitos da toxicidade varia de 7 anos ao tempo de vida para a crônica, de semanas a 7 anos para a subcrônica e da ordem de alguns dias para a aguda.

Os resultados destes estudos estabelecem a dose resposta, conforme a relação quantitativa entre a concentração da dose e o grau dos seus efeitos adversos à saúde, permitindo a determinação da dose segura de um certo composto tóxico e a definição de coeficientes utilizados no cálculo do risco (USEPA, 1989). Alguns destes coeficientes são descritos a seguir (ASTM, 1995):

- NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*), indicativo da maior dose em que não se observa nenhum efeito no organismo;
- LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*), indicativo da menor dose em que não se observa qualquer efeito no organismo;
- RfD (*Reference Dose*), representa a estimativa da dose de exposição diária de uma determinada população, suficiente para eliminar o risco de efeitos nocivos pelo período de uma vida. É utilizado para os compostos tóxicos não carcinogênicos;
- SF (*Slope Factor*), fator de carcinogenicidade, representa o risco produzido pela exposição diária a 1 mg/Kg/dia do composto pelo período de uma vida.

O quadro a seguir resume as categorias da classificação USEPA (ASTM, 1998) quanto à carcinogenicidade dos compostos:

<b>Classificação USEPA – U.S. Environmental Protection Agency</b>	
<b>Grupo</b>	<b>Descrição</b>
<b>A</b>	Carcinogênico para humanos, suficientes evidências (estudos epidemiológicos)
<b>B1</b>	Provavelmente carcinogênico para humanos, evidências limitadas (estudos epidemiológicos)
<b>B2</b>	Provavelmente carcinogênico para humanos, pouca ou nenhuma evidência (estudos em animais)
<b>C</b>	Possivelmente carcinogênico para humanos (estudos em animais)
<b>D</b>	Não classificável como carcinogênico para humanos
<b>E</b>	Potencialmente não carcinogênico para humanos

A **Tabela 3.6.** apresenta os parâmetros toxicológicos e efeitos à saúde humana de alguns hidrocarbonetos de petróleo.

Composto	Nº carbonos	RfD (mg/kg/dia)	NOAEL (mg/kg/dia)	SF	carcinogênico	efeitos à saúde
Benzeno	C6	-	-	0,029	S (A <sup>1</sup> )	Depressão do SNC, náusea, vômito
Tolueno	C7	0,2	312	-	N	Depressão do SNC, fadiga, irritação dos olhos
Etilbenzeno	C8	0,1	97,1	-	N (D <sup>1</sup> )	Depressão do SNC, náusea, vômito Danos renais e hepáticos
Xilenos	C8	2,0	179	-	N	Depressão do SNC, náusea, irritação da pele, vômito
Benzo(a)antraceno	C18	-	-	0,73	S (B2 <sup>1</sup> )	-
Benzo(b)fluoranteno	C20	-	-	-	S (B2 <sup>1</sup> )	-
Benzo(a)pireno	C20	-	-	7,3	S (B2 <sup>1</sup> ) <sup>1</sup>	-
Dibenzo(ah)antraceno	C22	-	-	-	S (B2 <sup>1</sup> )	-
Criseno	C18	-	-	-	S (B2 <sup>1</sup> )	-
Fenantreno	-	0,03	-	-	N	-
Fluoranteno	C16	0,04	125	-	N	-
Fluoreno	C13	0,04	125	-	N	-
Pireno	C16	0,03	75	-	N	-
Antraceno	C14	0,3	1000	-	N	-
Naftaleno	C10	0,04	35,7	-	N (D <sup>2</sup> )	Tontura, fraqueza tremores, vômito

(-) sem dados disponíveis (S) sim (N) não

(1) Classificação USEPA quanto à carcinogenicidade

**Tabela 3.6.** Parâmetros Toxicológicos e Efeitos à Saúde Humana de Alguns Hidrocarbonetos de Petróleo (fontes: Cole, 1994; TPHCWGS, 1997; ASTM, 1998).

### 3.4. TÉCNICAS DE SANEAMENTO E REMEDIAÇÃO

Segundo LaGrega *et al.* (1994), previamente à elaboração de um plano de remediação para uma área contaminada, devem ser conduzidos estudos de avaliação de risco com o objetivo de subsidiar a decisão de confronto ao problema, isto é, se será necessário eliminar completamente o risco ou tão somente reduzi-lo a níveis aceitáveis ou permissíveis, conforme os limites estabelecidos pelas leis vigentes.

Desta forma, os dados obtidos nos trabalhos investigativos assumem fundamental importância, na elaboração do modelo conceitual do projeto de remediação, e devem apresentar uma caracterização completa do meio físico geológico e hidrogeológico, bem como da contaminação presente, envolvendo (LaGrega *et al.*, 1994; Palma & Zuquette, 1998): 1) estimativa da extensão horizontal e vertical da contaminação; 2) localização da área-fonte (*hot-spot*) e sua situação na bacia hidrográfica local; 3) descrição da área impactada; e 4) potencial de recuperação.

Gloeden (1999) explica que de modo geral, a definição da medida corretiva mais adequada a ser aplicada em uma área contaminada dependerá de inúmeros fatores, dos quais cita as características do meio contaminado e dos contaminantes, os objetivos da remediação, o tempo e recursos disponíveis.

Uma síntese das principais alternativas de remediação, incluindo classificação, princípios, aplicações e limitações, tanto para solo como para água subterrânea, é apresentada no trabalho de Palma & Zuquette (1998). Recomenda-se ainda, a consulta ao trabalho de Spilborghs (1997) para um aprofundamento sobre o tema biorremediação.

A seguir são descritas algumas das técnicas mais utilizadas atualmente na remediação de áreas impactadas por hidrocarbonetos de petróleo, alvo do presente estudo.

#### 3.4.1. TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO

A biorremediação de uma área degradada pode ser realizada por processos *in situ* ou *ex-situ*. Em processos *in situ* a remediação biológica é aplicada diretamente no local contaminado, ao contrário de processos *ex-situ*, em que o meio impactado é removido e

tratado separadamente. Em Seabra (2001) são descritas as principais técnicas de biorremediação.

#### **3.4.1.1. *Ex-Situ***

##### **Landfarming**

Técnica aplicada a solos, sedimentos e borras contaminados. Esses materiais, previamente depositados em células impermeabilizadas, são homogeneizados por meio de aragem periódica.

##### **Biopilha**

O material contaminado é depositado em pilhas e por estimulação de fatores ambientais, como umidade, nutrientes, oxigênio, temperatura e pH, a concentração dos contaminantes é progressivamente reduzida pela biodegradação.

#### **3.4.1.2. *In Situ***

##### **Biorremediação Melhorada de Solo e Aquífero**

Processo que promove a redução da concentração de contaminantes orgânicos presentes no solo, por meio da sua transformação sob a ação de bactérias existentes *in situ*. Para a eficácia do método são necessárias algumas condições que devem estar presentes, como: 1) a existência de nitrogênio e fósforo, que representam nutrientes essenciais ao desenvolvimento das bactérias; e 2) oxigênio suficiente para as reações aeróbias de oxidação dos hidrocarbonetos. Como resultado, os contaminantes são convertidos em CO<sub>2</sub>, água e massa celular microbiana.

Durante a implantação, busca-se otimizar as condições descritas por meio da injeção, em subsuperfície, de oxigênio e nutrientes, estimulando a população bacteriana e, por consequência, a degradação dos contaminantes.

A atuação mais intensa da biorremediação na zona não saturada pode ser explicada muitas vezes pela maior quantidade de fase residual de hidrocarbonetos de petróleo quando comparada à fase dissolvida desses compostos na água subterrânea (USEPA, 1992a).

### **Bioventilação (*Bioventig*)**

Técnica que promove a biodegradação *in situ* dos hidrocarbonetos de petróleo através da injeção de ar (oxigênio) na zona não saturada e franja capilar, incrementando a atividade aeróbia microbiana nativa. Representa importante aplicação em áreas impactadas por compostos orgânicos pouco voláteis (por exemplo os constituintes do óleo diesel). Apresenta ineficácia em solos com baixa permeabilidade e não permite o tratamento da zona saturada (USEPA, 1992a e 1995).

### **Aeração (*Air Sparging*)**

Técnica aplicada na presença de fase dissolvida de compostos orgânicos no aquífero. Consiste na injeção de ar sob pressão abaixo do nível d'água (Fetter, 1999), substituindo em parte a água presente nos poros do solo. Como consequência são observados, principalmente: 1) um aumento da oxigenação da água subterrânea, proporcionando um estímulo à biodegradação; e 2) a volatilização dos compostos orgânicos presentes e sua remoção física (Brown *et al.*, 1994; Hinchee, 1994 e Johnson, 1994 *apud* Spilborghs, 1997).

O *air sparging* é uma técnica complementar à extração de vapores do solo (SVE), uma vez que os contaminantes volatilizados e liberados nas águas subterrâneas serão capturados em poços de extração na zona não-saturada. A eficiência da aeração *in situ* está condicionada a permeabilidade do solo média a alta.

Norris (1992, *apud* Spilborghs, 1997) cita que a injeção de ar na zona saturada de um aquífero contaminado pode levar à remoção como também pode espalhar ou aumentar a contaminação existente. Explica que com o aumento da dissolução dos compostos orgânicos

pode aumentar a mobilidade e/ou aumento da pluma de contaminantes, se a água não for captada e tratada.

### **Monitoramento da Atenuação Natural**

A atenuação natural compreende processos físicos, químicos e biológicos que sob condições favoráveis e sem a intervenção humana, reduzem a massa, a toxicidade, a mobilidade, o volume ou a concentração de contaminantes no solo e na água subterrânea. Estes processos incluem a biodegradação, dispersão, diluição, sorção, volatilização, estabilização química ou biológica, transformação ou destruição dos contaminantes (USEPA, 1999b).

A atuação da atenuação natural em áreas impactadas por hidrocarbonetos de petróleo é eficiente, principalmente devido à biodegradação. A avaliação do potencial à atenuação natural depende tanto da caracterização dos meios geológico e hidrogeológico como da extensão da contaminação e propriedades físico-químicas dos contaminantes envolvidos. Os resultados são observados com a redução da pluma de contaminação ao longo do tempo através de monitoramentos periódicos (USEPA, 1999b).

#### **3.4.2. EXTRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO (SVE – SOIL VAPOR EXTRACTION)**

Técnica aplicada *in situ* que permite extrair os contaminantes da zona não saturada. O processo consiste na implantação na área impactada de poços de injeção de ar (quente ou frio) e poços de extração a vácuo, implantados no subsolo até a proximidade da franja capilar, acelerando o processo de recuperação dos contaminantes (Fetter, 1999). Os vapores extraídos também são tratados, não comprometendo a qualidade do ar atmosférico.

A eficácia desta técnica está relacionada às propriedades litológicas do substrato, como distribuição granulométrica, permeabilidade e porosidade, à presença de carbono orgânico e umidade.

### **3.4.3. BOMBEAMENTO E TRATAMENTO (*PUMP-AND-TREAT*)**

Técnica aplicada principalmente na remoção de hidrocarbonetos de petróleo e LNAPLs em fase livre, sobrenadante à água subterrânea. Envolve o processo de bombeamento por meio de poço de extração, quando a eficiência da operação é determinada pela formação de um cone de depressão no nível d'água local. Assim, as plumas de contaminação pelas fases livre e dissolvida são impedidas de migrar facilitando a remediação (USEPA, 1990). O produto recuperado juntamente com a água é então direcionado para uma caixa separadora, que segregará os dois líquidos.

A principal desvantagem desta técnica se deve à elevada porcentagem de hidrocarbonetos que permanecem em fase adsorvida no solo representando uma contínua fonte de contaminação para o aquífero (USEPA, 1996; Brown *et al.*, 1985, *apud* Spilborghs, 1997). Sob a ação da infiltração da água na zona não saturada ocorre a lixiviação dos compostos orgânicos que se dissolvem e são transportados até a zona saturada.

### **3.4.4. EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA (MPE – *MULTI-PHASE EXTRACTION*) OU *BIOSLURPING***

Técnica de remediação *in situ* que opera com a aplicação de alto vácuo em poços de extração e apresenta as seguintes características (USEPA, 1999a): 1) atua na extração simultânea das três fases de hidrocarbonetos (líquida, vapor e dissolvida); 2) permite a remoção de fontes contaminantes em solos com baixa permeabilidade; 3) remove contaminantes das zonas não saturada, franja capilar e saturada; 4) devido à formação de um amplo raio de influência, a zona de captura por poço é maior, requerendo para a operação a instalação de menos poços que outras técnicas similares; 5) tempo de duração da remediação reduzido quando comparado a outras técnicas similares; 6) promove a biorremediação aeróbia de solos impactados por hidrocarbonetos.

### **3.4.5. TRINCHEIRA**

Conforme a EPA (1990) a contenção da migração das plumas de contaminantes por meio de trincheiras somente é eficiente sob fase livre. Para a implantação desta técnica devem ser observados: 1) a profundidade do nível d'água; 2) a direção do fluxo d'água subterrâneo; 3) a extensão da pluma de fase livre; 3) os tipos de fases de hidrocarbonetos existentes; 4) a densidade do contaminante; e 4) a existência de interferências como obras civis superficiais e/ou subterrâneas.

Uma opção para a retirada do produto em fase livre das trincheiras são as bombas do tipo *skimmers*, que são projetadas para flutuar sobre o nível d'água e podem ser equipadas com sensores para detectar a presença do combustível e operar conforme uma determinada espessura acumulada (Spilborghs, 1997).

As trincheiras, porém apresentam algumas restrições : 1) ineficientes a profundidades maiores que 5 metros e elevados custos envolvidos; 2) sua eficiência é melhor observadas em plumas pequenas; 3) difícil instalação.

### **3.4.6. CONFINAMENTO GEOTÉCNICO OU COBERTURA**

O confinamento geotécnico ou cobertura consiste na impermeabilização de superfícies, objetivando isolar o contaminante em relação ao meio. A aplicação desta técnica impede a infiltração de águas pluviais no solo impactado, evitando assim a lixiviação e migração dos contaminantes até o aquífero freático, como também a liberação de vapores para o meio ambiente.

### **3.4.7. INCINERAÇÃO**

Técnica de tratamento *ex-situ*, aplicada a solos impactados removidos, que utiliza a aplicação de temperaturas elevadas com o objetivo da queima e volatilização dos compostos orgânicos.

### **3.5. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL FEDERAL**

A seguir é apresentada uma seleção das principais leis e normas ambientais federais vigentes, relacionadas ao tema do presente estudo, elaborada com base na Constituição Brasileira do ano de 1988, edição atualizada em 1996, e no trabalho de Machado (1999).

O Decreto Federal 79.367/77 dispõe sobre o padrão de potabilidade da água e a Resolução CONAMA 20/86, revogada pela Resolução CONAMA 274/00, define águas doces, salinas e salobras e dá outras providências.

A Lei Federal 6.938/81 dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins, mecanismos de formulação, aplicação e estrutura do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente).

No âmbito processual a Lei Federal 7.347/85 disciplina a Ação Civil Pública de responsabilidade por danos causados ao meio ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico.

O Decreto Federal 99.274/90, entre outras disposições, regulamenta as Leis Federais 6.902/81 e 6.938/81, instituindo a estrutura do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente), cria o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Estabelece ainda, a obrigatoriedade do licenciamento ambiental e quando for necessário a apresentação de EIA/RIMA.

A Resolução CONAMA 05/93 dispõe sobre os procedimentos mínimos para o gerenciamento de resíduos sólidos ou lixo, objetivando a preservação da saúde pública e a qualidade do meio ambiente.

A Resolução CONAMA 09/93 estabelece que todo óleo lubrificante, usado ou contaminado, será obrigatoriamente recolhido e terá uma destinação adequada, de forma a não afetar negativamente o meio ambiente.

A Resolução CONAMA 237/97 efetiva a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente.

No âmbito de Crimes Ambientais, a Lei Federal 9.605/98, entre outras providências, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. A Medida Provisória 2.163-41 acrescenta dispositivos a esta Lei,

estabelecendo que os órgãos ambientais integrantes do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente) ficam autorizados a celebrar, com força de título executivo extrajudicial, termo de compromisso com pessoas físicas ou jurídicas, responsáveis pela construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras.

O Decreto Federal 3.179/99 dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

A Resolução CONAMA 273/00 estabelece que a localização, a construção, a instalação, a modificação, a ampliação e a operação de postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis dependerão de prévio licenciamento do órgão ambiental competente.

A Lei Federal 9.966/00 dispõe sobre a prevenção, controle e fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências.

A criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos é apresentada na Lei Federal 9.984/00.

## 4. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa compreendeu, basicamente, a aplicação sistemática dos seguintes procedimentos, apresentados por etapas:

### **ETAPA 1 - *Trabalhos Prévios:***

- 1) *Fundamentação Teórica:* revisão bibliográfica.
- 2) *Levantamento de Dados e Vistoria Detalhada da Área:* identificação de potenciais fontes de contaminação e reconhecimento ambiental da área investigada.

### **ETAPA 2 - *Investigação Preliminar do Solo (Soil Gas Survey):***

Medições *in situ* de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e semi-voláteis (SVOCs).

### **ETAPA 3 - *Investigação Complementar de Detalhe do Solo e das Águas Subterrâneas:***

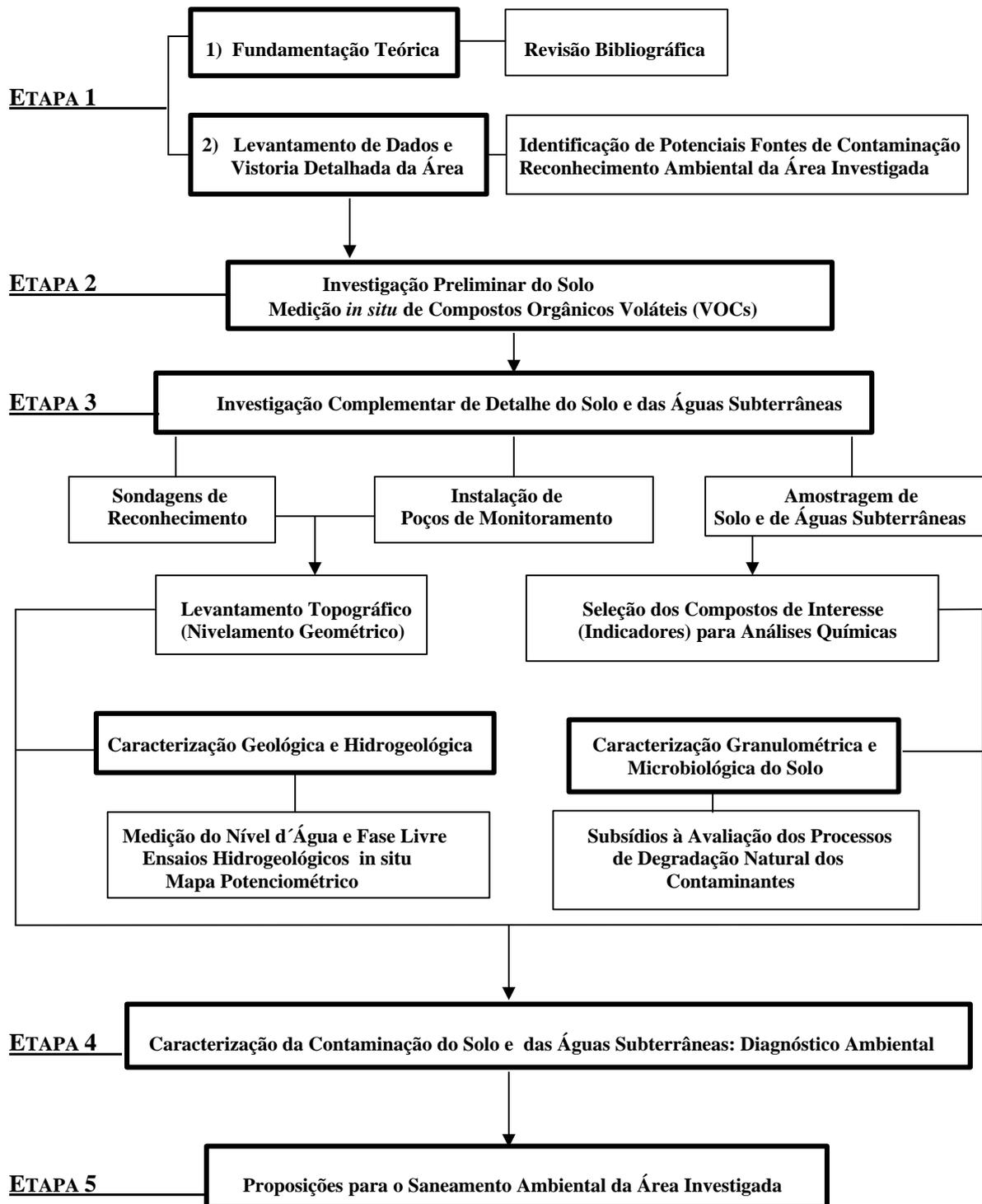
Execução de sondagens de reconhecimento, construção de poços de monitoramento, amostragem de solo e água subterrânea, levantamento topográfico, caracterização granulométrica/microbiológica do solo, caracterização geológica e hidrogeológica.

### **ETAPA 4 - *Caracterização da Contaminação do Solo e da Água Subterrânea: Diagnóstico Ambiental.***

Integração e interpretação de dados de campo e resultados analíticos.

### **ETAPA 5 - *Proposições para o Saneamento Ambiental da Área Investigada.***

A **Figura 4.1.** apresenta o fluxograma da pesquisa, elaborado com base na metodologia descrita.



**Figura 4.1.** Fluxograma da Pesquisa

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

A seguir são descritos pormenorizadamente os resultados obtidos em cada etapa da pesquisa, segundo o roteiro metodológico utilizado, apresentados por etapas da pesquisa.

### **5.1. ETAPA 1 – TRABALHOS PRÉVIOS**

Ressalta-se que a fundamentação teórica para o desenvolvimento da pesquisa foi obtida com a realização da revisão bibliográfica, que envolveu a elucidação e compreensão de conceitos e terminologias indispensáveis ao conhecimento do tema tratado, conforme apresentado no Capítulo 3.

#### **5.1.1. LEVANTAMENTO DE DADOS E VISTORIA DETALHADA DA ÁREA**

Previamente ao início dos trabalhos de campo (meses de Setembro e Outubro/2000), foram consultadas plantas construtivas da antiga garagem, para levantar informações sobre a existência de instalações subterrâneas das áreas a serem estudadas como malhas de aterramento, tubulações de transporte de combustível e cabos elétricos, entre outras. Este procedimento objetiva proporcionar segurança ao pessoal envolvido com os trabalhos de sondagem, assim como evitar contratempos durante a investigação.

A vistoria visou o direcionamento dos trabalhos de campo com a confirmação de locais que apresentem tubulações e outras interferências subterrâneas, a verificação da existência de possíveis focos de contaminação decorrentes de atividades operacionais inadequadas, bem como o reconhecimento do entorno da área investigada e a identificação de possíveis receptores, levantando-se informações da captação e uso de águas superficiais e subsuperficiais, uso e ocupação do entorno, entre outras.

Nesta etapa foram também realizadas entrevistas com funcionários antigos da empresa com o intuito de se levantarem informações suficientes para o conhecimento das atividades operacionais da garagem e históricos de vazamentos ocorridos.

### 5.1.2. DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA INVESTIGADA E HISTÓRICO DE VAZAMENTOS

A área investigada compreende as instalações de uma antiga garagem de ônibus, caminhões e veículos pesados (tratores, empilhadeiras e retroescavadeiras), que operou até 1996, após aproximadamente 25 anos de atividades. Seu entorno apresenta principalmente ocupações residenciais e comerciais.

A planta com o arranjo físico e disposição geral das instalações da área investigada é apresentada na **Figura 5.1**.

