

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

**FLUTUAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO E SUA IMPLICAÇÃO NA RECUPERAÇÃO
DE HIDROCARBONETOS: UM ESTUDO DE CASO**

Marco Aurelio Zequim Pedde

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Tese de Doutorado elaborada junto ao Programa
de Pós-Graduação em Geociências e Meio
Ambiente para obtenção do título de Doutor em
Geociências e Meio Ambiente

Rio Claro (SP)
2009

551.49 Pede, Marco Aurélio Zequim
P371f Flutuação do lençol freático e sua implicação na
recuperação de hidrocarbonetos : um estudo de caso / Marco
Aurélio Zequim Pede. – Rio Claro : [s.n.], 2009
126 f. : il., tabs., mapas, gráfs., fots.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Chang Hung Kiang

1. Águas subterrâneas. 2. Remediação. 3. Fase livre. 4.
Contaminação. 5. Querosene. I. Título.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Prof. Dr. Everton de Oliveira

Prof. Dr. Holger Weiss

Prof. Dr. Luiz Tadeu Furlan

Prof. Dr. Miguel Alfaro Soto

Aluno

Marco Aurelio Zequim Pede

Rio Claro, 16 de março de 2009

Resultado: Aprovado com Distinção e Louvor

À minha

Famiglia

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang pela amizade, orientação e pela confiança depositada.

À Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – Fundunesp, pela bolsa concedida.

Ao companheiro Geólogo Cláudio Alexandre de Souza pelo empenho nos trabalhos de campo.

Ao amigo Elias Teramoto pelo apoio e amizade.

Ao Dr. Luiz Tadeu Furlan pelo incentivo na realização desta pesquisa.

À PETROBRAS.

Aos Drs. Everton de Oliveira e Miguel Alfaro Soto pelas valiosas observações durante a etapa de qualificação.

À minha esposa Vânia e à minha filha Anna, pela compreensão e incentivo dispensado em toda esta jornada.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Índice..... | i |
| Índice de Tabela..... | iii |
| Índice de Figuras..... | iv |
| Índice de Foto..... | vii |
| Resumo..... | viii |
| Abstract..... | ix |
| 1. Introdução..... | 01 |
| 2. Objetivos..... | 03 |
| 3. Revisão Bibliográfica..... | 05 |
| 4. Metodologia..... | 35 |
| 5. Caracterização da Área de Estudo..... | 52 |
| 6. Caracterização Hidrogeológica da Área de Estudo..... | 62 |
| 7. Remediação de Fase Livre..... | 83 |
| 8. Discussões e Conclusões..... | 118 |
| 9. Referências Bibliográficas..... | 122 |

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 – OBJETIVOS..... | 4 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 – Características dos Hidrocarbonetos..... | 5 |
| 3.2 – Comportamento do LNAPL em Sub-superfície..... | 6 |
| 3.2.1 – Saturação..... | 6 |
| 3.2.2 – Tensão Interfacial e Molhabilidade | 7 |
| 3.2.3 – Pressão Capilar e Perfil de Saturação..... | 8 |
| 3.2.4 – Mecanismos de Trapeamento e Saturação Residual | 11 |
| 3.3 – Distribuição de LNAPLS no Meio Poroso | 13 |
| 3.4 – Permeabilidade Relativa | 16 |
| 3.5 – Pressão Capilar de Sistemas Multifásicos para Poços de Monitoramento..... | 17 |
| 3.6 – Grau de Saturação de Sistemas Multifásicos a partir de Poços de Monitoramento | 20 |
| 3.7 – Quantificação do Volume Específico e do Volume Específico Recuperável da Fase Livre..... | 23 |
| 3.8 – Migração Lateral do LNAPL | 23 |
| 3.9 – Flutuação do Nível da Água | 24 |
| 3.10 – Recarga | 27 |
| 3.11 – Remediação..... | 29 |
| 3.11.1 – Métodos de Remediação da Fase Livre e Residual..... | 30 |
| 3.12 – Casos de Remediação de Fase Livre..... | 33 |
| 4 – METODOLOGIA | 35 |
| 4.1 – Revisão Bibliográfica..... | 35 |
| 4.2 – Delimitação e Acompanhamento da Pluma de Fase Livre | 35 |
| 4.2.1 – Instalação de Poços de Monitoramento e Bombeamento..... | 35 |
| 4.2.2 – Caracterização da Geologia Local..... | 38 |
| 4.2.3 – Monitoramento do Nível D`Água e Fase Livre | 39 |
| 4.2.4 – Teste de Slug | 40 |
| 4.3 – Determinação das Curvas de Pressão Capilar para o Sistema Água-Ar no Meio Poroso | 41 |
| 4.3.1 – Método de Translação de Eixos (Câmara de pressão de Richards)..... | 42 |
| 4.3.2 – Método do Papel Filtro | 43 |
| 4.4 – Propriedades dos Fluidos..... | 44 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1 – Análise da Viscosidade e Massa Específica..... | 44 |
| 4.4.2- Determinação da Tensão Superficial e Interfacial de LNAPL e Água | 45 |
| 4.4.3 – Caracterização do Óleo..... | 46 |
| 4.5- Remediação da Fase Livre | 49 |
| 5 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 52 |
| 5.1 – Localização da Área de Estudo..... | 52 |
| 5.2 – Hidrologia e Pluviometria | 53 |
| 5.3– Aspectos Geomorfológicos e Geológicos Regionais | 55 |
| 5.3.1 – Embasamento Cristalino | 55 |
| 5.3.2 – Subgrupo Itararé | 57 |
| 5.3.3 – Intrusivas Básicas | 57 |
| 5.3.4 – Depósitos Relacionados à Formação Rio Claro | 57 |
| 5.3.5 – Depósitos Quaternários..... | 59 |
| 5.4 – Hidrogeologia Regional..... | 60 |
| 6 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO | 62 |
| 6.1 – Histórico da Área..... | 62 |
| 6.2 - Mapa Potenciométrico e de Fase Livre | 63 |
| 6.3 – Modelo Hidrogeológico Conceitual..... | 66 |
| 6.4 - Curvas de Retenção e Índices Físicos | 76 |
| 6.5 – Valores de Condutividade Hidráulica e Velocidade da água Subterrânea | 77 |
| 6.6 – Cálculo de Recarga..... | 78 |
| 7 - Remediação da Fase Livre | 83 |
| 7.1 – Poços de Bombeamento..... | 83 |
| 7.2 – Teste Piloto | 85 |
| 7.3 – Remediação de Querosene | 92 |
| 7.4 – Quantificação da Emulsão e Volume Total de Querosene Recuperado | 108 |
| 7.5 – Fase Dissolvida..... | 109 |
| 7.6 – Simulação Analítica dos Poços de Bombeamento | 112 |
| 8 – Discussões e Conclusões | 118 |
| 9 – Referências Bibliográficas..... | 122 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Composição do Querosene..... | 6 |
| Tabela 2 – Técnicas de remediação passiva . | 30 |
| Tabela 3 - Técnicas de remediação LNAPL residual | 33 |
| Tabela 4 - Cotas de fase livre e nível d`água (Março 2007)..... | 66 |
| Tabela 5 – Valores de granulometria do poço de monitoramento PM 86. | 67 |
| Tabela 6 - Distribuição Granulométrica do poço PM 98. | 70 |
| Tabela 7 – Valores dos índices Físicos e parâmetros de Van Genutchen..... | 77 |
| Tabela 8 – Valores de condutividade hidráulica determinados em testes de slug..... | 77 |
| Tabela 9 – Valores de Δh , S_y e Recarga | 81 |
| Tabela 10 – Valores de recarga, pluviometria e percentual (recarga/pluviometria). | 82 |
| Tabela 11 – Dados dos poços de bombeamento. | 84 |
| Tabela 12 – Volume de querosene recuperado..... | 88 |
| Tabela 13 – Volume de querosene lançado (emulsão) . | 88 |
| Tabela 14 – Volume total de água (emulsão) bombeado entre maio de 2005 e maio de 2006. | 88 |
| Tabela 15 – Volume de querosene recuperado. | 94 |
| Tabela 16 – Volume de querosene recuperado. | 101 |
| Tabela 17 – Porcentagem de aromáticos e alifáticos na amostras de querosene. | 111 |
| Tabela 18 - Parâmetros físicos do querosene..... | 114 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ângulo de contato de uma gota molhante sobre uma superfície sólida..... | 7 |
| Figura 2 - Tubos capilares de diferentes diâmetros | 9 |
| Figura 3 – Gráfico de drenagem e embebição | 10 |
| Figura 4 a e b – Processo de embebição com fenômeno de snap-off (A) e sem trapeamento (B)..... | 12 |
| Figura 5 – Processo trapeamento de LNAPL (<i>bypassing</i>)..... | 12 |
| Figura 6 – Representação em sub-superfície do vazamento de LNAPL. | 13 |
| Figura 7 - Modelo conceitual de LNAPL em poço de monitoramento | 14 |
| Figura 8 - Perfil de saturação de diesel em diferentes litologias | 16 |
| Figura 9 - Permeabilidade relativa óleo/água | 17 |
| Figura 10 - Poço de monitoramento com a presença de LNAPL | 19 |
| Figura 12 – Variações sazonais do aquífero Rio Claro | 26 |
| Figura 13 – Gráfico correspondente ao método WTF, para estimativa de recarga | 28 |
| Figura 14 - Bombeamento de fluidos totais..... | 32 |
| Figura 15 - Desenho esquemático do poço de bombeamento (A) e monitoramento (B). | 38 |
| Figura 16 - Técnica do Papel Filtro para determinação da pressão capilar | 44 |
| Figura 17 – Cromatograma da amostra do poço de monitoramento RE 46..... | 47 |
| Figura 19 - Fragmentação de anel aromático substituído. | 48 |
| Figura 20 - Fragmentos característicos de anéis mono, di e trissubstituídos..... | 48 |
| Figura 21 - Fragmentação característica de compostos alifáticos..... | 48 |
| Figura 22 – Fragmentos sugeridos para os íons de m/z 29, 43, 57, 85..... | 49 |
| Figura 23 - Localização da área de estudo. | 52 |
| Figura 24 - Gráfico de precipitação mensal..... | 53 |
| Figura 25 - Série histórica dos valores mensais de pluviometria (jan 92 a dez 08). | 54 |
| Figura 26 – Mapa Geológico Regional, ilustrando a distribuição das unidades lito-estratigráficas que compõe a área de estudo (adaptado de Fernandes, 1997)..... | 56 |
| Figura 27 – Perfis da Formação. Rio Claro no município de Paulínia | 59 |
| Figura 28 – Rede de poços de monitoramento e bombeamento em janeiro/2007..... | 63 |
| Figura 29 - Mapa potenciométrico, fluxo e fase livre. | 65 |
| a zona de captura estimada..... | 65 |
| Figura 30 – Curva granulométrica das areias..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31 - Curva granulométrica dos areias argilosas/argilo-siltosas (unidade C). | 70 |
| Figura 32 - Curvas granulométricas dos argilas arenosas/siltosas (unidade D). | 71 |
| Figura 33 - Curvas granulométricas de siltes argilosos (unidade E). | 72 |
| Figura 34 - Curvas granulométricas de sedimentos da Unidade F. | 74 |
| Figura 35 – Mapa de distribuição do primeiro nível saturado dos diferentes litotipos. | 75 |
| Figura 36 - Curvas de retenção dos diferentes tipos litológicos | 76 |
| Figura 37 – Gráfico de variação do nível d´água e pluviometria. | 79 |
| Figura 38 – Gráfico para estimativa de recarga (pm 61). | 80 |
| Figura 39 – Mapa de localização dos poços de bombeamento e fase livre. | 84 |
| Figura 40 - Pluma de Fase livre em abril de 2005 (A) e cota do N.A. (azul) do PM 57 (B). | 87 |
| Figura 41 – Variação do nível d´água, fase livre e precipitação. | 89 |
| Figura 42 -Pluma de Fase livre em dezembro de 2005 (A) e cota correspondente do N.A. no PM 57B. | 90 |
| Figura 43 - Pluma de Fase livre em maio de 2006 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B). | 91 |
| Figura 44 - Pluma de Fase livre em outubro de 2006 (A) e cota correspondente do N.A. no PM 57 (B). | 93 |
| Figura 45 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 03. | 95 |
| Figura 46 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 02. | 95 |
| Figura 47 – Recuperação diária de querosene do PB 03. | 96 |
| Figura 48 – Recuperação diária de querosene do PB 05. | 96 |
| Figura 49 - Recuperação diária de querosene do PB 06. | 97 |
| Figura 50 - Recuperação diária de querosene do PB 07. | 97 |
| Figura 51 - Gráficos de recuperação diária de querosene | 98 |
| Figura 52 - Pluma de Fase livre em abril de 2007 (A) e cota correspondente do N.A. no PM 57 (B). | 99 |
| Figura 53 – Gráfico de recuperação de querosene mensal total. | 100 |
| Figura 54 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 08. | 103 |
| Figura 55 - Pluma de Fase livre em outubro 2007 (A) e cota correspondente do N.A. no PM 57 (B). | 105 |
| Figura 56 - Pluma de Fase livre em outubro 2008 (A) e cota correspondente do N.A. no PM 57 (B). | 106 |
| Figura 57 – Gráfico de recuperação de querosene e água dos poços PB 02,03,05,06 e 07. | 107 |
| Figura 58 – Gráfico de recuperação mensal do querosene emulsificado. | 108 |
| Figura 59 – Gráfico de recuperação mensal do querosene emulsificado. | 109 |
| Figura 60 – Mapa de distribuição da pluma de benzeno (junho 2008). | 110 |
| Figura 61 – Mapa de distribuição de aromáticos (março 2008). | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62 - Pluma de Fase livre e mapa de fluxo em dezembro 2008..... | 112 |
| Figura 63 – Variação do nível d`água no poço de monitoramento PM 10. | 113 |
| Figura 64 – Perfil simulado de saturação de querosene e água do poço de bombeamento PB 06..... | 115 |
| Figura 65 – Simulação da recuperação de querosene para o prazo de quinze anos PB 06..... | 115 |
| Figura 66 – Recuperação diária de óleo do PB 06 no mês de novembro de 2008..... | 116 |
| Figura 67 – Perfil simulado de saturação de querosene e água do poço de bombeamento PB 07..... | 116 |
| Figura 68 – Simulação da recuperação de querosene para o prazo de quinze anos para o PB 07..... | 117 |
| Figura 69 – Variação da espessura de fase livre do PM 86. | 120 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|---|-----|
| Foto 01 - Caminhão com equipamento hollow stem auger..... | 36 |
| Foto 02 - Geoprobe com amostrador | 39 |
| Foto 03 - Amostrador e <i>Liners</i> | 39 |
| Foto 04 - Retirada das amostras para ensaio de curva de pressão capilar | 41 |
| Foto 05 - Câmara de pressão de RICHARDS | 42 |
| Foto 06 – Coleta de amostra de óleo e água do poço PM-75 | 45 |
| Foto 07 - Bomba Submersa..... | 50 |
| Foto 08 – Caixa Separadora Individual | 50 |
| Foto 09 - Emulsão após caixa separadora..... | 51 |
| Foto 10 - Analisador de teor de TPH | 51 |
| Foto 11 - Poço de bombeamento e monitoramento. | 51 |
| Foto 12 - Solo vermelho areno-siltoso , PM 88 | 67 |
| Foto 13 - Areia friável média a grossa, PM 83. | 68 |
| Foto 14 - Areia friável média a grossa, PM 76. | 68 |
| Foto 15 - Paleocanais preenchidos por areia média a grossa..... | 69 |
| Foto 16 - Argila arenosa, PM 66 | 71 |
| Foto 17 - Silte arenoso com fragmentos de laterita PM 80..... | 72 |
| Foto 18 - Argilito cinza, PM 85 | 73 |
| Foto 19 - Contato erosivo entre a areia grossa e o argilito siltoso..... | 73 |
| Foto 20 – Aspecto límpido e cristalino da água bombeada do PB 06..... | 100 |

Resumo

Vazamentos acidentais de derivados de petróleo podem ocorrer em refinarias, dutos, postos de serviços e no transporte rodoviário ou ferroviário, ocasionando diversos impactos ambientais. Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento de uma pluma de fase livre de querosene, presente em uma área industrial no município de Paulínia (SP), e estudar a recuperação de querosene em resposta à variação sazonal das chuvas. A área de estudo apresentou seis litotipos de origem fluvial, destacando-se a presença de paleocanais preenchidos por areias grossas. Verificou-se que as grandes variações nos níveis d'água proporcionam o fenômeno de trapeamento/destrapeamento do querosene, afetando diretamente o processo de remediação. A área apresenta altas taxas de recarga, variando de 370 mm a 550 mm em um ano. Após 40 meses de remediação, em que se procedeu ao bombeamento de oito poços, foram recuperados 176.000 litros de querosene. O período de maior recuperação foi de outubro a janeiro. Cálculos efetuados a partir dos índices físicos do solo, das propriedades físicas do querosene e da espessura observada de fase livre, em dezembro de 2008, permitiram estimar um volume remanescente recuperável de 192.000 litros de querosene no subsolo.

Palavras Chaves: pluma de fase livre, variação do nível d'água, remediação e querosene.

Abstract

Accidental spills of petroleum products may occur in refineries, pipelines, and service stations, as well as during roadway and railway transportation, causing environmental damages. The main objective of this thesis is to evaluate the behavior of a kerosene free phase plume in an industrial area of the municipality of Paulinia, and evaluate the role of water table fluctuation on hydrocarbon recovery. Six lithofacies deposited in fluvial environment were identified, in particular paleochannels filled by coarse grain sands. An important finding was large water table fluctuation induce entrapment/release of kerosene, greatly affecting aquifer remediation. The studied aquifer underwent high recharge rates of 370 mm to 550 mm per year. Throughout 40 months of remediation, in which eight submersible pumps were employed, 176.000 liters of kerosene were recovered. The largest period of kerosene recovery was in the interval comprising October to January. Calculations using soil physical indexes, physical properties of kerosene and the observed thickness of free phase, as measured in December of 2008, allowed to estimate a volume of 192.000 liters of recoverable remnant kerosene yet in the ground.

Keywords:free phase plume, water table fluctuation, remediation, kerosene.

1 – INTRODUÇÃO

Vazamentos acidentais de derivados de petróleo podem ocorrer em refinarias, dutos, postos de serviços e no transporte rodoviário ou ferroviário. Estes vazamentos, além de impactar o meio ambiente, podem originar riscos à saúde e segurança humanas, demandando medidas de caracterização e controle destas áreas.

Segundo a ANP (2008), existiam no Brasil, em 2006: 13 refinarias, 536 bases de distribuição, 34.709 postos de abastecimento de combustíveis, além de 7.775 km de dutos que cortam grande parte do País. Muitas vezes tais empreendimentos são afetados por vazamentos de hidrocarbonetos que exigem, na maioria das vezes, ações emergenciais.

Quando o vazamento é de grandes proporções, os hidrocarbonetos líquidos podem eventualmente atingir o nível d'água, espalhando-se lateralmente e iniciando o processo de dissolução dos compostos orgânicos na água. Com tempo, a pluma dissolvida migra em função do fluxo da água subterrânea, sofrendo atenuação por meio de processos biológicos naturais. Após longo período, os compostos mais solúveis são exauridos da pluma de contaminação, restando os compostos de baixa solubilidade e de alta viscosidade.

Em regiões tropicais, como no Brasil, a estação chuvosa é bem definida, permitindo uma rápida elevação do nível d'água dos aquíferos livres impactados, o que leva ao fenômeno de trapeamento do óleo presente no meio poroso e afeta diretamente o processo de remediação.

No Brasil, a maioria dos projetos de remediação segue metodologias preestabelecidas, invariavelmente importadas, que não levam em consideração as características geológicas do meio impactado e os fenômenos hidrodinâmicos. Para remediação da fase livre de hidrocarbonetos, as técnicas aplicadas resumem-se, na maioria das vezes, apenas à operação de equipamentos. Os projetos seguem o mesmo padrão operacional ao longo dos anos do processo de remediação, e a eficiência é pouco questionada.

Ao longo dos últimos anos, a simples presença de LNAPL em poços de monitoramento sempre foi associada à necessidade imediata de remediação da fase livre. Esta percepção errônea levou muitas vezes à escolha de métodos inadequados de remediação, em que baixas, ou mesmo nulas, taxas de recuperação de óleo foram observadas, mesmo em poços onde a espessura de fase livre era superior a um metro. A caracterização hidrogeológica inadequada, a falta do conhecimento das características físicas do LNAPL e da amplitude de variação do nível d'água levam a falsos diagnósticos baseados na espessura de fase livre. Na maioria das vezes, o volume e a taxa de recuperação de LNAPL são superestimados e o tempo requerido de remediação subestimado.

A remediação dos aquíferos contaminados por hidrocarbonetos requer o conhecimento das características hidrogeológicas da área contaminada, da extensão, tipo e distribuição da pluma de contaminação e dos aspectos técnicos locais para implantação dos equipamentos. O acompanhamento minucioso é necessário ao longo do processo de remediação, bem como os dados obtidos exigem uma análise técnica acurada.

A quantidade de trabalhos científicos internacionais que relacionem a variação do nível d'água e a remediação é mínima e, no Brasil, inexistente.

Salienta-se que a questão legal apresenta, ao menos no Estado de São Paulo, um fator a ser discutido, dado que segundo a decisão da CETESB Nº. 103/2007 o prazo para remoção da fase livre em áreas contaminadas é de 180 dias.

Na região de Paulínia, onde esta inserida a área de interesse desta pesquisa, está instalado um dos maiores pólos petroquímicos da América Latina. Nesta região, observam-se diversos problemas ambientais relacionados principalmente à contaminação do solo e da água subterrânea devido a vazamentos de derivados de petróleo e outros compostos químicos. A falta do acompanhamento adequado da variação dos níveis de água e espessura de óleo associados ao regime

pluviométrico faz com que, muitas vezes, o aparecimento de espessuras significativas de fase livre durante os processos de remediação, ou monitoramento, sejam relacionados a novas fontes de contaminação.

2 – OBJETIVOS

A presente pesquisa foi desenvolvida com os seguintes objetivos:

- ✓ Avaliar o comportamento de uma pluma de fase livre de querosene sob influência da variação do nível d'água;
- ✓ Avaliar ao longo do ciclo hidrológico a eficiência do sistema de remediação escolhido;
- ✓ Comparar os dados obtidos com as soluções analíticas existentes.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O entendimento do comportamento em sub-superfície dos hidrocarbonetos menos densos que a água, denominados pela literatura internacional como LNAPL (*light non-aqueous phase liquid*), ou fase líquida imiscível leve, em conjunto com as características hidrogeológicas do meio, permite estabelecer parâmetros necessários à remediação e ao monitoramento de uma área impactada por hidrocarbonetos.

3.1 – Características dos Hidrocarbonetos

O petróleo é uma complexa mistura de compostos de hidrocarbonetos e outros elementos incluindo enxofre, nitrogênio e oxigênio. Por meio da destilação e craqueamento, o petróleo bruto é transformado em numerosos produtos. Estes produtos são classificados de acordo com as propriedades físicas e a composição química. Fisicamente, os produtos são classificados por sua densidade, viscosidade, molhabilidade, tensão interfacial e superficial, volatilidade e solubilidade e por seu ponto de ebulição. Quimicamente, os hidrocarbonetos são moléculas orgânicas compostas de hidrogênio e carbono, classificadas em quatro tipos: alcanos, cicloalcanos, aromáticos e alcenos.

Os principais produtos derivados do petróleo são: gás liquefeito de petróleo (glp), gasolina, nafta, diesel, querosene, óleos lubrificantes e asfalto. No Brasil, a gasolina recebe de 20 a 25 % de etanol para comercialização.