As operações de armazenagem e distribuição de óleo diesel eram realizadas em locais distintos e separados, e compreendendo as principais atividades da garagem. Sendo assim, foram delimitadas 2 sub-áreas para o desenvolvimento das investigações. A saber:

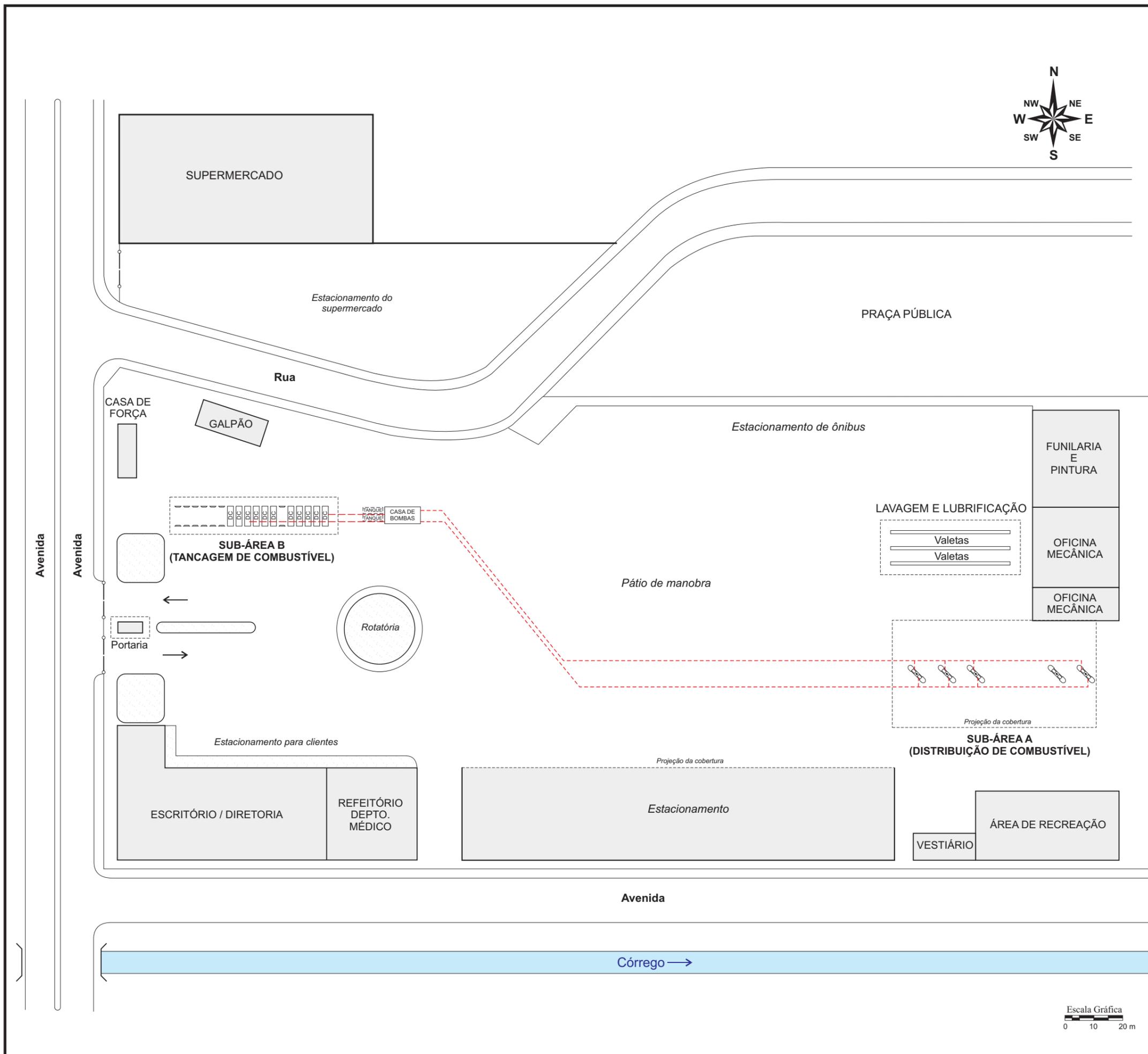
- 1) **Sub-área A (Distribuição de Combustível):** ocupava uma área de cerca de 1000 m<sup>2</sup>, na qual existiam 3 bombas grandes com 2 bicos de abastecimento cada e 1 bomba pequena com 1 bico.
- 2) **Sub-área B (Tancagem de Combustível):** ocupa uma área de aproximadamente 1000 m<sup>2</sup> na qual existem 11 tanques suspensos e 2 tanques subterrâneos, todos com capacidade de 15000 L.

As duas sub-áreas não possuíam piso impermeável, sistemas de captação de efluentes (canaletas) ou separação água/óleo. A movimentação de óleo diesel era de aproximadamente 2.400.000 L/mês.

Segundo informações de funcionários que trabalharam no local, havia freqüentes perdas durante as operações de abastecimento dos veículos e tanques e o combustível era derramado diretamente no solo. Apesar de desativados, os tanques permanecem no local, assim como as linhas que levavam o óleo diesel até as bombas.

No local, a água utilizada para o consumo humano e para uso geral, provinha do sistema municipal de abastecimento.

A antiga garagem está disposta sobre depósitos aluvionares recentes, constituídos por cascalhos, areias e argilas. Situa-se em uma região plana, apresentando declividade < 5%, e pequenos morros no entorno. Ao sul da área há um córrego, atualmente canalizado.



Legenda:

- DC Tanque de armazenamento de combustível
- Ilha de abastecimento
- - - Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)

**Nota:** Área aproximada da garagem 58.400 m<sup>2</sup>

Figura 5.1. - ARRANJO FÍSICO DAS INSTALAÇÕES DA ÁREA INVESTIGADA

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

**Aluno:** José Angelo Ferreira da Silva  
**Orientador:** Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri

**Campus de Rio Claro**  
**Instituto de Geociências e Ciências Exatas**  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002

## 5.2. ETAPA 2 - INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DO SOLO (*SOIL GAS SURVEY*)

O levantamento preliminar do solo compreendeu a execução de sondagens rasas e buscou identificar os locais mais contaminados, por meio da verificação do registro ou não, de concentrações anômalas de vapores orgânicos no solo presentes nos poros do solo, provenientes da volatilização de combustíveis adsorvidos no solo ou em fase livre sobrenadante ao nível freático.

A aplicação desta técnica visou: 1) minimizar o número de sondagens profundas, até o nível d'água; 2) agilizar o rastreamento do impacto de hidrocarbonetos de petróleo no solo e na água subterrânea; e 3) delimitar a pluma de compostos orgânicos voláteis verificados em leituras de campo.

Os vapores de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) e Semi-Voláteis (SVOCs) no solo foram avaliados por meio de equipamento portátil, modelo GASTECH 1238 ME, no qual os vapores amostrados são direcionados, por meio de uma bomba de sucção, a uma resistência elétrica aquecida, nela sendo queimados causando uma diferença de potencial elétrico que varia de acordo com a concentração de vapores na amostra. O resultado fornecido pelo aparelho é relativo a esta diferença de potencial.

O levantamento preliminar do solo consistiu na execução de sondagens de 1", dentro de uma malha regular de 10 m x 10 m, até 90 cm de profundidade, cobrindo as áreas com histórico de vazamentos e suspeita de contaminação. São utilizados nas perfurações o trado manual ou furadeira elétrica e a coleta dos gases é realizada por meio de um amostrador metálico que apresenta aberturas para a captação dos gases e saída para sua leitura. Durante a amostragem, realizada sempre a duas profundidades (a 50 cm e a 90 cm), a perfuração recebe uma vedação junto ao amostrador de forma a evitar a perda dos gases.

As 38 sondagens realizadas na sub-área A (Distribuição de Combustível) apontaram os maiores valores de VOCs nos pontos G40 (2200 ppm), G41 (1320 ppm), G49 (1100 ppm), G50 (1100 ppm) e G58 (6050 ppm), coincidindo com a locação aproximada dos antigos bicos de abastecimento.

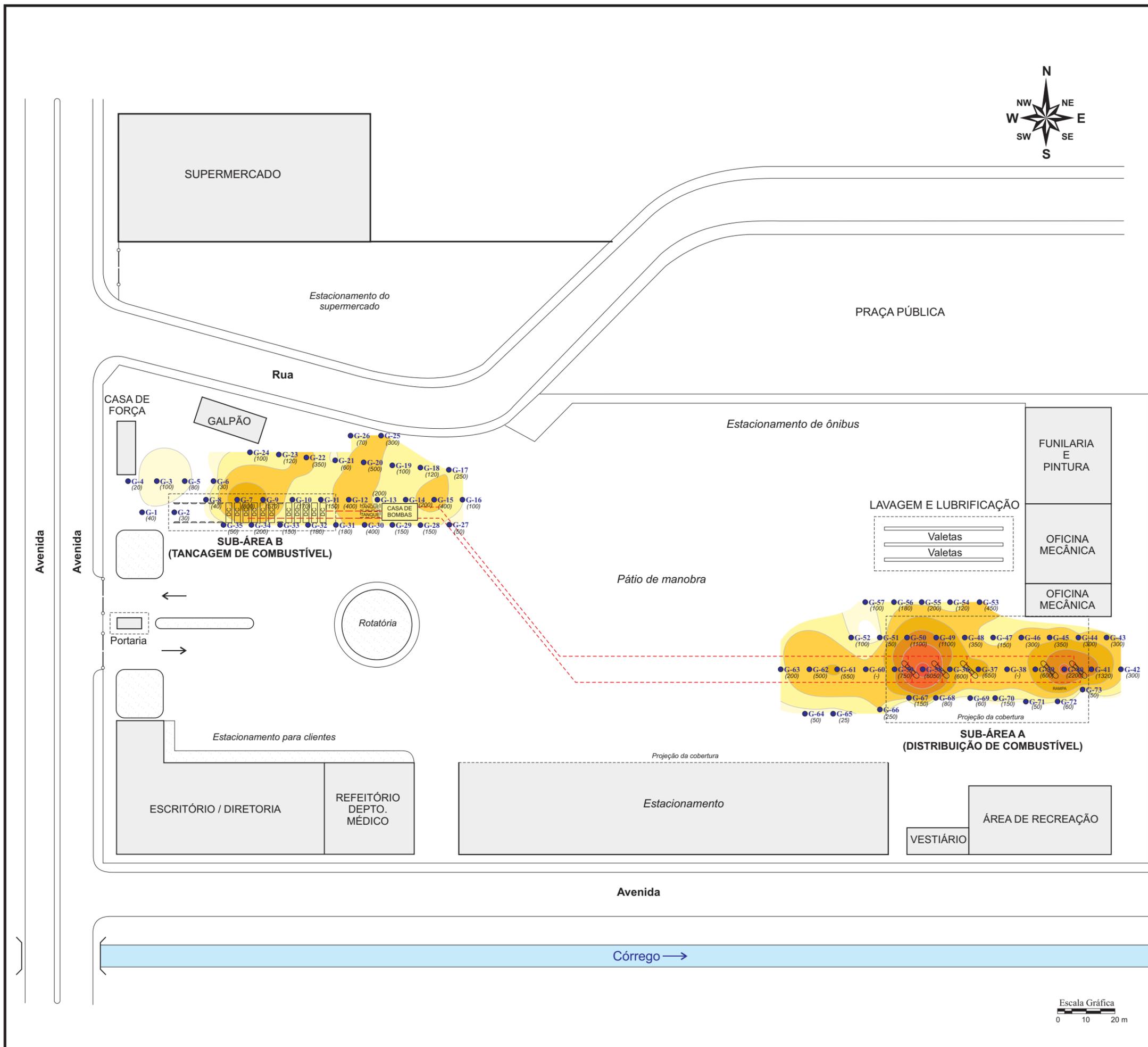
Na sub-área B (Tancagem de Combustível), foram realizadas 35 sondagens, sendo encontrados os maiores valores de VOCs nos pontos G7 (800 ppm), G9 (570 ppm), G12 (400 ppm), G15 (400 ppm), G20 (500 ppm) e G30 (400 ppm), quase todos nas proximidades dos tanques suspensos, tanques e linhas de distribuição enterrados.

As tabelas **5.1.** e **5.2.** resumem, respectivamente para as sub-áreas A e B, os dados obtidos nas atividades de campo referentes à investigação preliminar do solo. A **Figura 5.2.** ilustra as plumas das maiores concentrações de vapores orgânicos no solo até a profundidade de 90 cm.

<b>Tabela 5.1. Valores de VOC – Soil Gas Survey, sub-área A.</b>					
FURO	PROFUNDIDADE (m)	VOC (ppm)	FURO	PROFUNDIDADE (m)	VOC (ppm)
G36	0,5	350	G55	0,5	200
	0,9	600		0,9	125
G37	0,5	-	G56	0,5	180
	0,9	650		0,9	100
G38	0,5	-	G57	0,5	100
	0,9	-		0,9	100
G39	0,5	450	G58	0,5	650
	0,9	600		0,9	6050
G40	0,5	170	G59	0,5	380
	0,9	2200		0,9	750
G41	0,5	270	G60	0,5	-
	0,9	1320		0,9	-
G42	0,5	50	G61	0,5	200
	0,9	300		0,9	550
G43	0,5	50	G62	0,5	200
	0,9	300		0,9	500
G44	0,5	300	G63	0,5	150
	0,9	100		0,9	200
G45	0,5	350	G64	0,5	10
	0,9	50		0,9	50
G46	0,5	50	G65	0,5	25
	0,9	300		0,9	25
G47	0,5	50	G66	0,5	80
	0,9	150		0,9	250
G48	0,5	350	G67	0,5	90
	0,9	100		0,9	150
G49	0,5	530	G68	0,5	50
	0,9	1100		0,9	80
G50	0,5	310	G69	0,5	50
	0,9	1100		0,9	60
G51	0,5	50	G70	0,5	150
	0,9	50		0,9	100
G52	0,5	50	G71	0,5	25
	0,9	100		0,9	50
G53	0,5	450	G72	0,5	60
	0,9	150		0,9	60
G54	0,5	70	G73	0,5	50
	0,9	120		0,9	50

**Tabela 5.2.** Valores de VOC – *Soil Gas Survey*, sub-área B.

FURO	PROFUNDIDADE (m)	VOC (ppm)	FURO	PROFUNDIDADE (m)	VOC (ppm)
G01	0,5	30	G19	0,5	100
	0,9	40		0,9	50
G02	0,5	20	G20	0,5	200
	0,9	30		0,9	500
G03	0,5	20	G21	0,5	60
	0,9	100		0,9	50
G04	0,5	20	G22	0,5	280
	0,9	20		0,9	350
G05	0,5	30	G23	0,5	50
	0,9	80		0,9	120
G06	0,5	30	G24	0,5	100
	0,9	30		0,9	100
G07	0,5	800	G25	0,5	30
	0,9	800		0,9	300
G08	0,5	40	G26	0,5	50
	0,9	40		0,9	70
G09	0,5	350	G27	0,5	40
	0,9	570		0,9	50
G10	0,5	170	G28	0,5	150
	0,9	170		0,9	150
G11	0,5	120	G29	0,5	100
	0,9	150		0,9	150
G12	0,5	100	G30	0,5	400
	0,9	400		0,9	180
G13	0,5	150	G31	0,5	180
	0,9	200		0,9	100
G14	0,5	30	G32	0,5	100
	0,9	200		0,9	180
G15	0,5	400	G33	0,5	100
	0,9	400		0,9	150
G16	0,5	100	G34	0,5	200
	0,9	80		0,9	100
G17	0,5	250	G35	0,5	50
	0,9	250		0,9	50
G18	0,5	50			
	0,9	120			



- Legenda:
- DC Tanque de armazenamento de combustível
  - Ilha de abastecimento
  - Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
  - G-1 Pontos de medição de VOC
  - (40) Concentrações de VOC (ppm)

- Concentrações de VOC (ppm)
- < 50
  - 51 a 100
  - 101 a 250
  - 251 a 500
  - 501 a 1000
  - 1001 a 2000
  - 2001 a 5000
  - > 5000

Figura 5.2.- LEVANTAMENTO PRELIMINAR DO SOLO (SOIL GAS SURVEY) - ISOCONCENTRAÇÕES DE VOC's - 0,90 m DE PROFUNDIDADE

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
 Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002

As fotos 5.1. a 5.3. ilustram respectivamente, o medidor de gás portátil, os equipamentos utilizados e o procedimento de amostragem e leitura de gases.



Foto 5.1. Medidor de Gás Portátil, modelo GASTECH 1238 ME.

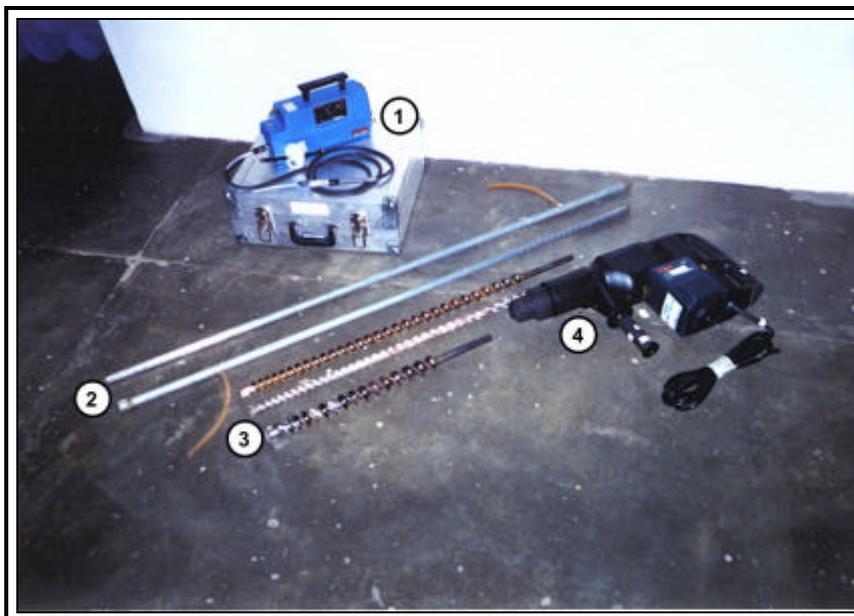


Foto 5.2. Soil Gas Survey, equipamentos utilizados no levantamento.  
1) GASTECH; 2) hastes metálicas de amostragem de gases; 3) brocas;  
4) furadeira elétrica.



**Foto 5.3.** *Soil Gas Survey*, amostragem e leitura.

## 5.3. INVESTIGAÇÃO COMPLEMENTAR DE DETALHE DO SOLO E DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

### 5.3.1. SONDAGENS DE RECONHECIMENTO

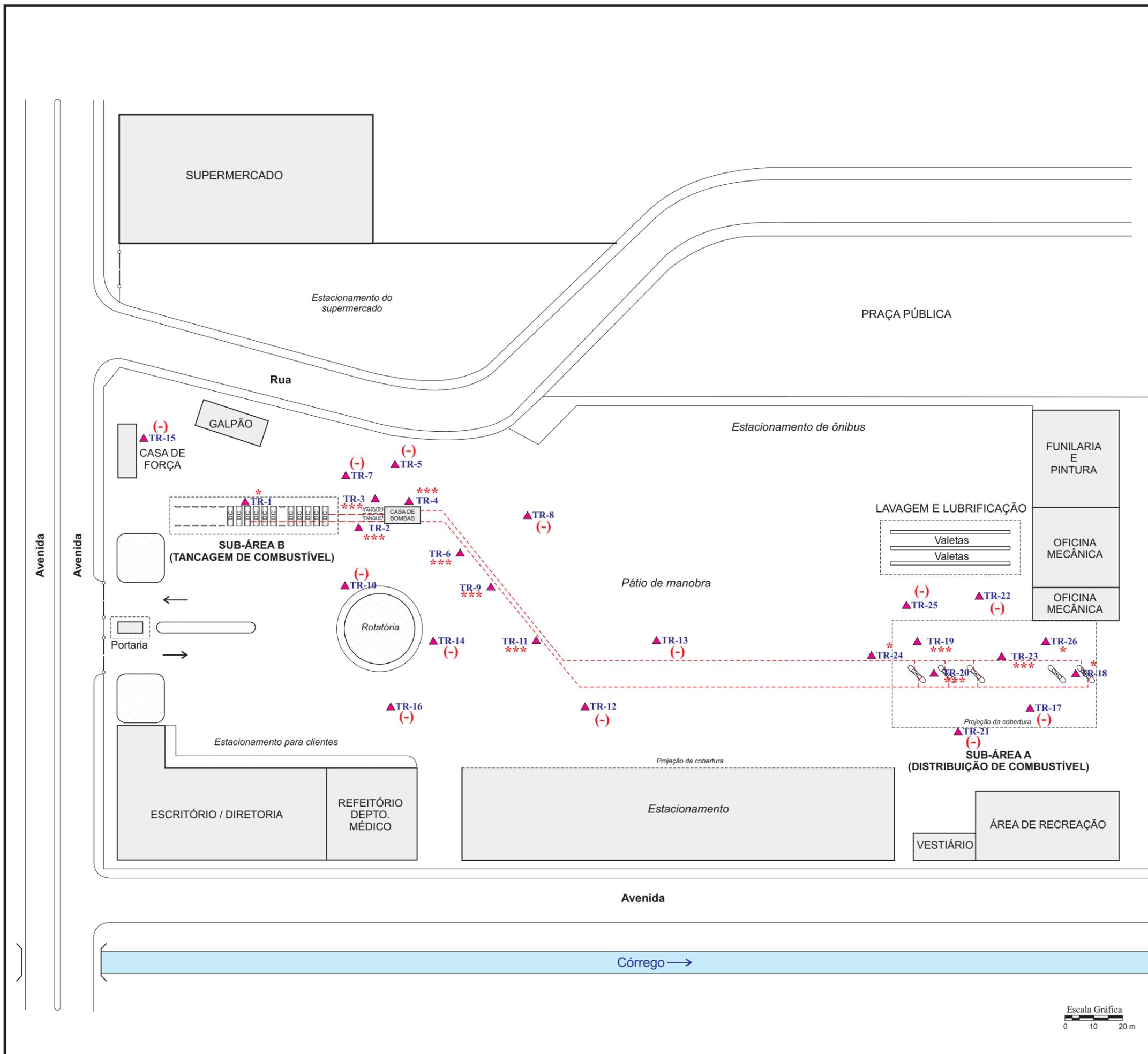
As sondagens do tipo manual e mecanizada representam métodos de investigação direta. Na presente pesquisa é focalizada a sondagem manual a trado, que consiste na utilização de ferramenta perfurante, helicoidal e oca, que permite a amostragem do horizonte de solo desejado. O seu avanço em profundidade se dá pela conexão de barras rosqueáveis.

A investigação detalhada do solo por meio de sondagens a trado manual pode ser realizada em diâmetros que variam entre 4” e 6”, conforme a finalidade da perfuração (por exemplo, instalação de poço de monitoramento e padrão de amostragem de solo), locadas em função das informações preliminares da investigação (*soil gas survey*). Os trabalhos foram realizados conforme as especificações da Norma Técnica ABNT NBR 9603.

Além de possibilitarem a caracterização geológica da área investigada, as sondagens de reconhecimento objetivaram: 1) a coleta de amostras deformadas de solo para análises químicas, microbiológicas e granulométricas; 2) monitorar o nível d’água e os indícios da presença de eventuais contaminantes no solo (fase adsorvida) e nível freático (fase livre), utilizando-se de amostrador de acrílico do tipo caçamba com válvula de retenção e/ou medidor elétrico; e 3) orientar os locais mais adequados à instalação dos poços de monitoramento. Para tanto, as sondagens a trado são continuadas até aproximadamente 1,0 m após a detecção do nível d’água.

A **Figura 5.3.** apresenta o mapa de localização das sondagens de reconhecimento e indícios de contaminação observados.

A avaliação de indícios da presença de combustíveis no perfil de solo observados nas sondagens a trado manual é feita com a caracterização organoléptica (visual, táctil e olfativa) das amostras coletadas, segundo os seguintes critérios:



- Legenda:
- DC Tanque de armazenamento de combustível
  - Ilha de abastecimento
  - Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
  - ▲TR-1 Sondagens a trado manual
  - (-) Sem indício
  - \* Odor / fase adsorvida
  - \*\*\* Presença de fase livre durante as sondagens

Figura 5. 3. - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS SONDAJENS A TRADO MANUAL E INDÍCIOS DE CONTAMINAÇÃO

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
 Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002



- 1) **sem indício:** não observados odor ou presença de combustíveis (fase adsorvida no solo e/ou fase livre na água subterrânea);
- 2) **odor de combustível:** detectado somente odor de combustíveis no solo e/ou na água subterrânea; e
- 3) **presença de combustíveis no solo (fase adsorvida) e/ou na água subterrânea (fase livre):** constatação visual da ocorrência de combustíveis.

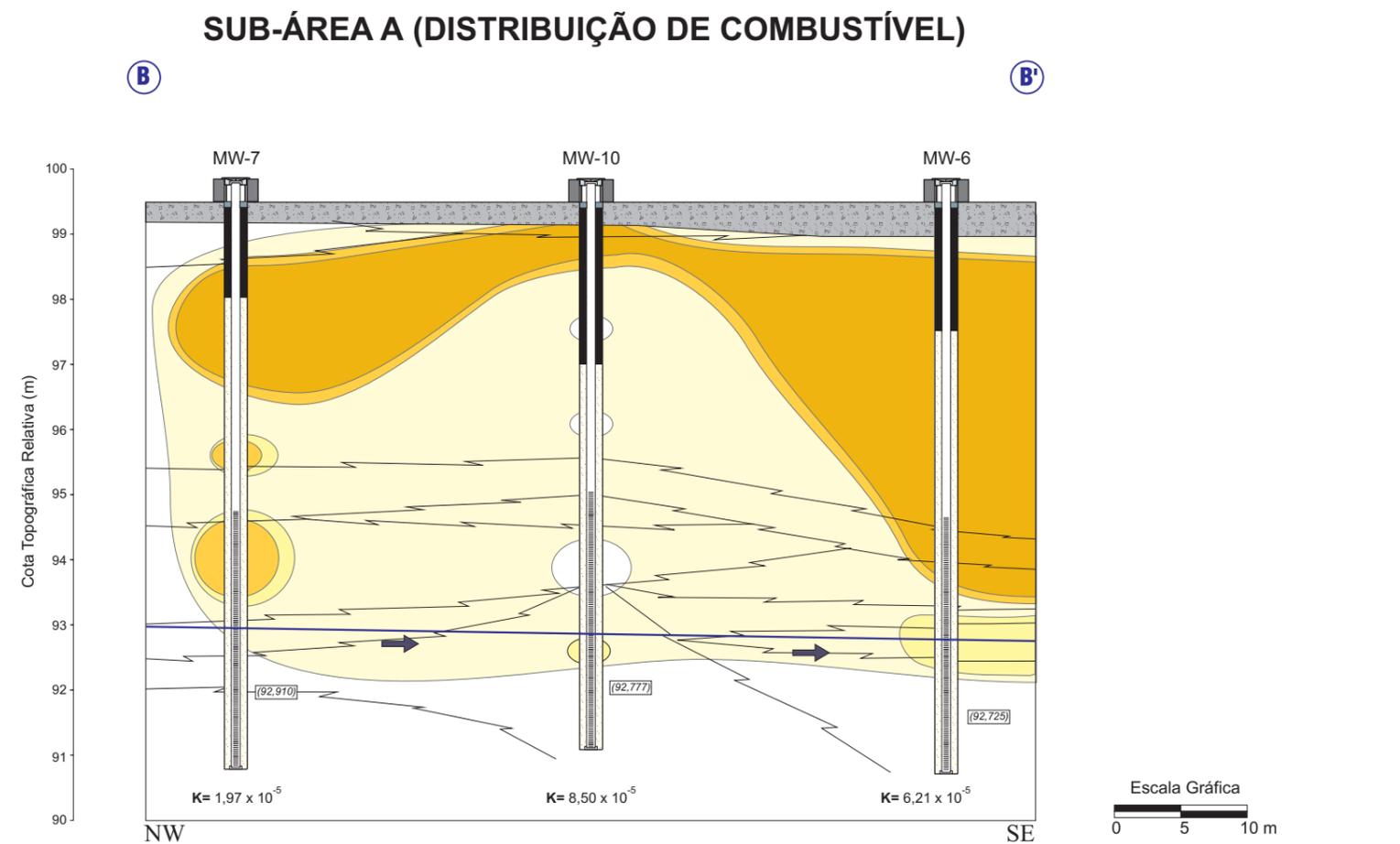
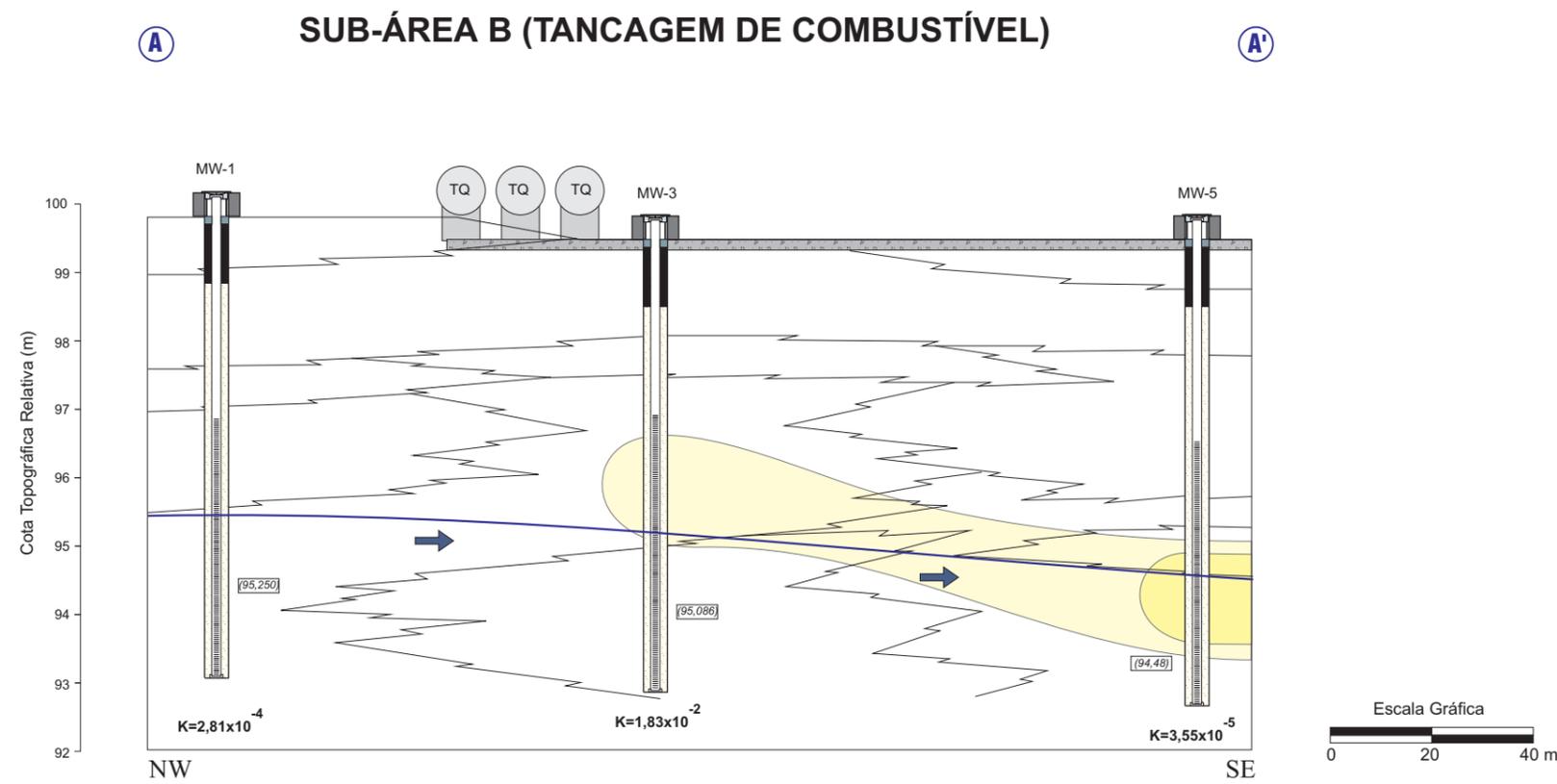
Durante a realização das sondagens a trado são coletadas amostras deformadas de solo a cada 0,5 m objetivando a descrição das unidades geológicas presentes, bem como a medição das concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) *in situ*. O solo amostrado é colocado em sacos plásticos e homogeneizado por agitação, liberando os vapores presentes nos seus poros. A amostra que apresentar o valor mais elevado é reservada para caracterização analítica em laboratório.

As leituras de VOCs em profundidade fornecem também a indicação da variação vertical da presença de contaminantes, visto que há uma correlação entre a concentração de voláteis e a concentração da contaminação presente no solo. A **Figura 5.4.** ilustra, em duas seções verticais (vide localização das seções na **Figura 5.8.**) a distribuição em profundidade das isoconcentrações de VOCs.

#### **- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

Foram executadas nesta sub-área 10 sondagens de reconhecimento de 4" (TR-17 a TR-26), num total de 80,64 m, das quais 9 atingiram profundidades de no mínimo 1 metro abaixo do nível d'água, e uma foi interrompida a 5,0 m (TR-21) visto a impossibilidade de se trazer, com o trado manual, o material à superfície por se tratar de areia inconsolidada. Os furos foram perfilados para concentrações de VOC a cada 0,5 m (vide **Tabela 5.3.**)

Durante os trabalhos de campo, foram constatados indícios de presença de combustível em 6 sondagens e presença de fase livre (óleo diesel) em 3 delas (TRs 19, 20 e 23). Os indícios se referem à observação visual das amostras de solo que podem apresentar produto em fase adsorvida e odor. A leitura de compostos orgânicos voláteis (VOCs) das amostras coletadas confirmou as observações e forneceu uma medida das concentrações de gases acumulados nos poros do solo.



Legenda:

- Piso de cimento
- Brita
- Nível d' água
- Carga hidráulica (m)
- K Condutividade hidráulica (cm/s)
- Direção do fluxo subterrâneo

#### CONCENTRAÇÕES DE VOC (ppm)

- < 50
- 51 a 100
- 101 a 250
- 251 a 500
- > 500

Figura 5.4. - ISOCONCENTRAÇÕES DE VOCs DISTRIBUIÇÃO EM PROFUNDIDADE

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri

Campus de Rio Claro

**Instituto de Geociências e Ciências Exatas**  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002

O solo na área investigada é predominantemente argilo-arenoso e o nível d'água durante as sondagens foi interceptado a uma profundidade média de 6,90 m.

<b>Tabela 5.3. Valores de VOC - Sondagens de Reconhecimento, sub-área A.</b>										
PROF. (m)	SONDAGENS DE RECONHECIMENTO - VOC (ppm)									
	TR-17	TR-18	TR-19	TR-20	TR-21	TR-22	TR-23	TR-24	TR-25	TR-26
0.5	10		50	290	25	5	540	180	25	25
1.0	10	300	950	350	15	5	500	250	25	25
1.5	10	380	850	260	15	10	130	50	25	25
2.0	40	350	730	200	10	5	50	30	25	25
2.5	40	400	830	180	10	10	80	25	25	30
3.0	40	400	720	170	10	10	60	50	20	30
3.5	25	380	120	320	10	5	50	30	25	50
4.0	25	390	270	250	10	10	90	30	10	70
4.5	40	400	200	130	15	10	70	450	10	130
5.0	25	400	400	300	-	10	60	350	10	180
5.5	25	400	350	230	-	10	40	250	25	90
6.0	40	350	450	60	-	10	40	180	25	400
6.5	50	200	80	30	-	10	60	40	20	50
7.0	-	200	90	40	-	10	180	50	-	25
7.5	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
8.0	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-

A **Tabela 5.4.** resume as características das sondagens de reconhecimento.

<b>Tabela 5.4. Características das Sondagens de Reconhecimento, sub-área A.</b>					
SONDAGEM	PROFUNDIDADE DO FURO (m)	N.A. (m)	CONC. MÁX DE VOC (ppm)	PROF. DA CONC. MÁX DE VOC (m)	OUTROS INDÍCIOS DE CONTAMINAÇÃO
TR-17	8,34	6,50	50	6,50	(-)
TR-18	9,10	6,70	400	5,50	*
TR-19	9,00	6,80	950	1,00	***
TR-20	8,80	7,00	350	1,00	***
TR-21	5,00	-	25	0,50	(-)
TR-22	8,70	7,00	10	5,50	(-)
TR-23	8,68	6,70	540	0,50	***
TR-24	7,50	6,50	450	4,50	*
TR-25	8,00	6,80	25	6,00	(-)
TR-26	7,50	6,80	400	6,00	*

N.A. - nível d'água durante as sondagens

(-) - sem indício

\* - odor/fase adsorvida

\*\*\* - fase livre

#### **- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Foram executadas nesta sub-área 16 sondagens de reconhecimento de 4" (TR-1 a TR-16), num total de 105,21 m, até profundidades de no mínimo 1 metro abaixo do nível d'água. Os furos foram perfilados para concentrações de VOC a cada 0,5 m, vide **Tabela 5.5.**

<b>Tabela 5.5. Valores de VOC - Sondagens de Reconhecimento, sub-área B.</b>								
PROF. (m)	SONDAGENS DE RECONHECIMENTO - VOC (ppm)							
	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7	TR-8
0.5	1650	60	70	250	50	50	150	25
1.0	1650	80	600	180	50	70	150	20
1.5	880	200	550	300	130	70	30	15
2.0	880	300	450	280	200	60	40	20
2.5	850	300	470	230	150	50	40	30
3.0	300	250	400	240	210	50	50	40
3.5	60	270	700	270	100	150	50	40
4.0	40	420	450	370	50	170	50	45
4.5	30	450	400	440	30	320	50	120
5.0	20	350	200	250	40	220	40	130
5.5	-	-	150	70	-	-	-	50
PROF. (m)	SONDAGENS DE RECONHECIMENTO - VOC (ppm)							
	TR-9	TR-10	TR-11	TR-12	TR-13	TR-14	TR-15	TR-16
0.5	100	50	300	20	30	20	5	15
1.0	100	50	550	20	800	20	10	20
1.5	60	40	730	25	40	270	10	30
2.0	60	50	800	30	25	350	10	60
2.5	70	50	600	50	20	370	5	60
3.0	60	170	400	40	50	400	10	25
3.5	70	150	450	40	40	240	10	30
4.0	100	100	500	50	50	220	10	30
4.5	600	60	580	50	30	200	5	30
5.0	100	-	400	250	50	200	10	35
5.5	-	-	350	190	180	170	-	30
6.0	-	-	-	180	50	-	-	-
6.5	-	-	-	-	50	-	-	-

A **Tabela 5.6.** resume as características das sondagens de reconhecimento.

**Tabela 5.6.** Características das Sondagens de Reconhecimento, sub-área B.

SONDAGEM	PROFUNDIDADE DO FURO (m)	N.A. (m)	CONC. MÁX DE VOC (ppm)	PROF. DA CONC. MÁX DE VOC (m)	OUTROS INDÍCIOS DE CONTAMINAÇÃO
TR-1	5,80	4,80	1650	1,00	*
TR-2	6,00	5,00	450	4,50	***
TR-3	6,50	5,30	700	3,50	***
TR-4	7,10	5,50	440	4,50	***
TR-5	6,00	5,00	210	3,00	(-)
TR-6	6,00	5,00	320	4,50	***
TR-7	6,00	5,00	150	1,00	(-)
TR-8	6,50	5,50	130	5,00	(-)
TR-9	6,50	5,30	600	4,50	***
TR-10	6,96	4,70	170	3,00	(-)
TR-11	6,50	5,50	800	2,00	***
TR-12	7,30	6,00	250	5,00	(-)
TR-13	7,10	6,00	800	1,00	*
TR-14	7,00	5,60	400	3,00	(-)
TR-15	6,95	4,60	10	4,50	(-)
TR-16	7,00	5,80	60	2,50	(-)

N.A. - nível d'água durante as sondagens

(-) - sem indício

\* - odor/fase adsorvida

\*\*\* - fase livre

Durante os trabalhos de campo, foram constatados indícios de presença de combustível em 7 sondagens e presença de fase livre (óleo diesel) em 6 delas (TRs 2, 3, 4, 6, 9, 11). Estes indícios se referem à observação visual das amostras de solo que podem apresentar produto em fase adsorvida e odor. A leitura de compostos orgânicos voláteis (VOCs) das amostras coletadas confirmou as observações e forneceu uma medida das concentrações de gases acumulados nos poros do solo.

O solo na área investigada é predominantemente argilo-siltoso e o nível d'água foi interceptado a uma profundidade média de 5,20 m.

As fotos 5.4. a 5.5. ilustram, respectivamente, os equipamentos utilizados nas sondagens a trado de reconhecimento, a execução da sondagem à trado manual e a amostragem/leitura de gases no solo.



**Foto 5.4.** Equipamentos utilizados em sondagens a trado manual. 1) trados 3", 4" e 6" tipo helicoidal; 2) hastes rosqueáveis; 3) chave inglesa 36"; 4) trados 2" e 3" tipo helicoidal holandês; 5) trépanos; 6) colher de pedreiro; 7) marreta.



**Foto 5.5.** Medição de VOCs em amostra de solo.

### 5.3.2. INSTALAÇÃO DE POÇOS DE MONITORAMENTO

Após a execução de todas as sondagens de reconhecimento, foram definidos a quantidade e os locais para instalação dos poços de monitoramento, em função do fluxo d'água subterrâneo do aquífero local e dos indícios de contaminação observados.

Os poços de monitoramento foram instalados de acordo com a Norma Técnica ABNT NBR-13895 - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem. A seguir é apresentada a lista dos materiais utilizados:

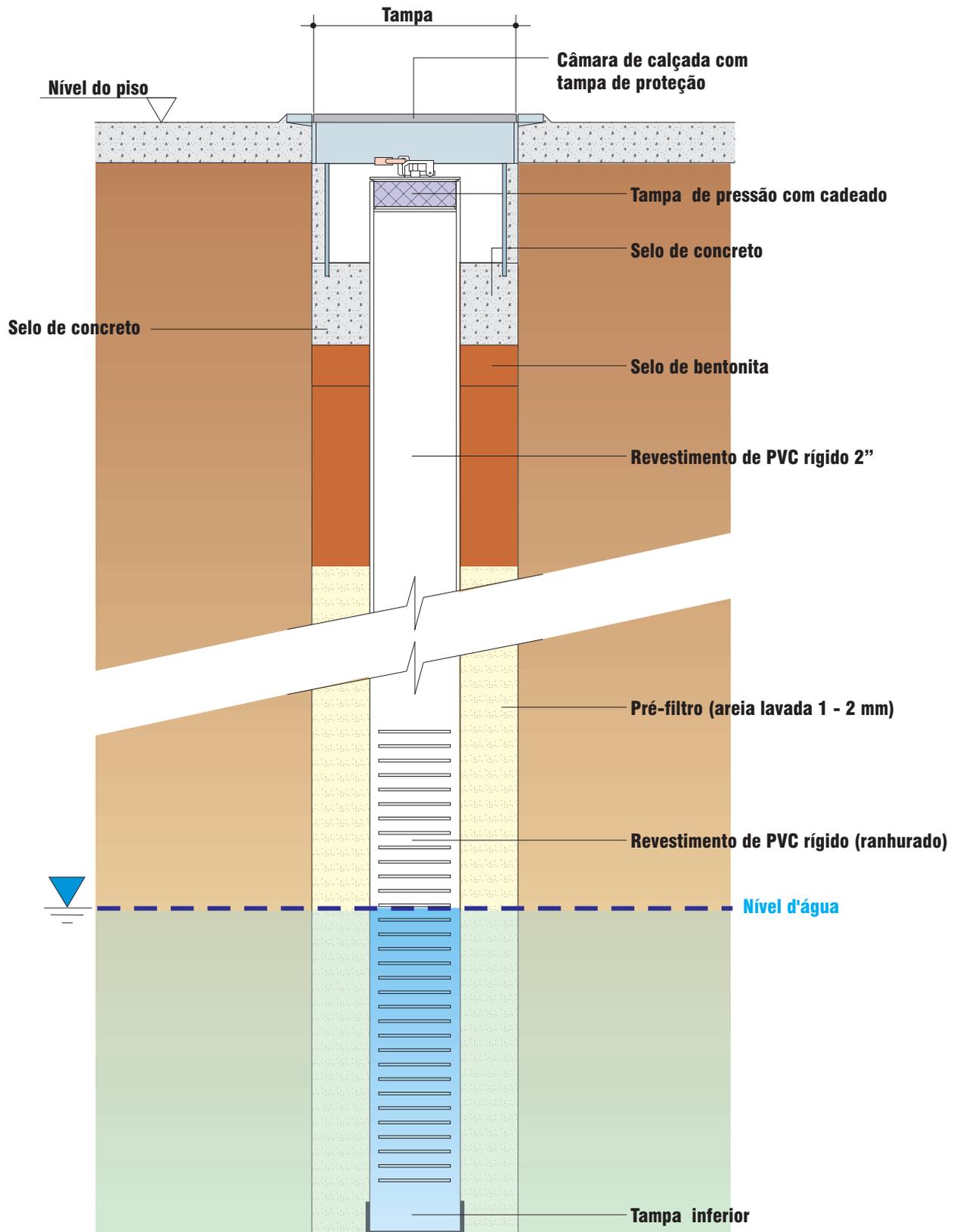
- **revesti mento:** tubos de PVC Geomecânico 2" com conexões rosqueáveis. O fechamento da extremidade inferior é feito com tampa, também de PVC;
- **filtros:** tubos de PVC Geomecânico 2" com conexões rosqueáveis do tipo ranhurado com aberturas de 0,5 mm e espaçamento de 0,5 cm;
- **pré-filtro:** o espaço anelar entre a perfuração e o poço de monitoramento é preenchido com areia grossa lavada com granulação entre 1 e 2 mm, até no máximo 0,5 m acima do nível do filtro;
- **selo hidráulico:** o espaço anelar acima do pré-filtro é preenchido com bentonita para isolar a porção mais superficial do solo;
- **laje de proteção (mecânica e sanitária):** construída em cimento e tampa com identificação. O poço possui ainda tampa superior de pressão fechada com cadeado.

A instalação dos poços de monitoramento apresentou como objetivos:

- possibilitar o monitoramento periódico da qualidade das águas subterrâneas por meio de campanhas de amostragem e observação visual;
- fornecer informações sobre as oscilações do nível freático;
- permitir a realização de ensaios de permeabilidade *in situ* e assim incrementar a caracterização hidrogeológica, com a determinação da superfície potenciométrica e da condutividade hidráulica do meio, bem como delinear o comportamento do fluxo subterrâneo da área estudada (direção e velocidade);

- permitir a realização de ensaios de bombeamento *in situ* para estabelecer parâmetros de operação em um eventual processo de limpeza da área;

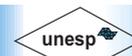
A **Figura 5.5.** ilustra o perfil construtivo do poço de monitoramento.



**Figura 5.5.- PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO**

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



**Campus de Rio Claro**

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Pós-Graduação em Geociências  
Área de Concentração  
Geociências e Meio Ambiente  
Rio Claro (SP) - 2002

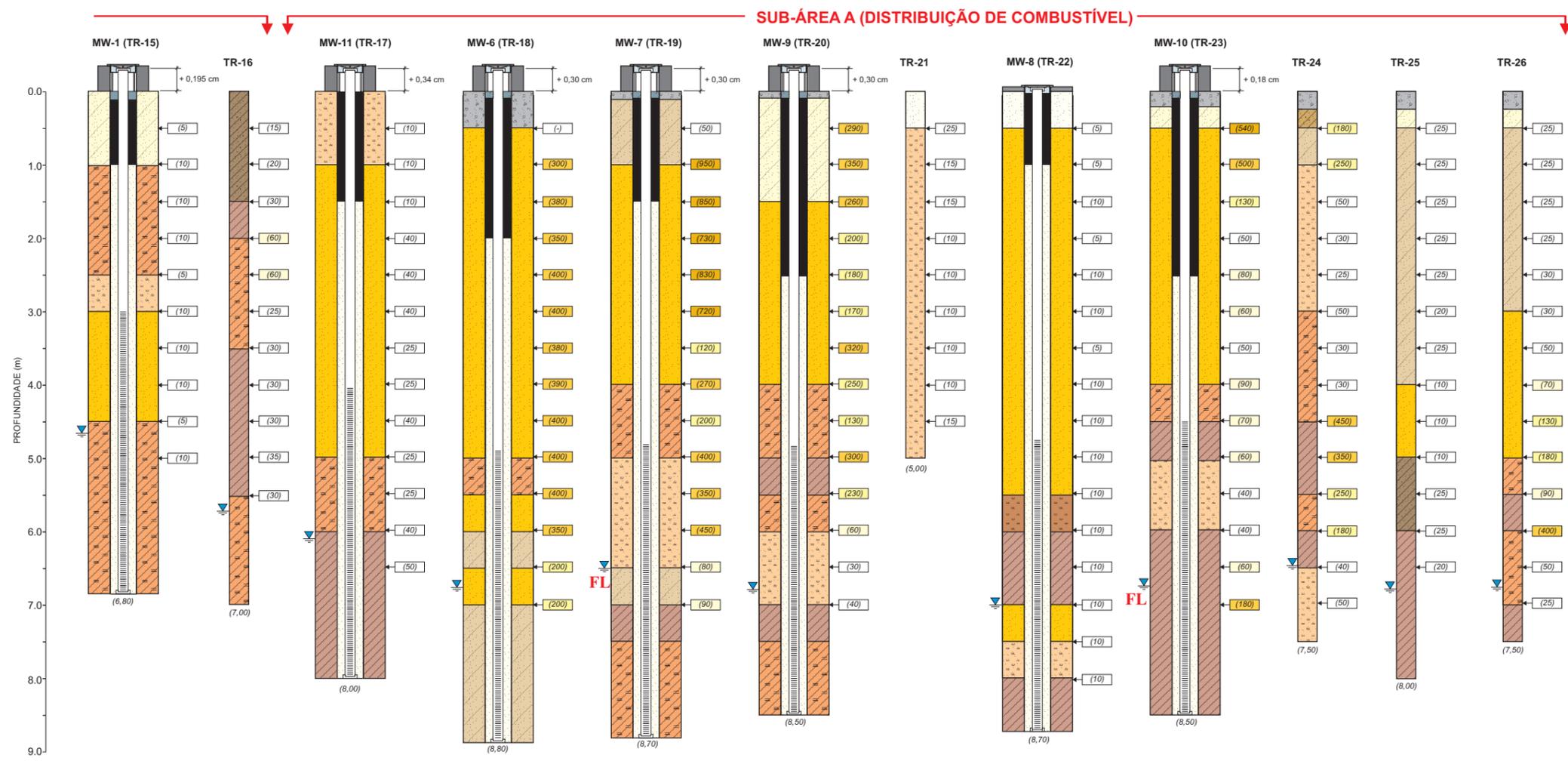
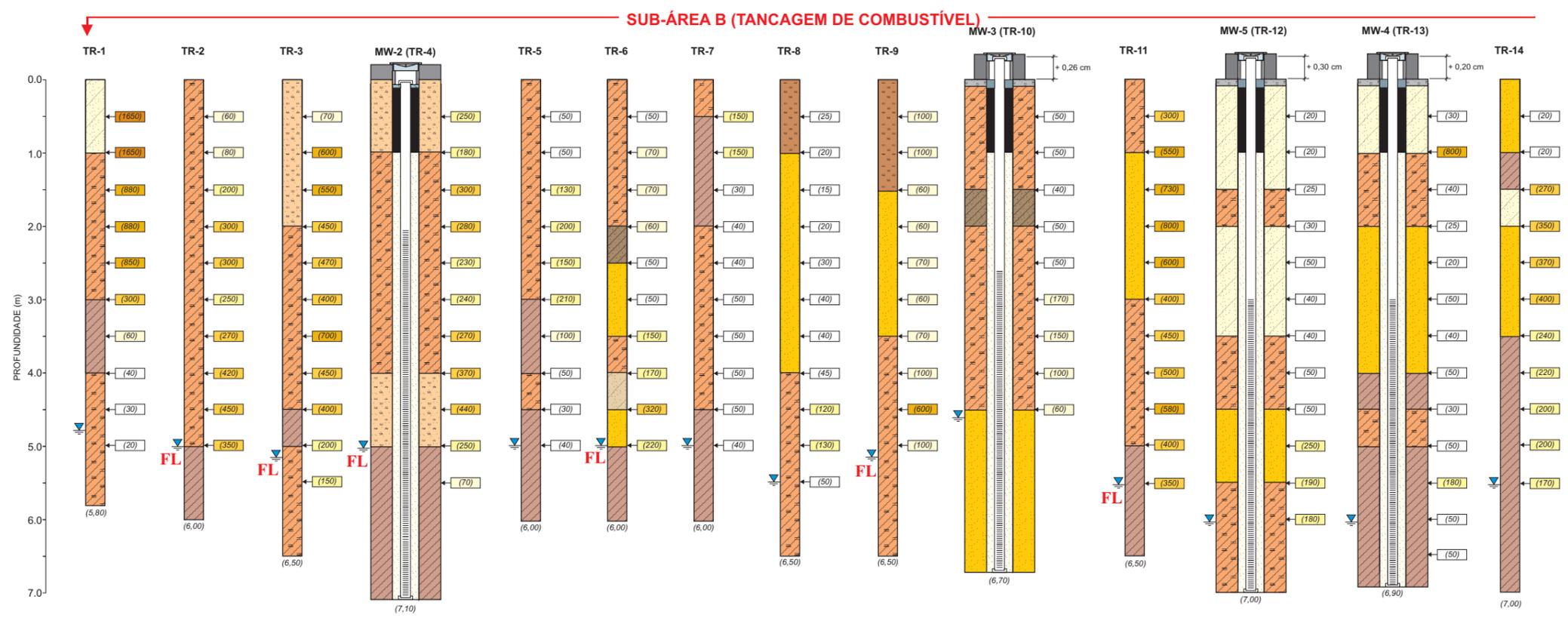
Posteriormente à instalação dos poços de monitoramento realizou-se o seu desenvolvimento (purga) para a eliminação de particulados finos eventualmente presentes. Foi utilizado amostrador de acrílico do tipo caçamba com válvula de retenção.