O querosene de aviação (QAV), em particular, é o derivado de petróleo adequado à geração de energia, por combustão, em motores de aeronaves turbinados a gás. O querosene de aviação contém hidrocarbonetos com 9 a 16 átomos de carbono. A composição do querosene de aviação depende do processo de refino e do tipo de petróleo, podendo variar a concentração dos tipos de hidrocarbonetos (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição do querosene (QAV).

| HIDROCARBONETO | % volume |
|--------------------------|----------|
| Parafinas (alcanos) | 33-61 |
| Naftênicos (cicloacanos) | 33-45 |
| Aromáticos | 12-25 |
| Oleofinas (alcenos) | 0,5-5 |

Fonte: PETROBRAS (2000)

3.2 – Comportamento do LNAPL em Sub-superfície

3.2.1 – Saturação

O meio poroso pode ser preenchido por diferentes fluidos (ar, água e LNAPL) que são imiscíveis entre si. A fração do volume total de poros ocupado por um fluido é chamada de saturação, representada em porcentagem. Matematicamente é representada pela equação:

$$S = \frac{V_f}{V_t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

S = saturação;

V_f = volume do fluido nos poros;

V_t = volume total de poros.

3.2.2 – Tensão Interfacial e Molhabilidade

Moléculas de uma substância em sua fase líquida atraem-se umas às outras. Uma molécula de um líquido é atraída por outras moléculas ao seu redor e, em média, não experimenta nenhuma força resultante. Quando o líquido está em contato com outro líquido, as forças de atração sobre as moléculas situadas na superfície do líquido, ou perto dela, não permanecem mais em equilíbrio e estas sofrem uma força resultante, normalmente no sentido da superfície para o líquido, caso atração entre as moléculas no líquido sejam mais fortes do que entre o líquido e o meio (que é o caso do contato entre o líquido e seu vapor).

A tensão interfacial é o principal fator de controle da molhabilidade, que pode ser definida como a tendência de um fluido se espalhar ou aderir a uma superfície sólida. O fluido com menor ângulo de contato (θ_c), que preferencialmente adere à superfície sólida, é chamado de fluido molhante. O ângulo de contato é o ângulo medido entre a superfície sólida e a interface presente no fluido molhante (Figura 1).

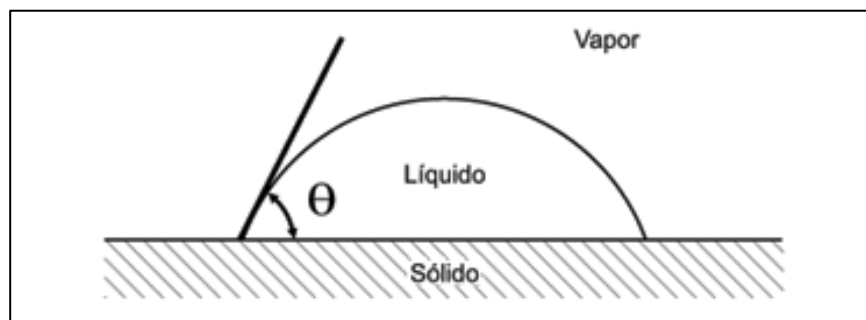


Figura 1: Ângulo de contato de uma gota molhante sobre uma superfície sólida

3.2.3 – Pressão Capilar e Perfil de Saturação

Quando a superfície que separa dois fluidos imiscíveis é curva, diferentes valores de pressão ocorrem ao longo da interface entre os fluidos. Essa diferença de pressão é chamada de pressão capilar e é definida pela seguinte equação:

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

P_c = pressão capilar;

P_{nw} = pressão do fluido não molhante;

P_w = pressão do fluido molhante.

A pressão capilar pode ser calculada pela equação de Young (1805) e Laplace (1806) (Adamson, 1982).

$$P_c = \frac{2\sigma \cos(\theta_c)}{r} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

P_c = pressão capilar;

θ_c = ângulo de contato (graus);

r = raio médio da curvatura (cm)

σ = tensão Superficial (dina/cm)

No meio poroso assume-se que o raio do poro que contém a interface entre o fluido molhante e não molhante é o mesmo que o raio médio de curvatura (r).

Quando tubos de vidro de diferentes diâmetros são colocados em recipiente com água, observa-se o fenômeno de ascensão capilar (Figura 2). A elevação da água em cada tubo está relacionada ao raio de cada tubo: quanto menor o raio maior a ascensão e maior a pressão capilar (negativa). A altura de elevação da água (h_c) é diretamente proporcional à pressão capilar. Neste caso, o fluido molhante é a água e o não molhante é o ar.

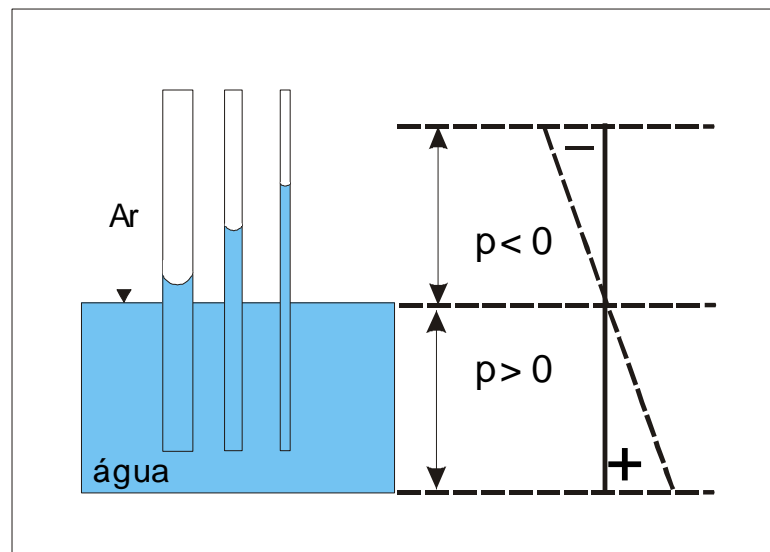


Figura 2 - Tubos capilares de diferentes diâmetros

Nos aquíferos, a água pode ser considerada a fase molhante e o ar presente a fase não molhante. O óleo é a fase não molhante em relação à água e molhante em relação ao ar.

A relação entre pressão capilar e saturação do fluido molhante em meio poroso é conhecida como curva característica do solo, ou curva de pressão capilar, parâmetro importante no entendimento da mobilidade e retenção do LNAPL. A curva característica do solo obtida em laboratório reflete o formato e o tamanho dos poros interconectados e varia de acordo com o tipo de solo.

A curva de pressão capilar é usualmente medida em solo totalmente saturado com fluido molhante. Um fluido não molhante é introduzido aumentando-se a pressão capilar até que cesse a diminuição da saturação do fluido molhante. Este ponto é conhecido como saturação irreduzível do fluido molhante, S_{wr} . Esta curva é chamada de curva de drenagem (Figura 3). A curva de drenagem mostra a pressão capilar (P_d) necessária para o deslocamento inicial do fluido molhante pelo não molhante.

Se a pressão capilar for diminuída, o fluido molhante desloca o fluido não molhante, gerando uma curva de embebição. Quando a pressão capilar é reduzida para zero, o solo não estará completamente saturado com o fluido molhante, restando uma saturação residual do fluido não molhante, S_{nwr} .

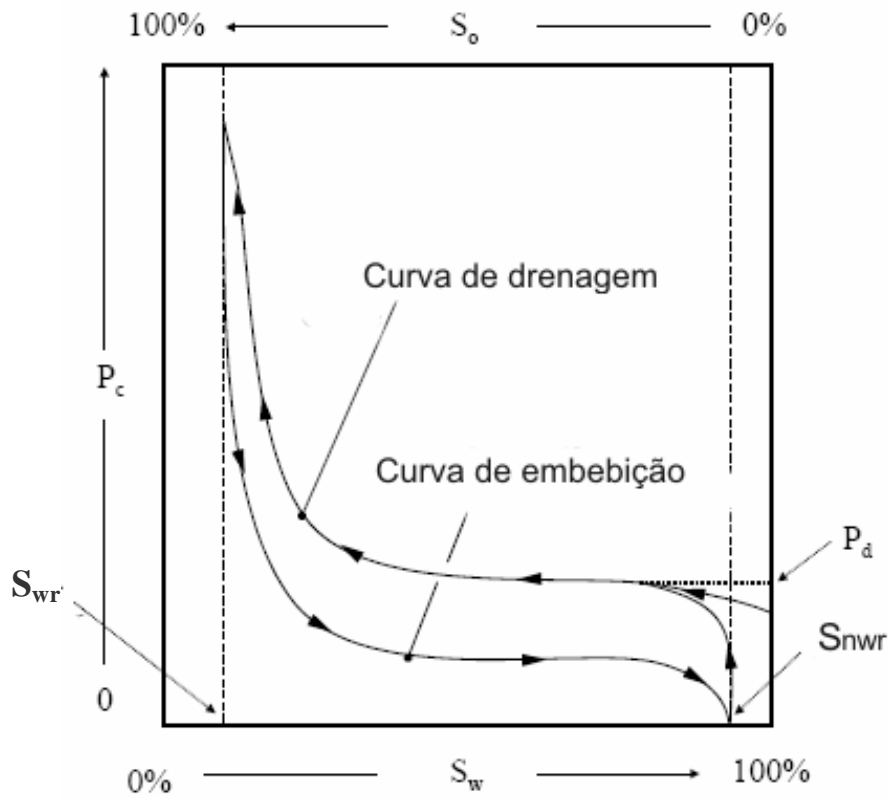


Figura 3 – Curvas de pressão capilar para os processos de drenagem e embebição (modificado de API, 2004).

O trabalho de van Genutchen (1980) descreve matematicamente a curva de pressão capilar, conhecida também como curva de retenção de água no solo. Para o modelo matemático, utiliza-se a curva de drenagem primária. O modelo proposto por van Genutchen (1980) é o mais utilizado em investigações ambientais e apresenta a seguinte fórmula matemática:

$$S_e = \left(1 + (\alpha h_c)^N\right)^{-M} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

S_e = saturação efetiva da fase molhante (varia de 0 a 1);

h_c = pressão capilar (expresso em cm de fluido molhante);

α e N = fatores de distribuição do tamanho do poro;

Para $N > 2$, $M = 1 - 2/N$ (Burdine, 1953).

Para $N > 1$, $M = 1 - 1/N$ (Mualen, 1976).

Segundo Charbeneau (2007), o emprego do valor N e M varia de acordo com o tipo de textura do solo.

Para os valores obtidos da curva de drenagem primária (Figura 3) a saturação efetiva (S_e) é definida pela seguinte equação:

$$S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

S_w = saturação de água;

S_{wr} = saturação irreduzível do fluido molhante.

3.2.4 – Mecanismos de Trapeamento e Saturação Residual

Para Charbeneau (2000), a quantidade de LNAPL (non-aqueous phase liquid) que permanece presa no meio poroso após deslocamento por um fluido molhante é chamada de saturação residual. Existem dois mecanismos de trapeamento de LNAPL no meio poroso: *snap-off* e *bypassing* (CHATZIS *et al.* 1983). O processo de *snap-off* (Figura 4A) ocorre durante o processo de embebição, em que o fluido não molhante (LNAPL) é deslocado pelo fluido molhante (água), e a razão entre o corpo e a garganta do poro é alta (*high aspect ratio*). A instabilidade das interfaces (capilaridade) faz com que o LNAPL fique aprisionado na garganta do poro na forma de gota. A Figura 4B mostra que a razão entre o corpo e a garganta do poro é pequena e, com isso, durante o processo de embebição o fluido não molhante não é afetado pela instabilidade capilar, evitando assim o fenômeno de *snap off*. Segundo Charbeneau (2000), o meio poroso com baixa razão corpo/garganta apresenta pequena saturação residual de LNAPL.

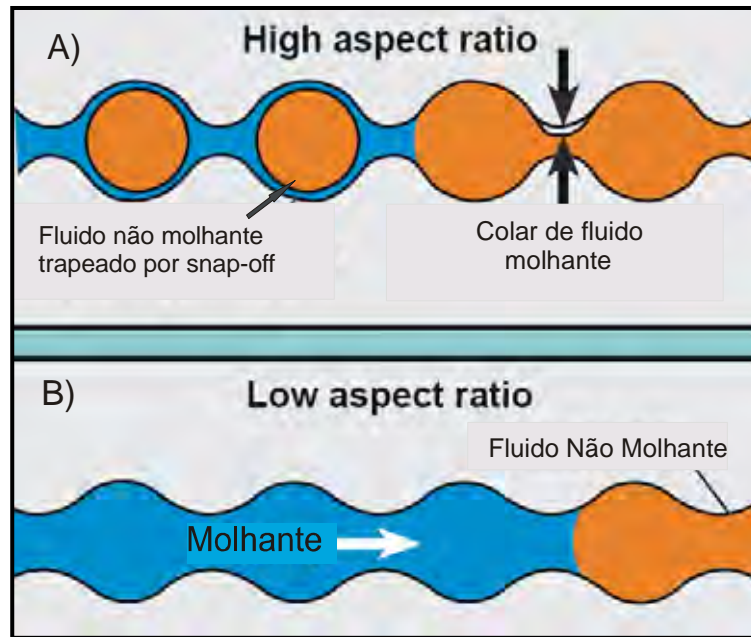


Figura 4 a e b – Processo de embebição com fenômeno de snap-off (A) e sem trapeamento (B) (Modificado de CHATZIZ, *et al.* 1983)

O mecanismo de trapeamento de LNAPL, denominado *bypassing*, ocorre durante o processo de embebição em que o fluido molhante (água) desloca o fluido não molhante (LNAPL) através do poro menor mais rapidamente que pelo poro maior, fazendo com que o LNAPL fique aprisionado (Figura 5). Segundo Chatzis *et al.* (1983), o volume residual de LNAPL no meio poroso causado pelo mecanismo de *bypassing* é maior que o observado no mecanismo de *snap-off*.

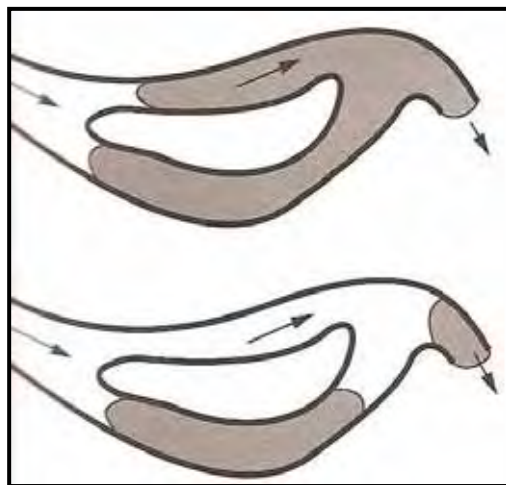


Figura 5 – Processo trapeamento de LNAPL (*bypassing*) (Modificado de CHATZIZ, *et al.* 1983)

3.3 – Distribuição de LNAPLs no Meio Poroso

A ocorrência de vazamentos em tanques e instalações subterrâneas faz com o LNAPL migre verticalmente na zona não saturada sob a influência da gravidade e das forças capilares. Quando o volume de LNAPL é suficiente, o LNAPL migra pela zona não saturada até atingir a franja capilar e o nível d'água (Figura 6).

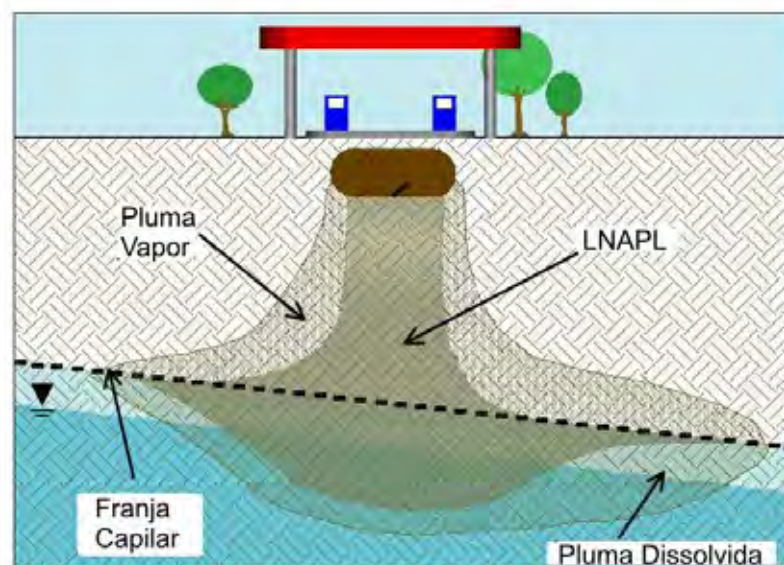


Figura 6 – Representação em sub-superfície do vazamento de LNAPL.

Quando um poço de monitoramento é instalado em uma porção do aquífero contaminada com LNAPL, óleo e água migram para o interior do poço até que o equilíbrio com a pressão atmosférica seja atingido. O poço de monitoramento passa a apresentar uma camada sobrenadante de óleo, de espessura medida entre a interface ar-óleo e a interface óleo-água, chamada de espessura aparente.

No passado acreditava-se que o óleo migrava da franja capilar para o poço, onde não existe o efeito da capilaridade, refletindo uma lente de LNAPL no aquífero onde os poros drenáveis eram 100 % preenchidos por óleo. Este modelo conceitual levou alguns pesquisadores a estabelecer a espessura de LNAPL presente no aquífero a partir da espessura aparente presente nos poços de monitoramento. Pastrovich *et al.* (1979) propôs que a espessura aparente era quatro vezes a espessura presente no aquífero; por sua vez, Kramer (1982) concluiu que a espessura de gasolina medida em poço de monitoramento era de duas a três vezes

a espessura na formação. Estes resultados se basearam em experimentos com areias selecionadas ou esferas de vidro.

Para o cálculo do volume de óleo no aquífero utilizava-se a espessura do óleo, corrigido por um fator descrito anteriormente, a porosidade da formação e a extensão lateral da fase livre. Esta forma de cálculo resultava em grandes volumes de óleo e na expectativa de altas taxas de recuperação durante a operação dos sistemas de remediação.

Os trabalhos de Farr *et al.* (1990) e Lenhard & Parker (1990) mostraram que o LNAPL não ocorre sob a forma de uma lente de óleo uniforme, conhecida na literatura como “panqueca” de óleo. O modelo conceitual proposto por esses trabalhos leva em consideração a presença, ao longo do perfil do meio poroso, de três fases: ar, LNAPL e água. Ar, LNAPL e água coexistem no meio acima do nível d’água. LNAPL e água coexistem abaixo do nível d’água e a saturação decresce com a profundidade até atingir 100 % dos poros saturados em água (Figura 7).

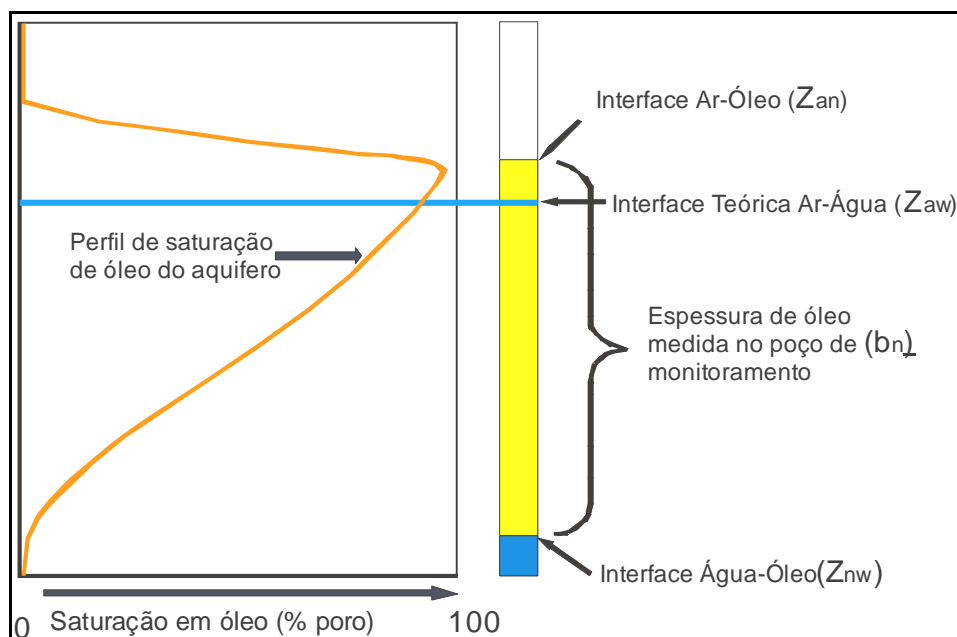


Figura 7 - Modelo conceitual de LNAPL em poço de monitoramento (modificado de API, 2004).

A superfície superior da camada de óleo é denominada de interface ar-LNAPL (Z_{an}) e a superfície inferior é denominada de interface LNAPL-água (Z_{nw}); a espessura medida no poço de monitoramento é denominada b_n . Segundo

Charbeneau (2007), a interface teórica ar-água (Z_{aw}) pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$Z_{aw} = \rho_r Z_{an} + (1 - \rho_r) Z_{nw} \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

Z_{aw} = Altura da interface teórica ar/água;

Z_{an} = Altura da interface ar/LNAPL;

Z_{nw} = Altura da interface Lnapi/água;

ρ_r = densidade relativa (óleo/água).

Farr *et al.* (1990) e Lenhard & Parker (1990), utilizando a equação de van Genuchten (1980), mostraram que a saturação em LNAPL acima da interface LNAPL/água (Z_{nw}) é função da litologia, da distribuição da pressão capilar, da densidade relativa do LNAPL e da tensão interfacial entre óleo/água. Ambos os trabalhos permitiram estabelecer diferentes perfis de saturação de óleo em função dos diferentes tipos litológicos, espessura de fase livre e das características físicas do LNAPL. Huntley *et al.* (1994) e Lundergard & Mudford (1998) confirmaram, a partir de trabalhos realizados em campo, o perfil de distribuição do óleo na zona saturada.

A Figura 8 mostra a variação do perfil de saturação em óleo diesel para diferentes litologias. O perfil de saturação é baseado na espessura de um metro de óleo diesel no poço de monitoramento. O volume de óleo diesel presente na areia grossa é aproximadamente dez vezes maior que o volume de óleo presente no silte.

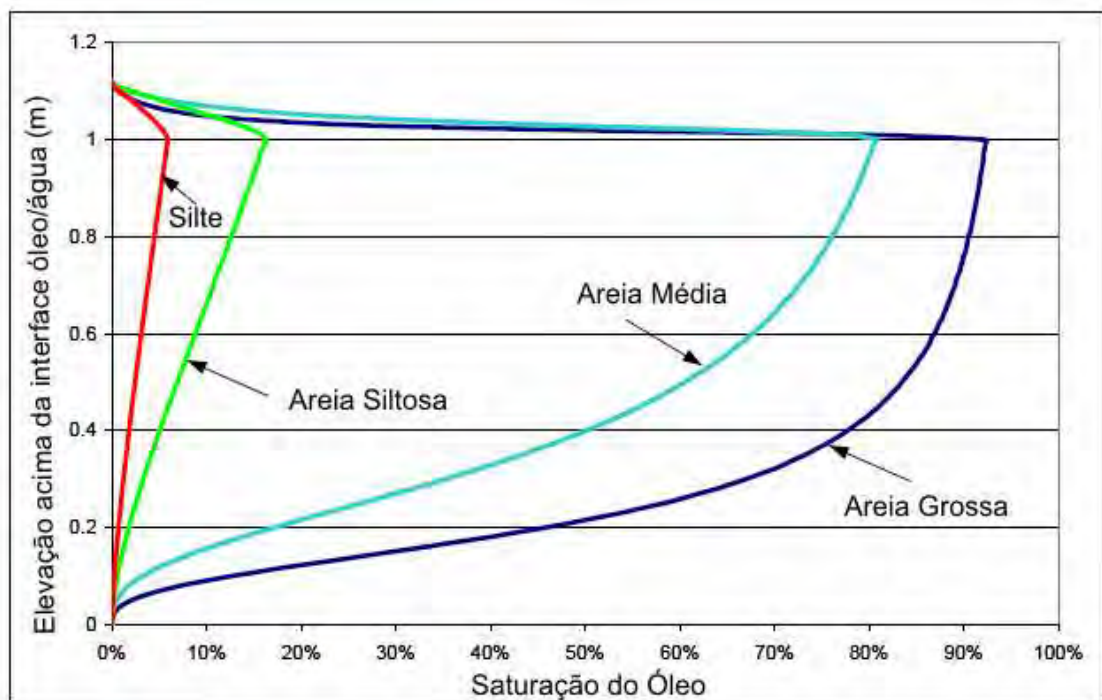


Figura 8 - Perfil de saturação de diesel em diferentes litologias (modificado de API, 2004).