O monitoramento da eventual existência de fase livre também foi possível com a instalação dos poços de monitoramento. Foi verificado que esta fase, detectada durante as sondagens de reconhecimento, não foi observada nos poços, sugerindo tratar-se de influência da fase residual ou adsorvida de produto contido no solo. A confirmação da presença desta fase não solúvel de contaminação na água subterrânea somente se fará por meio da implementação de programa de monitoramento periódico.

As perfurações decorrentes das sondagens de reconhecimento que não foram utilizadas para instalação de poços de monitoramento foram preenchidas com o próprio solo removido e, na sua porção mais superior, seladas com bentonita. Este procedimento permite evitar a formação de caminhos preferenciais à eventual percolação de contaminantes até o nível freático.

A **Figura 5.6.** apresenta a localização dos poços instalados e a **Figura 5.7.** ilustra os perfis litológicos das sondagens de reconhecimento e perfis construtivos dos poços de monitoramento, com as respectivas concentrações de VOCs.





**Legenda:**

- Piso de cimento
- Brita
- Areia marrom com presença de brita
- Areia argilosa marrom a cinza escura, com presença de brita
- Areia argilosa micácea marrom a cinza
- Areia marrom a amarela
- Areia siltosa micácea marrom a cinza
- Silte argiloso micáceo marrom a cinza
- Argila arenosa marrom, com presença de brita
- Argila arenosa micácea marrom a cinza
- Argila de coloração variegada (marrom, cinza, rósea e branca), compacta
- Argila siltosa micácea marrom a cinza
- Nível d' água (não estabilizado)
- Concentrações de VOC (ppm)
- FL** Fase livre observada durante as sondagens

**CONCENTRAÇÕES DE VOC (ppm)**

< 50	101 a 250	501 a 1000
51 a 100	251 a 500	> 1000

**Figura 5.7. - PERFIS LITOLÓGICOS E DE VOCs DAS SONDAJENS DE RECONHECIMENTO E PERFIS CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO INSTALADOS**

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

**Aluno:** José Angelo Ferreira da Silva  
**Orientador:** Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



**Instituto de Geociências e Ciências Exatas**  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002

- **Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

Foram instalados 6 poços de monitoramento (MWs 6 a 11), locados em função da distribuição espacial dos indícios de contaminantes. O MW-8 foi instalado no furo TR-22 que apresentou máxima concentração de VOC de 10 ppm, dentro do limite de precisão de leitura e calibração do medidor de gás, e representa um ponto “de branco” da área. A **Tabela 5.7.** resume as características dos poços de monitoramento instalados.

<b>Tabela 5.7.</b> Dados Relativos aos Poços de Monitoramento Instalados, sub-área A.					
POÇO / SONDAGEM	COTA RELATIVA DA BOCA DO POÇO (m)	PROF. TOTAL (m)	PROF. DO NA (m)	FASE LIVRE (cm)	CARGA HIDRÁULICA.
MW-6 / TR-18	99,835	9,10	7,11	(-)	92,72
MW-7 / TR-19	99,780	9,00	6,87	(-)	92,91
MW-8 / TR-22	100,0	8,70	7,15	(-)	92,85
MW-9 / TR-20	99,788	8,80	6,90	(-)	92,88
MW-10 / TR-23	99,757	8,68	6,98	(-)	92,77
MW-11 / TR-17	99,292	8,34	6,54	(-)	92,75

NA - nível d'água estabilizado

(-) - ausente

- **Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Foram instalados 5 poços de monitoramento (MWs 1 a 5), locados em função da distribuição espacial da pluma de contaminantes. O MW-1, localizado à montante do fluxo das águas subterrâneas, instalado no furo TR-15, que apresentou máxima concentração de VOC de 10 ppm, dentro do limite de precisão de leitura e calibração do medidor de gás, representa um ponto “de branco” da área. A **Tabela 5.8.** resume as características dos poços de monitoramento instalados.

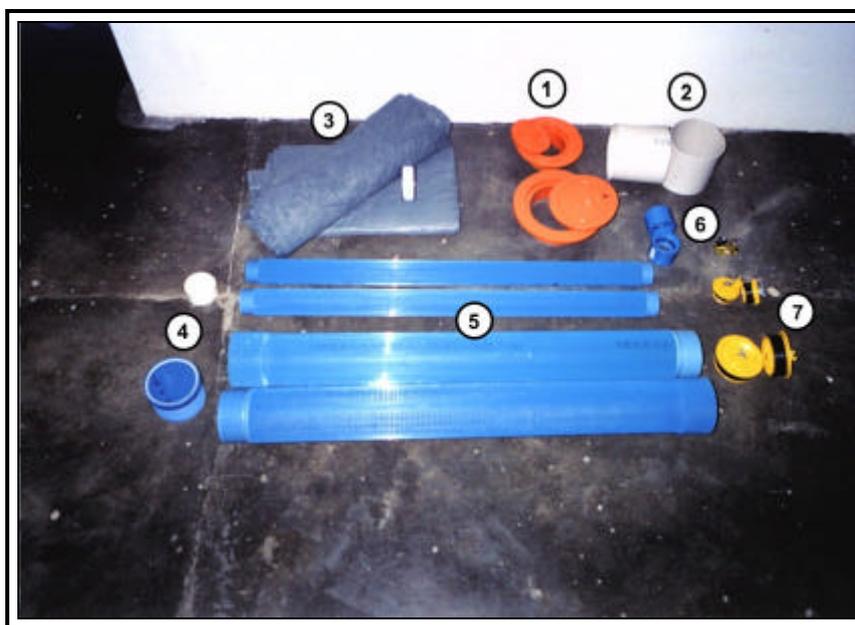
**Tabela 5.8.** Dados Relativos aos Poços de Monitoramento Instalados, sub-área B.

POÇO/ SONDAGEM	COTA RELATIVA DA BOCA DO POÇO (m)	PROF. TOTAL (m)	PROF. DO NA (m)	FASE LIVRE (cm)	CARGA HIDRÁULICA (m)
MW-01/ TR-15	100,000	6,95	4,75	(-)	95,25
MW-02/ TR-04	99,810	7,10	5,02	(-)	94,79
MW-03/ TR-10	99,816	6,96	4,73	(-)	95,086
MW-04/ TR-13	100,265	7,10	5,70	(-)	94,565
MW-05/ TR-12	100,330	7,30	5,05	(-)	95,28

NA - nível d'água estabilizado

(-) - ausente

As fotos 5.6. a 5.9. ilustram, respectivamente, os materiais construtivos, a montagem e o acabamento final do poço de monitoramento.



**Foto 5.6.** Poços de monitoramento, materiais construtivos. 1) tampas de proteção; 2) PVC para construção da caixa de proteção; 3) manta tipo “bidim” para revestimento do filtro; 4) tampa de rosca (fechamento inferior do poço); 5) revestimentos (2” e 4”) e filtros (2” e 4”); 6) luvas 2” para conexão dos tubos; 7) tampas de pressão (fechamento superior do poço).



**Foto 5.7.** Poço de monitoramento, montagem.



**Foto 5.8.** Poço de monitoramento, acabamento final.

### 5.3.3. AMOSTRAGEM DE SOLO

A amostragem de solo seguiu a metodologia descrita na Norma Técnica ABNT NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos. O número de amostras foi definido em função da extensão da área impactada e dos maiores valores de VOCs medidos durante as sondagens de forma a representar o grau de alteração ambiental existente.

A qualidade da caracterização ambiental de solos depende do cumprimento dos procedimentos estabelecidos na norma, uma vez que subsidiará as interpretações finais, e conseqüentemente eventuais medidas de remediação para a área investigada.

A seguir são apresentados os conceitos e métodos de trabalho envolvidos na amostragem de solo:

- **Plano de Amostragem:** preparado previamente ao início dos trabalhos, apresenta os objetivos da amostragem; define o número, a localização e profundidade da amostra de solo; determina os parâmetros analíticos e eventuais aquisição de dados *in situ* (pH, temperatura e condutividade hidráulica), fixa técnicas específicas de preservação e acondicionamento das amostras para os parâmetros de interesse (tipo de frascos, preservantes, volume de amostra, etc.);
- **Descontaminação:** realizada previamente às amostragens, envolve a limpeza dos trados e outros equipamentos de coleta, com o uso de detergente neutro e água destilada/desmineralizada, evitando assim interferências analíticas;
- **Sondagem:** desenvolvida nos pontos indicados previamente no plano de amostragem, com o uso de equipamento descontaminado até ser atingida a profundidade desejada. A descrição da unidade geológica presente e eventuais indícios da presença de contaminantes das amostras é registrada em fichas específicas ou em caderneta de campo. Ao final da perfuração, os furos devem ser preenchidos com bentonita, cimento ou outro material selante adequado, para evitar a comunicação direta da superfície com o nível freático;
- **Coleta:** dependendo das características das unidades geológicas da área em estudo, constatadas durante as sondagens, podem ser coletadas dois tipos de amostras: a simples (pontual) e a composta (representativa de uma área ou profundidades diversas). É realizada com o uso de trados manuais ou equipamentos mecanizados; as amostras devem ser colocadas em frascos novos (sem uso anterior) e padronizados pelo laboratório

de destino, previamente identificados com dados da área, número da amostra e a data da coleta. A amostra deve ser mantida sob refrigeração ou outro preservante específico;

- **Remessa ao laboratório:** para o envio, as amostras são mantidas em caixas de isopor resfriadas (aproximadamente 4°C), evitando a decomposição dos compostos orgânicos eventualmente presentes. Deve ser acompanhada de guia de transferência controlada;
- **Registro das informações:** todos os dados coletados durante as sondagens e amostragens são registrados em fichas específicas.

A **Foto 5.9.** ilustra as amostragem de solo já acondicionadas em frascos.

Durante a execução das sondagens de reconhecimento foi realizada uma amostragem de solo a cada 0,5 m para leitura de compostos orgânicos voláteis (VOCs) *in situ*, e assim observar a possível variação vertical da contaminação. As amostras que, em cada sondagem, apresentaram a maior concentração de VOC foram reservadas e preservadas sob refrigeração.



**Foto 5.9.** Amostras de solo coletadas e acondicionadas em frascos de vidro.

### - Sub-área A (Distribuição de Combustível):

Foram selecionadas, dentre as amostras coletadas, 8 (sendo uma por furo) para caracterização analítica, em função da sua representatividade quanto à distribuição espacial da contaminação. Uma das amostras representa o “branco de campo” da área (TR-22). Para análise microbiológica foram coletadas 3 amostras (TRs 19, 22 e 23), além de outras 3 (TRs-18, 24 e 26) para análise de distribuição granulométrica das frações do solo.

### - Sub-área B (Tancagem de Combustível):

Foram selecionadas, dentre as amostras coletadas, 6 (1 por furo), para caracterização analítica, em função da sua representatividade quanto à distribuição espacial da contaminação. Uma das amostras representa o “branco de campo” da área (TR-15). Para análise microbiológica foram coletadas 3 amostras de solo (TRs 1, 3 e 15), além de outras 3 (TRs 3, 4 e 7) para análise de distribuição granulométrica das frações do solo.

As tabelas 5.9. e 5.10. resumem as características das amostras de solo coletadas nas sub-áreas A e B, respectivamente.

<b>Tabela 5.9. Características das Amostras de Solo, sub-área A.</b>								
CARACTERÍSTICAS	AMOSTRA / SONDAGEM							
	AS-AB-1/ TR-17	AS-AB-02/ TR-18	AS-AB-3/ TR-19	AS-AB-4/ TR-20	AS-AB-6/ TR-21	AS-AB-7/ TR-22	AS-AB-8/ TR-23	AS-AB-10/ TR-24
Profundidade (m)	6,5	5,5	1,0	1,0	7,0	0,5	4,5	6,0
Nível d'água (m)	6,5	6,7	6,8	7,0	7,0	6,7	6,5	6,8
Tipo	simples	simples	simples	simples	simples	simples	simples	simples
Textura	argilosa	arenosa	arenosa	areno-argilosa	arenosa	areno-argilosa	argilo-siltosa	argilo-siltosa
Matéria Orgânica	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Índice de Contaminação	ausente	odor	fase residual	fase residual	ausente	ausente	odor	odor
Umidade	seca	seca	seca	seca	seca	seca	seca	seca
VOC (ppm)	50	400	950	350	540	10	450	400

**Tabela 5.10.** Características das Amostras de Solo, sub-área B.

CARACTERÍSTICAS	AMOSTRA / SONDAGEM					
	AS-T-1/ TR-1	AS-T-2/ TR-2	AS-T-3/ TR-3	AS-T-11/ TR-11	AS-T-13/ TR-13	AS-T-15/ TR-15
Profundidade (m)	1,0	5,0	3,5	2,0	1,0	4,0
Nível d'água (m)	4,80	5,0	5,3	5,5	6,0	4,60
Tipo	simples	simples	simples	simples	simples	simples
Textura	argilosa	argilo-siltosa	argilo-siltosa	arenosa	argilo-siltosa	arenosa
Matéria Orgânica	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Índice de Contaminação	odor	fase residual	fase residual	fase residual	odor	ausente
Umidade	úmida	úmida	úmida	úmida	úmida	úmida
VOC (ppm)	1650	450	700	800	800	10

#### 5.3.4. AMOSTRAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A amostragem de águas subterrâneas foi realizada conforme a Norma Técnica ABNT NBR 13895 - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem, durante o período de pouca pluviosidade (mês de Outubro) na região onde está localizada a área estudada. A seguir são apresentados alguns conceitos envolvidos no procedimento de amostragem:

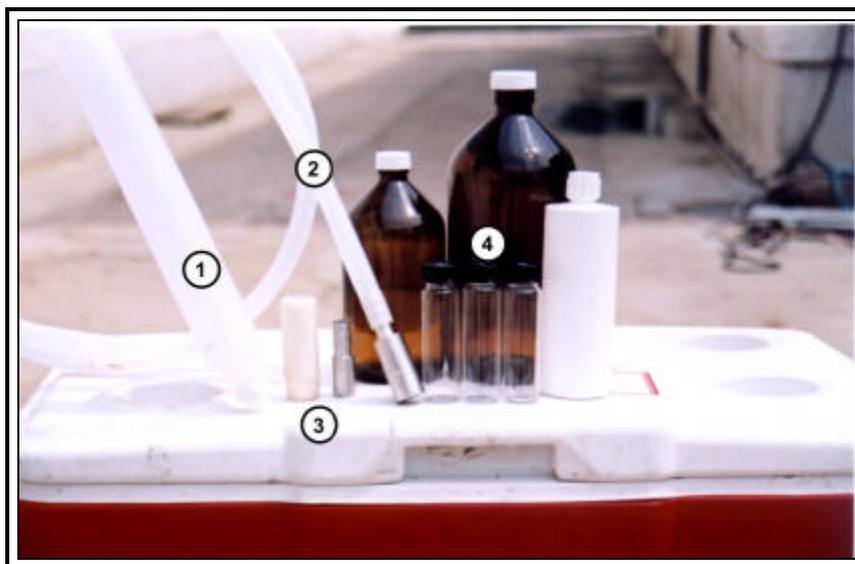
- **Branco de Campo:** para representar o “branco de campo” e obter valores de *background* da área investigada deve ser instalado um poço de monitoramento à montante dos limites da eventual pluma de contaminantes detectada.
- **Branco de Equipamento:** visto que toda a amostragem foi realizada com amostradores (*bailers*) e mangueiras plásticas descartáveis, exclusivos para cada poço amostrado, não foram coletadas amostras de branco de equipamento, destinadas à aferição dos procedimentos de descontaminação dos equipamentos de amostragem;
- **Amostra Instantânea:** corresponde à amostra coletada em um único ponto ou profundidade. Todas as amostras coletadas na área investigada correspondem a este tipo em particular;

- **Amostra Composta:** representam aquelas amostras coletadas em pontos, profundidades e/ou instantes diferentes, posteriormente homogeneizadas para a obtenção de uma amostra composta representativa. Na presente pesquisa não foram coletadas amostras deste tipo;
- **Réplica:** coleta de duplicata de uma amostra de água para aferição dos resultados analíticos e avaliação do laboratório.

O procedimento de amostragem compreendeu os seguintes passos:

- **Plano de amostragem:** documento que reúne informações como o tipo e a quantidade de amostras, amostras de controle, identificação e seqüência de amostragem, equipamentos de medição em campo e previsão de realização dos trabalhos;
- **Medição do nível d'água:** realizada previamente à purga de cada poço, determina-se também a espessura da coluna d'água;
- **Esgotamento do poço (purga):** necessário para a limpeza e renovação da água contida no poço, pode ser realizado com um dia de antecedência ou na hora da amostragem. O volume de água que deve ser extraído em poços de 2" corresponde a duas a três vezes o comprimento da coluna d'água existente;
- **Coleta das amostras:** é realizada utilizando-se materiais descartáveis, como mangueiras plásticas e amostradores (*baylers*) plásticos;
- **Medição de temperatura, pH e condutividade elétrica *in situ*:** compreendem testes de rotina, fornecendo a medida da atividade dos íons de hidrogênio, taxas de reação e total de sólidos dissolvidos;
- **Preservação:** as amostras devem ser acondicionadas adequadamente em caixas termoplásticas (*cooler*) ou isopor, mantendo a refrigeração com gelo acondicionado em sacos plásticos, evitando-se a possibilidade de contaminação cruzada;
- **Remessa ao laboratório:** as amostras devem ser enviadas ao laboratório dentro do prazo de validade para cada parâmetro, com registro em guia controlada.

As fotos 5.10. a 5.13. ilustram os materiais para coleta, equipamentos de medição *in situ* e procedimento de coleta de água subterrânea.



**Foto 5.10.** Amostragem de água subterrânea, materiais e equipamentos para coleta. 1) *bayler* descartável; 2) mangueira plástica descartável; 3) válvula com dispositivo para retenção de água; 4) frascos para acondicionamento das amostras (tipos âmbar, plástico e *vials*).



**Foto 5.11.** Amostragem de água subterrânea, equipamentos de medição *in situ*.



**Foto 5.12.** Amostragem de água subterrânea, utilizando bayler descartável.



**Foto 5.13.** Acondicionamento das amostras coletadas.

**- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

Foram coletadas amostras de água subterrânea nos 6 poços instalados (MWs 6 a 11) e a amostragem para a análise microbiológica foi realizada nos MWs 7, 8 e 10.

**- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Foram coletadas amostras de água subterrânea nos 5 poços instalados (MWs 1 a 5) e a amostragem para a análise microbiológica foi realizada nos MWs 1, 2 e 5.

As tabelas 5.11. e 5.12 resumem as características das amostras de água subterrânea coletadas nas sub-áreas A e B, respectivamente.

<b>Tabela 5.11.</b> Características das Amostras de Água Subterrânea, sub-área A.						
AMOSTRA / POÇO	COR	ODOR	TURBIDEZ	pH	TEMPERATURA (°C)	CONDUTIVIDADE (µS/cm)
AA-AB-1 / MW-6	transparente	fraco	muito baixa	6,53	28,8	620
AA-AB-2 / MW-7	marrom claro	ausente	média	6,58	29,1	458
AA-AB-3 / MW-8	marrom claro	ausente	média	6,75	29,0	215
AA-AB-4 / MW-9	marrom claro	muito fraco	baixa	6,32	29,6	333
AA-AB-5 / MW-10	marrom claro	fraco	média	6,53	28,6	481
AA-AB-6 / MW-11	transparente	ausente	ausente	6,54	28,9	418

<b>Tabela 5.12.</b> Características das Amostras de Água Subterrânea, sub-área B.						
AMOSTRA / POÇO	COR	ODOR	TURBIDEZ	pH	TEMPERATURA (°C)	CONDUTIVIDADE (µS/cm)
AA-T-1 / MW-1	marrom claro	ausente	média	6,16	29,6	288
AA-T-2 / MW-2	marrom claro	fraco	média	6,27	30,5	352
AA-T-3 / MW-3	marrom claro	ausente	média	6,13	29,4	288
AA-T-4 / MW-4	marrom claro	ausente	média	6,60	28,6	425
AA-T-5 / MW-5	marrom	fraco	alta	6,63	30,1	498

### 5.3.5. ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO E DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A seleção dos parâmetros mais relevantes à caracterização dos contaminantes existentes no solo e água subterrânea dependeu basicamente: 1) da quantidade e qualidade das informações obtidas durante as investigações preliminar e detalhada, e 2) do histórico levantado com antigos funcionários da empresa transportadora, cujas atividades envolviam tão somente produto derivado de petróleo do tipo óleo diesel.

A composição química do óleo diesel possui, de maneira geral, cadeias de carbono mais longas e mais pesadas que as da gasolina, variando de  $C_6$  a  $C_{22}$ , sendo que a maioria dos hidrocarbonetos se encontra, no diesel, na faixa de  $C_{10}$  a  $C_{18}$ . O diesel apresenta elevada porcentagem de PAHs como naftalenos, acenaftalenos, antracenos e fenantrenos. No Brasil, devido à adição de gasolina ao diesel, há também a presença de BTXE (Benzeno, Tolueno, Xilenos e Etilbenzeno). Destes, o benzeno é o que apresenta maior mobilidade e é o mais reconhecidamente carcinogênico, dentre os PAHs o benzo(a)antraceno e benzo(a)pireno são considerados carcinogênicos (TPHWGS, 1997).

A metodologia utilizada nas análises químicas foi baseada no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19<sup>th</sup> Edition*, publicada pelo *American Public Health Association* e nos métodos USEPA - *United States Environmental Protection Agency*, de acordo com o *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Method, SW846, 3<sup>rd</sup> Edition*.