3.4 – Permeabilidade Relativa

A permeabilidade relativa é um fator que reflete a habilidade de um fluido se mover através do meio poroso, quando o mesmo é parcialmente ocupado por outro fluido. A permeabilidade relativa de um fluido depende de sua saturação e da saturação de outro fluido presente. A permeabilidade relativa varia de 0 a 1 (Figura 9).

O fenômeno da permeabilidade relativa é estudado na indústria do petróleo, explicando a limitação na recuperação de óleo dos campos de exploração onde volumes significativos de óleo permanecem retidos no meio poroso (CHATZIS *et al.*, 1983).

A Figura 9 mostra que para escoarem, a água e o óleo devem atingir um valor mínimo de saturação. Caso a saturação em água seja menor que a saturação irreduzível, o óleo escoar e a água permanece presa pelas forças capilares. Da mesma forma, se a saturação em óleo for menor que a saturação residual, a água escoar, mas o óleo não.

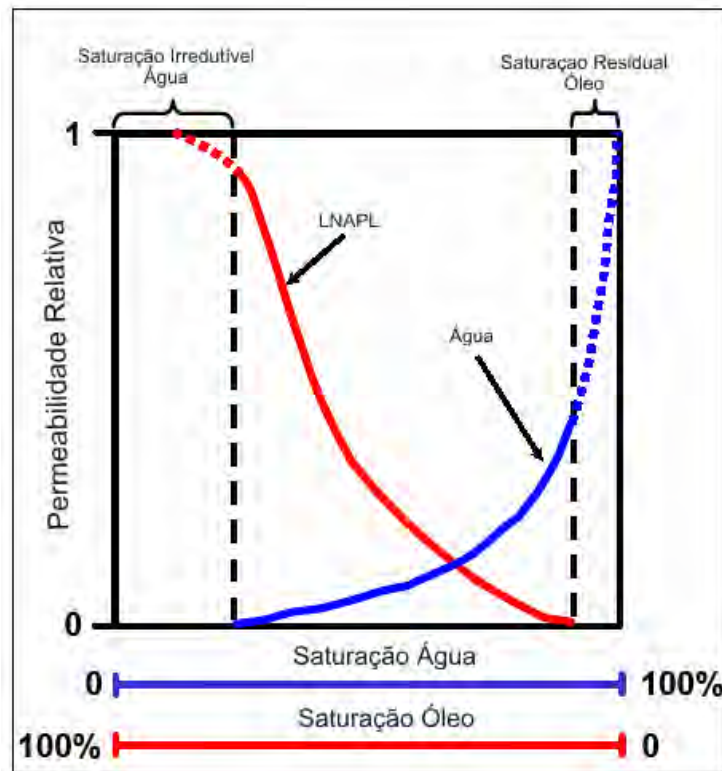


Figura 9 - Permeabilidade relativa óleo/água (Modificado de FETTER, 2001).

3.5 – Pressão Capilar de Sistemas Multifásicos para Poços de Monitoramento

Segundo Charbeneau (2007), em um poço de monitoramento os fluidos podem-se movimentar-se devido aos gradientes de pressão e gravitacionais que atuam sobre eles. Para as três fases, os gradientes hidráulicos decorrentes da água (J_w), do LNAPL (J_n) e do ar (J_a) são descritos por:

$$\vec{J}_w = -\frac{\nabla p_w}{\rho_w g} - \hat{k} \quad (\text{Equação 07})$$

$$\vec{J}_n = -\frac{\nabla p_n}{\rho_n g} - \hat{k} \quad (\text{Equação 08})$$

$$\vec{J}_a = -\frac{\nabla p_a}{\rho_a g} \quad (\text{Equação 09})$$

O primeiro termo de cada equação descreve o gradiente de pressão, enquanto o segundo, a força gravitacional. A esse respeito, a equação (09) não conta com o segundo termo, pois as forças gravitacionais (baixa densidade do ar) são desprezíveis para o cálculo do gradiente total.

As equações (07) e (08) podem ser combinadas considerando-se a definição de pressão capilar entre o LNAPL e água ($p_{c[nw]} = \rho_n - \rho_w$) resultando;

$$\vec{J}_n = -\frac{\nabla p_{c[nw]}}{\rho_w g} - \left(\frac{\rho_w}{\rho_n} - 1\right)\hat{k} + \frac{\rho_w}{\rho_n} \vec{J}_w \quad (\text{Equação 10})$$

De forma similar, para as equações (08) e (09) considerando-se a definição de pressão capilar entre o ar e LNAPL ($p_{c[an]} = \rho_a - \rho_n$), resulta a equação (11):

$$\vec{J}_n = \frac{\nabla p_{c[an]}}{\rho_n g} - \hat{k} + \frac{\rho_a}{\rho_n} \vec{J}_a \quad (\text{Equação 11})$$

As forças capilares devidas à pressão, que dependem do tipo e distribuição granulométrica e do fluido no meio poroso, podem ser anuladas pelas forças provenientes da flutuação do LNAPL, cuja densidade é menor que a da água. Desta forma, o LNAPL poderá movimentar-se apenas lateralmente induzido pelo fluxo da água ou ar.

A partir das equações (10) e (11), para alcançar o equilíbrio vertical, as distribuições de pressão para LNAPL-água e ar-LNAPL resultarão, respectivamente:

$$p_{c[nw]} = (\rho_w - \rho_n)g(z - z_{r1}) \quad (\text{Equação 12})$$

$$p_{c[an]} = \rho_n g(z - z_{r2}) \quad (\text{Equação 13})$$

Nestas equações, z_{r1} e z_{r2} identificam as elevações de referência onde a pressão capilar é igual a zero.

A presença de LNAPL em poços de monitoramento provoca inicialmente um ajuste de níveis de água e LNAPL, até que um equilíbrio de energia entre os fluidos

do poço e do meio poroso seja estabelecido. Assim, uma diferença de magnitudes de energia pode causar fluxo para dentro ou para fora do poço. A Figura 10 mostra um esquema de um poço de monitoramento contendo LNAPL. Nesta figura, Z_{gs} , Z_{an} , Z_{nw} e Z_{aw} representam os níveis do terreno, de elevação das interfaces ar-LNAPL, LNAPL-água e a elevação da água sem a presença do LNAPL, respectivamente. b_n corresponde à espessura do LNAPL e h_n e h_w às alturas do LNAPL e da água medidas a partir de um nível de referência, respectivamente.

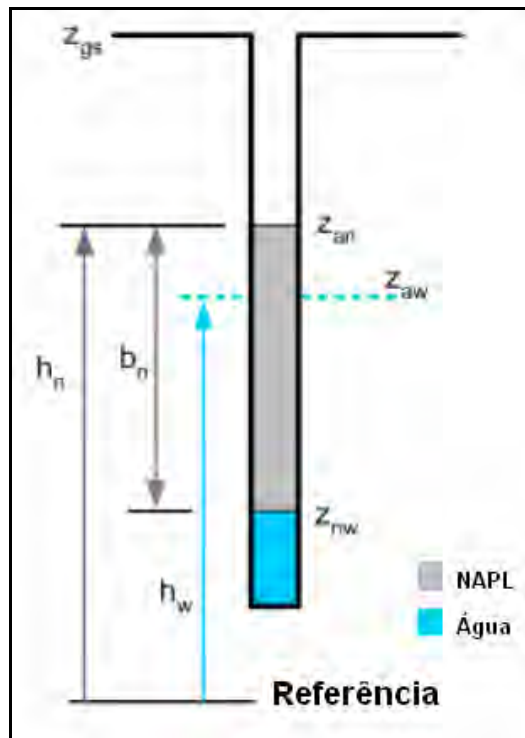


Figura 10 - Poço de monitoramento com a presença de LNAPL (modificado de CHARBENEAU, 2007).

Para o esquema da Figura 10, a pressão capilar da equação (6) resultará:

$$P_{c[nw]} = (\rho_w - \rho_n)g(z - z_{nw}) \quad (\text{Equação 14})$$

Adicionalmente, pode-se introduzir o conceito de densidade relativa que é definida por:

$$\rho_r = \frac{\rho_n}{\rho_w} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde ρ_n e ρ_w são as densidades do LNAPL e água respectivamente

Esta equação, substituída na equação (14) resultará:

$$h_{nw} = \frac{P_{c[nw]}}{\rho_w g} = (1 - \rho_r)(z - z_{nw}) \quad (\text{Equação 16})$$

Nesta equação, h_{nw} , representa a carga de pressão devido a efeitos capilares para a interface LNAPL-água.

De forma similar, substituindo (15) na equação (13) têm-se:

$$h_{an} = \frac{P_{c[an]}}{\rho_w g} = \rho_r (z - z_{an}) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde h_{an} , representa a carga de pressão devido a efeitos capilares para a interface ar-LNAPL.

3.6 – Grau de Saturação de Sistemas Multifásicos a partir de Poços de Monitoramento

O grau de saturação dos fluidos no meio poroso pode ser determinado a partir do monitoramento de um poço, relacionando a pressão capilar e curvas características dos fluidos presentes nesse meio.

Segundo Charbeneau (2007), a equação (04) proposta por van Genuchten (1980) pode ser empregada para este objetivo. Assim, pode ser reescrita para representação da saturação de um sistema composto por LNAPL e água resultando:

$$S_{e[w]} = (1 + (\alpha_{[nw]} h_{[nw]})^N)^{-M} \quad (\text{Equação 18})$$

Nesta equação, $S_{e[w]}$, representa a saturação efetiva da água e que para fluxo multifásico, inclui a saturação residual do LNAPL (S_{nr}) resultando:

$$S_{e[w]} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{nr}} \quad (\text{Equação 19})$$

α_{nw} corresponde ao parâmetro de ajuste da equação (04) modificado para o sistema multifásico (composto por LNAPL-água) e é dado por:

$$\alpha_{nw} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{nw}} \alpha \quad (\text{Equação 20})$$

No entanto, o produto $\alpha_{[nw]}h_{[nw]}$ da equação (18) pode ser rearranjado convenientemente (levando em consideração a expressão 16) e cada componente do produto pode ser expresso por:

$$\alpha_{nw} = (1 - \rho_r) \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{nw}} \sigma \quad (\text{Equação 21})$$

$$h_{[nw]} = (z - z_{nw}) \quad (\text{Equação 22})$$

σ_{aw} e σ_{nw} representam as tensões interfaciais ar-água e LNAPL-água respectivamente. z_{nw} corresponde à altura de posição da interface LNAPL-água, respectivamente (Figura 10).

Ainda na equação (18), os parâmetros N e M são os mesmos obtidos para a interface ar-água. Isto porque, apesar de N estar associado à distribuição dos poros, assume-se que, esta distribuição não é modificada pela presença de outros fluídos. Por outro lado, similar à equação (18), a expressão proposta por van Genuchten (1980) pode ser empregada também para representação da saturação de um sistema ar-LNAPL, da forma seguinte:

$$Se_{[t]} = (1 + (\alpha_{[an]} h_{[an]})^N)^{-M} \quad (\text{Equação 23})$$

Nesta equação, $Se_{[t]}$, representa a saturação efetiva para os fluídos envolvidos e que é expresso por:

$$S_{e[t]} = \frac{S_w + S_n - S_{wr} - S_{nr}}{1 - S_{wr} - S_{nr}} \quad (\text{Equação 24})$$

S_n , corresponde à saturação do LNAPL e α_{na} corresponde ao parâmetro de ajuste da equação (04), porém modificado para a interface LNAPL-água, α_{an} é expresso por:

$$\alpha_{an} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{an}} \alpha \quad (\text{Equação 25})$$

Similar à equação (20), o produto $\alpha_{[an]}h_{[an]}$ da equação (23) pode ser rearranjado convenientemente (levando em consideração a expressão 17) e cada componente do produto pode ser expresso por:

$$\alpha_{an} = \rho_r \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{an}} \alpha \quad (\text{Equação 26})$$

$$h_{[nw]} = (z - z_{an}) \quad (\text{Equação 27})$$

σ_{na} representa a tensão interfacial ar-LNAPL. z_{an} corresponde à altura de posição da interface ar-LNAPL (Figura 10).

A saturação da água contendo uma parcela residual de LNAPL nos poros pode ser obtida a partir da equação (19), mediante a seguinte expressão:

$$S_w(z) = S_{wr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})S_{e[w]}(z) \quad (\text{Equação 28})$$

Já a saturação do LNAPL, pode ser obtida pelas expressões abaixo:

Para elevações $z < z_{an}$;

$$S_n(z) = 1 - S_w(z) \quad (\text{Equação 29})$$

Para elevações $z > z_{an}$ e a partir das equações (19) e (24) tem-se:

$$S_n(z) = S_{nr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})(S_{e[t]} - S_{e[w]}) \quad (\text{Equação 30})$$

Adicionalmente, a altura máxima da franja capilar do LNAPL (z_{max}), pode ser determinada a partir da relação entre as equações (18) e (23), o que resulta:

$$Z_{\max} = \frac{\alpha_{an} Z_{an} - \alpha_{nw} Z_{nw}}{\alpha_{an} - \alpha_{nw}} \quad (\text{Equação 31})$$

3.7 – Quantificação do Volume Específico e do Volume Específico Recuperável da Fase Livre

A quantidade de fase livre existente no meio poroso pode ser recuperada empregando-se métodos de remediação adequados. No entanto, a quantidade a ser recuperada por estas tecnologias será possível quando a saturação do LNAPL for superior à residual.

Desta forma, o volume específico de LNAPL (D_n) pode ser determinado a partir da medição de sua espessura no poço de monitoramento, a partir da equação seguinte:

$$D_n(b_n) = \int_{z_{nw}}^{z_{\max}} n S_n(z) dz \quad (\text{Equação 32})$$

Nesta equação, n representa a porosidade total do meio poroso.

O volume recuperável (R_n) de LNAPL pode ser determinado pela equação anterior, porém descontando-se o volume residual. Assim tem-se:

$$R_n(b_n) = \int_{z_{nw}}^{z_{\max}} n (S_n(z) - S_{nr}(z)) dz \quad (\text{Equação 33})$$

3.8 – Migração Lateral do LNAPL

Um importante fator de risco associado à presença de LNAPL no meio poroso é o potencial de migração até um receptor. A migração lateral do LNAPL é um fenômeno altamente complexo e continua sendo objeto de estudo de diversos pesquisadores (API, 2004).

No início de um vazamento, o LNAPL migra sob a influência da gravidade no meio não saturado deslocando o ar e saturando os poros vazios. O óleo é continuamente trapeado no solo enquanto migra verticalmente, diminuindo a sua mobilidade. Ao atingir a franja capilar o LNAPL começa a deslocar a água presente

no meio poroso. O potencial de o óleo atingir o nível d'água torna-se função do volume do vazamento, da espessura da zona não saturada e da litologia da área.

Para migrar lateralmente em meios porosos o LNAPL tem de deslocar, próximo ao nível d'água, tanto a água quanto o ar. É necessária uma pressão capilar positiva (coluna de LNAPL) para que o fluido não molhante (LNAPL) desloque o fluido molhante (água) do meio poroso. Ao mesmo tempo, o LNAPL age como fluido molhante deslocando o ar do meio poroso. O gradiente de pressão capilar criado faz com que o LNAPL migre para a porção do meio poroso preenchida por ar, gerando uma capilar de óleo acima do nível d'água (CHARBENAU, 2007).

Em litologias de granulometria fina, a pressão capilar de entrada necessária é alta, fazendo com que o LNAPL migre por litologias mais arenosas onde os poros são maiores e a pressão capilar necessária para deslocamento do fluido molhante pelo não molhante é menor. Quando a pressão a montante de LNAPL não é suficiente para deslocar na borda a água no meio poroso, a pluma para de migrar lateralmente.

3.9 – Flutuação do Nível da Água

A flutuação do nível d'água em função da recarga/descarga do aquífero é um importante fator no entendimento do comportamento de uma pluma de LNAPL. A natureza transiente da flutuação afeta a espessura do LNAPL no poço de monitoramento, bem como a mobilidade, estabilidade e remediação da pluma (API, 2004).

Kemblowski & Chiang (1990) observaram variações na espessura de fase livre em um poço de monitoramento instalado em um aquífero arenoso, em resposta a mudanças da superfície freática. Observaram que a espessura de óleo diminuía com a subida do nível d'água e aumentava com a descida.

Segundo API (2004), o movimento ascendente do nível d'água faz com que o LNAPL seja deslocado pela água no meio poroso (processo de embebição). Parte do óleo é trapeado nos poros maiores na forma de gotas isoladas (Figura 11). O movimento ascendente faz com que o LNAPL se torne residual em partes superiores do meio poroso. Durante este processo observa-se uma diminuição da espessura de

fase livre nos poços de monitoramento e em alguns casos ocorre o desaparecimento total.

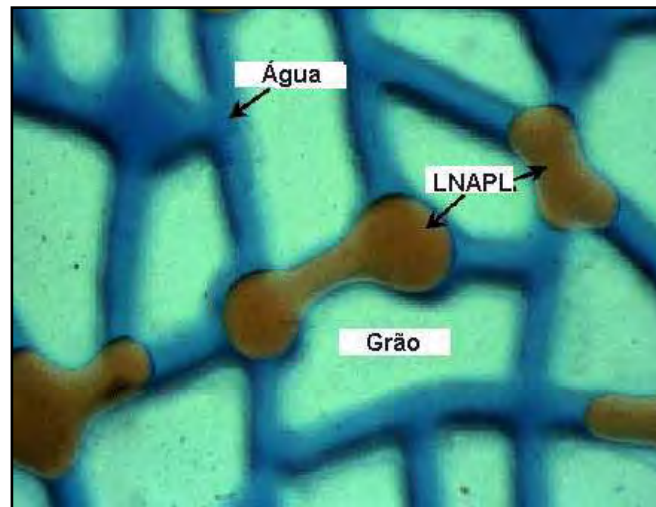


Figura 11 - Fenômeno de trapeamento de óleo no meio poroso (API, 2004)

Quando o nível d'água desce parte do LNAPL permanece preso pelas forças capilares na zona não saturada na forma residual. Parte do LNAPL anteriormente trapeado torna-se móvel, aumentando a espessura de fase livre no poço de monitoramento.

A resultante vertical do movimento do nível d'água gera uma fase residual tanto na porção não saturada quanto na porção saturada do aquífero. O contínuo processo de variação sazonal do nível d'água faz com que a espessura da lâmina de fase livre, presente no poço de monitoramento, não entre em equilíbrio vertical com a formação, prejudicando a avaliação da saturação e o volume de LNAPL presente no meio poroso. O fenômeno cíclico de variação do nível d'água faz com o LNAPL tenha uma maior área de contato com a água subterrânea, aumentando a fase dissolvida (RATNAM *et al.* 1996).

Segundo Pacher *et al.* (1995), a fase residual de LNAPL resultante do movimento vertical do nível d'água é menor na porção não saturada, onde os poros são ocupados por ar, LNAPL e água, e maior na zona saturada, onde a água e o LNAPL ocupam completamente o meio poroso. Na zona não saturada, a fase residual varia de 3 a 7% e, na zona saturada, de 5 a 25%. Para Mercer & Cohen (1990), a saturação residual de LNAPL varia de 10 a 20 % na zona não saturada.

Para Charbenau (2000), a distribuição do LNAPL no meio poroso na zona não saturada é influenciada pelo sistema trifásico, onde a água é o fluido molhante, o ar

é o fluido não molhante e o LNAPL possui molhabilidade intermediária. No sistema trifásico o LNAPL pode espalhar como um filme de óleo entre as fases de ar e água.

Segundo Adamson (1982), o coeficiente de espalhamento Σ (equação 34) possibilita medir a tendência de espalhamento do LNAPL entre a interface ar-água.

$$\Sigma = \sigma_{aw} - (\sigma_{nw} - \sigma_{an}) \quad (\text{Equação 34})$$

Nesta equação σ_{aw} , σ_{nw} e σ_{an} representam as tensões interfaciais ar-água, LNAPL-água e ar LNAPL, respectivamente. Caso $\Sigma > 0$ o LNAPL se espalhará através da interface ar-água. Se o valor $\Sigma < 0$, o LNAPL ficará preso na interface ar-água.

Em países de clima tropical como o Brasil, os fenômenos climáticos tais como EL Niño e La Niña (CPTEC, 2008) afetam os regimes de chuva, alterando as taxas de recarga de aquíferos rasos.

Os fenômenos de variação do nível d'água em aquíferos rasos são poucos estudados no Brasil. Entre os poucos trabalhos existentes, destaca-se o de Carnier Neto (2006), que monitorou um poço instalado na Formação Rio Claro, no período de setembro de 2001 a março de 2006 (Figura 12). O poço de monitoramento apresentava nível d'água inicial de 7,70 m.

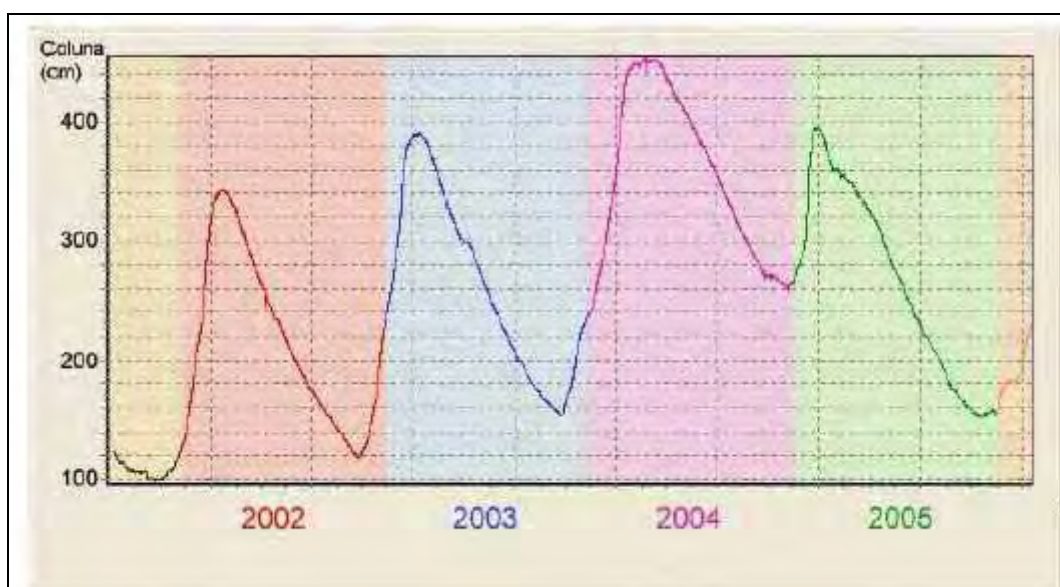


Figura 12 – Variações sazonais do aquífero Rio Claro (CARNIER NETO, 2006).

Carnier Neto (2006) observou os ciclos sazonais de recarga e descarga do aquífero resultante das variações pluviométricas anuais. O valor máximo de coluna aumentou, a cada ciclo, em 2002, 2003 e 2004, voltando a cair em 2005 (Figura 12). A variação de 3,5m na coluna d'água, no período de setembro de 2001 (mínima) a março de 2004 (máxima), mostrou a importância do monitoramento de longo prazo, necessário para o entendimento do comportamento dos aquíferos rasos.

3.10 – Recarga

Em uma área contaminada, as estimativas de recarga auxiliam no entendimento dos processos que governam o fluxo de água subterrânea, bem como os processos de trapeamento de LNAPL e remediação.

O conceito de recarga refere-se aos processos onde a água move-se até a porção saturada do aquífero, a partir de qualquer direção (LERNER, 1997).

O nível d'água em aquíferos livres oscila em resposta aos inúmeros fenômenos, tais como aqueles de natureza antrópica (irrigação, bombeamento, fuga de água do sistema de abastecimento público) e flutuações sazonais naturais da precipitação e evapotranspiração induzidas por variações climáticas ao longo do ano.

Segundo Lerner *et al* (1990), existem diversas metodologias para estimativas de recarga, tais como: datação, testes isotópicos, traçadores com cloreto, uso de lisímetros, balanço hídrico e diversos métodos adaptados a partir do fluxo darciano. Alguns destes métodos possuem abrangência pontual até regional. O emprego destes métodos é dependente da escala de trabalho e da natureza dos dados disponíveis.

O método de flutuação da superfície livre, conhecido como WTF (*water table fluctuation*) é o mais difundido e empregado para estimativas de recarga em escala local. Este método analisa as flutuações da superfície freática em poços de monitoramento.

A vantagem do método WTF é sua simplicidade e facilidade de utilização, não sendo necessário assumir pressuposições sobre os mecanismos pelos quais a água percola a zona não saturada (HEALY & COOK, 2002).

Segundo Healy & Cook (2002), o método WTF é baseado na premissa de que as elevações de carga hidráulica em aquíferos livres são devidas aos processos de recarga, sendo expressa pela equação (35). O método assume que a água que é adicionada ao aquífero, pelo processo de recarga, é imediatamente acrescentada ao armazenamento e os demais componentes do fluxo subterrâneo, tais como evapotranspiração, fluxo de base, e o influxo e afluxo de água subterrânea, são nulos.

$$R = S_y dh / dt = S_y \Delta h_R / \Delta t \quad (\text{Equação 35})$$

R é a recarga em cm e S_y é o valor da porosidade específica. A extrapolação gráfica da curva de recessão permite a obtenção do valor (Δh_R) e Δt (Figura 13).

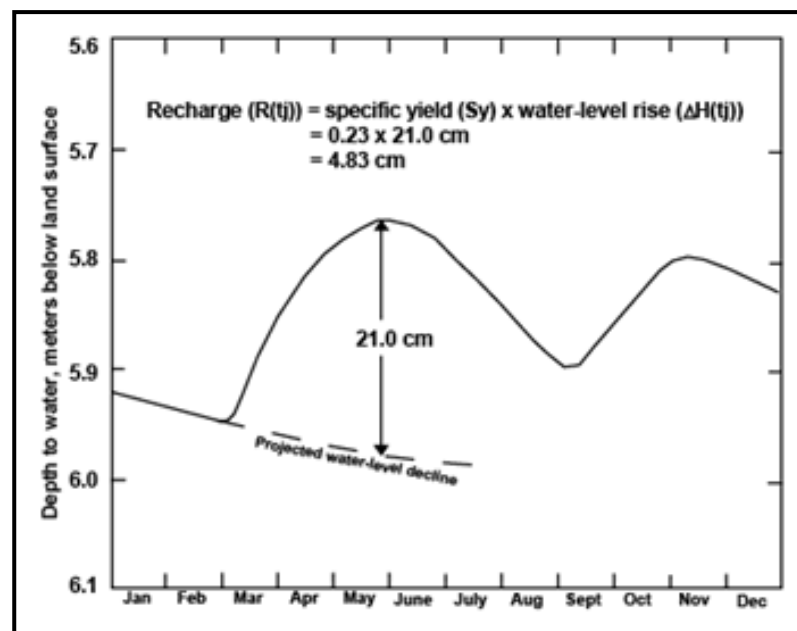


Figura 13 – Gráfico correspondente ao método WTF, para estimativa de recarga (Fonte: USGS, 2008).

A principal limitação deste método, apontada por Delin *et al.* (2007), está relacionada à frequência do monitoramento do nível d'água. Esses autores

demonstram que o erro na estimativa de recarga cresce significativamente com o espaçamento nos períodos de medição dos níveis d'água.

3.11 – Remediação

A presença de LNAPL na forma de fase separada em subsuperfície atua como fonte ativa de contaminação da água subterrânea (MARINELLI & DUNFORD, 1996). Embora o arcabouço geológico e a sazonalidade da variação do nível d'água limitem o movimento da pluma de fase livre e os processos de atenuação natural limitem a migração da pluma de fase dissolvida, deve ser considerado inicialmente, em qualquer projeto de remediação, a remoção da fase livre. Portanto, fica evidente que a remoção do LNAPL na forma de produto puro é mais eficiente do que a remoção na forma de fase dissolvida.

Segundo API (2004), as áreas contaminadas podem ser classificadas em três categorias de mobilidade e estabilidade da pluma de fase livre, a saber:

1. O LNAPL não é móvel;
2. O LNAPL é potencialmente móvel, mas a pluma de fase livre está estabilizada;
3. O LNAPL é móvel e a pluma de fase livre migra.

A primeira categoria reflete a presença de óleo residual no meio poroso, demandando métodos de remediação que busquem a remoção da massa de LNAPL da fase residual. Os poços de monitoramento com o óleo demoram dias ou meses após a retirada para retornar à condição de equilíbrio vertical.

A segunda categoria está relacionada à presença de óleo móvel no interior da pluma de fase livre, demandando métodos de remediação que promovam a retirada do mesmo. Nesta condição, a pluma de fase livre não migra, permitindo melhor planejamento do processo de remediação.

A terceira categoria é a de maior risco e envolve a necessidade imediata de intervenção, com a instalação de poços de bombeamento na borda da pluma para contenção da mesma, por meio do controle hidráulico. Esta situação ocorre quando a fonte de LNAPL permanece ativa.

3.11.1 – Métodos de Remediação da Fase Livre e Residual

Vários métodos de remediação foram desenvolvidos para remoção do LNAPL da sub-superfície. As tecnologias podem recuperar o óleo de forma passiva ou ativa (API, 2004).

A forma passiva de recuperação relaciona-se ao gradiente natural de óleo, sendo coletado por meio de *bailers*, *skimmers* e trincheiras com *skimmer*. Na forma passiva não ocorre à extração de água. Na Tabela 2 estão descritos os métodos passivos.

Tabela 2 – Técnicas de remediação passiva (API, 2004).

| Método | Descrição | Aplicabilidade |
|----------------------------------|---|---|
| <i>Bailer</i> | O hidrocarboneto é recuperado manualmente do poço por meio de um cilindro de metal ou plástico com válvula de pé, sem a extração de água. | Devido à limitada área de influência do sistema, baixos volumes de produto são removidos. Geralmente utilizado em litologias finas, situação em que o tempo de equilíbrio da fase livre é longo, ou onde a presença de óleo reflete a saturação residual. |
| <i>Skimmer</i> | O hidrocarboneto é recuperado do poço utilizando-se bomba hidrofóbica, sem a extração de água. | Devido à limitada área de influência do sistema, baixos volumes de produto são removidos. Geralmente utilizado em poços instalados no centro de plumas de fase livre que não migram. |
| <i>Skimmer</i> em trincheiras | O hidrocarboneto é recuperado de trincheiras, utilizando-se <i>skimmer</i> ou cinta hidrofóbica, sem a extração de água. | Geralmente utilizado em situações de emergências, quando o LNAPL é móvel e a pluma migra. Ideal para litologias de baixa condutividade hidráulica e nível d'água inferior a 5 metros. |

No Brasil, a remediação por meio de *bailers* é usada em postos de combustível onde a presença de fase livre reflete apenas a saturação residual e o óleo não é móvel. Esta técnica é de baixo custo quanto ao equipamento, mas necessita do uso de mão de obra. Na África do Sul, Sole (2004) relata a remediação emergencial de uma pluma de querosene de aviação com o uso de *bailers*. Segundo o autor de abril de 2001 a novembro de 2003 foram recolhidos manualmente 380.000 litros de querosene.

Segundo Charbeneau (1999), a forma ativa de remediação envolve a recuperação da fase livre por meio de bombeamento que promove um gradiente de óleo e água aumentando a taxa migração do óleo para o poço de remediação. O bombeamento pode ser realizado utilizando-se bombas pneumáticas e elétricas submersas e bombas de superfície. Outra forma de bombeamento é através do uso de bombas de vácuo.

O bombeamento através de bomba submersa provoca o rebaixamento do nível d'água induzindo a migração do óleo para o poço. Esta técnica de remediação é utilizada onde o controle hidráulico da pluma de fase livre e/ou dissolvida é necessário. A recuperação de óleo somente é possível se o óleo estiver móvel na pluma. De maneira geral, este tipo de remediação necessita de poços de 4 polegadas de diâmetro.

Durante o bombeamento, água e óleo são retirados e a emulsão é enviada para caixa separadora (Figura 14). Na caixa separadora, placas coalescentes agregam as gotas de óleo formando uma fase separada de óleo sobrenadante que é recolhida internamente por um *skimmer* horizontal, ligado a um recipiente de armazenamento externo. A emulsão restante é enviada para tratamento. Este processo de remediação pode gerar grandes volumes de água subterrânea contaminada, com altos custos de tratamento.

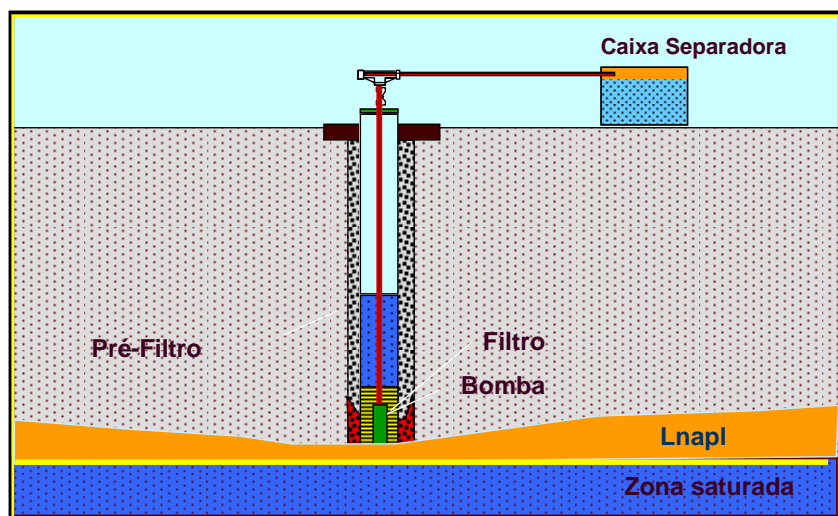


Figura 14 - Bombeamento de fluidos totais.

Segundo API (2004), a principal limitação do uso do sistema de bombeamento é que o rebaixamento excessivo do nível d'água ocasionará, em porções inferiores do aquífero, o trapeamento da fase livre gerando fase residual. O aumento do volume de contaminantes na forma residual gerará, em contato com a água subterrânea, maiores volumes de água contaminada por meio de processos de dissolução. Portanto, deve-se estabelecer valores máximos de vazão de bombeamento, pela observação do rebaixamento do nível d'água nos poços de monitoramento vizinhos.

Outro sistema ativo de remediação, que utiliza a técnica de bombeamento, é o MPE (Multi Phase Extraction), ou equipamento de extração multifásica (Pede, 2008). Este equipamento utiliza bomba de vácuo para bombeamento através de tubulação instalada no interior dos poços de remediação. Este sistema é capaz de recuperar vapor, óleo e água, atuando também na zona não saturada, retirando o óleo residual e aumentando os processos de biorremediação através do aumento do teor oxigênio. Este tipo de sistema apresenta melhor eficiência para profundidade do nível de óleo inferior a 7,0 m. O MPE pode utilizar a rede de poços de monitoramento de duas polegadas para bombeamento. Atualmente no Brasil este tipo equipamento é amplamente utilizado em projetos de remediação, principalmente em postos de combustível.

O processo de remediação da fase livre proporciona, mediante as melhores condições, a recuperação de somente uma fração do total de hidrocarbonetos

infiltrados no meio geológico. As taxas de recuperação variam, segundo API (2004), entre 20 e 60 % do volume total infiltrado. Portanto, a remediação da fase residual deverá ser considerada na maioria dos sítios contaminados. As tecnologias de remediação da fase residual estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Técnicas de remediação LNAPL residual (API, 2004).

| Método | Descrição | Aplicabilidade |
|-------------------------------------|--|---|
| Atenuação Natural Monitorada | Método passivo que necessita dos processos naturais para degradação dos hidrocarbonetos | Técnica de baixo custo, que usa dados geoquímicos para evidenciar a atenuação natural. Concentrações de oxigênio, nitrato, Ferro II e metano são medidas. |
| Bioventilação | O processo de bioventilação promove o aumento do nível de oxigênio, acelerando o processo de biodegradação. | Técnica utilizada na zona não saturada para biodegradação de compostos pouco voláteis (diesel). |
| Escavação | O hidrocarboneto residual é escavado e retirado de solos rasos. Aplicado para zona não saturada. | Técnica limitada à profundidade da contaminação. Necessita de tratamento posterior. Alto custo para grandes volumes de solo. |
| <i>SVE (Soil Vapor Extraction)</i> | O SVE promove, pela utilização de bomba de vácuo, a remoção de vapores voláteis. | Técnica aplicada na zona não saturada. Os vapores extraídos necessitam ser tratados. |
| <i>Air Sparging</i> (injeção de ar) | O processo consiste na injeção de ar na zona saturada, promovendo o particionamento da fase dissolvida para vapor. | Técnica eficiente na remoção de compostos voláteis da zona saturada. Deve ser associada ao uso de SVE |

3.12 – Casos de Remediação de Fase Livre

Apesar da importância, são poucos os estudos que tratam de áreas contaminadas com a presença de fase livre de hidrocarbonetos. Destacam-se os trabalhos realizados nos Estados Unidos, devido ao grande número de refinarias

antigas, muitas vezes abandonadas, impactadas por grandes volumes de hidrocarbonetos.

Mazalan *et al.* (1997) mostraram os resultados de uma investigação detalhada de uma refinaria fechada em Cincinnati, Ohio, onde, após doze anos de remediação, a recuperação de LNAPL diminuiu drasticamente. Através de três poços de bombeamento foram recuperados, neste período, cerca de 11,8 milhões de litros de gasolina e diesel, com volume diário de água bombeado de 18 milhões de litros. Com o uso da técnica direta de investigação LIF (fluorescência induzida a laser), os autores mostraram que a maior saturação de LNAPL encontrava-se trapeada entre 7 e 8 metros abaixo do nível d'água da época. A explicação para tal profundidade era a variação do nível d'água ao longo dos anos.

Wickland *et al.* (2000) descrevem o caso de uma refinaria construída em 1920, no estado do Texas, que possuía uma pluma de fase livre que abrangia área de 1 milhão de metros quadrados. A remediação realizada no período de 1982 a 1999 recuperou cerca de 30 milhões de litros de LNAPL. A grande dificuldade nesta área foi a profundidade da superfície freática, que varia de 24 a 57 m. Em 1999, após a realização de diversos ensaios em campo e laboratório, os autores do trabalho concluíram que a saturação de óleo medida em laboratório era menor que modelo proposto por Lenhard & Parker (1990). A principal explicação seria a perda de LNAPL durante a coleta das amostras de solo. Com base na espessura de óleo, nos parâmetros físicos do solo e nas características do óleo simularam volume recuperável restante de 30,6 milhões de litros de LNAPL.

Himmelstein *et al.* (2006) apresentam os resultados do teste piloto de remediação, realizado em uma antiga refinaria no sul da Califórnia. Investigações geológicas prévias mostraram que, em função da subida do nível d'água, 70 % da massa total de LNAPL estava submersa até 12 metros abaixo do nível d'água à época da investigação. Os autores concluíram que as técnicas de rebaixamento do NA., extração de vapores (SVE) e injeção de ar (*air sparging*) não apresentaram valores satisfatórios dado o limitado raio de influência dos métodos e a complexidade do meio impactado.

4 – METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho compreendeu as fases de revisão bibliográfica, realização de trabalhos no campo, coleta periódica de dados e, finalizando, a fase de tratamento e análise dos dados obtidos.

4.1 – Revisão Bibliográfica

Nesta fase realizou-se o levantamento dos principais trabalhos científicos e teses de hidrogeologia e geologia relacionados à área de estudo. A revisão bibliográfica estendeu-se também aos métodos, normas técnicas de campo e laboratoriais utilizados nesta tese.

4.2 – Delimitação e Acompanhamento da Pluma de Fase Livre

4.2.1 – Instalação de Poços de Monitoramento e Bombeamento

Na investigação ambiental de áreas suspeitas de contaminação, poços de monitoramento são instalados com o propósito de se obter amostras quimicamente representativas da água dos aquíferos estudados, observar a possível presença de fase livre de óleo, permitir a caracterização das propriedades hidrogeológicas e monitorar a variação sazonal do nível d'água.

Na área de estudo, a instalação dos poços de monitoramento seguiu a norma NBR 13.895 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Parte dos poços de monitoramento e a totalidade dos poços de bombeamento foram perfurados e instalados com equipamento tipo *hollow stem auger*, basicamente constituído por uma sonda rotativa montada em caminhão que utiliza trados ocos do tipo helicoidal com piloto interno (Foto 1). Esse tipo de equipamento possui inúmeras vantagens, tais como: rapidez na perfuração, manutenção do furo sem desmoronamentos, amostrar de forma contínua o solo e facilitar a descida da coluna de revestimento e a injeção do pré-filtro no poço. O diâmetro das perfurações variaram de 7 ½” a 15”.

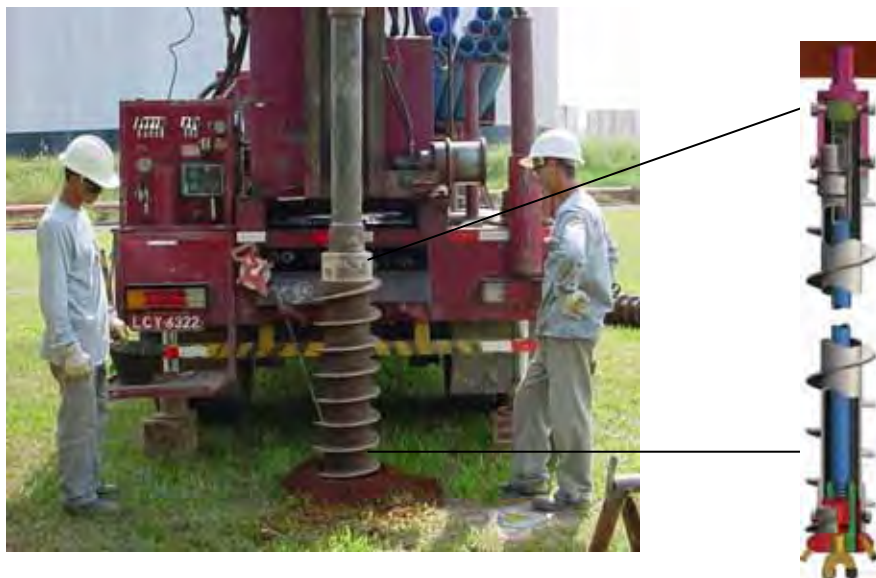


Foto 1 - Caminhão com equipamento do tipo hollow stem auger, no detalhe desenho do trado oco.

Em áreas de difícil acesso optou-se pela utilização de trado manual e tripé. O trado é constituído por uma concha metálica dupla acionada por hastes rosqueáveis e cruzeta. O diâmetro de perfuração foi de 4”.

Para revestimento dos furos foi utilizado tubo geomecânico do tipo nervurado com diâmetro interno útil de 2”. O filtro, constituído do mesmo material e mesmo

diâmetro, possui ranhuras transversais de 0,50 mm de espessura para passagem da água.

O espaço anelar entre o furo da sondagem e a parede externa do tubo de revestimento foi preenchido com pré-filtro do tipo pérola, constituído por grãos de areia de granulometria variando de 1 a 2 mm. O pré-filtro foi colocado até um metro acima da ranhura superior do filtro.

Na porção anelar, acima do pré-filtro, foi colocado aproximadamente 1 metro de bentonita pelotizada e, acima desta, calda de cimento completando o furo até a superfície. Na porção superior do poço foi colocado tampa de pressão no tubo de revestimento com cadeado, sobreposto por uma câmara de calçada de ferro ou alumínio. Em volta da boca do poço, uma laje de cimento de 50 cm de largura funciona como proteção sanitária.

De acordo com norma vigente, os poços de monitoramento foram perfurados e instalados de maneira a possibilitar a presença de no mínimo dois metros de coluna água. Na investigação de contaminantes menos densos que a água (LNAPL), os filtros estendem-se acima do nível d'água, relativo ao período das chuvas.

Para obtenção de dados hidráulicos e hidrogeoquímicos em profundidade, ao longo da zona saturada, foram instalados poços multi-níveis em diferentes profundidades, com seção filtrante de um metro, completados com pré-filtro e selo, delimitando assim o campo de ação de cada filtro.

Após a instalação dos poços de monitoramento, foi realizado seu desenvolvimento para retirada de detritos finos gerados pela perfuração. O desenvolvimento adequado dos poços de monitoramento é importante para permitir a efetiva conexão hidráulica entre a porção filtrante dos poços e o aquífero.

Os poços de bombeamento foram perfurados utilizando trado de 15 polegadas de diâmetro, o que proporcionou espaço anular adequado para preenchimento do envoltório do poço com pré-filtro. Nos furos foram instalados tubos e filtros, tipo geomecânico de 4" de diâmetro. A Figura 15 mostra esquematicamente o perfil construtivo dos poços de bombeamento.

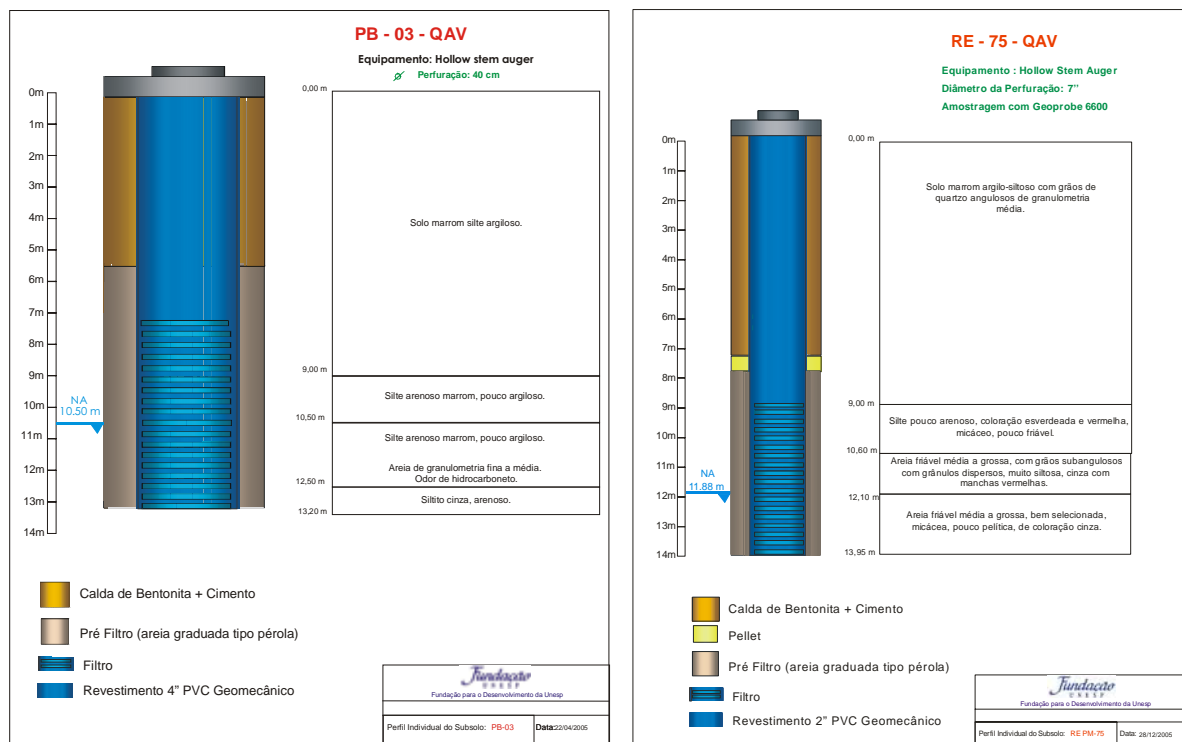


Figura 15 - Desenho esquemático do poço de bombeamento (A) e monitoramento (B).