Assim, os parâmetros analíticos recomendados e suas respectivas metodologias analíticas, com base na fonte de contaminação, referem-se àqueles constituintes do óleo diesel, a saber:

**Compostos Específicos:** compostos relativamente mais tóxicos presentes nos combustíveis. Compreendem:

- PAH (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*): são também chamados *polyaromatic hydrocarbons*, referem-se a hidrocarbonetos de petróleo definidos numa cadeia que varia de  $C_{12}$  a  $C_{25}$ , formada pela união de múltiplos anéis de benzeno (métodos USEPA 8100, 8270 e 8310);
- BTEX: são os compostos monoaromáticos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos presentes na gasolina (métodos USEPA 8015 e 8240).

**Parâmetros Gerais:** referem-se aos Métodos USEPA 418.1 e 8015. Fornecem as concentrações totais de hidrocarbonetos para análise da massa total de hidrocarbonetos presentes em uma amostra e taxas de degradação, que são essenciais para estudos de atenuação natural e/ou remediação.

- *Light Hydrocarbons (LH)* ou *Total Petroleum Hydrocarbons - Gasoline Range Organics (TPH-GRO)*: Hidrocarbonetos Leves (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>), presentes na gasolina;
- *Total Petroleum Hydrocarbons - Diesel Range Organics (TPH-DRO)*: Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>), presentes no óleo diesel.

O controle de qualidade dos resultados baseou-se na documentação cuidadosa e completa das informações de campo, na utilização de equipamentos descartáveis ou descontaminação dos equipamentos entre as amostragens e na utilização de frascos, métodos e preservantes apropriados.

#### **- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

##### Amostras de Solo

- BTEX e TPH-(DRO/GRO): analisados para as amostras coletadas nos pontos TRs 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26.
- PAHs: sondagens TRs 18, 19 e 22.

##### Amostras de Água Subterrânea

- BTEX e TPH (DRO/GRO): em todos os 6 MWs.
- PAHs: MWs 7, 8 e 10.

#### **- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

##### Amostras de Solo

- BTEX e TPH (DRO/GRO): TRs 1, 2, 3, 11, 13 e 15.
- PAHs: TRs 1, 3 e 15.

### Amostras de Água Subterrânea

- BTEX e TPH (DRO/GRO): em todos os 5 MWs.
- PAHs: MWs 1, 2 e 5.

### **5.3.6. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO: NIVELAMENTO GEOMÉTRICO**

Ao término da instalação dos poços de monitoramento foi efetuado um levantamento topográfico da área investigada por meio de nivelamento geométrico, que consiste em irradiar visadas a partir de uma estação fixa. As cotas topográficas obtidas são relativas, adotando-se o valor 100 como cota base.

Assim, determinou-se a locação e nivelamento da cota superior dos poços, que associada a valores de medições do nível d' água permite o traçado da superfície potenciométrica, em função das respectivas cargas hidráulicas, para a área.

O nivelamento geométrico foi desenvolvido conforme a Norma Técnica ABNT NBR 13.133 – Execução de Levantamento Topográfico.

### **5.3.7. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA**

O contexto geológico regional não foi abordado visto não contribuir na análise mais focalizada da presença dos contaminantes no subsolo.

A área investigada está disposta sobre depósitos aluvionares recentes, constituídos por cascalhos, areias e argilas. Situa-se em uma região plana, apresentando declividade < 5% e pequenos morros no entorno.

As sondagens realizadas permitiram individualizar as seguintes unidades geológicas (vide **Figura 5.7.**):

**- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

- Areia argilosa marrom a cinza escura, com presença de brita. Ocorre sempre mais superficialmente, apresentando espessura máxima de 1,5 m;
- Areia marrom a amarela. unidade presente em 8 das sondagens com até 5,0 m de espessura;
- Areia siltosa, micácea, marrom a cinza. Apresentou a maior espessura na sondagem TR-21, com 4,5 m, ocorreu em 7 furos;
- Areia argilosa, micácea, marrom a cinza. Sua maior espessura foi observada na sondagem TR-25, com 3,5 m. Está presente em 6 furos;
- Areia marrom com presença de brita. Ocorre, superficialmente, nas TRs 21 e 22 com espessura de 0,5 m;
- Argila siltosa, micácea, marrom a cinza com até 1,2 m de espessura (TR-20). Descrita em 7 sondagens;
- Argila compacta de coloração variegada (marrom, cinza, rósea e branca), apresentou 2,5 m de espessura no furo TR-23. Ocorre em 8 sondagens;
- Argila arenosa, micácea, marrom a cinza. Pouco espessa, até 1 m, e pouco freqüente, verificada nas TRs 18 e 25;
- Argila arenosa marrom com presença de brita, presente apenas na sondagem TR-24, superficialmente, com 0,3 m de espessura aproximadamente;
- Silte argiloso, micáceo, marrom a cinza. Descrito somente no furo TR-22 com 0,5 m de espessura.

A descrição das unidades geológicas, indicou um solo predominantemente argilo-arenoso nesta sub-área.

### **- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

- Areia argilosa marrom a cinza escura, com presença de brita. Ocorre sempre mais superficialmente, apresentando espessura máxima de 1,5 m;
- Areia marrom a amarela. Unidade presente em 9 das 16 sondagens, com até 3,0 m de espessura;
- Areia siltosa, micácea, marrom a cinza. Apresentou maior espessura na sondagem TR-3, com 2,0 m, ocorre em 3 furos;
- Areia argilosa, micácea, marrom a cinza. Está presente apenas na sondagem TR-6 com uma espessura de 0,5 m;
- Argila siltosa, micácea, marrom a cinza com até 3,0 m de espessura (TRs 3, 4 e 5). Descrita em 15 sondagens;
- Argila compacta de coloração variegada (marrom, cinza, rósea e branca), apresentou 3,5 m de espessura no furo TR-14. Ocorre em 10 sondagens;
- Argila arenosa, micácea, marrom a cinza. Pouco espessa (até 1,5 m) e pouco freqüente, verificada nas TRs 6, 10 e 16;
- Silte argiloso, micáceo, marrom a róseo. Descrito nos furos TRs 8 e 9 (1,5 m de espessura).

A descrição das unidades geológicas, indicou um solo predominantemente argilo-siltoso a arenoso nesta sub-área.

### 5.3.8. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

A caracterização hidrogeológica resultou da integração dos dados do monitoramento do nível d'água e fase livre, da execução de ensaios hidrogeológicos *in situ* e do nivelamento geométrico.

As informações levantadas permitiram a elaboração do mapa potenciométrico das sub-áreas investigadas, bem como possibilitou definir o comportamento do aquífero local, apontando a direção e sentido preferenciais do fluxo das águas subterrâneas, seu gradiente hidráulico e a sua velocidade (vide **Figura 5.8.**).

Os parâmetros obtidos com a caracterização hidrogeológica são também utilizados na elaboração de projetos conceituais de remediação.

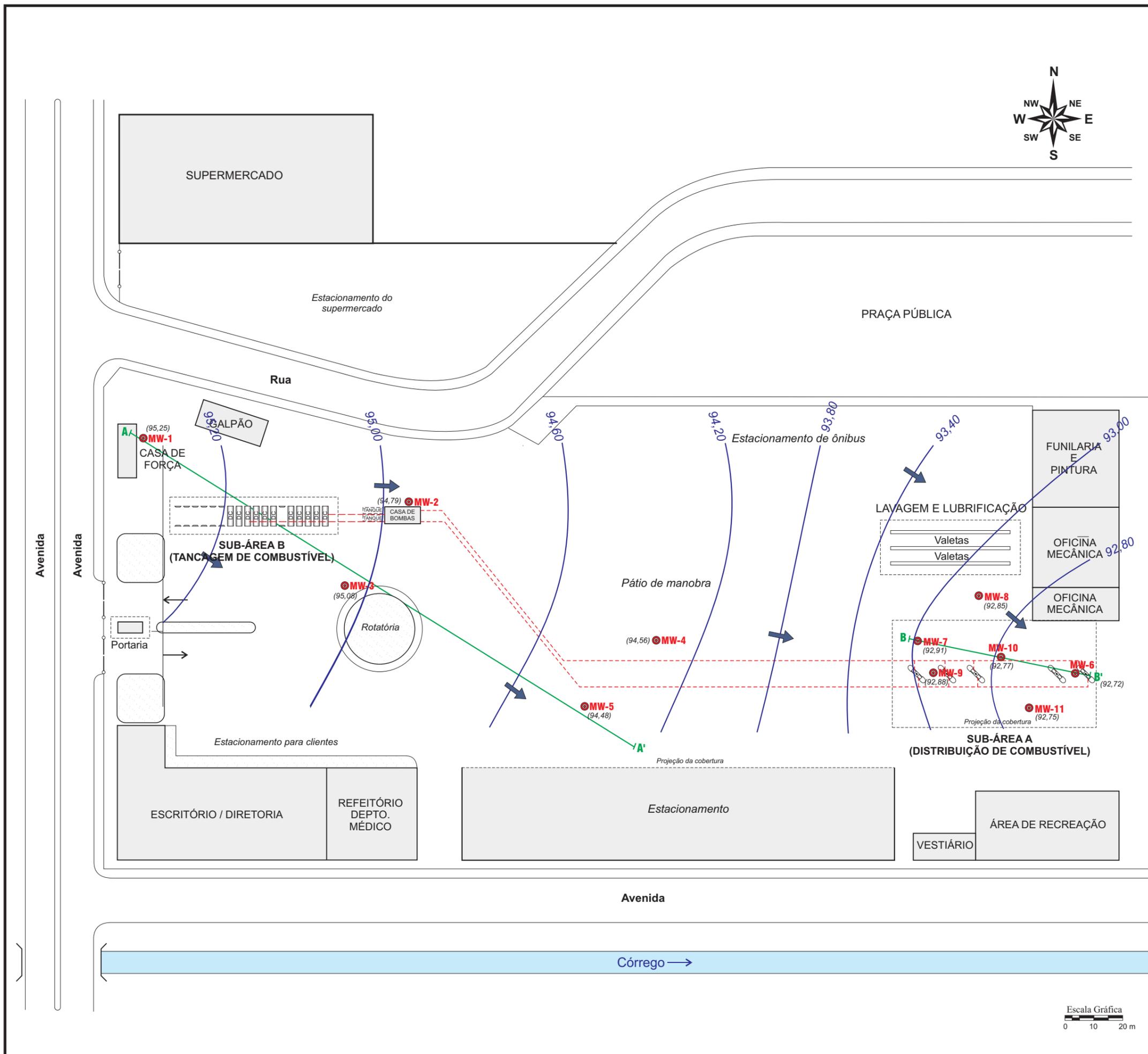
A **Figura 5.9.** apresenta as seções hidrogeológicas A-A' e B-B' com a indicação do sentido do fluxo subterrâneo (NW-SE) e os valores de condutividade hidráulica (**K**) determinados para o aquífero. A localização desta seção está representada no mapa potenciométrico.

A velocidade do fluxo das águas subterrâneas foi calculada conforme a Lei de Darcy, por meio da equação:

$$V = K \times i / n_e$$

onde: V, velocidade das águas subterrâneas (cm/s); K, condutividade hidráulica (cm/s); i, gradiente hidráulico (expresso em porcentagem);  $n_e$ , porosidade efetiva (expresso em porcentagem).

É importante ressaltar que a velocidade de deslocamento das águas subterrâneas não coincide com a do combustível, eventualmente presente no aquífero, devido às diferenças de densidade e fluidez de cada composto.



- Legenda:
- DC Tanque de armazenamento de combustível
  - Ilha de abastecimento
  - Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
  - MW-1 Poços de monitoramento instalados
  - (92,85) Carga hidráulica (m) (leitura em 18/10/00)
  - 97,20 Linhas equipotenciais (m)
  - Direção do fluxo subterrâneo
  - A A' Seção hidrogeológica

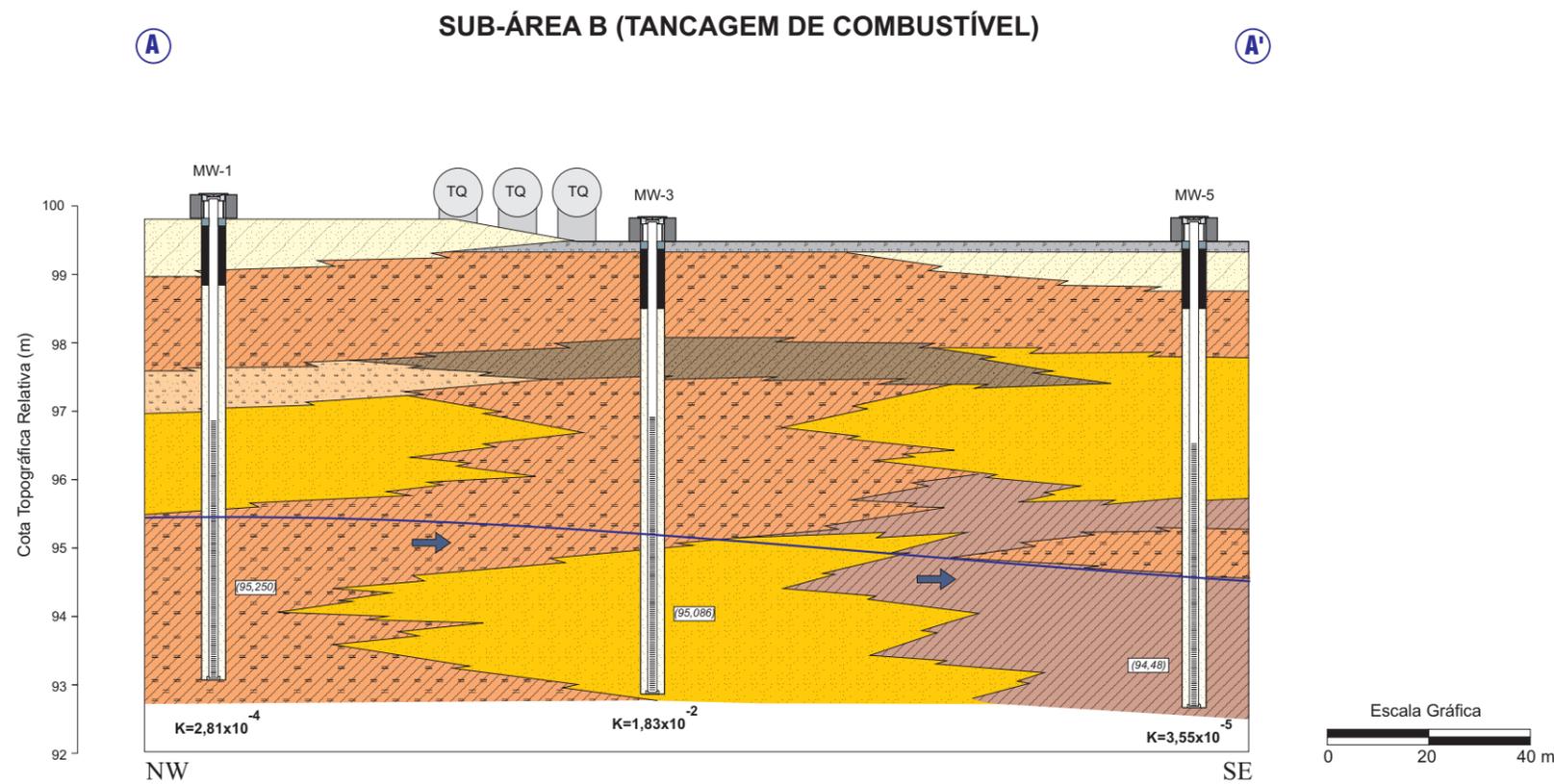
Figura 5.8. - MAPA POTENCIOMÉTRICO

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
 Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002



- Legenda:
- Piso de cimento
  - Brita
  - Areia marrom com presença de brita
  - Areia argilosa marrom a cinza escura, com presença de brita
  - Areia argilosa micácea marrom a cinza
  - Areia marrom a amarela
  - Areia siltosa micácea marrom a cinza
  - Silte argiloso micáceo marrom a cinza
  - Argila arenosa marrom, com presença de brita
  - Argila arenosa micácea marrom a cinza
  - Argila de coloração variegada (marrom, cinza, rósea e branca), compacta
  - Argila siltosa micácea marrom a cinza
  - Nível d' água
  - Carga hidráulica (m)
  - $\kappa$  Condutividade hidráulica (cm/s)
  - Direção do fluxo subterrâneo

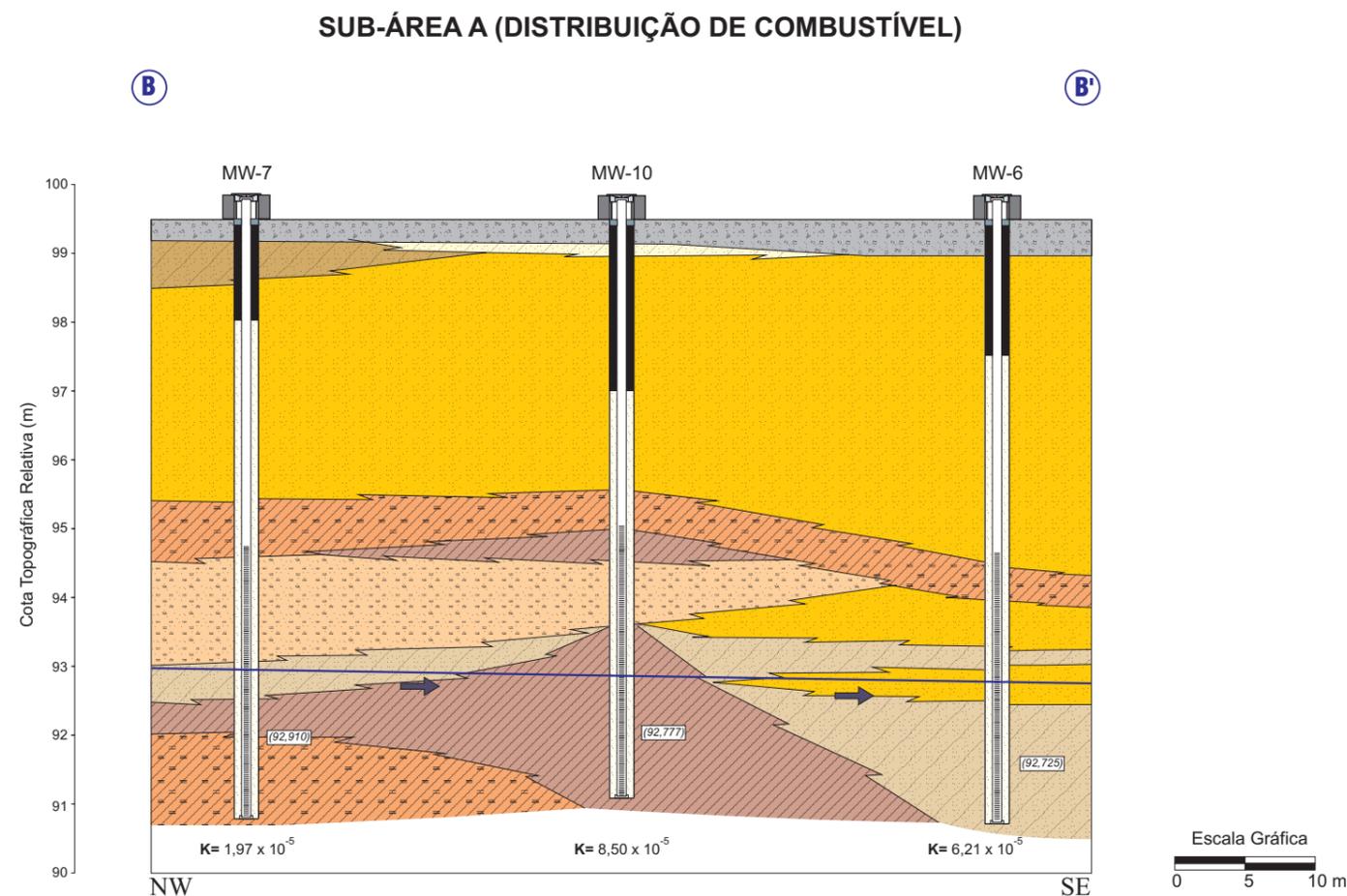


Figura 5.9. - SEÇÕES HIDROGEOLÓGICAS (A - A' E B - B')

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri

### **- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

O aquífero estudado é do tipo freático constituído por sedimentos aluvionares, predominantemente argilosos e arenosos. O nível d'água está à profundidade média de 6,90 m.

O gradiente hidráulico médio, obtido a partir do traçado entre dois pontos no mapa potenciométrico, estabelecendo uma reta paralela à direção preferencial do fluxo d'água subterrâneo, é da ordem de 0,005 (0,5%) e a porosidade efetiva média pode ser estimada em torno de 15 % para este aquífero (Baumgartner & Liebscher, 1996).

A média harmônica das condutividades hidráulicas obtidas nos poços ensaiados ( $k_{\text{médio}} = 3,85 \times 10^{-5}$  cm/s), permitiu estimar a velocidade das águas subterrâneas em 1,12 m/ano nesta sub-área.

### **- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

O aquífero estudado é do tipo freático constituído por sedimentos aluvionares, argilo-arenosos a siltosos. O nível d'água está a uma profundidade média de 5,20 m.

O gradiente hidráulico médio, obtido a partir do traçado entre dois pontos no mapa potenciométrico, estabelecendo uma reta paralela à direção preferencial do fluxo d'água subterrânea, é da ordem de 0,004 (0,4%) e a porosidade efetiva média pode ser estimada em torno de 10 % para este aquífero (Baumgartner & Liebscher, 1996).

A média harmônica das condutividades hidráulicas obtidas nos poços ensaiados ( $k_{\text{médio}} = 7,11 \times 10^{-5}$  cm/s), permitiu estimar a velocidade das águas subterrâneas em 1,66 m/ano nesta sub-área.

### 5.3.8.1. Monitoramento do Nível d'Água e Fase Livre

Durante o monitoramento do nível d'água também é verificada a presença ou não de fase livre de combustível sobrenadante, buscando delimitar com mais precisão eventuais plumas de contaminantes interceptadas durante os trabalhos investigativos.

As leituras de nível d'água e espessuras de fase livre de hidrocarbonetos são realizadas por meio de amostradores de acrílico do tipo caçamba com válvula de retenção e/ou medidores elétricos apropriados do tipo *Interface Meter*, conforme ilustra a **Foto 5.14**.



**Foto 5.14.** Monitoramento do nível d'água e fase livre, utilizando medidores elétricos tipo *Interface Meter*.



**Foto 5.15.** Exemplo de coleta de fase livre utilizando amostrador de acrílico com válvula de retenção.

### 5.3.8.2. Ensaios de Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade aplicados *in situ* em solos são realizados para se obter os valores de condutividade hidráulica dos terrenos alvo de interesse à implantação e/ou construção de obras civis. Mais particularmente, são desenvolvidos para se obter a caracterização hidrogeotécnica dessas áreas, por meio da observação do comportamento hidráulico de cada uma das unidades geotécnicas existentes. Quanto à sua aplicação, classificam-se em ensaio sob níveis d'água constante e variável (Oliveira & Corrêa Filho, 1996).

O ensaio aplicado neste estudo para a obtenção de parâmetros hidráulicos se refere aos *slug tests*, um tipo de ensaio a nível variável, no qual é aplicada uma descarga no poço ensaiado (ensaio de recuperação), retirando-se a água e medindo-se em seguida a velocidade de recuperação até a sua estabilização.

## Ensaio tipo Carga Variável

A água contida no poço é bombeada até a obtenção de rebaixamento de pelo menos 1,0 m abaixo do nível d'água do terreno, até serem atingidas condições de fluxo permanente, ou próximas (vazões constantes). A seguir interrompe-se o bombeamento, tomando-se este instante como zero e a intervalos curtos no início e mais longos em seguida (30", 1', 2', 5', 10', etc.) acompanha-se a recuperação do nível d'água do poço. Para a realização das medições são utilizados medidores elétricos com precisão de  $\pm 0,5$  cm.

As fórmulas normalmente empregadas para a determinação da condutividade hidráulica consideram o meio homogêneo e contínuo, além da necessidade de haver regime de fluxo laminar. Neste caso, a Lei de Darcy é válida e a mais utilizada, produzindo resultados satisfatórios.

A obtenção da condutividade hidráulica a partir de dados de recuperação do nível d'água e das características dos poços de monitoramento é expressa pela seguinte equação (Bower & Rice 1976, *apud* Freeze & Cherry, 1979):

$$K = [r^2 \cdot \ln(R_e/R) \cdot \ln(h_0/h_t)] / 2 \cdot L \cdot t$$

onde: K, condutividade hidráulica (cm/s); r, raio do poço (cm); R, raio do centro do poço até o material componente do aquífero (cm);  $R_e$ , raio efetivo de influência do ensaio de variação do nível da água (cm); L, comprimento do filtro (cm);  $h_0$ , nível da água no poço no início da recuperação,  $t=0$  (cm);  $h_t$ , nível da água no poço após o início da recuperação,  $t>0$  (cm); t, tempo (seg)

O método foi aplicado com a utilização do *software Aquifer Test for Windows Waterloo Hydrogeologic*, versão 2.5 (Röhlich, 1997). Este software permite ao usuário definir as características geométricas do poço e do aquífero, segundo o método mais apropriado de análise das condições hidrogeológicas local.