4.2.2 – Caracterização da Geologia Local

Na área estudada foram realizadas amostragens contínuas utilizando equipamento tipo Geoprobe (Foto 2). Este equipamento permite a amostragem do substrato geológico com uso de *liners* de plástico inseridos no interior do amostrador (Foto 3). A amostra presente no interior dos *liners* permite identificar, de maneira adequada, a profundidade dos diversos litotipos presentes, bem como a presença de contaminantes voláteis e óleo.

Em áreas onde não foi possível a utilização do Geoprobe, a descrição das amostras foi feita a partir do material retirado da concha do trado.

A descrição litológica dos furos foi realizada *in situ*, levando-se em conta os aspectos texturais, mineralógicos e de cor das amostras obtidas durante perfuração. Amostras de solo foram selecionadas de determinados intervalos para análise granulométrica e de densidade em laboratório.



Foto 2 - Geoprobe com amostrador.



Foto 3 - Amostrador e Liners.

4.2.3 – Monitoramento do Nível D`Água e Fase Livre

Logo após a instalação dos primeiros poços de monitoramento, iniciou-se, em setembro de 2003, a medição quinzenal dos poços de monitoramento. À medida que novos poços eram instalados, os mesmos eram adicionados à malha de monitoramento. O equipamento utilizado foi o medidor tipo *interface*, da marca *Solinst*, que permitiu, com precisão milimétrica, medir a profundidade do nível d`água bem como a profundidade do topo do óleo. Esses dados foram utilizados na confecção de mapas potenciométricos, de fluxo e de distribuição e espessura da fase livre. Para confecção desta tese foram utilizados os dados do período entre setembro de 2003 e o final do mês de dezembro de 2008, totalizando 63 meses de monitoramento.

4.2.4 – Teste de Slug

A determinação precisa dos valores de condutividade hidráulica é necessária para estimar a velocidade de fluxo da água subterrânea no cálculo das taxas de transporte dos contaminantes, na análise de risco das áreas impactadas e no esboço dos métodos de remediação.

Os testes de *slug* são utilizados em hidrogeologia para determinar a condutividade hidráulica (K) dos aquíferos. Os testes são de rápida realização, baixo custo e com a principal vantagem, em relação aos testes de bombeamento, de não gerar água potencialmente contaminada.

Na prática, o teste de *slug* consiste em introduzir ou retirar um cilindro sólido (*slug*) de pequeno diâmetro de dentro de um poço de monitoramento, de forma que o nível d'água (NA) no poço seja elevado ou rebaixado quase instantaneamente. Este volume deslocado equivale à adição ou à retirada de água do aquífero e é igual ao volume do *slug*. Medindo-se a subida/descida do NA, com o tempo, obtêm-se valores que, juntamente com as características geométricas do poço e utilizando-se o método de análise adequado, fornecem o valor de condutividade hidráulica nas imediações do poço de monitoramento ensaiado.

Para realização dos ensaios na área de estudo, seguiu-se a metodologia proposta por Pede (2004). O sólido utilizado foi um cilindro de *nylon* de 1”3/8 de diâmetro e 1,0 m de comprimento. O volume do tarugo é igual a 983 cm³ (1 litro aproximadamente), correspondendo a um deslocamento do NA de 48 cm em um tubo liso de 2”. O monitoramento do deslocamento da água durante os ensaios foi efetuado por meio de um transdutor marca DRUCK, modelo PTX 1830, com correção automática de barometria acoplado a um *notebook*. A leitura, o armazenamento e a análise dos ensaios foram efetuados automaticamente, utilizando o *software* WinSlug®.

O método utilizado no presente estudo para interpretar os dados de testes de *slug* foi o de Hvorslev (1951).

A determinação da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951), é efetuada pela seguinte fórmula :

$$K = \frac{r_c^2 \ln(L_e / R)}{2L_e T_0} \quad \text{(Equação 36)}$$

Onde:

K = condutividade hidráulica [L/T]

r_c = raio do revestimento [L]

R = raio do poço [L]

L_e = comprimento do filtro saturado [L]

T_o = tempo de resposta (37 % da recuperação) [T]

4.3 – Determinação das Curvas de Pressão Capilar para o Sistema Água-Ar no Meio Poroso

Para realização dos ensaios de determinação das curvas de pressão capilar, foram retirados corpos de prova provenientes de três blocos indeformados, escavados a partir de afloramentos com material livre de contaminação e potencialmente representativos dos diferentes tipos litológicos impactados por hidrocarbonetos na área estudada. A Foto 4 mostra a retirada de um corpo de prova para ensaio de curva de pressão capilar.



Foto 04 - Retirada das amostras para ensaio de curva de pressão capilar.

Os métodos empregados para determinação da curva de pressão capilar foram o da translação de eixos e o do papel filtro, segundo os procedimentos sugeridos em Alfaro Soto (2004). O primeiro método foi empregado nas amostras

friáveis (Arenito Argiloso/Siltoso) ou muito friáveis, como o caso do Areia Grossa em que a manipulação das amostras durante os ensaios é limitada.

O método do papel filtro foi o mais adequado para o argilito, pois mantém a amostra coesa e intacta. Este ensaio permite maior rapidez na obtenção dos dados e a medição de valores mais elevados de pressão capilar.

As curvas de pressão capilar foram realizadas pelo processo de secagem. Para iniciar os ensaios a partir da condição de saturação, os corpos de prova (de 5,0 cm de diâmetro e 2,2 cm de altura para o método de translação de eixos, e de 5,0 cm de diâmetro e 1,0 cm de altura para o método de papel filtro) foram colocados assentes numa placa porosa e imersos parcialmente em água destilada. O tempo de imersão para as amostras foi de 24 horas. Os procedimentos para cada método de ensaio executado são descritos a seguir.

4.3.1 – Método de Translação de Eixos (Câmara de pressão de Richards)

Para utilização deste método foi empregada uma câmara de pressão de Richards desenvolvida para este fim no Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), UNESP-Rio Claro. A Foto 05 mostra um esquema da câmara utilizada e seus componentes.



Foto 05 - Câmara de pressão de RICHARDS para determinação da curva de pressão capilar desenvolvida no LEBAC - UNESP.

Uma vez saturados, os corpos de prova foram colocados assentes na placa porosa dentro da câmara de pressão, sendo que esta placa foi previamente saturada

por imersão durante 24 horas, em água destilada, bem como os dutos de comunicação internos da câmara desde a placa até a torneira de saída de água.

Segundo a técnica de translação de eixos, as magnitudes de pressão de ar aplicadas são equivalentes aos valores de pressão capilar. Assim, para o processo de secagem as pressões de ar comprimido aplicadas foram crescentes, com a finalidade de expulsar a água contida no solo a partir da saturação.

Para cada pressão aplicada, foi necessário o monitoramento para estabelecimento do equilíbrio de potenciais (controlado por meio da pesagem sucessiva de cada corpo de prova). O equilíbrio de potenciais ocorreu quando o peso da amostra tornou-se invariável e, nesse estágio, foi feita a mudança de pressão para um valor superior, pois, para essa situação, cada corpo de prova parou de expulsar água. O procedimento foi repetido até atingir a pressão máxima desejada.

Os pesos finais de equilíbrio foram empregados na determinação dos teores de umidade e, com auxílio de alguns dos índices físicos (massa específica do solo seco e dos sólidos), os graus de saturação correspondentes para cada pressão. Assim, com a relação pressão vs grau de saturação, pôde-se obter a curva de pressão capilar de cada solo.

4.3.2 – Método do Papel Filtro

Para este método, os corpos de prova foram deixados secar até atingir um teor de umidade desejado e controlado por pesagens sucessivas.

Uma vez atingido o teor de umidade requerido, foram colocados em contato direto com o solo e em cada superfície, um papel filtro Whatman N^o42. Sobreposto ao papel, foi colocado um disco de PVC do mesmo diâmetro e de 1 cm de espessura. Em seguida, o conjunto foi embrulhado hermeticamente com um filme plástico e firmemente envolto com uma fita adesiva, garantindo um contato firme entre papel-solo. A Figura 16 mostra o esquema do arranjo utilizado.

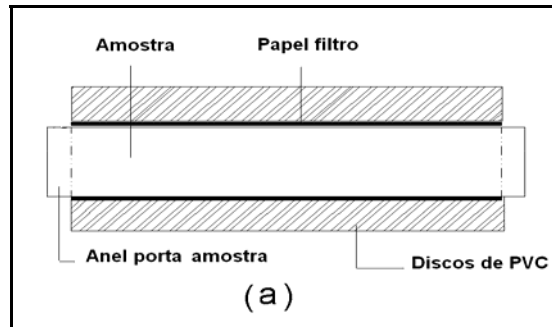


Figura 16 - Técnica do Papel Filtro para determinação da pressão capilar (Alfaro Soto, 2004).

O período para alcançar equilíbrio de umidade entre o papel e o solo foi de 10 dias, segundo recomendações de Marinho (2004). Posteriormente, foi determinado o teor de umidade dos papéis pesando-os em balança com resolução de 0,0001g. A quantificação da umidade do papel serviu à estimativa da pressão capilar utilizando as curvas de calibração para o papel filtro Whatman N^o42, obtidas por Chandler *et al.*, (1992). Com a amostra de solo determinou-se o teor de umidade gravimétrico e posteriormente, com auxílio dos índices físicos, o grau de saturação. Assim, para cada grau de saturação do solo corresponde uma sucção matricial estimada a partir do teor de umidade do papel, o que tornou possível a construção da curva de pressão capilar.

4.4 – Propriedades dos Fluidos

4.4.1 – Análise da Viscosidade e Massa Específica

Para medição dos valores de viscosidade cinemática das amostras de óleo presente na pluma de fase livre seguiu-se a norma ASTM D 445, com a unidade de viscosidade expressa em Stokes (St). Segundo esta norma, a viscosidade cinemática expressa a resistência oferecida pelo fluido ao escoamento sob gravidade.

Para medição da viscosidade cinemática, foram coletadas seis amostras de óleo dos poços de monitoramento vizinhos aos poços de remediação (bombeamento).

As mesmas amostras coletadas para medição da viscosidade cinemática foram utilizadas para medição da massa específica, segundo a norma ASTM D 4052. Segundo esta norma, a massa específica é a razão entre a massa e o volume obtida à temperatura de 20° C. Os valores obtidos foram expressos em Kg/m³.

4.4.2- Determinação da Tensão Superficial e Interfacial de LNAPL e Água

Para determinação da tensão superficial e interfacial dos fluidos presentes no meio poroso foram coletadas amostras de água e óleo localizadas ao longo da pluma de fase livre. Quatro amostras de água e quatro amostras de óleo foram coletadas para medição da tensão interfacial e superficial de ambos os fluidos.

Para a coleta das amostras dos poços de monitoramento utilizou-se amostradores descartáveis tipo *bailer* (Foto 6). Após a coleta, cada amostra foi armazenada em garrafas de vidro cor âmbar e enviadas imediatamente para o laboratório do Instituto de Química da Unicamp.



Foto 06 – Coleta de amostra de óleo e água do poço PM-75.

A quantificação da tensão superficial e interfacial entre líquidos foi realizada segundo o método do anel (*Du Nouy*), utilizando-se o tensiometro KSV, modelo

Sigma 701, segundo procedimentos da ASTM D 971-99a. O teste consiste basicamente em determinar a tensão superficial e interfacial pela medição da força necessária para destacar um anel de platina (de características conhecidas) ao passá-lo pela interface ar-água, ar-LNAPL e água-LNAPL, respectivamente.

Os testes foram realizados à temperatura constante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, em duas condições de velocidade de descida e subida da placa (20 e $25 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente), com a finalidade de verificar se a diferença de velocidades interfere significativamente na medição. Adicionalmente, para cada condição foram realizadas 10 determinações, visando verificar a variabilidade dos resultados mediante o desvio padrão e obtenção do valor médio aritmético de cada uma delas.

Para o cálculo da tensão superficial e interfacial (σ expresso em mN/m) das amostras ensaiadas foi utilizada a equação:

$$\sigma = P \times F \quad (\text{Equação 37})$$

Nesta equação, P representa a leitura na escala graduada quando ocorre a ruptura (mN/m) e F corresponde ao fator de conversão da leitura na escala para tensão interfacial (adimensional), que é expresso por:

$$F = 0,7250 + \sqrt{\frac{1,452P}{C^2(D-d)} + 0,04534 - \frac{1,679}{R/r}} \quad (\text{Equação 38})$$

Nesta expressão, C é a circunferência do anel (mm), D a densidade da água, d a densidade da amostra a ser testada a 25°C (g/ml), R , o raio do anel (mm) e r , o raio do fio utilizado na construção do anel.

4.4.3 – Caracterização do Óleo

Para caracterização do óleo presente na pluma de fase livre foram inicialmente coletadas amostras de óleo de seis poços de monitoramento. Por meio do processo de destilação em laboratório, em conjunto com os valores de viscosidade cinemática e massa específica, foi possível classificar o derivado de petróleo.

Para quantificação da porcentagem dos compostos aromáticos e de alifáticos nas amostras de óleo, foram analisadas onze amostras representativas da extensão da pluma de fase livre. Utilizou-se o cromatógrafo gasoso e o espectrômetro de massa acoplado a amostrador automático de *headspace* (GC/MS/HS) do Instituto de Química da Unicamp.

A cromatografia gasosa tem por finalidade separar os compostos para posterior identificação; após separação, os compostos são analisados no espectrômetro de massa.

Para cada análise utilizou-se 3 μL da amostra de óleo, colocada posteriormente em um frasco lacrado contendo aproximadamente 0,18 g de sílica gel 60 Fluka. Para a quantificação das amostras utilizou-se a técnica de fortificação com o padrão tridecano, com uma concentração de 1:7 (94,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). A Figura 17 mostra um exemplo de cromatograma de íons de uma das amostras (RE 46), onde o pico referente ao tempo de retenção de 30,111 min é o padrão interno (tridecano) fortificado na amostra.

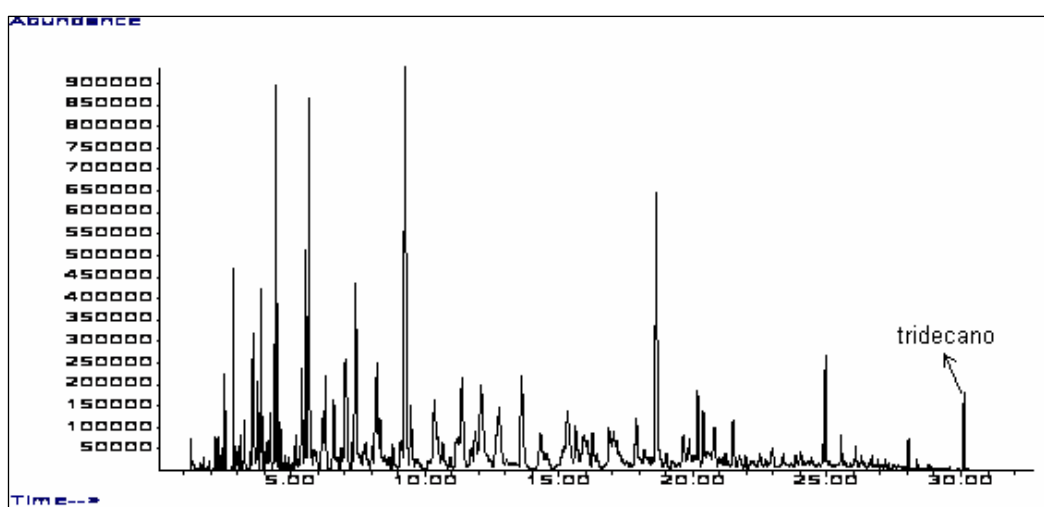


Figura 17 – Cromatograma da amostra do poço de monitoramento RE 46.

Os compostos observados foram separados em dois grandes grupos: compostos alifáticos e compostos aromáticos. A qualificação destes compostos foi baseada na fragmentação característica de cada um dos grupos, no caso de compostos aromáticos os íons de m/z 119, 105, 91, 77, 65, 51, 39. As Figuras 18 a 20 mostram os fragmentos., característicos de cada grupo.

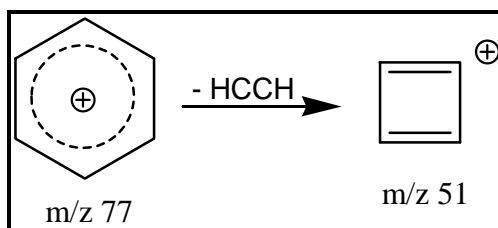


Figura 18 - Fragmentação característica do anel benzênico.

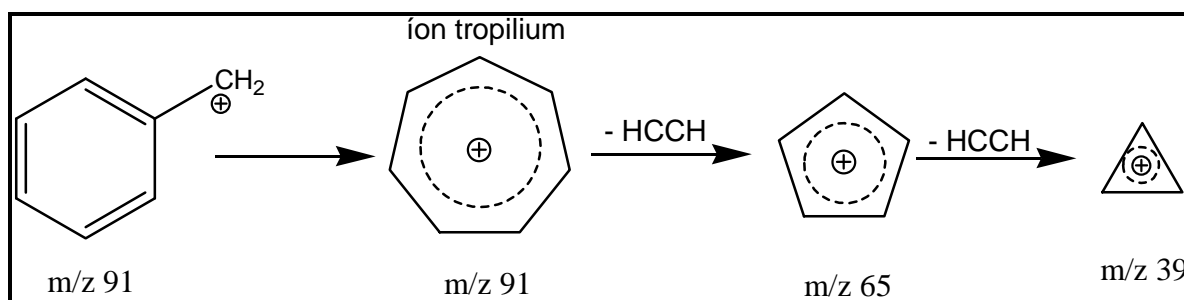


Figura 19 - Fragmentação de anel aromático substituído.

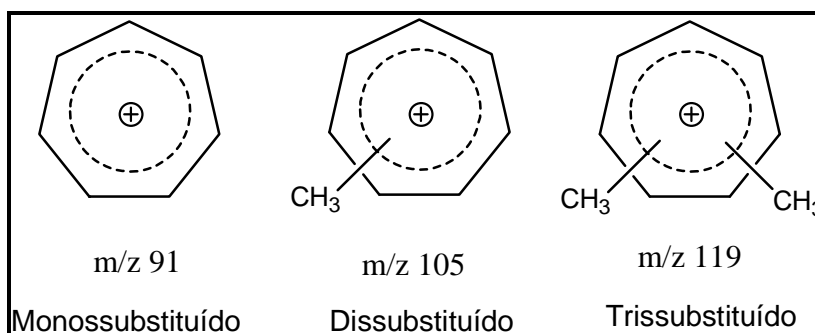


Figura 20 - Fragmentos característicos de anéis mono, di e trissustituídos.

Os fragmentos característicos de compostos alifáticos são m/z 15, 29, 43, 57, 71, 85, como mostrado nas Figuras 21 e 22.

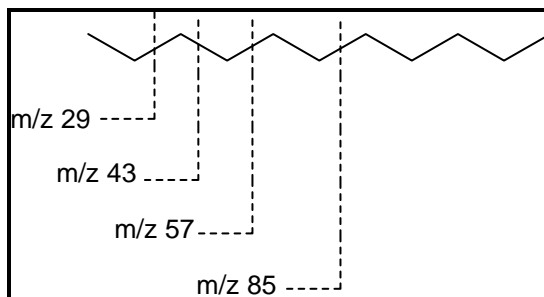


Figura 21 - Fragmentação característica de compostos alifáticos.

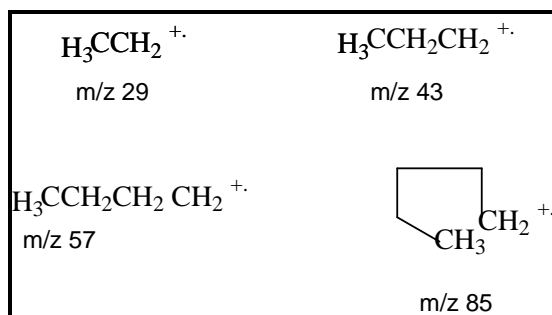


Figura 22 – Fragmentos sugeridos para os íons de m/z 29, 43, 57, 85.

4.5- Remediação da Fase Livre

Durante o processo de delimitação da pluma de fase livre e após a análise da profundidade média do nível d'água e de óleo, optou-se pela instalação, em abril de 2005, de um sistema piloto de remediação composto por três poços de bombeamento. A técnica de remediação escolhida foi a de extração das fases livre e dissolvida por meio de bombas submersas. Esta técnica de remediação do tipo ativa foi considerada a mais adequada em função do nível d'água médio estar a cerca de 11m da superfície do terreno e pelo fato da fonte da contaminação não ter sido identificada até então. A fonte poderia estar ativa e a pluma poderia avançar além dos limites previamente observados.

A técnica de remediação escolhida consistiu em bombear a água subterrânea promovendo um cone de depressão, aumentando a migração da fase livre em direção ao poço de bombeamento. O líquido bombeado foi lançado em caixas separadoras, o hidrocarboneto sobrenadante recolhido para reprocessamento e o efluente restante (água e óleo emulsificado) enviado para tratamento na estação de efluentes industriais. Nos poços foram instaladas bombas submersas elétricas de 0,5 hp de potência, apropriadas para o bombeamento de hidrocarbonetos (Foto 7). Utilizou-se como tubo edutor mangueiras trançadas transparentes de $\frac{3}{4}$ de polegada de diâmetro, o que permitiu a visualização da emulsão bombeada.

A técnica de bombeamento consistiu em manter o nível da interface óleo/água próximo ao crivo da bomba, não permitindo que o óleo acumulasse acima do corpo do bombeador, evitando assim o contato prolongado do óleo com o cabo de energia e a tubulação de recalque.

Diferentemente de outros projetos de remediação existentes, procurou-se medir individualmente a produção de óleo de cada poço de bombeamento, no intuito de se observar as taxas de recuperação de óleo ao longo do ciclo hidrológico, a influência da constituição litológica e a posição do poço na pluma. Seis caixas separadoras individuais (Foto 8) foram instaladas e a produção de óleo foi medida periodicamente, com frequência praticamente diária.

A vazão dos poços foi medida semanalmente e foram emitidos relatórios mensais sobre a eficiência do sistema de remediação e a evolução da pluma de fase livre. Procurou-se manter os poços funcionando de maneira ininterrupta, com as bombas operando 24 horas por dia.



Foto 7 - Bomba Submersa.



Foto 8 - Caixa Separadora Individual.

O processo de bombeamento emulsifica o óleo e, em alguns casos, a caixa separadora não é eficiente para aglutinar as micro-gotículas de óleo dispersas, gerando efluentes com altos teores de hidrocarboneto. Para melhor quantificar a eficiência do processo de remediação optou-se por analisar quinzenalmente, em laboratório, a emulsão dos poços de bombeamento após passar pela caixa separadora (Foto 9). O equipamento utilizado para análise da emulsão foi o *TOG/TPH Analyzer* modelo CVH, da empresa Wilks Enterprise (Foto 10), que utiliza a

tecnologia de absorção por infravermelho. Este equipamento permite a obtenção dos valores de óleos e graxas (TOG) e de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) de forma expedita. Os valores de concentração obtidos são expressos em ppm (partes por milhão).



Foto 9 - Emulsão após caixa separadora



Foto 10 - Analisador de teor de TPH

Outra particularidade deste projeto de remediação foi a instalação de poços de monitoramento (Foto 11) próximos aos poços de bombeamento, para melhor entendimento da evolução da espessura da fase livre ao longo da remediação e do ciclo hidrológico. A distância entre esses poços variou de 0,5 a 2,0 metros.



Foto 11 - Poço de bombeamento e monitoramento

5 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1 – Localização da Área de Estudo

A área de estudo situa-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo, Região Metropolitana de Campinas (RMC), na porção nordeste do município de Paulínia (Figura 23). O local dista cerca de 120 km da cidade de São Paulo, sendo acessível pelo Sistema Anhangüera - Bandeirantes (SP 330 e SP 348) e, após interligação com a Rodovia Dom Pedro I (SP 65), através da Rodovia Milton Tavares de Sousa (SP 332). A área da presente pesquisa ocupa aproximadamente 50.000 m².

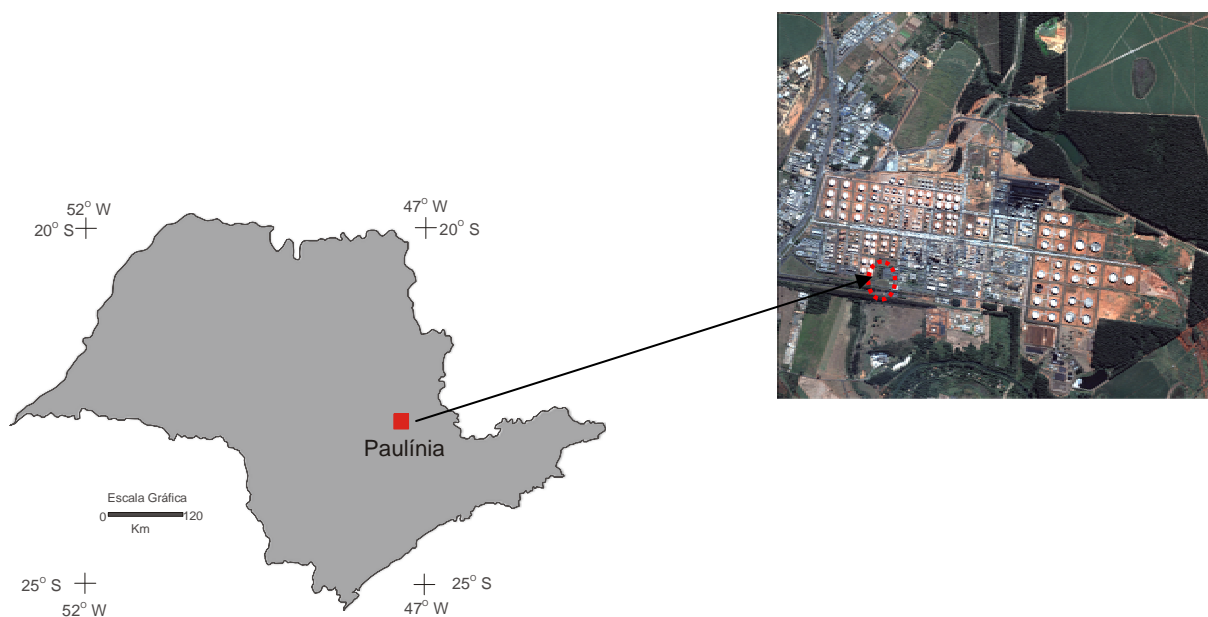


Figura 23 - Localização da área de estudo.

5.2 – Hidrologia e Pluviometria

A área de estudo está situada entre as sub-bacias dos rios Jaguari e Atibaia que compõem a Bacia do Rio Piracicaba; caracteriza-se por intenso adensamento industrial e populacional, o que imprime uma elevada demanda de água à região.

Por meio da análise dos dados da série histórica de pluviometria registrada pela estação meteorológica existente no local, verifica-se que a área estudada apresenta precipitação média anual de 1339 mm (média de 1992 a 2008), sendo que aproximadamente 58% deste total precipita durante o período de verão, entre os meses de dezembro a março. Os valores mensais máximos, mínimos e médios de precipitação estão representados na Figura 24. A série histórica está representada na Figura 25.

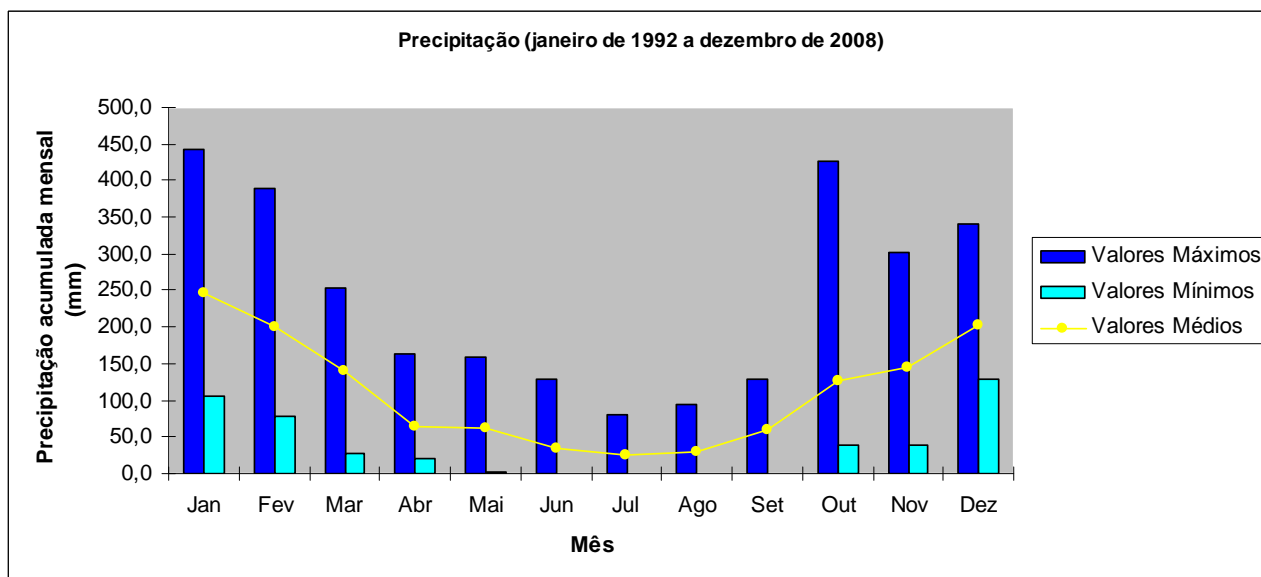


Figura 24 - Gráfico de precipitação mensal.

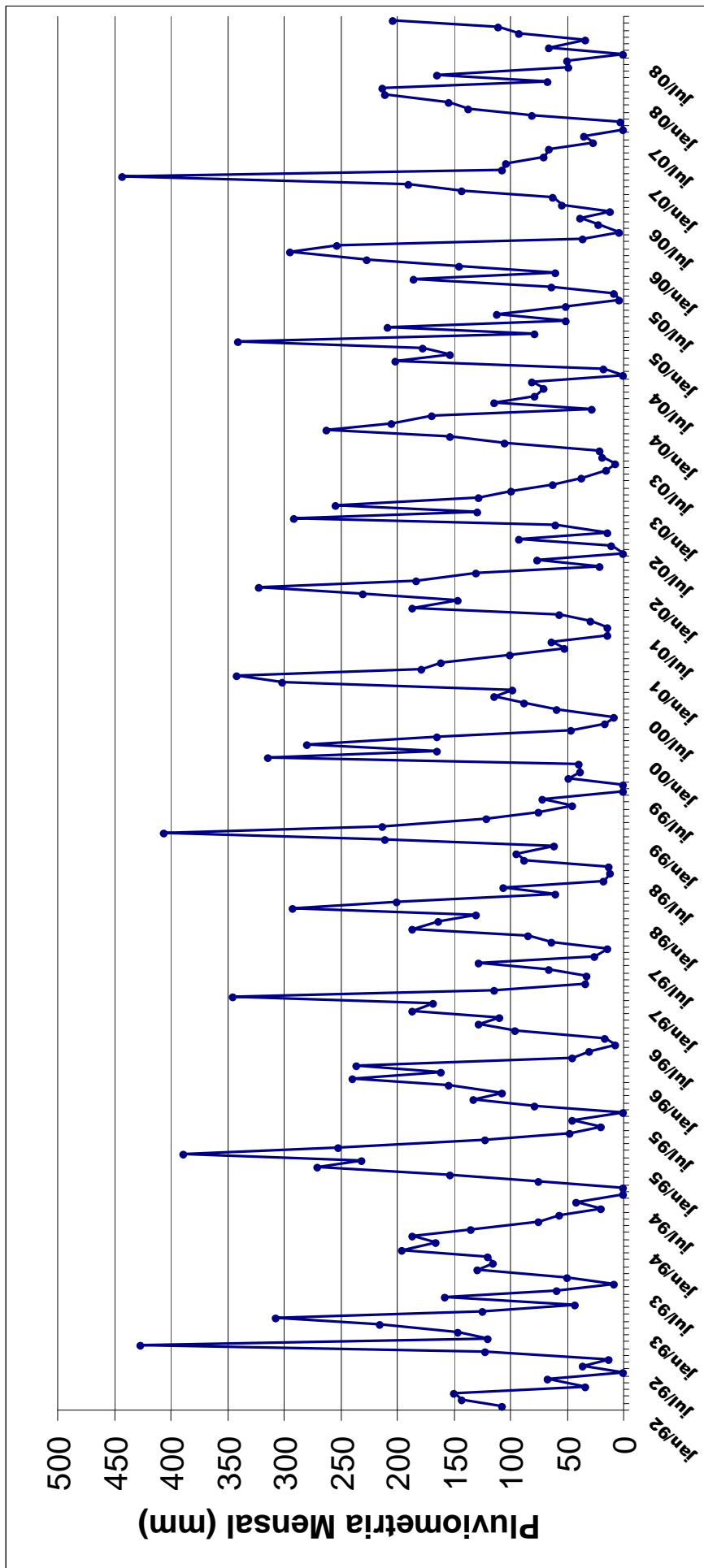


Figura 25 - Série histórica dos valores mensais de pluviometria (jan 92 a dez 08).

5.3– Aspectos Geomorfológicos e Geológicos Regionais

A área de estudo situa-se, de acordo com a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo proposta por Almeida (1964), no trecho leste da Depressão Periférica Paulista. Na região, a Depressão Periférica possui formato alongado, com direção aproximada Norte-Sul, caracterizando-se pela dominância de topografia colinosa; seus limites são definidos a Oeste pelas cuestas basálticas e a Leste pelas elevações cristalinas do Planalto Atlântico.

No que se refere ao contexto geológico regional, a Depressão Periférica corresponde à faixa de ocorrência das rochas sedimentares paleozóicas e mesozóicas da Bacia Sedimentar do Paraná, no Estado de São Paulo, incluindo corpos intrusivos sob a forma de diques e soleiras (*sills*) de diabásio, capeadas por extensas e delgadas coberturas sedimentares cenozóicas. Pequenas exposições de rochas pré-cambrianas ocorrem na faixa leste desta província geomorfológica.

Segundo Fernandes (1997), na região de Paulínia são encontradas três unidades geológicas, constituídas por rochas do Subgrupo Itararé, Intrusivas Básicas, e Depósitos Cenozóicos correlatos à Formação Rio Claro e depósitos aluvionares (Figura 26).

5.3.1 – Embasamento Cristalino

Na porção leste da área, afloram rochas pré-cambrianas do Embasamento Cristalino, com amplo predomínio na área de estudo de rochas granulito-migmatitos-gnáissicos, atribuído ao Eoproterozóico-Arqueano, como descrito em Hasui *et al.* (1981).

Na região, são ainda encontrados ortognaisses e granitóides intrusivos do Domínio da Nappe Socorro-Guaxupé.

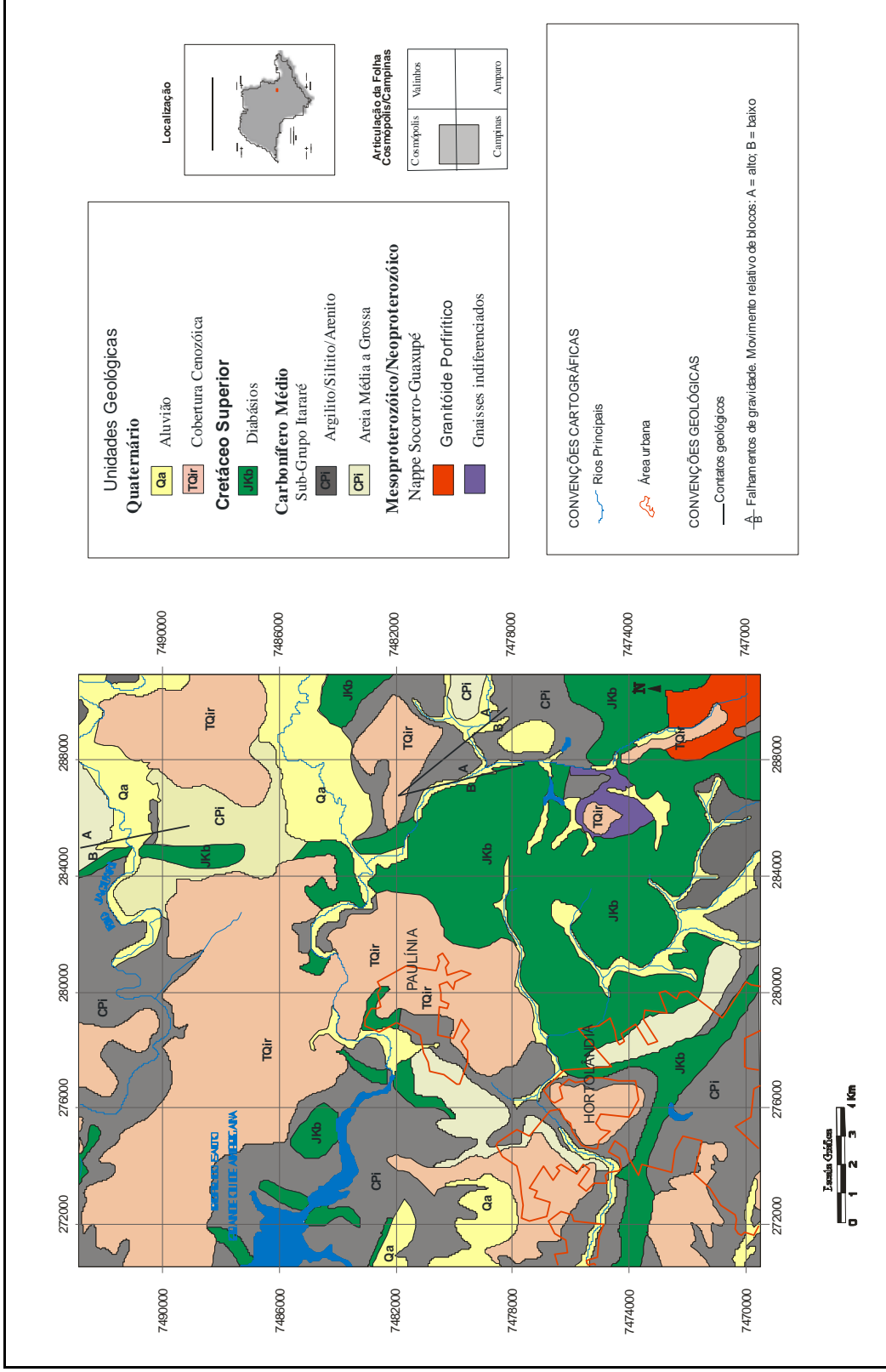


Figura 26 – Mapa Geológico Regional, ilustrando a distribuição das unidades lito-estratigráficas que compõe a área de estudo (adaptado de Fernandes, 1997)

5.3.2 – Subgrupo Itararé

As rochas sedimentares pertencentes ao Subgrupo Itararé, de idade permocarbonífera (IPT, 1981a), encontram-se assentadas diretamente sobre o embasamento cristalino, em contato discordante e erosivo. A diversidade de ambientes deposicionais (glácio-continental, glácio-marinho, flúvio-deltaico, lacustre e marinho), que caracteriza o Subgrupo Itararé, resulta em complexa associação de litologias representadas por argilitos, siltitos, arenitos de granulações variadas, conglomerados, além de outras litologias, tais como ritmitos e diamictitos.

Segundo Fernandes (1997), na região de Campinas ocorrem sete fácies sedimentares geradas pelo retrabalhamento de sedimentos glaciais, em ambiente marinho.

5.3.3 – Intrusivas Básicas

O Subgrupo Itararé está intrudido localmente por diques e soleiras de diabásio, contemporâneos aos derrames basálticos da Formação Serra Geral, de idade juro-cretácea (IPT, 1981a). O diabásio é toleítico, constituído por plagioclásio, augita, pigeonita e rara olivina.

Segundo Fernandes (1997), as intrusões básicas estão encaixadas na forma de sills, que na região obedecem a padrões estruturais com direções predominantes NE-SW e NW-SE. O trabalho de Yoshinaga-Pereira (1996) mostra que os sills de diabásio têm espessura variando de poucos metros a mais de 200 m.

Na região de estudo, estas rochas afloram principalmente em trechos do leito dos rios Jaguari e Atibaia.

5.3.4 – Depósitos Relacionados à Formação Rio Claro

Na região de Paulínia e adjacências, sobrepostas aos sedimentos do Subgrupo Itararé, encontram-se localmente coberturas detríticas de idade cenozóica, geralmente consideradas correlatas à Formação Rio Claro. Estes

depósitos Cenozóicos são geneticamente relacionados à evolução do relevo da Depressão Periférica Paulista e das Cuestas Basálticas.

Dentre os trabalhos publicados sobre os depósitos correlacionáveis à Formação Rio Claro, destacam-se o de Fernandes *et al.* (1994), Melo (1995) e Fernandes (1997). Para Fernandes (1997), na Formação Rio Claro ocorrem cinco fácies (Figura 27), conforme abaixo descritas.

Fácies Si – representada por siltitos, argilitos e arenitos muito finos, que corresponderiam a depósitos desenvolvidos em meandros abandonados. Possui níveis fossilíferos, contendo fósseis vegetais atribuíveis às famílias Cyperaceae ou Typhaceae. Esta fácies apresenta espessura de até 10 m no município de Paulínia.

Fácies Ar – esta fácies corresponde a arenitos grossos ou médio a finos, por vezes conglomeráticos, mal ou medianamente selecionados, com grânulos e seixos de quartzo subangulosos ou subarredondados, com estratificação tabular de médio porte.

Fácies Ag – argilitos siltosos esbranquiçados com laminação incipiente, representando corpos tubulares extensos, com até 2 m de espessura.

Fácies La – lamitos a arenitos pelíticos, maciços, com esparsos grânulos e seixos de quartzo subarredondados ou subangulosos, cinzentos e com manchas vermelhas.

Fácies C – Conglomerados sustentados por matriz de areia grossa com seixos de quartzo, em camadas de até 1 m.

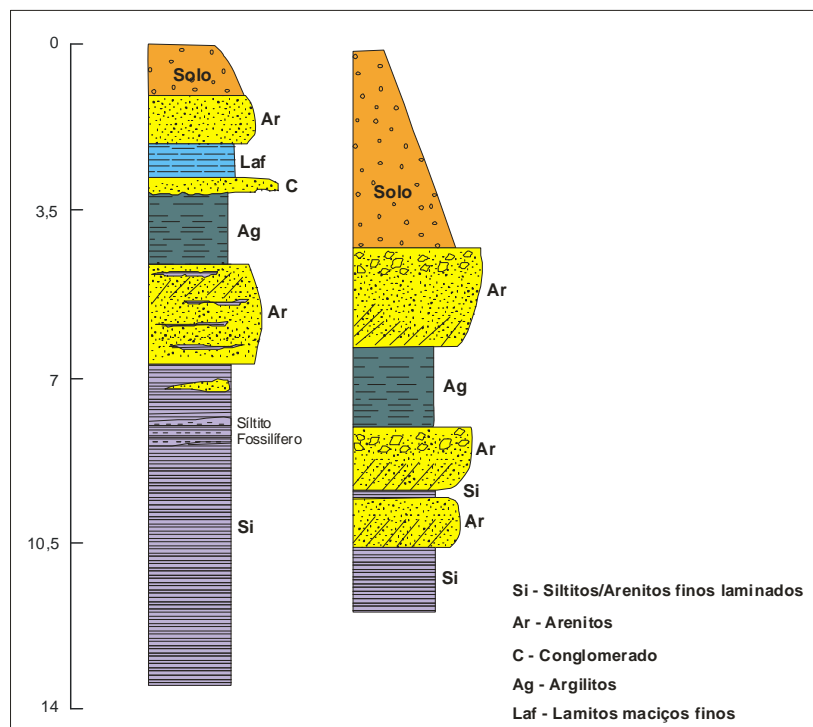


Figura 27 – Perfis da Formação. Rio Claro no município de Paulinia (modificado de FERNANDES, 1997).

Segundo a autora, as fácies *Si* e *Ag* representam depósitos de planícies de inundação, com formação de lagos em meandros abandonados, onde se desenvolveram plantas aquáticas, dentro de ambiente fluvial meandrante. A fácies *Ar* corresponde a depósitos de canais do tipo barra de pontal (areias) e a *C*, a fundo de canal. O formato sigmoidal de alguns corpos de arenitos, em meio à fácies *Si*, sugere que localmente tenham ocorrido processos de rompimento de diques marginais e deposição dos arenitos em lagos (possivelmente *oxbow lakes*), por ocasião das inundações. A fácies *La* foi formada por processos gravitacionais (corridas de lama e fluxos de detritos).

5.3.5 – Depósitos Quaternários

Os depósitos quaternários representam extensas planícies aluviais ao longo dos rios Atibaia e Jaguari. A constituição destes depósitos está vinculada à natureza das rochas subjacentes.

As ocorrências sobre a Formação Rio Claro, com espessuras de até 7m, correspondem a materiais avermelhados, argilosos a argilo-arenosos, com grânulos e seixos pequenos, esparsos e subangulosos, de quartzo. Depósitos fluviais (terraços) estão presentes sobre as rochas pré-cambrianas e correspondem a cascalhos intercalados com areia grossa a muito grossa. Os depósitos quaternários que ocorrem sobre os arenitos do Subgrupo Itararé apresentam natureza arenosa, com grânulos e pequenos seixos esparsos, além de seixos basais.

5.4 – Hidrogeologia Regional

Em termos hidrogeológicos existem na região quatro grandes sistemas aquíferos: Sistema Aquífero Cristalino, Sistema Aquífero Tubarão, Sistema Aquífero Diabásio e Sistema Aquífero Cenozóico.

- ✓ **Sistema Aquífero Cristalino** - representado por rochas graníticas e metassedimentares, apresenta armazenamento e circulação de água através da porosidade secundária (fraturas e falhas). Este aquífero é recoberto por rochas sedimentares do Subgrupo Itararé e intrusivas básicas. Segundo DAEE (1981), as características hidráulicas deste aquífero são: capacidade específica entre 0,05 e 0,7 m³/h/m e transmissividade com valores variando de 0,1 a 100 m²/dia.
- ✓ **Sistema Aquífero Tubarão** – representado na região por litotipos do Subgrupo Itararé, este sistema possui características hidráulicas bastante variáveis devido à complexa associação litológica. Para a região de Campinas a influência as fraturas sobre a produção do Aquífero Tubarão é demonstrada por Fernandes (1997) e Fernandes & Rudolph (2001). Nesta área a mediana de capacidade específica é de 0,13 m³/h/m, para um total de 134 poços. Considerando apenas os poços com capacidade específica maior que 0,5 m³/h/m, que totalizam 21 poços, 18 estão próximos a lineamentos e apenas três estão longe destas feições.

- ✓ **Sistema Aquífero Diábásio** – é constituído por corpos de diabásio que ocorrem sob a forma de soleiras (corpos sub-horizontais) e diques (corpos subverticais). Na área possuem espessuras que variam desde alguns metros chegando a ultrapassar 200 m. Este sistema aquífero é do tipo fissural, com circulação de água restrita à suas descontinuidades. Na região de Campinas apresenta capacidade específica média de 0,6 m³/h/m (DAEE, 1981).

- ✓ **Sistema Aquífero Cenozóico** – representado por depósitos correlatos à Formação Rio Claro e depósitos aluvionares quaternários dos vales dos principais rios da região. Este sistema aquífero é explorado através de poços tipo cacimba, principalmente na zona rural. Este aquífero é pouco estudado, muito embora seja o principal a sofrer os impactos ambientais das atividades antrópicas.