## Ensaio tipo Vazão Constante

Este ensaio foi realizado nos poços que apresentaram pouco rebaixamento do nível d'água (alta recarga). Inicialmente toma-se a posição do nível d'água (nível estático), no poço de monitoramento, e em seguida realiza-se o bombeamento da água sob vazão constante. O rebaixamento foi acompanhado até a sua estabilização (nível dinâmico).

O valor da condutividade hidráulica (**K**) foi obtido por meio das seguintes equações:

$$K = \frac{Q}{H_m \cdot S} \qquad H_m = H + \frac{S}{2}$$

onde: H, altura da coluna d'água ou a carga hidráulica; S, rebaixamento (nível estático – nível dinâmico); Q, vazão (volume / tempo)

A condutividade hidráulica (**K**) para cada sub-área foi determinada calculando-se a média harmônica dos dados obtidos para cada poço, individualmente. A média harmônica é particularmente recomendada quando é necessário o tratamento estatístico de dados que são inversamente proporcionais (por exemplo o cálculo de velocidade média), podendo ser expressa pela seguinte fórmula (Martins & Donaire, 1990):

$$Mh = \frac{n}{1/x_1 + 1/x_2 + 1/x_3 + \dots + 1/x_n}$$

onde: Mh, média harmônica; n, número total de valores; x, valor

As tabelas **5.13.** e **5.14.** apresentam os valores das condutividades hidráulicas obtida nos poços de monitoramento ensaiados e a média harmônica calculada, respectivamente para as sub-áreas A e B

<b>Tabela 5.13.</b> Condutividade Hidráulica - Poços de Monitoramento, sub-área A.			
POÇO DE MONITORAMENTO	TIPO DE ENSAIO APLICADO	TEMPO DE DURAÇÃO DO ENSAIO (minutos)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)
MW-6	nível variável	18	6,21.10 <sup>-5</sup> cm/s
MW-7	nível variável	12	1,97.10 <sup>-4</sup> cm/s
MW-8	nível variável	14	6,86.10 <sup>-5</sup> cm/s
MW-9	nível constante	9	1,08.10 <sup>-5</sup> cm/s
MW-10	nível constante	6	8,50.10 <sup>-5</sup> cm/s
MW-11	nível constante	5	6,36.10 <sup>-5</sup> cm/s
<b>MÉDIA HARMÔNICA</b>			3,85.10 <sup>-5</sup> cm/s

<b>Tabela 5.14.</b> Condutividade Hidráulica - Poços de Monitoramento, sub-área B.			
POÇO DE MONITORAMENTO	TIPO DE ENSAIO APLICADO	TEMPO DE DURAÇÃO DO ENSAIO (minutos)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)
MW-1	nível variável	9	$2,81 \times 10^{-4}$
MW-2	nível variável	30	$3,58 \times 10^{-5}$
MW-3	nível constante	2	$1,82 \times 10^{-2}$
MW-4	nível variável	16	$9,40 \times 10^{-5}$
MW-5	nível variável	30	$3,55 \times 10^{-5}$
MÉDIA HARMÔNICA			$7,11 \times 10^{-5}$ cm/s

### 5.3.9. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO E MICROBIOLÓGICA DO SOLO E DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

As análises microbiológicas do solo e da água subterrânea, assim como a determinação granulométrica do solo são importantes para uma avaliação dos processos de degradação natural dos contaminantes orgânicos e da aplicação de sistemas de remediação ambiental, baseados na capacidade da biodegradação dos contaminantes. Dependendo da distribuição granulométrica do solo e da presença de microbiota, tecnologias são mais ou menos adequadas à remediação do local.

Informações indicativas de atividade e crescimento microbiano no solo e águas subterrâneas são importantes pois possibilitam avaliar a eficiência de aplicação de técnicas de remediação de solos e águas subterrâneas *in situ*, como a biorremediação.

Assim, os locais de coleta de amostras de solo e águas subterrâneas, para identificação e contagem microbiológica, foram definidos em função do grau de alteração ambiental encontrado durante a investigação.

### 5.3.9.1. Caracterização Microbiológica do Solo e da Água Subterrânea

A caracterização microbiológica do solo e da água subterrânea consistiu na contagem de bactérias heterotróficas, principais microorganismos presentes nestes ambientes, responsáveis pelos processos de biodegradação aeróbica e anaeróbica dos hidrocarbonetos de petróleo. Os objetivos da contagem são avaliar a capacidade de biodegradação dos contaminantes orgânicos e as possibilidades de aplicação de técnicas biológicas de remediação ambiental.

Bactérias heterotróficas são aquelas que utilizam compostos orgânicos como principal fonte de carbono para síntese de seus nutrientes. A contagem bacteriana representa a medida da quantidade da população bacteriana em um sistema e o processo mais usualmente utilizado é a contagem indireta, realizada pela formação de colônias em placas (ABNT, 1993).

A amostra de branco da área investigada representa o valor de referência, indicando o número natural de bactérias heterotróficas existentes na área investigada, sem a interferência de contaminação.

Os resultados obtidos apontaram que provavelmente a contaminação não está exercendo efeitos negativos nem positivos sobre a população bacteriana, indicando uma possibilidade potencial para a aplicação de técnicas que estimulem a biodegradação dos hidrocarbonetos de petróleo.

Seabra (2001) explica que para a eficácia da biodegradação são necessárias algumas condições que devem estar presentes, como: 1) a existência de nitrogênio e fósforo, que representam nutrientes essenciais ao desenvolvimento das bactérias; e 2) oxigênio suficiente para as reações aeróbicas de oxidação dos hidrocarbonetos. Como resultado, os contaminantes são convertidos em CO<sub>2</sub>, água e massa celular microbiana.

#### - Sub-área A (Distribuição de Combustível):

A **Tabela 5.15.** resume os resultados das análises microbiológicas de solo e águas subterrâneas comparando-os aos indícios de contaminantes observados nas sondagens de reconhecimento e poços de monitoramento amostrados.

A concentração de compostos orgânicos voláteis (10 ppm) medida na amostra de solo AS-AB-3 (TR-22) está dentro do limite de precisão de leitura e calibração do medidor de gás portátil e não deve ser considerada. Os resultados analíticos confirmaram a ausência de contaminação na amostra de branco.

**Tabela 5.15.** Resultados das Análises Microbiológicas de Solo e de Água Subterrânea, sub-área A.

ÁGUA SUBTERRÂNEA				
PONTO DE COLETA/ N° AMOSTRA	CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS (ufc/g)	NÍVEL D'ÁGUA (m)	TPH Total (mg/L) (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> ) + (C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> )	INDÍCIO
MW-7/AA-AB-2	4,5.10 <sup>3</sup>	6,87	5,6	odor
MW-8/AA-AB-3	1,1.10 <sup>4</sup>	7,15	<0,10	ausente
MW-10/AA-AB-5	8,7.10 <sup>3</sup>	6,98	19	odor
SOLO				
PONTO DE COLETA/ N° AMOSTRA	CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS (ufc/g)	PROFUNDIDADE (m)	TPH Total (mg/Kg) (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> ) + (C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> )	VOC (ppm)
TR-19/AS-AB-2	1,4.10 <sup>2</sup>	1,0	5,0	950
TR-22/AS-AB-3	7,0.10 <sup>2</sup>	7,0	<0,001	10
TR-23/AS-AB-5	22.10 <sup>2</sup>	0,5	13	540

**Amostra de branco**

ufc/g = unidade formadora de colônia por grama de material amostrado

**- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

A **Tabela 5.16.** resume os resultados das análises microbiológicas de solo e da água subterrânea comparando-os com indícios de contaminantes, observados nas sondagens de reconhecimento e poços de monitoramento amostrados.

A concentração de compostos orgânicos voláteis (10 ppm) medida na amostra de solo AS-T-1 (TR-15) está dentro do limite de precisão de leitura e calibração do medidor de gás portátil e não deve ser considerada. Os resultados analíticos confirmaram a ausência de contaminação na amostra de branco.

**Tabela 5.16.** Resultados das Análises Microbiológicas de Solo e de Água Subterrânea, sub-área B.

<b>ÁGUA SUBTERRÂNEA</b>				
PONTO DE COLETA/ N°AMOSTRA	CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS (ufc/g)	NÍVEL D'ÁGUA (m)	INDÍCIO	TPH TOTAL (mg/L) (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> ) + (C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> )
MW-1/AA-T-1	9,5.10 <sup>3</sup>	4,75	ausente	<0,10
MW-2/AA-T-2	2,7.10 <sup>3</sup>	5,02	odor	5,07
MW-3/AA-T-3	7,5.10 <sup>4</sup>	4,73	ausente	<0,10
<b>SOLO</b>				
PONTO DE COLETA/ N°AMOSTRA	CONTAGEM DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS (ufc/g)	PROFUND. (m)	VOC (ppm)	TPH Total (mg/Kg) (C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> ) + (C <sub>10</sub> -C <sub>30</sub> )
TR-15/AS-T-1	1,9.10 <sup>4</sup>	4,0	10	<0,001
TR-1/AS-T-2	4,0.10 <sup>3</sup>	1,0	1650	15
TR-13/AS-T-4	2,0.10 <sup>2</sup>	1,0	800	13

**Amostra de branco**

ufc/g = unidade formadora de colônia por grama de material amostrado

**5.3.9.2. Caracterização Granulométrica do Solo**

Com base na descrição táctil-visual das amostras de solo, foram selecionadas 3 amostras de cada sub-área para a análise granulométrica, de forma representassem as unidades geológicas mais ocorrentes na área.

As análises granulométricas de solo foram realizadas segundo os procedimentos determinados na Norma Técnica ABNT MB-32/NBR 7181, Solo - Análise Granulométrica. Como defloculante foi utilizada a combinação de hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio.

**- Sub-área A (Distribuição de Combustível):**

Os resultados indicaram a predominância das seguintes classes:

- areia e silte nas amostras TR-18 e TR-24, classificadas respectivamente, como areia levemente siltosa e areia siltosa;
- silte e argila na amostra TR-26, classificada como silte argiloso.

**- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Os resultados indicaram a predominância das seguintes classes:

- argila e silte na amostra TR-3 classificada como argila-siltosa.
- areia e silte na amostra TR-4 classificada areia siltosa.
- silte e argila na amostra TR-7, classificada como silte argiloso.

As tabelas **5.17.** e **5.18.** sintetizam os resultados das análises granulométricas, confirmando as descrições realizadas em campo.

<b>Tabela 5.17. Resultados das Análises Granulométricas, sub-área A.</b>												
SONDAGEM	PROF. (m)	Distribuição Granulométrica										CLASSIF. DA AMOSTRA
		Argila (%)	Silte (%)			Areia (%)			Pedregulho (%)			
			Fino	Médio	Grosso	Fino	Médio	Grosso	Fino	Médio	Grosso	
TR-18	4,5	4	1	1	2	10	47	29	6	-	-	AREIA SILTOSA
TR-24	5,0	23	6	9	24	30	8	-	-	-	-	AREIA SILTOSA
TR-26	5,0	31	9	17	23	18	2	-	-	-	-	SILTE ARGILOSO

**Tabela 5.18.** Resultados das Análises Granulométricas, sub-área B.

AMOSTRA/ SONDAGEM	PROF. (m)	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS										CLASSIF. DA AMOSTRA
		Argila (%)	Silte (%)			Areia (%)			Pedregulho (%)			
			Fino	Médio	Grosso	Fino	Médio	Grosso	Fino	Médio	Grosso	
TR-3	5,0	64	19	14	3	-	-	-	-	-	-	ARGILA SILTOSA
TR-4	4,0	5	2	3	7	23	55	5	-	-	-	AREIA SILTOSA
TR-7	4,0	40	10	25	17	7	1	-	-	-	-	SILTE ARGILOSO

## 5.4. ETAPA 4 - CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

Para a obtenção da avaliação do grau de contaminação do solo e da água subterrânea foram utilizados os seguintes procedimentos:

- integração dos dados levantados em campo com os resultados obtidos nas análises químicas; e
- comparação dos resultados analíticos com padrões (listas de referência) nacionais (água subterrânea) e internacionais (solo e água subterrânea).

Foram utilizadas as seguintes listas de referência:

- Portaria 36 do Ministério da Saúde do Brasil, que define parâmetros de potabilidade para água destinada ao consumo humano;
- *Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites (Canadian Council of Ministers of the Environment) – CCME*, Níveis de Investigação e Remediação;
- *Revised Dutch Reference Framework (STI Values) – Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment (VROM)* – Lista Holandesa.
- *Summary of Guidelines for Water Quality in Canadá - Canadian Water Quality Guidelines*, Ministério Nacional da Saúde e Bem-Estar do Canadá.

### 5.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO

Os trabalhos de campo e os resultados analíticos demonstraram haver expressiva contaminação desde a superfície do solo até o nível d'água, com a presença de compostos constituintes do óleo diesel. A área impactada é de aproximadamente 5000 m<sup>2</sup>, dos quais 1000 m<sup>2</sup> correspondem à sub-área A (Distribuição de Combustível) e 4000 m<sup>2</sup> à sub-área B (Tancagem de Combustível). Os valores analíticos máximos detectados atingiram níveis de intervenção, requerendo a aplicação de medidas corretivas na área pesquisada.

### - Sub-área A (Distribuição de Combustível):

Os resultados do levantamento preliminar do solo (*Soil Gas Survey*) indicaram que os maiores valores de compostos orgânicos voláteis (VOCs) foram encontrados nos pontos G40 (2200 ppm), G41 (1320 ppm), G49 (1100 ppm), G50 (1100 ppm) e G58 (6050 ppm), coincidindo com a localização aproximada dos antigos bicos de abastecimento.

Em 6 das 10 sondagens executadas foi observado indício de contaminante (óleo diesel). A presença de fase livre imiscível de combustível, com 1 cm aproximadamente, foi verificada em 3 sondagens localizadas na parte central da área investigada e não ultrapassa os limites da antiga garagem. Após a instalação dos poços de monitoramento a fase livre não foi mais observada.

Os resultados das medições dos compostos orgânicos voláteis *in situ* nas amostras de solo coletadas durante as sondagens (vide **Figura 5.4**), indicou ora uma contaminação mais superficial, até 1 metro de profundidade (TRs 19, 20 e 23), ora mais profunda, já próxima do nível freático. Os furos que apresentaram fase livre foram aqueles que indicaram elevados valores de VOCs mais superficialmente e estão localizados nas proximidades dos antigos bicos de abastecimento de combustível.

Dentre os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), somente o etilbenzeno foi detectado nas amostras AS-AB-3, 4 e 7. Sua concentração porém ultrapassou o Nível S (*background*) da Lista Holandesa e os padrões do CCME para investigação.

Os resultados de TPH indicaram a existência de hidrocarbonetos tanto de cadeia baixa (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>) como de cadeia alta (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>). As concentrações encontradas para TPH total estão acima do Nível I (intervenção) da Lista Holandesa nos pontos TR-18, TR-19, TR-20, TR-23, TR-24 e TR-26 e os valores mais elevados pertencem à faixa (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) típicos de locais onde há presença de óleo diesel. Destaque para as amostras AS-AB-7/TR-23 (12390 mg/kg) e AS-AB-8/TR-24 (10230 mg/kg).

Com relação aos compostos PAH foram detectados valores totais acima do Nível T (investigação adicional) da Lista Holandesa nas amostras dos pontos TR-18 e TR-19. As concentrações de naftaleno, fenantreno e pireno nestas amostras também ultrapassaram os padrões do CCME para investigação.

**- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Os resultados do levantamento preliminar do solo (*Soil Gas Survey*) indicaram que, os maiores valores de compostos orgânicos voláteis (VOCs) foram encontrados nos pontos G7 (800 ppm), G9 (570 ppm), G12 (400 ppm), G15 (400 ppm), G20 (500 ppm) e G30 (400 ppm), quase todos nas proximidades da antiga tancagem.

Nesta sub-área foram constatados índices de contaminação mais elevados do que na Sub-área A. Em 7 das 16 sondagens executadas foram observados indícios de contaminantes (óleo diesel). A presença de fase livre imiscível de combustível, com até 2 cm aproximadamente, foi verificada em 6 sondagens (TRs 2, 3, 4, 6, 9, 11). Após a instalação dos poços de monitoramento a fase livre não foi mais observada.

Os resultados das medições dos compostos orgânicos voláteis *in situ* nas amostras de solo coletadas durante as sondagens indicaram valores elevados tanto em superfície quanto em profundidade. As maiores concentrações em profundidade, entre 2,0 e 5,0 m, coincidiram com os furos que apresentaram fase livre.

Dentre os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) somente o etilbenzeno foi detectado em concentrações superiores ao Nível S (*background*) da Lista Holandesa e aos padrões do CCME para investigação.

Os compostos TPH (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>) e (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) estão presentes em concentrações totais superiores ao Nível I (intervenção) da Lista Holandesa em todas as amostras, com exceção da AS-T-15 (TR-15). Observa-se que os valores mais elevados são encontrados na faixa de C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>, típico de locais onde há presença de óleo diesel. A maior concentração de TPH (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) (19000 mg/kg) foi observada na amostra AS-T-2, coletada na sondagem TR-2, locada próximo à antiga área de tancagem.

Com relação aos compostos PAH foram detectados valores totais acima do Nível I (intervenção) da Lista Holandesa nas amostras AS-T-1 (TR-1) e AS-T-2 (TR-2), destacando-se o benzo(a)antraceno, o criseno, o fluoranteno, o naftaleno e o fenantreno. Quando comparados aos padrões do CCME, observou-se que o Nível de Investigação foi ultrapassado pelos compostos benzo(a)antraceno e pireno, e no Nível de Remediação (residencial) pelo naftaleno e fenantreno.

A **Figura 5.10.** ilustra a distribuição dos resultados analíticos em planta e as tabelas **5.19.** e **5.20.** apresentam, respectivamente para as sub áreas A e B, os resultados das análises químicas de BTEX, TPH (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>/C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) e PAH obtidos nas amostras de solo.

**Tabela 5.19. - Resultados Analíticos de Amostras de Solo - BTEX, TPH (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>/C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>/C<sub>5</sub>-C<sub>30</sub>) e PAH - sub-área A**

PARÂMETROS		UNID.	LDM <sup>(3)</sup>	AS-AB-1 TR-17	AS-AB-2 TR-18	AS-AB-3 TR-19	AS-AB-4 TR-20	AS-AB-6 TR-22	AS-AB-7 TR-23	AS-AB-8 TR-24	AS-AB-10 TR-26	LISTA HOLANDESA <sup>(1)</sup>			CCME <sup>(2)</sup>			
												Nível S	Nível T	Nível I	INVESTIGAÇÃO	REMEDIAÇÃO		
																Residencial	Industrial	
BTEX	BENZENO	mg/Kg	0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,01	0,11	0,2	0,05	0,5	5	
	ETILBENZENO	mg/Kg	0,1	<0,1	<0,1	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	<0,1	<b>0,83</b>	<0,1	<0,1	0,01	5,0	10,0	0,1	5	50	
	TOLUENO	mg/Kg	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,01	13,0	26,0	0,1	3	30	
	XILENOS	mg/Kg	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,01	2,5	5,0	0,1	5	50	
TPH	TPH (C5-C10)	mg/Kg	10	<10	200	160	140	<10	390	230	250	-	-	-	-	-	-	
	TPH (C10-C30)	mg/Kg	10	<10	5800	4800	5800	<10	12000	10000	8600	-	-	-	-	-	-	
	TPH (C5-C30)	mg/Kg	-	<10	<b>6000</b>	<b>4960</b>	<b>5940</b>	<10	<b>12390</b>	<b>10230</b>	<b>8850</b>	10	505	1000	-	-	-	
PAH	ANTRACENO	mg/Kg	0,01	-	<0,19 <sup>(4)</sup>	<0,21 <sup>(4)</sup>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	BENZO(a)ANTRACENO	mg/Kg	0,01	-	<0,09 <sup>(4)</sup>	<0,08 <sup>(4)</sup>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
	BENZO(a)PIRENO	mg/Kg	0,01	-	0,02	0,03	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
	BENZO(g,h,i)PERILENO	mg/Kg	0,02	-	0,02	0,02	-	<0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	BENZO(k)FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	-	<0,01	<0,01	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
	CRISENO	mg/Kg	0,01	-	0,4	0,29	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	-	0,08	0,13	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	mg/Kg	0,02	-	<0,02	<0,02	-	<0,02	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
	NAFTALENO	mg/Kg	0,01	-	<b>1,2</b>	<b>3,1</b>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	5	50	
	FENANTRENO	mg/Kg	0,01	-	<b>2,7</b>	<b>3,3</b>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	5	50	
	PAH (SOMA)	mg/Kg	-	-	<b>4,42</b>	<b>6,87</b>	-	<0,02	-	-	-	-	0,2	4,1	8,0	-	-	-
	ACENAFTENO	mg/Kg	0,01	-	0,3	0,32	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ACENAFTILENO	mg/Kg	0,01	-	<0,21 <sup>(4)</sup>	<0,27 <sup>(4)</sup>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	BENZO(b)FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	-	0,03	<0,05	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
	DIBENZO(a,h)ANTRACENO	mg/Kg	0,02	-	<0,02	<0,02	-	<0,02	-	-	-	-	-	-	0,1	1	10	
FLUORENO	mg/Kg	0,01	-	1,1	1,2	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
PIRENO	mg/Kg	0,01	-	<b>0,41</b>	<b>0,37</b>	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	0,1	10	100		

- (1) Lista Holandesa Revised Dutch Reference Framework (STI - Values) 1994 (Teores de argila e matéria orgânica iguais a 0%)  
 Nível S - (Target Level) Equivale ao "background" da área, o risco é negligível para seres humanos e ecossistema  
 Nível T - (Futher Investigation Value) Valores acima dos quais é necessário a realização de investigação adicionais  
 Nível I - (Intervention Value) Valores acima dos quais deve haver uma intervenção na área existindo risco à saúde e ecossistema
- (2) Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites (Canadian Council of Ministers of the Enviroment - CCME)
- (3) LDM - Limite de Detecção do Método
- (4) Limite aumentado devido a interferência na identificação do composto pelo espectrômetro de massa

**Tabela 5.20. - Resultados Analíticos de Amostras de Solo - BTEX, TPH (C5-C10/C10-C30/C5-C30) e PAH - sub-área B**

PARÂMETROS		UNID.	LDM <sup>(3)</sup>	AS-T-1 TR-1	AS-T-2 TR-2	AS-T-3 TR-3	AS-T-11 TR-11	AS-T-13 TR-13	AS-T-15 TR-15	LISTA HOLANDESA <sup>(1)</sup>			CCME <sup>(2)</sup>		
										Nível S	Nível T	Nível I	INVESTIGAÇÃO	REMEDIÇÃO	
														Residencial	Industrial
BTEX	BENZENO	mg/Kg	0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,01	0,11	0,2	0,05	0,5	5
	ETILBENZENO	mg/Kg	0,1	<b>4,6</b>	<b>0,88</b>	<0,1	<0,1	<b>0,14</b>	<0,1	0,01	5,0	10,0	0,1	5	50
	TOLUENO	mg/Kg	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,01	13,0	26,0	0,1	3	30
	XILENOS	mg/Kg	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,01	2,5	5,0	0,1	5	50
TPH	TPH (C5-C10)	mg/Kg	10	880	230	280	140	730	<10	-	-	-	-	-	-
	TPH (C10-C30)	mg/Kg	10	14000	19000	10000	3300	13000	<10	-	-	-	-	-	-
	TPH (C5-C30)	mg/Kg	-	<b>14880</b>	<b>19230</b>	<b>10280</b>	<b>3440</b>	<b>13730</b>	<10	10	505	1000	-	-	-
PAH	ANTRACENO	mg/Kg	0,01	<0,84 <sup>(4)</sup>	<0,65 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-
	BENZO(a)ANTRACENO	mg/Kg	0,01	<b>0,46</b>	<b>0,2</b>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	1	10
	BENZO(a)PIRENO	mg/Kg	0,01	0,05	0,03	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	1	10
	BENZO(g,h,i)PERILENO	mg/Kg	0,02	<0,02	<0,2 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,02	-	-	-	-	-	-
	BENZO(k)FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	<0,01	<0,1 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	1	10
	CRISENO	mg/Kg	0,01	1,7	0,92	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-
	FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	0,27	0,55	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-
	INDENO(1,2,3-c,d)PIRENO	mg/Kg	0,02	<0,02	<0,2 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,02	-	-	-	0,1	1	10
	NAFTALENO	mg/Kg	0,01	<b>8</b>	<b>6</b>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	5	50
	FENANTRENO	mg/Kg	0,01	<b>11</b>	<b>12</b>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	5	50
	PAH (SOMA)	mg/Kg	-	<b>21,48</b>	<b>19,7</b>	-	-	-	<0,02	0,2	4,1	8,0	-	-	-
	ACENAFTENO	mg/Kg	0,01	1	<1,7 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-
	ACENAFTILENO	mg/Kg	0,01	0,82	<0,97 <sup>(4)</sup>	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-
	BENZO(b)FLUORANTENO	mg/Kg	0,01	<0,1 <sup>(4)</sup>	<0,1 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	1	10
	DIBENZO(a,h)ANTRACENO	mg/Kg	0,02	<0,02	<0,2 <sup>(5)</sup>	-	-	-	<0,02	-	-	-	0,1	1	10
FLUORENO	mg/Kg	0,01	4	4,3	-	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	
PIRENO	mg/Kg	0,01	<b>1,3</b>	<b>1,6</b>	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,1	10	100	

(1) Lista Holandesa Revised Dutch Reference Framework (STI - Values) 1994 (Teores de argila e matéria orgânica iguais a 0%)

Nível S - (Target Level) Equivale ao "background" da área, o risco é negligível para seres humanos e ecossistema

Nível T - (Further Investigation Value) Valores acima dos quais é necessário a realização de investigação adicionais

Nível I - (Intervention Value) Valores acima dos quais deve haver uma intervenção na área existindo risco à saúde e ecossistema

(2) Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites (Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME)

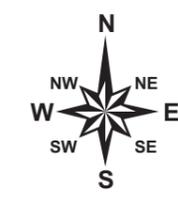
(3) LDM - Limite de Detecção do Método

(4) Limite aumentado devido a interferência na identificação do composto pelo espectrômetro de massa

(5) Limite aumentado devido à diluição da amostra visto o seu alto grau de contaminação

Legenda:

- DC Tanque de armazenamento de combustível
- Ilha de abastecimento
- Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
- ✕ **TR-15** Pontos de amostragem de solo



**RESULTADOS ANALÍTICOS (mg/Kg)**

TR-19	Número da amostra
	Benzeno
	Tolueno
	Xilenos
	Etilbenzeno
	TPH (C5-C10)
	TPH (C10-C30)
	TPH total (C5-C30)

390 Valores acima dos limites utilizados como comparação

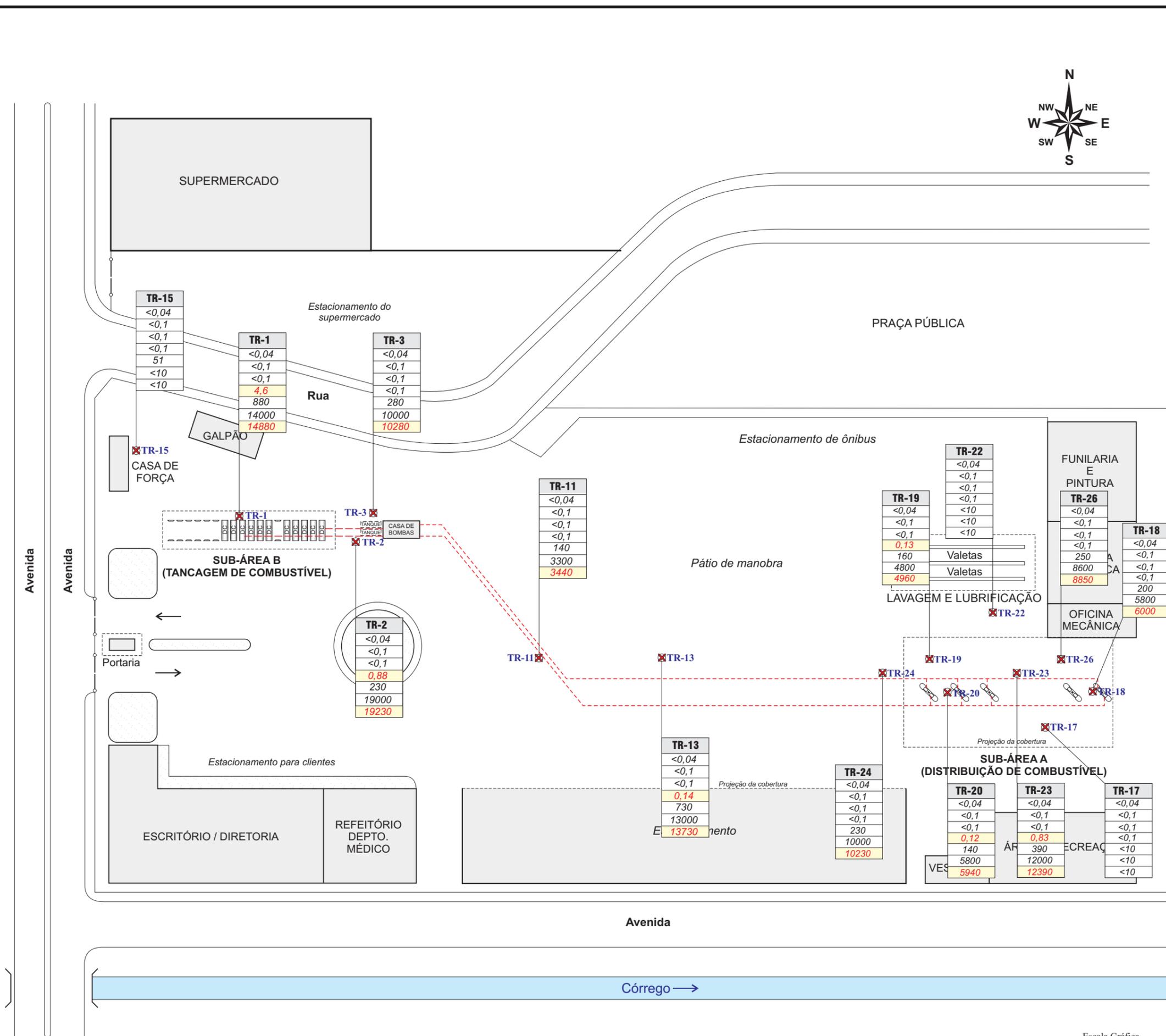


Figura 5.10. - RESULTADOS ANALÍTICOS DAS AMOSTRAS DE SOLO

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Pós-Graduação em Geociências  
Área de Concentração  
Geociências e Meio Ambiente  
Rio Claro (SP) - 2002



#### 5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas apresentam contaminação por fase dissolvida de compostos constituintes do óleo diesel. Os valores analíticos máximos detectados atingiram níveis de intervenção, requerendo a aplicação de medidas corretivas na área pesquisada.

Não foram detectadas concentrações dos compostos de interesse analisados nas amostras de branco, provenientes dos poços MW-08 (AA-AB-3) e MW-01 (AA-T-1), os resultados permaneceram abaixo dos limites de detecção dos métodos analíticos.

##### - Sub-área A (Distribuição de Combustível):

Os resultados analíticos para os compostos PAH indicaram que o criseno ultrapassou o Nível I da Lista Holandesa nos MWs 7 e 10. Os compostos benzo(a)antraceno, benzo(g,h,i)perileno e fluoranteno superaram o Nível T (investigação adicional) da referida lista no MW-7. Os níveis de investigação adicional estabelecidos pelo CCME foram ultrapassados para o benzo(k)fluoranteno no MW-10 e para o fenantreno e pireno nos MWs-7 e 10. Os demais compostos apresentaram concentrações abaixo ou muito próximas dos limites de detecção do método.

Dentre os compostos BTEX, apenas o tolueno apresentou concentrações superiores ao Nível S (*background*) da Lista Holandesa e ao valor de investigação adicional estabelecido pela CCME na amostra AA-AB-2 (MW-7). Os demais compostos apresentaram-se abaixo do limite de detecção do método.

Os resultados dos compostos TPH indicaram a existência de contaminação por diesel, evidenciada pelas altas concentrações de hidrocarbonetos da cadeia C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>, acima do Nível I (intervenção) da Lista Holandesa nos poços MWs 6, 7 e 10.

A Portaria nº36 do Ministério da Saúde (Decreto nº 79.367 de 23/01/90) estabelece os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano, porém dentre os parâmetros avaliados ela abrange apenas os compostos Benzeno e Benzo(a)pireno. Nenhuma das amostras analisadas apresentou valores acima do estabelecido pelo referido Decreto.

A soma dos resultados analíticos e das informações levantadas em campo apontaram que em 4 dos 6 poços de monitoramento amostrados, localizados nos limites da maior extensão (MWs 6 e 7) e no centro (MWs 9 e 10) da área investigada, há indícios de contaminação da água subterrânea por fase dissolvida de compostos constituintes do óleo diesel.

**- Sub-área B (Tancagem de Combustível):**

Nos MWs 2 e 5, locados respectivamente, na região da antiga tancagem e limite sul da área próximo ao muro da área investigada, os resultados de TPH indicaram baixas concentrações de hidrocarbonetos na faixa (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>) e valores acima do Nível I (intervenção) da Lista Holandesa na faixa (C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>).

Comparando-se os resultados dos compostos BTEX com os limites estabelecidos pela Lista Holandesa, os mesmos estão abaixo do Nível T, que estabelece investigações adicionais e abaixo dos limites estabelecidos pela *Canadian Water Guidelines* (ingestão). Em relação aos padrões do CCME, as concentrações dos compostos benzeno (AA-T-2) e tolueno (AA-T-2, 4 e 5) superaram o valor de investigação.

O PAH de maior destaque, com concentrações acima do limite determinado pelo Nível I (intervenção) da Lista Holandesa foi o criseno na amostra do MW-5. Em comparação com os padrões do CCME, as concentrações dos compostos benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, fenantreno e pireno obtidas no MW-5, e naftaleno, fenantreno e benzo(a)antraceno obtidas no MW-2 superaram o limite de investigação. Apenas a amostra coletada no MW-5 apresentou valor para o benzo(a)pireno acima dos limites estabelecidos pela Portaria 36.

As figuras **5.11** e **5.12**. ilustram, respectivamente, a distribuição dos resultados analíticos em planta e a pluma de fase livre de óleo diesel, observada durante as sondagens de reconhecimento. Esta pluma acompanha o sentido do fluxo d'água subterrâneo (NW-SE) e possivelmente não ultrapassa os limites da antiga garagem, visto não ter sido constatada a sua presença em sondagem realizada junto ao muro que delimita a área (TR-12).

As tabelas **5.21.** e **5.22.** apresentam, respectivamente para as sub-áreas A e B os resultados das análises químicas de BTEX, TPH (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>/C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>) e PAH obtidos das amostras de água subterrânea.

**Tabela 5.21. - Resultados Analíticos de Amostras de Água Subterrânea - BTEX, TPH (C5-C10/C10-C30/C5-C30) e PAH - sub-área A**

PARÂMETROS	UNID.	LDM <sup>(5)</sup>	AA-AB-1	AA-AB-2	AA-AB-3	AA-AB-4	AA-AB-5	AA-AB-6	LISTA HOLANDESA <sup>(1)</sup>			CWG <sup>(2)</sup>	CCME <sup>(3)</sup>		PORTARIA 36 <sup>(4)</sup>		
			MW-6	MW-7	MW-8	MW-9	MW-10	MW-11	Nível S	Nível T	Nível I	INGESTÃO	INVESTIGAÇÃO	REMEDIACÃO INGESTÃO			
BTEX	BENZENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,015	0,03	0,005	0,0005	0,005	0,01
	ETILBENZENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,075	0,15	0,0024	0,0005	0,0024	-
	TOLUENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	<b>0,0023</b>	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,5	1	0,024	0,0005	0,024	-
	XILENOS	mg/L	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,035	0,07	0,3	0,0005	0,3	-
TPH	TPH (C5-C10)	mg/L	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	-	-	-	-	-	-	-
	TPH (C10-C30)	mg/L	0,1	0,8	5,6	<0,1	0,2	19	<0,10	<0,10	-	-	-	-	-	-	-
	TPH (C5-C30)	mg/L	-	<b>0,8</b>	<b>5,6</b>	<0,10	<b>0,2</b>	<b>19</b>	<0,10	<0,10	0,05	0,325	0,6	-	-	-	-
PAH	ACENAFTENO	mg/L	0,00001	-	0,00084	<0,00001	-	0,00051	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ACENAFILENO	mg/L	0,00001	-	<0,0005 <sup>(6)</sup>	<0,00001	-	<0,00027 <sup>(6)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ACRIDINO	mg/L	0,00005	-	<0,0014 <sup>(6)</sup>	<0,00005	-	<0,00018 <sup>(6)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ANTRACENO	mg/L	0,00001	-	<0,00093 <sup>(6)</sup>	< 0,0005 <sup>(6)</sup>	-	<0,00036 <sup>(6)</sup>	-	0,00002	0,0025	0,005	-	-	-	-	-
	BENZO(a)ANTRACENO	mg/L	0,00001	-	<b>0,00029</b>	<0,00001	-	<b>0,00021</b>	-	0,000002	0,00025	0,0005	-	0,00001	-	-	-
	BENZO(a)PIRENO	mg/L	0,00001	-	<0,00006 <sup>(6)</sup>	<0,00001	-	<0,00003 <sup>(6)</sup>	-	0,000001	0,000026	0,00005	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
	BENZO(b)FLUORANTENO	mg/L	0,00001	-	<0,00012 <sup>(6)</sup>	<0,00001	-	<0,00008 <sup>(6)</sup>	-	-	-	-	-	0,00001	-	-	-
	BENZO(g,h,i)PERILENO	mg/L	0,00002	-	<b>0,00003</b>	<0,00002	-	<0,00002	-	0,0000002	0,000025	0,00005	-	-	-	-	-
	BENZO(k)FLUORANTENO	mg/L	0,00001	-	<0,00005 <sup>(6)</sup>	<0,00001	-	<b>0,00002</b>	-	0,000001	0,000026	0,00005	-	0,00001	-	-	-
	CRISENO	mg/L	0,00001	-	<b>0,00079</b>	<0,00001	-	0,00054	-	0,000002	0,000026	0,00005	-	-	-	-	-
	DIBENZO(a,h)ANTRACENO	mg/L	0,00002	-	<0,00002	<0,00002	-	<0,00002	-	-	-	-	-	0,00001	-	-	-
	FLUORANTENO	mg/L	0,00001	-	<b>0,00066</b>	<0,00001	-	<b>0,00031</b>	-	0,000005	0,0005	0,001	-	-	-	-	-
	FLUORENO	mg/L	0,00001	-	0,0023	<0,00001	-	0,00079	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	INDENO(1,2,3-cd)PIRENO	mg/L	0,00002	-	<b>0,00002</b>	<0,00002	-	<0,00002	-	0,0000004	0,000025	0,00005	-	0,0001	-	-	-
	2-METILNAFTALENO	mg/L	0,00001	-	0,0045	<0,00028 <sup>(6)</sup>	-	<0,00022 <sup>(6)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NAFTALENO	mg/L	0,00001	-	<0,00086 <sup>(6)</sup>	0,00001	-	<0,00027 <sup>(6)</sup>	-	0,0001	0,035	0,07	-	0,0002	-	-	-
	FENANTRENO	mg/L	0,00001	-	<b>0,0052</b>	<0,00001	-	<b>0,00076</b>	-	0,00002	0,0025	0,005	-	0,0002	-	-	-
PIRENO	mg/L	0,00001	-	0,0013	0,00001	-	0,00086	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-	

(1) Lista Holandesa Revised Dutch Reference Framework (STI - Values) 1994 (Teores de argila e matéria orgânica iguais a 0%)

Nível S - (Target Level) Equivale ao "background" da área, o risco é negligível para seres humanos e ecossistema

Nível T - (Futher Investigation Value) Valores acima dos quais é necessário a realização de investigação adicionais

Nível I - (Intervention Value) Valores acima dos quais deve haver uma intervenção na área existindo risco à saúde e ecossistema

(2) Canadian Water Guidelines (1995)

(3) Interim Canadian Enviromental Quality Criteria for Contaminated Sites (Canadian Council of Ministers of the Enviroment - CCME)

(4) Portaria nº 36, de 23 de janeiro 1990, do Ministério da Saúde

(5) LDM - Limite de Detecção do Método

(6) Limite aumentado devido a interferência na identificação do composto pelo espectrômetro de massa

**Tabela 5.22. - Resultados Analíticos de Amostras de Água Subterrânea - BTEX, TPH (C5-C10/C10-C30/C5-C30) e PAH - sub-área B**

PARÂMETROS	UNID.	LDM <sup>(5)</sup>	AA-T-1 MW-1	AA-T-2 MW-2	AA-T-3 MW-3	AA-T-4 MW-4	AA-T-5 MW-5	LISTA HOLANDESA <sup>(1)</sup>			CCWG <sup>(2)</sup>	CCME <sup>(3)</sup>		PORTARIA 36 <sup>(4)</sup>	
								Nível S	Nível T	Nível I	INGESTÃO	INVESTIGAÇÃO	REMEDIAÇÃO INGESTÃO		
BTEX	BENZENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	<b>0,0007</b>	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,015	0,03	0,005	0,0005	0,005	0,01
	ETILBENZENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,075	0,15	0,0024	0,0005	0,0024	-
	TOLUENO	mg/L	0,0005	< 0,0005	<b>0,0092</b>	< 0,0005	<b>0,0006</b>	<b>0,0011</b>	0,0002	0,5	1	0,024	0,0005	0,024	-
	XILENOS	mg/L	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,0002	0,035	0,07	0,3	0,0005	0,3	-
TPH	TPH (C5-C10)	mg/L	0,1	<0,10	0,17	<0,10	<0,10	0,12	-	-	-	-	-	-	-
	TPH (C10-C30)	mg/L	0,1	<0,10	4,9	<0,10	0,2	4,7	-	-	-	-	-	-	-
	TPH (C5-C30)	mg/L	-	<0,10	<b>5,1</b>	<0,10	0,3	<b>4,8</b>	0,05	0,325	0,6	-	-	-	-
PAH	ACENAFTENO	mg/L	0,00001	<0,00001	0,0013	-	-	0,0012	-	-	-	-	-	-	-
	ACENAFTILENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<0,00042 <sup>(6)</sup>	-	-	<0,0004	-	-	-	-	-	-	-
	ACRIDINO	mg/L	0,00005	<0,00005	<0,0003	-	-	<0,00041	-	-	-	-	-	-	-
	ANTRACENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<0,00026	-	-	<0,00025	0,00002	0,0025	0,005	-	-	-	-
	BENZO(a)ANTRACENO	mg/L	0,00001	<0,00001	0,00003	-	-	<b>0,00007</b>	0,000002	0,00025	0,0005	-	0,00001	-	-
	BENZO(a)PIRENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<0,00001	-	-	<b>0,00002</b>	0,000001	0,000026	0,00005	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
	BENZO(b)FLUORANTENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<0,00001	-	-	<0,00004	-	-	-	-	0,00001	-	-
	BENZO(g,h,i)PERILENO	mg/L	0,00002	<0,00002	<0,00002	-	-	<0,00002	0,0000002	0,000025	0,00005	-	-	-	-
	BENZO(k)FLUORANTENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<0,00001	-	-	<0,00002	0,000001	0,000026	0,00005	-	0,00001	-	-
	CRISENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<b>0,00008</b>	-	-	<b>0,00016</b>	0,000002	0,000026	0,00005	-	-	-	-
	DIBENZO(a,h)ANTRACENO	mg/L	0,00002	<0,00002	<0,00002	-	-	<0,00002	-	-	-	-	0,00001	-	-
	FLUORANTENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<b>0,00011</b>	-	-	<b>0,0001</b>	0,000005	0,0005	0,001	-	-	-	-
	FLUORENO	mg/L	0,00001	<0,00002	0,0026	-	-	0,0018	-	-	-	-	-	-	-
	INDENO(1,2,3-c,d)PIRENO	mg/L	0,00002	<0,00002	<0,00002	-	-	<b>0,00002</b>	0,0000004	0,000025	0,00005	-	0,0001	-	-
	2-METILNAFTALENO	mg/L	0,00001	<0,00001	0,0072	-	-	0,002	-	-	-	-	-	-	-
	NAFTALENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<b>0,0014</b>	-	-	<0,0004 <sup>(6)</sup>	0,0001	0,035	0,07	-	0,0002	-	-
FENANTRENO	mg/L	0,00001	<0,00001	<b>0,0027</b>	-	-	<b>0,0029</b>	0,00002	0,0025	0,005	-	0,0002	-	-	
PIRENO	mg/L	0,00001	<0,00001	0,0002	-	-	<b>0,00027</b>	-	-	-	-	0,0002	-	-	

(1) Lista Holandesa

Revised Dutch Reference Framework (STI - Values) 1994

(Teores de argila e matéria orgânica iguais a 0%)

Nível S - (Target Level) Equivale ao "background" da área, o risco é negligível para seres humanos e ecossistema

Nível T - (Further Investigation Value) Valores acima dos quais é necessário a realização de investigação adicionais existindo risco à saúde e ecossistema

Nível I - (Intervention Value) Valores acima dos quais deve haver uma intervenção na área

(2) Canadian Water Guidelines (1995)

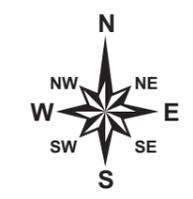
(3) Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites (Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME)

(4) Portaria nº 36, de 23 de janeiro 1990, do Ministério da Saúde

(5) LDM - Limite de Detecção do Método

Legenda:

- DC Tanque de armazenamento de combustível
- Ilha de abastecimento
- Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
- MW-1 Poços de monitoramento instalados



**RESULTADOS ANALÍTICOS (mg/L)**

MW-1	Número da amostra
	Benzeno
	Tolueno
	Xilenos
	Etilbenzeno
	TPH (C5-C10)
	TPH (C10-C30)
	TPH total (C5-C30)

0,80 Valores acima dos limites utilizados como comparação

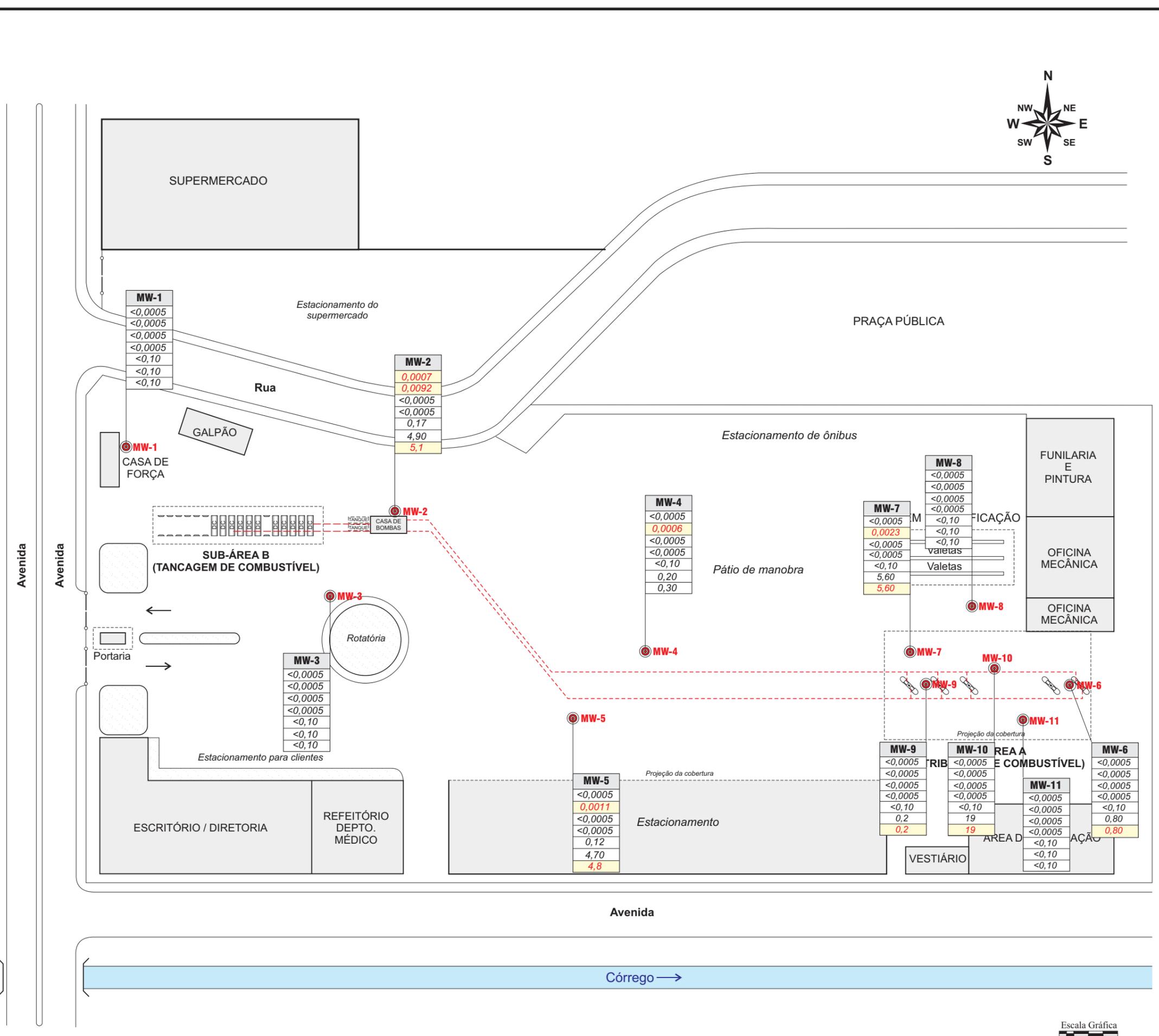


Figura 5.11.- RESULTADOS ANALÍTICOS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