6 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

6.1 – Histórico da Área

No segundo semestre de 2003, a partir de investigação hidrogeológica de uma área industrial no município de Paulínia, constatou-se cerca de dez centímetros de fase livre em apenas um poço de monitoramento (PM 29). Posteriormente, no mesmo ano, foram perfurados 16 poços de monitoramento (PMs 43 ao 58) para detalhamento da pluma da fase livre. O hidrocarboneto presente foi caracterizado como querosene de aviação.

Analisando-se a distribuição das maiores espessuras de fase livre da pluma de contaminação e calculando-se a área de influência das mesmas foi possível estimar inicialmente, com o uso do software **LNAST** da API, (American Petroleum Institute), versão 2000, volume da ordem de **520 m³** de hidrocarbonetos presentes no meio poroso. Essa estimativa expedita foi necessária para informar, em março de 2005, o órgão ambiental (CETESB) a ordem de grandeza da pluma de fase livre.

Até dezembro/2005, foram instalados 30 poços simples e 4 multiníveis (8 poços), totalizando 38 poços de monitoramento (PMs 29, 31, 43 ao 58, 61 ao 75) e 4 de bombeamento. Em janeiro/2007, a rede de poços já ampliada possuía 49 poços simples e 8 multiníveis (16 poços), totalizando 65 poços de monitoramento e 9 poços de bombeamento. A distribuição dos poços na área em questão está representada na Figura 28.

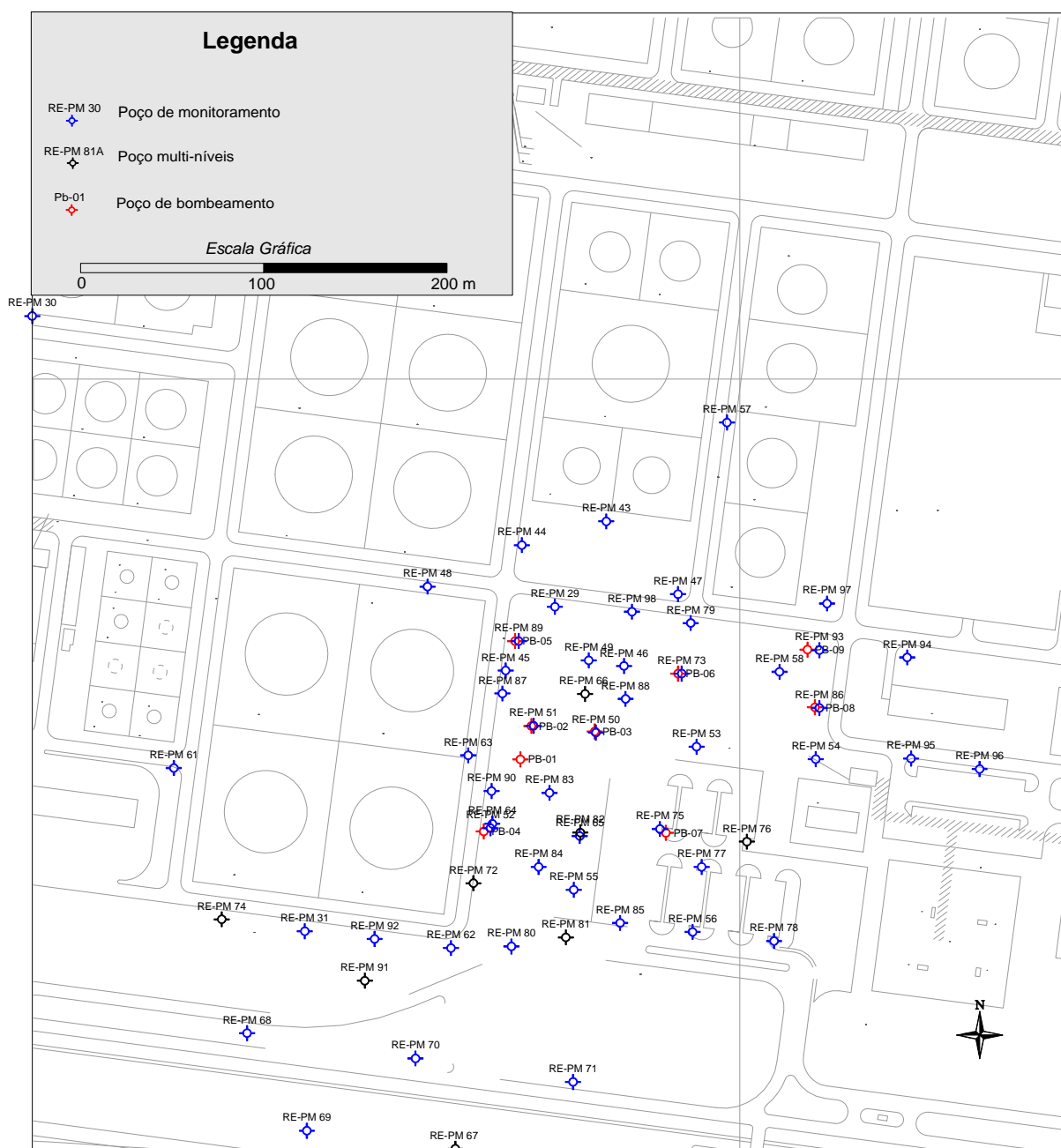


Figura 28 – Rede de poços de monitoramento e bombeamento em janeiro/2007.

6.2 - Mapa Potenciométrico e de Fase Livre

O acompanhamento quinzenal da variação do nível d'água e da fase livre permitiu, ao longo dos meses de monitoramento, e posteriormente, durante o

processo de remediação, a elaboração de mapas mensais de espessura de fase livre, potenciométrico e de fluxo. A pluma de fase livre mapeada possui cerca de 130 m de comprimento no eixo norte-sul e 320 metros no leste-oeste, perfazendo aproximadamente 41.000 m² de área.

A elaboração dos mapas em conjunto com os gráficos de variação do nível d'água auxiliaram no entendimento da evolução do processo de remediação.

O mapa potenciométrico (Figura 29) foi elaborado utilizando as profundidades do nível de água do lençol freático e da fase livre, obtidas por meio de medições realizadas no dia 02 de março de 2007 (Tabela 4). Esses dados foram obtidos pela mensuração da profundidade do lençol freático (NA) e da fase livre, em cada poço. Posteriormente, foram traçadas as isolinhas do NA, gerando-se o mapa potenciométrico. A pluma de fase livre mostra a distribuição dos valores de espessura de óleo.

No mapa potenciométrico, as direções e os sentidos preferenciais do fluxo de água subterrânea são indicados por setas. Na Figura 29, o mapa mostra que, de modo geral, o fluxo local ocorre de nordeste para sudoeste da área. Na área da pluma sob influência dos poços de bombeamento é possível observar que as equipotenciais sofrem inflexões e o fluxo ocorre aproximadamente de leste para oeste, sendo que na porção sul da pluma o fluxo é de direção SE para NW.

Neste mapa, é possível identificar um aumento elevado de gradiente hidráulico na porção sul, devido à presença de litologias de baixa condutividade hidráulica e da proximidade da zona de descarga, representada por um rio situado na porção externa à área de estudo.

Nos poços multiníveis com filtros de 1 metro, instalados em diferentes profundidades, foi possível medir a diferença de carga hidráulica em profundidade. Nestes poços verificou-se que as superfícies equipotenciais são aproximadamente verticais e o fluxo é horizontal.

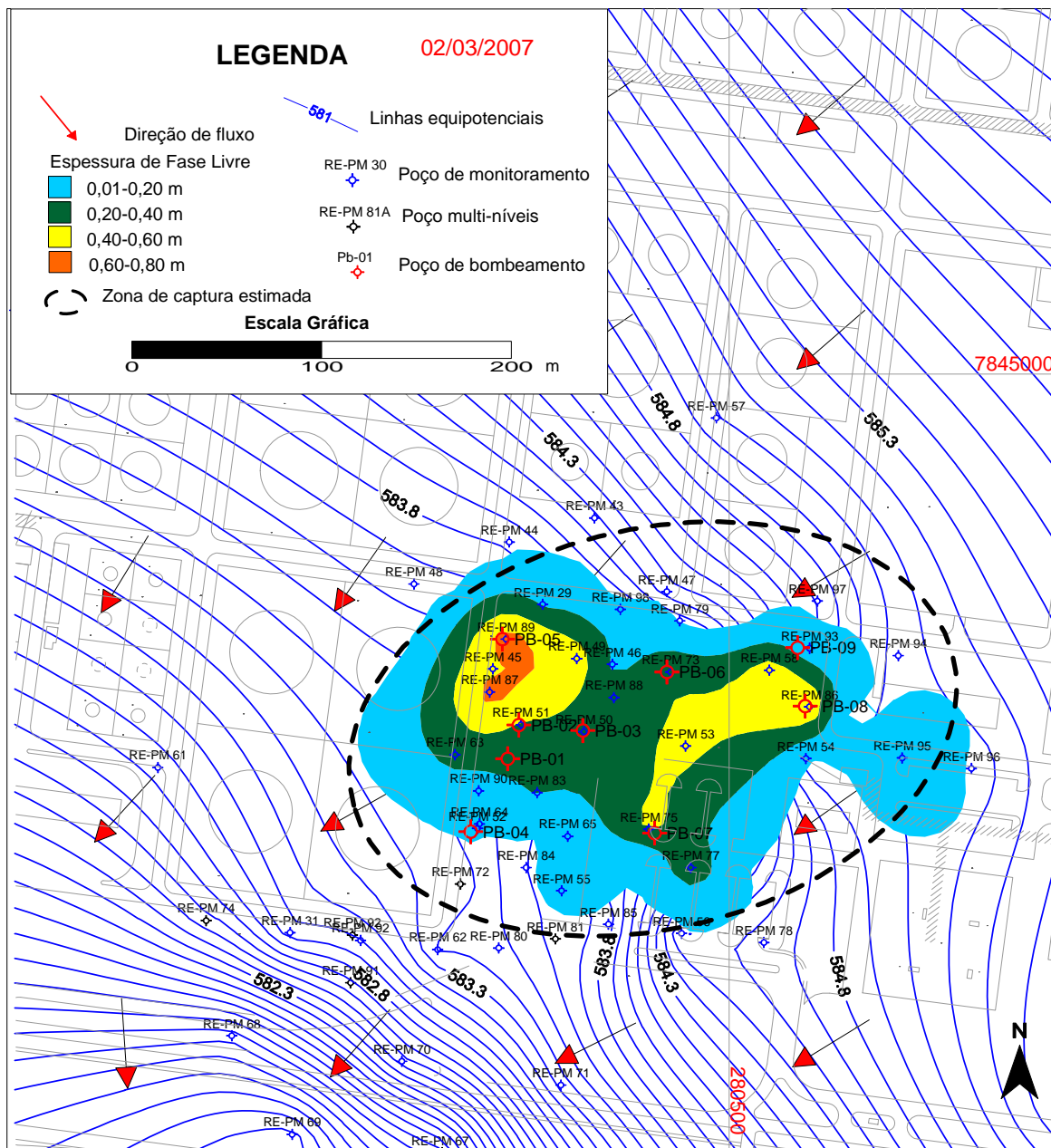


Figura 29 - Mapa potenciométrico, fluxo e fase livre. A área delimitada com o círculo representa a zona de captura estimada.

Tabela 4 - Cotas de fase livre (m) e nível d'água (m) (Março 2007).

| Poço | N.A. | Fase Livre | Esp. F.L. | Cota N.A | Cota F.L. |
|------------|--------|------------|-----------|----------|-----------|
| RE-PM 09 | 9,97 | | 0 | 585,255 | 0 |
| RE-PM 10 | 11,02 | | 0 | 584,422 | 0 |
| RE-PM 11 | 8,4 | | 0 | 586,71 | 0 |
| RE-PM 29 | 11,837 | 11,66 | 0,177 | 583,756 | 583,933 |
| RE-PM 30 | 11,63 | | 0 | 583,767 | 0 |
| RE-PM 31 | 12,65 | | 0 | 582,969 | 0 |
| RE-PM 32 | 10,28 | | 0 | 585,424 | 0 |
| RE-PM 43 | 11,27 | | 0 | 584,177 | 0 |
| RE-PM 44 | 11,61 | | 0 | 583,817 | 0 |
| RE-PM 45 | 11,81 | 11,27 | 0,54 | 583,499 | 584,039 |
| RE-PM 46 | 11,35 | 11,17 | 0,18 | 584,223 | 584,403 |
| RE-PM 47 | 11,186 | | 0 | 584,258 | 0 |
| RE-PM 48 | 12,031 | | 0 | 583,656 | 0 |
| RE-PM 49 | 11,72 | 11,173 | 0,547 | 583,653 | 584,2 |
| RE-PM 50 | 11,522 | 11,2 | 0,322 | 583,902 | 584,224 |
| RE-PM 51 | 11,996 | 11,62 | 0,376 | 583,459 | 583,835 |
| RE-PM 52 | 11,988 | 11,955 | 0,033 | 583,624 | 583,657 |
| RE-PM 53 | 11,854 | 11,407 | 0,447 | 583,727 | 584,174 |
| RE-PM 54 | 10,662 | | 0 | 584,979 | 0 |
| RE-PM 55 | 11,6 | 11,5 | 0,1 | 584,23 | 584,33 |
| RE-PM 56 | 11,104 | | 0 | 584,613 | 0 |
| RE-PM 57 | 10,523 | | 0 | 584,992 | 0 |
| RE-PM 58 | 11,06 | 10,532 | 0,528 | 584,604 | 585,132 |
| RE-PM 61 | 12,16 | | 0 | 582,838 | 0 |
| RE-PM 62 | 11,62 | | 0 | 583,41 | 0 |
| RE-PM 63 | 11,888 | 11,592 | 0,296 | 583,176 | 583,472 |
| RE-PM 64 | 11,56 | 11,552 | 0,008 | 583,388 | 583,396 |
| RE-PM 65 | 11,56 | 11,325 | 0,235 | 583,468 | 583,703 |
| RE-PM 66 A | 11,233 | | 0 | 583,715 | 0 |
| RE-PM 67 A | 13,13 | | 0 | 581,659 | 0 |
| RE-PM 67 B | 13,13 | | 0 | 581,659 | 0 |
| RE-PM 68 | 13,487 | | 0 | 581,537 | 0 |
| RE-PM 69 | 13,75 | | 0 | 580,949 | 0 |
| RE-PM 70 | 12,53 | | 0 | 582,46 | 0 |
| RE-PM 71 | 11,549 | | 0 | 583,348 | 0 |
| RE-PM 72A | 11,67 | | 0 | 583,337 | 0 |
| RE-PM 72B | 11,76 | | 0 | 583,247 | 0 |
| RE-PM 73 | 11,53 | 11,14 | 0,39 | 583,408 | 583,798 |
| RE-PM 74A | 12,39 | | 0 | 582,542 | 0 |
| RE-PM 74B | 12,367 | | 0 | 582,566 | 0 |
| RE-PM 75 | 11,7 | 11,25 | 0,45 | 583,434 | 583,884 |
| RE-PM 76A | 11,103 | 10,95 | 0,153 | 583,95 | 584,103 |
| RE-PM 76B | 10,99 | | 0 | 584,082 | 0 |
| RE-PM 77 | 11,348 | 10,978 | 0,37 | 583,652 | 584,022 |
| RE-PM 78 | 10,963 | 10,96 | 0,003 | 584,047 | 584,05 |
| RE-PM 79 | 10,95 | | 0 | 584,056 | 0 |
| RE-PM 80 | 11,792 | | 0 | 583,467 | 0 |
| RE-PM 81A | 11,65 | | 0 | 583,609 | 0 |
| RE-PM 81B | 11,65 | | 0 | 583,633 | 0 |
| RE-PM 82A | 11,36 | | 0 | 583,688 | 0 |
| RE-PM 82B | 11,36 | | 0 | 583,688 | 0 |
| RE-PM 83 | 11,624 | 11,398 | 0,226 | 583,431 | 583,657 |
| RE-PM 84 | 11,45 | | 0 | 583,604 | 0 |
| RE-PM 85 | 11,32 | | 0 | 583,739 | 0 |
| RE-PM 86 | 10,994 | 10,365 | 0,629 | 583,974 | 584,603 |
| RE-PM 87 | 12 | 11,3 | 0,7 | 582,879 | 583,579 |
| RE-PM 88 | 11,34 | 11,09 | 0,25 | 583,549 | 583,799 |
| RE-PM 89 | 12,218 | 11,482 | 0,736 | 582,683 | 583,419 |
| RE-PM 90 | 11,576 | 11,49 | 0,086 | 583,411 | 583,497 |
| RE-PM 91A | 12,22 | | 0 | 582,673 | 0 |
| RE-PM 91B | 12,26 | | 0 | 582,633 | 0 |
| RE-PM 92A | 12,08 | 0 | 0 | 582,988 | 0 |
| RE-PM 92B | 12,13 | 0 | 0 | 582,938 | 0 |
| RE-PM 93 | 10,42 | 10,365 | 0,055 | 584,524 | 584,579 |
| RE-PM 94 | 10 | | 0 | 585,037 | 0 |
| RE-PM 95 | 10,35 | 10,22 | 0,13 | 584,68 | 584,81 |
| RE-PM 96 | 9,98 | | 0 | 585,02 | 0 |
| RE-PM 97 | 10,088 | | 0 | 584,7 | 0 |
| RE-PM 98 | 11,196 | 11,147 | 0,049 | 583,727 | 583,776 |

6.3 – Modelo Hidrogeológico Conceitual

A partir da descrição dos litotipos presentes durante a etapa de investigação e em conjunto com o quadro hidroestratigráfico regional foi possível estabelecer o modelo hidrogeológico local.

Para classificação dos diferentes litotipos em subsuperfície, utilizou-se a descrição de campo, bem como as análises granulométricas das amostras obtidas por meio de amostragem contínua. A grande dificuldade para a classificação é a variação centimétrica da granulometria dos depósitos ao longo dos perfis em algumas sondagens, característica esta comum em ambiente deposicional fluvial. A Tabela 5 mostra um exemplo desta variação na sondagem relativa ao poço de monitoramento PM 86.

Tabela 5 – Valores de granulometria do poço de monitoramento PM 86.

| PM 86 Amostragem contínua (Geoprobe) | | | | | | |
|---|----------------|-------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Profundidade (m) | (10,8-11,2) | (11,8-12,0) | (12,0-12,4) | (13,0-13,2) | (13,2-13,4) | (14,1-14,4) |
| Pedregulho Grosso (%) | 0,0 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Pedregulho Fino (%) | 1,4 | 8,1 | 5,5 | 1,4 | 1,0 | 0,4 |
| Areia Grossa (%) | 6,4 | 17,4 | 8,8 | 3,3 | 9,0 | 1,0 |
| Areia Média (%) | 11,2 | 17,9 | 10,2 | 3,3 | 15,0 | 1,6 |
| Areia Fina (%) | 14,0 | 15,0 | 19,5 | 10,0 | 15,0 | 9,0 |
| Silte (%) | 22,0 | 18,0 | 29,0 | 38,0 | 34,0 | 52,0 |
| Argila (%) | 45,0 | 17,0 | 27,0 | 44,0 | 26,0 | 36,0 |
| Classificação | Argila arenosa | Areia | Areia silto-argilosa | Argila siltosa | Areia silto-argilosa | Silte argiloso |
| Massa específica dos sólidos (g/cm ³) | 2,649 | 2,654 | 2,649 | 2,651 | 2,679 | 2,650 |

Basicamente, este modelo compreende seis unidades hidroestratigráficas principais, descritas a seguir.

Unidade A – Solo superficial

Esta unidade, correspondente à porção não-saturada do aquífero, é representada por solos superficiais (Foto 12). Texturalmente são solos argilo-arenosos a areno-argilosos com espessuras que variam de 4 m a 9,5 m. Sua cor varia de amarelo ocre a vermelho escuro. A importância desta unidade relaciona-se ao fato de ser a porção não saturada do aquífero que controla as taxas e o tempo da recarga, bem como a migração dos vapores a partir da pluma de contaminação.



Foto 12 - Solo vermelho areno-siltoso recuperado do poço 88 com profundidade variando de 8,8 a 9,2 m.

Unidade B – Areias Médias a Grossas

Esta unidade está presente na porção centro-sul da área investigada e compreende sedimentos arenosos médios a grossos, com grânulos de quartzo subangulosos a subarredondados (Foto 13 e 14). Estes sedimentos são bastante friáveis e apresentam, em subsuperfície, de coloração cinza. A espessura varia de 2 a 3,5 metros. Esta unidade ocorre na área estudada a partir de 11,0 m de profundidade; ao norte, apresentam contato lateral com litologias areno-argilosas (unidade C) e, ao sul, com litologias silto-argilosas (unidade E). As curvas granulométricas das amostras desta unidade estão representadas na Figura 30.

Esta unidade superpõe-se às fácies finas de argilitos da unidade C e D, por meio de contato erosivo. Ocorre em diversos poços sugerindo a presença de canais fluviais com direção leste-oeste na porção centro-sul da área estudada. Ao sul da área, próximo ao rio Atibaia, observa-se a presença de paleocanais preenchidos por areia média a grossa superpondo-se a argilitos (Foto 15).



Foto 13: Areia friável média a grossa, PM 83.

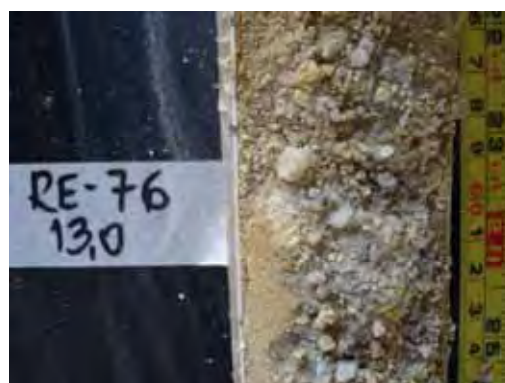


Foto 14: Areia friável média a grossa, PM 76.

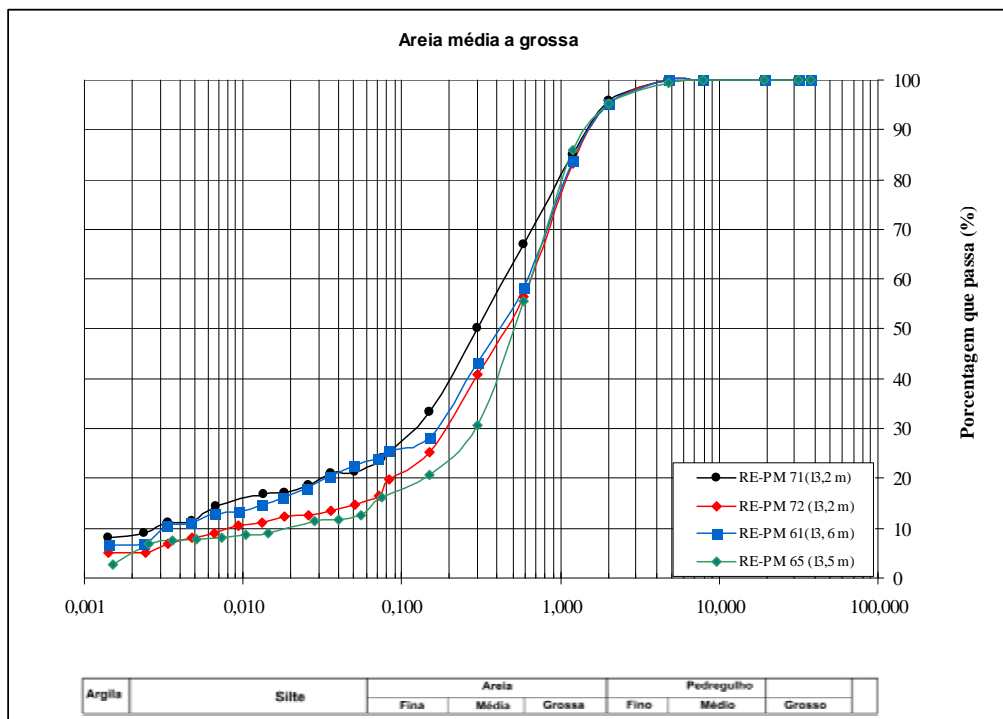


Figura 30 – Curva granulométrica das areias.