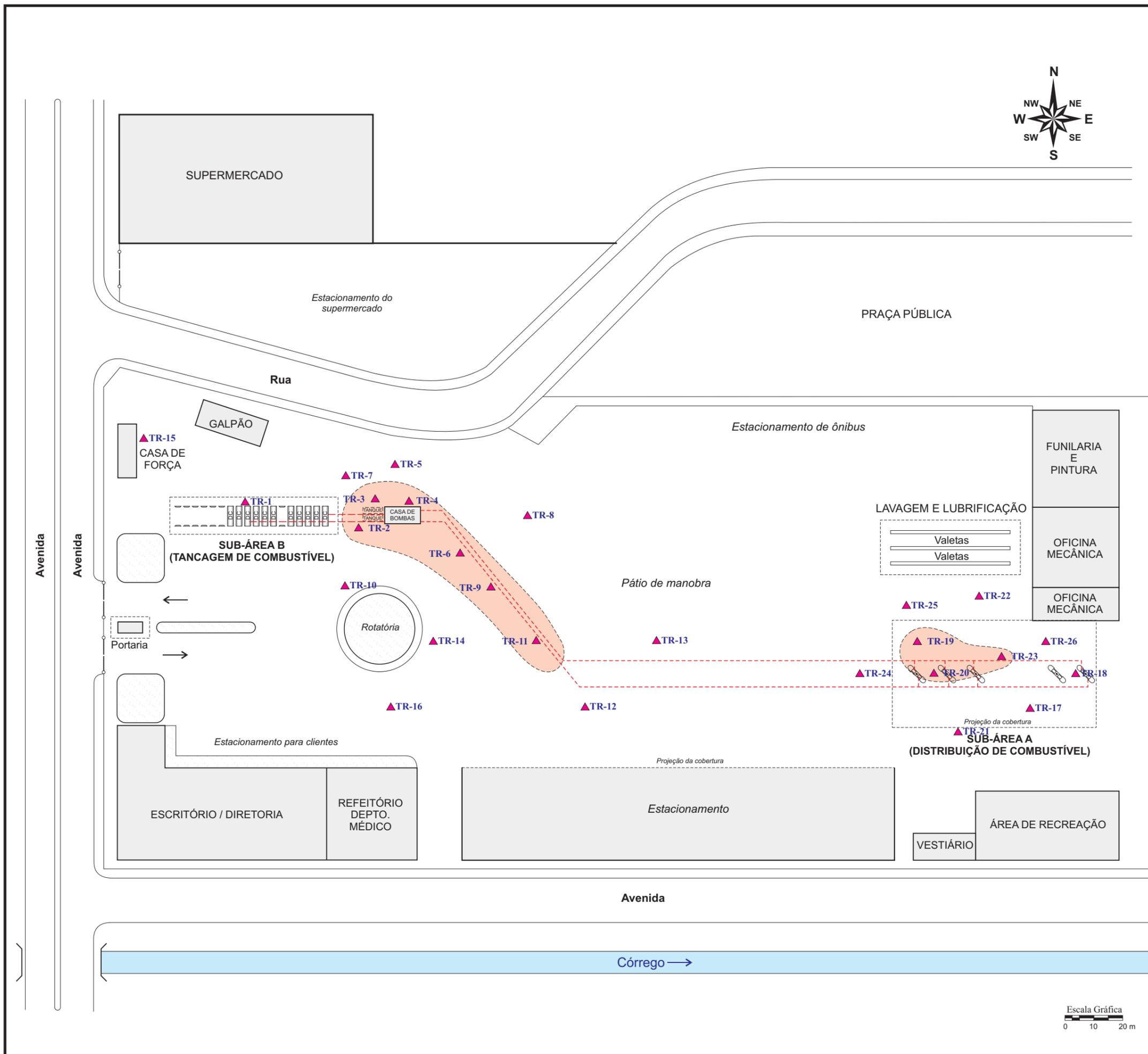
**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Pós-Graduação em Geociências  
Área de Concentração  
Geociências e Meio Ambiente  
Rio Claro (SP) - 2002





- Legenda:
- DC Tanque de armazenamento de combustível
  - Ilha de abastecimento
  - Linhas de distribuição de óleo diesel (localização inferida)
  - ▲TR-1 Sondagens a trado manual
  - Pluma de fase livre durante a realização das sondagens

Figura 5.12. - PLUMA DE FASE LIVRE OBSERVADA DURANTE AS SONDAgens DE RECO-NHECIMENTO

**Sistematização e Avaliação de Técnicas de Investigação Aplicadas à Caracterização e Diagnóstico de Área Contaminada por Hidrocarbonetos de Petróleo**

Aluno: José Angelo Ferreira da Silva  
 Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugenio Silva Cerri



Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
 Pós-Graduação em Geociências  
 Área de Concentração  
 Geociências e Meio Ambiente  
 Rio Claro (SP) - 2002

## **5.5. ETAPA 5 - PROPOSIÇÕES PARA O SANEAMENTO AMBIENTAL DA ÁREA INVESTIGADA**

A caracterização da contaminação do solo e da água subterrânea das sub-áreas A e B demonstrou a existência de compostos de interesse em concentrações acima dos valores de intervenção das listas de referência utilizadas, apresentando potencial risco à saúde pública e ao meio ambiente. Além disso, durante as sondagens de reconhecimento também foi detectada a presença de fase livre de óleo diesel.

A comparação com as listas de referência apresentou um diagnóstico efetivo do quadro ambiental fornecendo subsídios ao estabelecimento de prioridades quanto à aplicação de avaliação de risco específica em relação à proteção da saúde humana e implantação de medidas de intervenção na área impactada.

A aplicação de avaliação de risco específica, anteriormente à implementação de ações corretivas, é importante devido aos altos custos e longos prazos envolvidos em projetos de remediação.

Após implantada, a remediação da área impactada somente será concluída quando as concentrações dos contaminantes atingirem valores permissíveis, estabelecidos na avaliação de risco.

Preliminarmente à aplicação de qualquer medida de intervenção são necessárias as seguintes ações:

### **- Sub-área A (Distribuição de Combustível)**

Adequação das instalações de distribuição de combustíveis ao exposto na Resolução nº 273 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e apresentação de plano de encerramento de atividades a ser aprovado por órgão ambiental competente, uma vez que inclui áreas desativadas. Nesta sub-área ainda há linhas enterradas que podem conter combustível, caracterizando uma fonte potencial de contaminação, portanto devem ser removidas.

### **- Sub-área B (Tancagem de Combustível)**

Propõem-se medidas corretivas visando a eliminação de fontes crônicas de contaminação, bem como a adequação das instalações de armazenamento de combustíveis ao exposto na Resolução nº 273 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), uma vez que inclui áreas desativadas, a saber:

- Retirada do óleo diesel contido nos 2 tanques subterrâneos de armazenagem e inutilização dos mesmos, preenchendo-os com calda de cimento e posterior lacramento dos seus bocais de enchimento, respiros e válvulas extratoras;
- Remoção das linhas enterradas;
- Vistoria dos tanques aéreos e retirada de eventual produto contido no seu interior.

Em etapa posterior, para ambas sub-áreas propõe-se inicialmente o monitoramento analítico das águas subterrâneas, que consistirá de 4 campanhas trimestrais de amostragem, durante o período de 1 ano e permitirá avaliar:

- 1) o ressurgimento, ou não, da fase livre nos poços de monitoramento, identificada durante as sondagens de reconhecimento;
- 2) o comportamento dos compostos de interesse ao longo do tempo em relação aos efeitos de sazonalidade durante um ciclo hidrológico, e atuação de processos de atenuação natural.

Os parâmetros analíticos a serem monitorados são os mesmos indicados na presente pesquisa: BTEX, PAHs, TPH GRO (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub> e C<sub>10</sub>-C<sub>30</sub>).

A atuação da atenuação natural em áreas impactadas por hidrocarbonetos de petróleo é eficiente, principalmente devido à biodegradação. Para a avaliação da atuação dos processos envolvidos é necessário o monitoramento de alguns indicadores da existência de potencial à atenuação natural, como os parâmetros: Eh/pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica, alcalinidade, metano, ferro, manganês, nitrato e sulfato (ASTM, 1996).

Visto que os resultados das análises microbiológicas de solo e de água subterrânea, e granulométrica de solo deram uma indicação favorável à implantação de técnicas de biorremediação *in situ* (vide item 3.4.1.) nas sub-áreas avaliadas, o monitoramento proposto fornecerá subsídios à definição da eficácia de aplicação destas técnicas. A atuação da

biorremediação promoverá principalmente a limpeza da zona não saturada, evitando assim a lixiviação e o transporte dos contaminantes para a aquífero.

Conjuntamente ao monitoramento das águas subterrâneas propõe-se a realização da avaliação de risco específica para a área investigada, incluindo ambas sub-áreas. Uma metodologia correntemente utilizada por órgãos ambientais de vários países (EUA, União Européia, Austrália e Canadá) para o gerenciamento de área impactadas por hidrocarbonetos de petróleo está descrita na norma ASTM E1739-95 – *Standard Guide for Risk-based Corrective Action (RBCA) Applied at Petroleum Release Sites*, desenvolvida pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

Os procedimentos descritos pela metodologia RBCA, agrupam tanto métodos de avaliação de risco e exposição, como modelos matemáticos de transporte de contaminantes. A partir dos resultados são definidos, principalmente: 1) a necessidade de aplicação de medidas corretivas, 2) a tecnologia de remediação mais adequada, 2) os níveis de remediação aceitáveis, isto é, sob que concentrações máximas dos contaminantes avaliados é permitido o encerramento do processo de limpeza da área impactada.

Caso seja verificada a presença de fase livre nos poços de monitoramento, esta deverá ser removida. Uma possível técnica de remediação a ser aplicada *in situ* é o Bombeamento e Tratamento (*Pump-and-Treat*), descrito no item 3.4.3.

Spilborghs (1997) cita algumas características do sistema de bombeamento, como: 1) eficiência a várias profundidades; 2) eficiência na contenção de plumas de fase livre e dissolvida; 3) fácil instalação. Porém, explica, que um fator limitante à aplicação do bombeamento para áreas impactadas por hidrocarbonetos de petróleo se refere à fase adsorvida ao solo, que ao ser liberada gradualmente constitui uma fonte crônica de contaminação das águas subterrâneas.

Já o sistema MPE (Extração Multifásica), descrito no item 3.4.4. da presente pesquisa, apresenta uma maior eficácia, atuando não somente sobre a remoção da fase livre, como também sobre a fase dissolvida e fase vapor. Este tipo de extração à vácuo além de remover a fase livre estimula a volatilização dos hidrocarbonetos de petróleo dissolvidos na água subterrânea que são desta forma recuperados e tratados em superfície. Adicionalmente, por meio do incremento de oxigênio em subsuperfície, favorece a atuação da biodegradação.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos sistemáticos aplicados na presente pesquisa, para avaliar a qualidade do solo e das águas subterrâneas, forneceram elementos geológicos, hidrogeológicos e sobre as alterações do quadro ambiental da área investigada, possibilitando:

- determinar as unidades geológicas predominantes, bem como a direção do fluxo d'água subterrâneo;
- indicar a localização de potenciais fontes primárias de contaminação;
- confirmar a presença de contaminação das zonas saturada e não-saturada;
- quantificar e avaliar a distribuição dos contaminantes em fases livre e dissolvida no aquífero, bem como adsorvidos ao solo;
- fornecer elementos como subsídios à realização de uma análise de risco específica envolvendo os receptores do local estudado e de seu entorno;
- propor técnicas de remediação da área investigada.

Notavelmente, a sistematização proporcionou a coordenação dos trabalhos investigativos, que se desenvolveram de forma orientada e objetiva. Primeiro com a confirmação das áreas suspeitas, por meio da investigação preliminar do solo, levantadas na primeira etapa da pesquisa. Posteriormente, com a aplicação da investigação detalhada do solo e da água subterrânea, evidenciou-se a extensão horizontal e vertical da área impactada.

O seqüenciamento adotado e a integração das etapas investigativas da pesquisa, em conjunto com a interpretação dos resultados analíticos das amostras de solo e água subterrânea permitiram, na etapa 4, a caracterização da contaminação, direcionando as ações corretivas e possíveis medidas de remediação a serem aplicadas.

Na área de estudo, o aquífero presente é do tipo freático, constituído por sedimentos aluvionares recentes. O nível d'água médio difere para as sub-áreas A e B, respectivamente 6,90 m e 5,20 m, estabelecendo para o fluxo d'água subterrâneo o sentido NW-SE .

As velocidades estimadas das águas subterrâneas foram de 1,12 m/ano e 1,66 m/ano, respectivamente para as sub-áreas A e B. A média harmônica destas velocidades é de 1,39 m/ano.

Para ambas sub-áreas foi constatada expressiva contaminação desde a superfície do solo até o nível d'água, com presença de compostos constituintes do óleo diesel.

---

Conclui-se que a área impactada é de aproximadamente 5000 m<sup>2</sup>, dos quais 1000 m<sup>2</sup> correspondem à sub-área A (Distribuição de Combustível) e 4000 m<sup>2</sup> à sub-área B (Tancagem de Combustível). Os valores analíticos máximos detectados atingiram níveis de intervenção, requerendo a aplicação de medidas corretivas na área pesquisada.

A água subterrânea apresenta contaminação por fase dissolvida representada por compostos constituintes do óleo diesel que possivelmente extrapola os limites da área pesquisada, considerando o sentido do fluxo d'água subterrâneo (NW-SE).

As plumas de contaminação por fase livre constituída por óleo diesel, identificadas durante as sondagens nas duas sub-áreas, possivelmente estão restritas aos limites da antiga garagem, apresentando-se concordantes com o sentido do fluxo d'água subterrâneo (NW-SE).

Ressalta-se que, em caso de confirmação da presença desta fase livre, por meio de monitoramento futuro, a sua remoção deve ser imediata.

Destaca-se que as características geológicas e hidrogeológicas da área impactada permitem a implantação de técnicas de saneamento do aquífero como o bombeamento e extração multifásica, entre outras.

Os resultados das análises microbiológicas de solo e de água subterrânea, demonstraram a possibilidade de implantação de técnicas de biorremediação *in situ*, também permitindo o tratamento da zona não saturada.

Com o desenvolvimento da presente pesquisa pode-se investigar um dos exemplos mais graves e freqüentes de contaminação de solo e da água subterrânea na atualidade, sendo possível reunir capacitação referente às formas de ocorrência, comportamento e dinâmica dos hidrocarbonetos de petróleo em subsuperfície.

Por fim, pode-se concluir também que, a partir da apresentação e discussão dos resultados obtidos na presente pesquisa, foram integralmente atingidos os objetivos fixados no início da investigação já que, com o emprego de técnicas aplicadas à caracterização e quantificação do passivo ambiental de antiga área de armazenamento e distribuição de combustíveis derivados de petróleo (principalmente o óleo diesel), foram verificados quais os estudos necessários para avaliar a qualidade do solo e da água subterrânea.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **Standard guide for risk-based corrective action applied to petroleum released sites.** EUA, 1995. (ASTM Designation E 1739-95).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **ASTM draft guide for remediation by natural attenuation at petroleum released sites.** EUA, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **Standard provisional guide for risk-based corrective action.** EUA, 1998. (ASTM Designation OS 104-98).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma para Solo - Análise Granulométrica - MB-32/NBR 7181.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma para Sondagem a Trado, Procedimento - NBR 9603.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma para Amostragem de Resíduos, Procedimento - NBR 10.007.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Glossário de Poluição das Águas - NBR 9896.** Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma para Execução de Levantamento Topográfico - NBR 13.133.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Rochas e Solos, Terminologia - NBR 6502/TB3.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma para Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem - NBR 13.895.** Rio de Janeiro, 1997.

AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.11–130.

BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H. J. **Allgemeine hydrologie – Quantitative hydrologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1996.

BRANCO, M. B. **Hidrologia ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. (Coleção ABRH, v.3).

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria N° 36/GM**, de 19 de Janeiro de 1990. Normas e padrão da potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília, DF, 1990.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília: Câmara dos Deputados, 1996. (textos básicos n. 11).

CABRAL, J. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM; LABHID-UFPE, 1997. cap. 3, p. 35–51.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT - CCME. **Interim canadian enviromental quality criteria for contaminated sites**. Winnipeg: Manitoba, 1991. apêndice A.

CANADIAN WATER QUALITY GUIDELINES - CWQG. **Summary of guidelines for water quality in Canadá**. Ontário: Minister of National Health and Welfare Ottawa, 1995.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. v.1, p.1-50.

CHAPELLE, F. H. **Groundwater microbiology and geochemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1992.

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. vol. 2, cap. 5, p. 292-404. (Coleção ABRH).

COELHO, P. E. **Caracterização e remediação de áreas contaminadas**. São Paulo: EPUSP, 2000. - Apostila do Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

COLE, G. M. **Assessment and remediation of petroleum contaminated sites**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1997. (Relatórios).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Sistema geográfico de informações e cadastro de áreas contaminadas**. São Paulo, 1998.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução n° 273, de 29 de novembro de 2000. **Diário Oficial**, Brasília, DF, n. 5, 8 de janeiro de 2001.

CORSEUIL, H. X.; FERNANDES, M. Efeito do etanol no aumento da solubilidade de compostos aromáticos presentes na gasolina brasileira. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 1999.

DEHAINI, J. **Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração**. 2001. 100 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2001.

DUTCH MINISTRY OF HOUSING PHYSICAL PLANNING AND MINISTERS OF THE ENVIROMENTAL - VROM. **Revised Dutch Reference Framework (STI Values)**. Nertherlands: Deventer, 1995.

FERREIRA, J.; ZUQUETTE, L. V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 527–557, 1998.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 2nd ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1988.

FETTER, C. W. **Contaminant hydrogeology**. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

FINOTTI, A. R. **Estudo da aplicabilidade do modelo da ação corretiva baseada no risco (RBCA) em contaminações subterrâneas com gasolina e etanol**. Florianópolis (SC), 1997. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

FREEZE, A. L.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

GLOEDEN, E. **Gerenciamento de áreas contaminadas na bacia hidrográfica do reservatório Guarapiranga**. São Paulo, 1999. 191f. Tese (Doutorado em Recursos minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1999.

GUIGUER, N. **Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento**. Ontário: Waterloo Hydrogeologic, 1996.

GUSTAFSON, J. B.; TELL, J. G.; OREM, D. Selection of representative TPH fractions based on fate e transport considerations. **Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series**. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, 1997. v. 3.

KAIPPER, B. I. A.; CORSEUIL, H. X. Aumento da solubilidade de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em águas subterrâneas contaminadas com óleo diesel, VI-10. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21; 2001, João Pessoa. **Anais**. João Pessoa, 2001. 1 CD-ROM.

KAIPPER, B. I. A.; CORSEUIL, H. X.; TODESCHINI, V. A. Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos totais de petróleo em aquíferos contaminados por óleo diesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12; 2002, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis, 2002. 1 CD-ROM.

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. **Hazardous waste management**. USA: McGraw-Hill, 1994.

LOUREIRO, C. O.; OLIVEIRA, L. I.; RODRIGUES, O. O. A.; COSTA, W. D. Postos distribuidores de combustíveis e o problema ambiental em Belo Horizonte, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12; 2002, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis, 2002. 1 CD-ROM.

MACHADO, P. A. L. Direito ambiental brasileiro. 8a ed. São Paulo: Malheiros Editores, 1999.

MANOEL FILHO, J. Água subterrânea. Histórico e importância. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM; LABHID-UFPE, 1997a. cap 1.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM; LABHID-UFPE, 1997b. cap 2.

MARTINS, G. A.; DONAIRE, D. **Princípios de estatística**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas, 1990.

MAXIMIANO, A. M. S. **Determinação de níveis aceitáveis no ambiente para hidrocarbonetos utilizando o procedimento de ações corretivas baseadas no risco (RBCA). Aplicação para a cidade de São Paulo**. São Paulo, 2001. 121f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2001.

MERCER J.; COHEN R. A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation. **Journal of Contaminant Hydrology**. EUA, v. 6, p 107-163, 1990.

NADIM, F.; HOAG, G. E.; LIU, S.; CARLEY, R. J.; ZACK, P. Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. EUA, v. 26, p. 169-178, 2000.

NYER, E. K. **Practical techniques for groundwater and soil remediation**. New York: Lewis Publishers, 1992.

OGIHARA, S. H. **Avaliação de investigação ambiental e de tecnologia de intervenção aplicadas em uma área industrial com elevadas concentrações de hidrocarbonetos**. São Paulo, 2000. 126f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, E. **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo**. São Paulo, 1992. 112f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1992.

OLIVEIRA, L. I. **Postos distribuidores de combustíveis em Belo Horizonte: Caracterização do problema ambiental em potencial**. Belo Horizonte, 1999. 232f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

OLIVEIRA, A. M. S.; CORRÊA FILHO, D. (Coord.) **Ensaio de permeabilidade em solos – orientações para sua execução**. 3a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1996. (Boletim, 4).

PALMA, J. B.; ZUQUETTE, L. V. Principais técnicas de remediação – importância dos atributos geológico-geotécnicos. **Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 559-590, 1998.

PASTORE, E. L.; FONTES, R. M. Caracterização e classificação de solos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 197-210.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

POTTER, T. L.; SIMMONS, K. E. Composition of petroleum mixtures. **Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series**. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, 1998. v. 2.

REBOUÇAS, A. C. **Diagnóstico do setor hidrogeologia**. São Paulo: ABAS, 1996. (Caderno Técnico ABAS, 3).

ROCCA, A. C. C. Política institucional e fontes de poluição de solos e águas subterrâneas. In: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, **Prevenção e Controle da Poluição de Solo e Águas Subterrâneas**. São Paulo: CETESB, 2002. Apostila de Curso.

RÖHRICH, T. **Aquifer test for Windows – v. 2.5**. Manual do Usuário. Waterloo: Waterloo Hydrogeologic, 1987.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 87–99.

SCHWILLE, F. **Dense chlorinated solvents in porous and fractured media: model experiments**. New York: Lewis Publishers, 1988.

SEABRA, P. N. Uso da biorremediação em áreas impactadas pela indústria do petróleo. In: MELO, I. S.; SILVA, C. M. M. S.; SPESSOTO, A. (Ed.). **Biodegradação**. Jaguariúna, SP: II Workshop sobre Biodegradação, Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 41–59.

SOLOMONS, T. W. G. **Organic chemistry**. New York: John Wiley, 1996. v. 1.

SPILBORGHS, M. A. F. **Biorremediação de aquífero contaminado com hidrocarboneto**. São Paulo, 1997. 147f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997.

TESTA, S. M. & WINEGARDNER, D. L. **Restoration of petroleum contaminated aquifer**. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1991.

TESTA, S. M. **Geological aspects of hazardous waste management**. Boca Raton: CRC Press, 1993.

TOTAL PETROLEUM HYDROCARBON CRITERIA WORKING GROUP SERIES - TPHCWGS. **Development of fraction specific reference doses (RfDs) and reference concentrations (RfCs) for total petroleum hydrocarbons (TPH)**. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, 1997. v. 4.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Risk assessment guidance for superfund, human health evaluation manual (part A)**. EPA/540/1-89/003. Washington: EPA, 1989. v. 1.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Assessing UST corrective action technologies: early screening of clean up technologies for the saturated zone**. EPA/600/2-90/027. Washington: EPA, 1990.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Groundwater issue**. EPA/540/4-91/002. Washington: EPA, 1991a.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Handbook of groundwater. Methodology**. EPA/625/6-90/016b. Washington: EPA, 1991b. vol. 2.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Technologies and options for UST corrective actions: overview of current practices**. EPA/542/R-92/010. Washington: EPA, 1992a.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Dense nonaqueous phase liquids. A workshop summary**. EPA/600/R-92/030. Washington: EPA, 1992b.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Bioventing principles and practice. EPA/540/R-95/534a.** Washington: EPA, 1995. v. 1.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites. A guide for state regulators. EPA 510-R-96-001.** Washington: EPA, 1996.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Multi-phase extraction: state-of-the-practice. EPA/542/R-99/004.** Washington: EPA, 1999a.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons. EPA/600/F-98/021.** Washington: EPA, 1999b.

VAZ, L. F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Solos e Rochas: **Revista Brasileira de Geotecnia.** São Paulo, v. 19, n. 2, p. 117–136, 1996.