Foto 15 - Paleocanais preenchidos por areia média a grossa.

Unidade C – Areias Argilosas/Siltosas

Esta unidade corresponde aos sedimentos arenosos argilosos/siltosos de coloração vermelha a amarela. Ocorrem lateralmente aos sedimentos arenosos da unidade B. Estes arenitos ocorrem a partir de 9 metros profundidade e apresentam até 5 metros de espessura; possuem granulometria que varia de fina a grossa, e por vezes, apresentam grânulos e fragmentos de silito. As curvas granulométricas das

amostras desta unidade estão representadas na Figura 31. A Tabela 6 mostra a variação granulométrica, dentro do mesmo perfil de sondagem, referente ao poço PM-98.

Tabela 6 - Distribuição Granulométrica do poço PM 98.

| Identificação (amostra) | Intervalo (m) | Pedregulho Grosso (%) | Pedregulho Fino (%) | Areia Grossa (%) | Areia Média (%) | Areia Fina (%) | Silte (%) | Argila (%) | Classificação |
|-------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------|------------|----------------------|
| RE-98 | 13,0 -13,20 | 0,0 | 0,4 | 15,0 | 22,7 | 23,0 | 17,6 | 21,4 | Areia argilo-siltosa |
| RE-98 | 14,10 -14,20 | 0,0 | 2,1 | 18,5 | 21,4 | 18,0 | 10,5 | 29,5 | Areia argilosa |

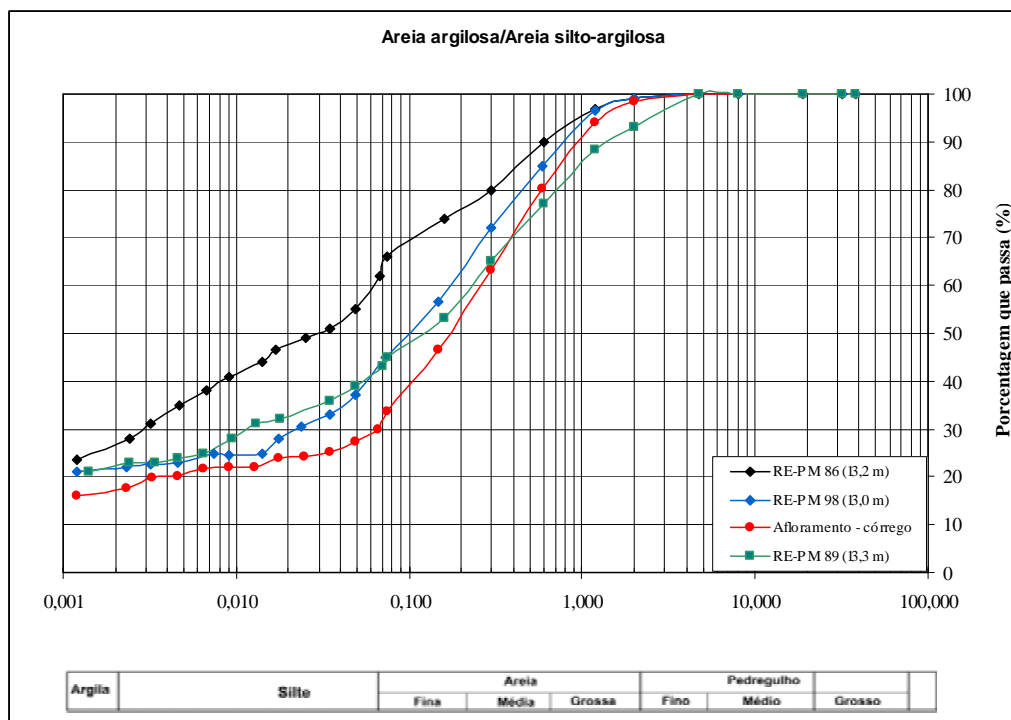


Figura 31 - Curva granulométrica das areias argilosas/argilo-siltosas (unidade C).

Unidade D – Argilas Arenosas/Areno Siltosas

Esta unidade corresponde aos sedimentos argilo-arenosos de coloração vermelha a cinza (Foto 16), interdigitados ao sul com os sedimentos arenosos argilosos da unidade C. Estas argilas ocorrem a partir de 8 metros de profundidade e apresentam até 6 metros de espessura; possuem plasticidade quando úmidos. As curvas granulométricas das amostras desta unidade estão representadas na Figura 32. Durante os trabalhos de amostragem não foi possível diferenciar, em campo, a unidade argilas arenosas da unidade areias argilosas, de forma que somente após análise granulométrica foi possível separar as amostras em unidades distintas.



Foto 16 - Argila arenosa. Amostra recuperada do poço PM 66, à profundidade de 12,0 m.

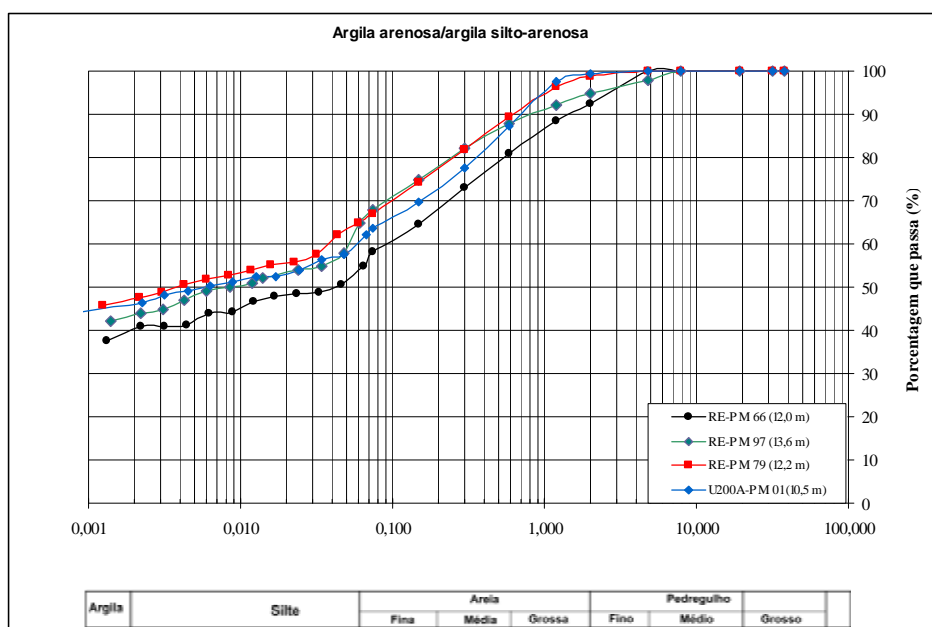


Figura 32 - Curvas granulométricas das argilas arenosas/siltosas (unidade D).

Unidade E - Silte Argiloso

Esta unidade compreende os sedimentos silto-argilosos friáveis, de coloração cinza, ocre e marrom. Ocorre na porção centro-norte da área de estudo, em contato lateral com a unidade D de argilas arenosas. Na porção sul, apresenta frequentemente fragmentos de siltitos laterizados e couraças limoníticas (Foto 17). As curvas granulométricas das amostras desta unidade estão representadas na Figura 33. Esta unidade ocorre a partir de 7,5 metros de profundidade e apresenta até 7 metros de espessura.



Foto 17 - Silte arenoso com fragmentos de laterita, recuperado do Poço 80 à profundidade de 9,6m.

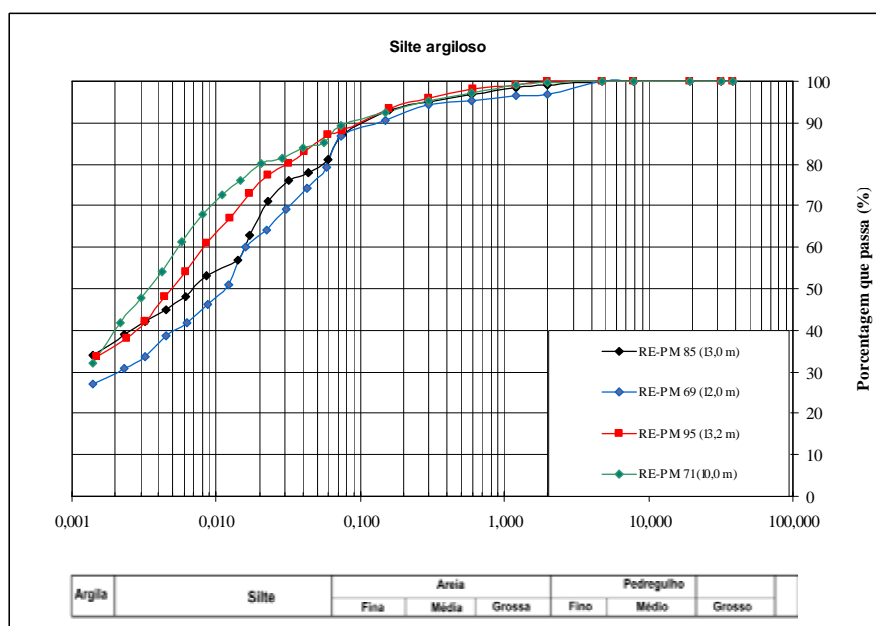


Figura 33 - Curvas granulométricas dos siltes argilosos (unidade E).

Unidade F – Argilitos Siltosos

Esta unidade sotopõe-se em contato horizontal às unidades B, C e D, sendo um importante marco litológico durante a perfuração e instalação dos poços de monitoramento e bombeamento. Os argilitos apresentam coloração esbranquiçada a cinza e variam de argilitos siltosos a argilitos maciços (Foto 18); apresentam laminação incipiente.

Os argilitos siltosos ocorrem em profundidades que variam de 10 a 16 m, com espessuras de até 2,5m. O contato com a unidade de areias médias a grossas é erosivo (Foto 19). Nas porções mais litificadas é possível observar a presença de fraturas subverticais. A Figura 34 mostra a distribuição granulométrica desta unidade na área.



Foto 18 - Argilito cinza, recuperado do poço 85 entre 11,40 a 13,20m de profundidade.

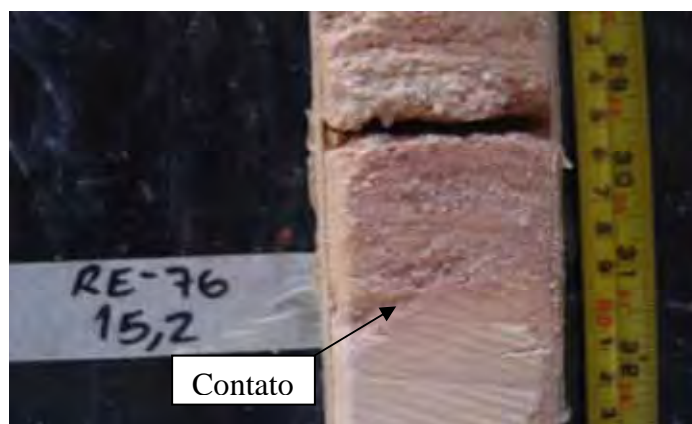
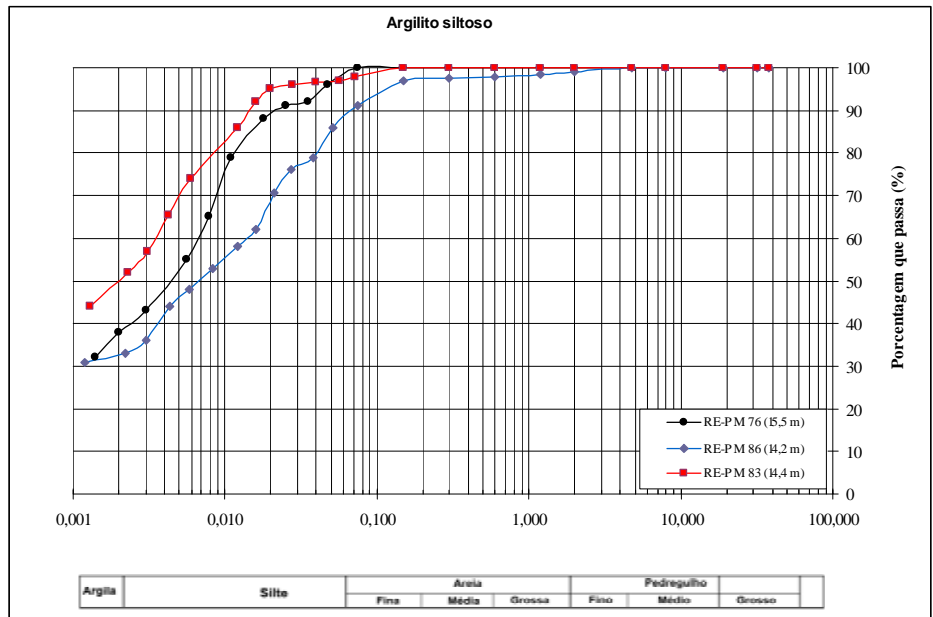


Foto 19 - Contato erosivo entre a areia grossa e o argilito siltoso. Amostra recuperada do poço 76, à profundidade de 15,20m.



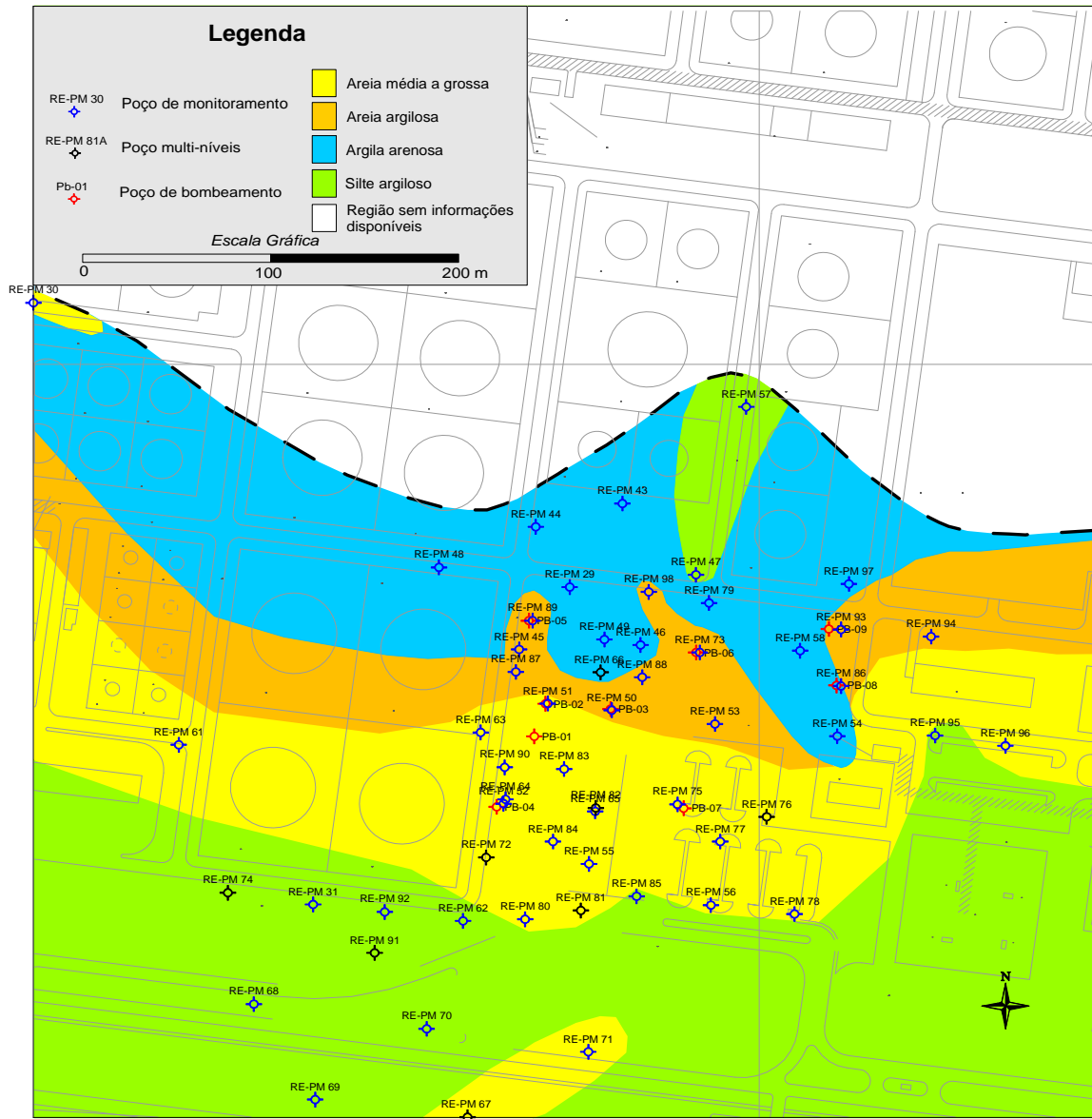


Figura 35 – Mapa de distribuição do primeiro nível saturado dos diferentes litotipos.

6.4 - Curvas de Retenção e Índices Físicos

Para determinação das curvas de pressão capilar e obtenção dos índices físicos foram realizados ensaios em amostras de três blocos indeformados, de acordo com a metodologia anteriormente descrita.

As amostras correspondem às unidades litológicas descritas para o aquífero presente na área, e foram retiradas de afloramentos localizados em cotas topográficas mais baixas.

A areia média a grossa, retirado de um paleocanal, corresponde à unidade B, a areia argilosa retirada das margens de um córrego corresponde à unidade C e o argilito presente na base do paleocanal corresponde à unidade F. A Figura 36 mostra as curvas de retenção obtidas por meio dos ensaios. A Tabela 7 mostra os valores dos índices físicos e os parâmetros de ajuste de Van Genuchten.

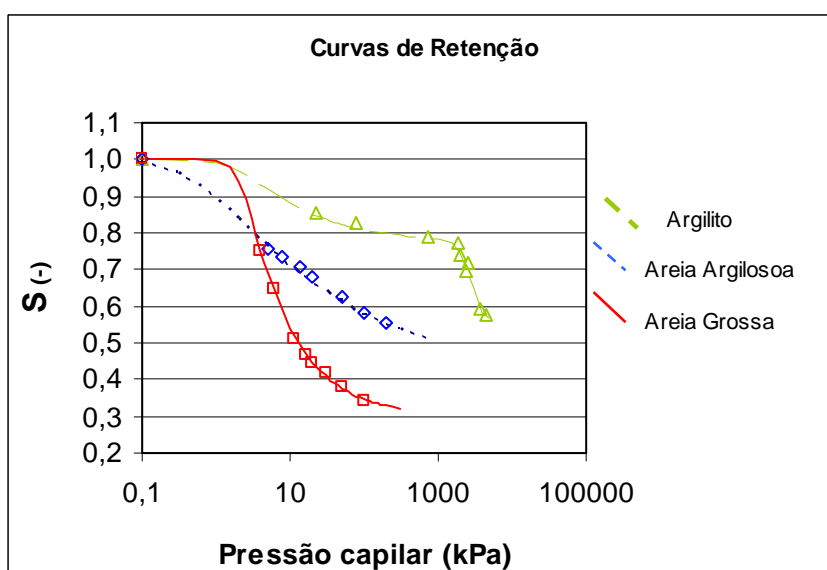


Figura 36 - Curvas de retenção dos diferentes tipos litológicos

Tabela 7 – Valores dos índices Físicos e parâmetros de Van Genutchen.

| Parâmetro | Argilito | Areia Argilosa | Areia Grossa |
|---|----------|----------------|--------------|
| ρ_s (massa específica dos sólidos) g/cm ³ | 2,705 | 2,712 | 2,782 |
| ρ_d (massa específica seca) g/cm ³ | 1,364 | 1,545 | 1,502 |
| W (teor de umidade gravimétrico) % | 36,30 | 27,90 | 30,60 |
| θ_s (teor de umidade volumétrico por drenagem) % | 49,60 | 43,00 | 46,00 |
| n (porosidade total) % | 49,60 | 43,00 | 46,00 |
| S_s (armazenamento específico) % | 7,9 | 22,00 | 29,00 |
| S_{wr} (saturação irreduzível) | 0,5610 | 0,3890 | 0,299 |
| n (parâmetro de ajuste de VAN GENUTCHEN) | 4,4870 | 1,230 | 4,2530 |
| m (parâmetro de ajuste de VAN GENUTCHEN) | 1,9820 | 0,1870 | 0,1651 |
| α (parâmetro de ajuste de VAN GENUTCHEN) m ⁻¹ | 0,003 | 16,0 | 4,575 |

6.5 – Valores de Condutividade Hidráulica e Velocidade da água Subterrânea

Seguindo a metodologia anteriormente descrita, foram realizados testes de *slug* nos poços de monitoramento que não apresentavam, na época do ensaio, a presença de fase livre. Os valores de condutividade hidráulica média do meio saturado variam de $1,58 \times 10^{-2}$ cm/s a $4,05 \times 10^{-5}$ cm/s (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores de condutividade hidráulica determinados em testes de slug.

| Poço | Cond. Hidráulica - K | |
|-------|----------------------|----------|
| | (m/dia) | (cm/s) |
| PM 43 | 5,11E-02 | 5,91E-05 |
| PM 44 | 3,50E-02 | 4,05E-05 |
| PM 47 | 3,31E-01 | 3,84E-04 |
| PM48 | 9,45E-01 | 1,09E-03 |
| PM56 | 1,36E+01 | 1,58E-02 |
| PM57 | 6,65E-01 | 7,70E-04 |
| PM61 | 9,33E+00 | 1,08E-02 |
| PM62 | 4,71E+00 | 5,45E-03 |
| PM67 | 8,90E+00 | 1,03E-02 |
| PM68 | 3,21E-01 | 3,72E-04 |
| PM69 | 3,66E-01 | 4,24E-04 |
| PM70 | 4,39E-01 | 5,08E-04 |
| PM71 | 9,24E+00 | 1,07E-02 |

Para o cálculo da velocidade da água subterrânea utilizou-se a equação descrita em Fetter (2001):

$$V = \frac{Ki}{n_e} \quad (\text{Equação 39})$$

Onde :

V = velocidade linear média (cm/s);

K = condutividade hidráulica (cm/s);

i = gradiente hidráulico (%);

n_e = porosidade efetiva, armazenamento específico (%).

Na área estudada adotou-se como valor médio de porosidade efetiva o valor relativo ao arenito argiloso de 22 % (Tabela 7). Para a pluma de abril de 2005, que apresentou a maior elevação da superfície freática, a velocidade média da água subterrânea foi de 10,48 m/ano. Para dezembro de 2008 com sistema de remediação desligado, e a superfície potenciométrica em seu nível mais baixo, desde o início das medições, observou-se uma velocidade média de 16,00 m/ano.

6.6 – Cálculo de Recarga

Na área desta pesquisa foi realizada a quantificação da recarga pelo método WTF (*water table fluctuation*) conforme descrito anteriormente. O período hidrológico considerado no cálculo do percentual de recarga em relação à pluviometria foi o de setembro a agosto.

O monitoramento da potencimetria na área de estudo possibilitou a distinção de dois períodos durante o ano que se repetem ciclicamente, um caracterizado pela ascensão e outro pela queda dos níveis dos poços de monitoramento.

O monitoramento dos poços no período setembro de 2003 a dezembro 2008 mostrou que os meses de novembro ou dezembro são os que apresentam os valores mais baixos de potencimetria. O período de recarga tem seu ápice nos meses de abril ou maio, e excepcionalmente, como ocorrido no ano de 2008, devido a melhor distribuição das chuvas, o mês de junho (Figura 37).

Em todos os poços de monitoramento observa-se uma diferença média de três meses entre o início efetivo do período de chuvas e o início da recarga. Esta diferença corresponde ao tempo de trânsito da água infiltrada até a superfície freática. Após o começo da recarga qualquer precipitação mensal anômala reflete rapidamente na subida dos níveis, como a ocorrida em janeiro de 2007, onde o valor mensal de pluviometria atingiu 443 mm e os poços de monitoramento apresentaram uma recuperação média de 80 cm em 26 dias entre os meses de janeiro e fevereiro.

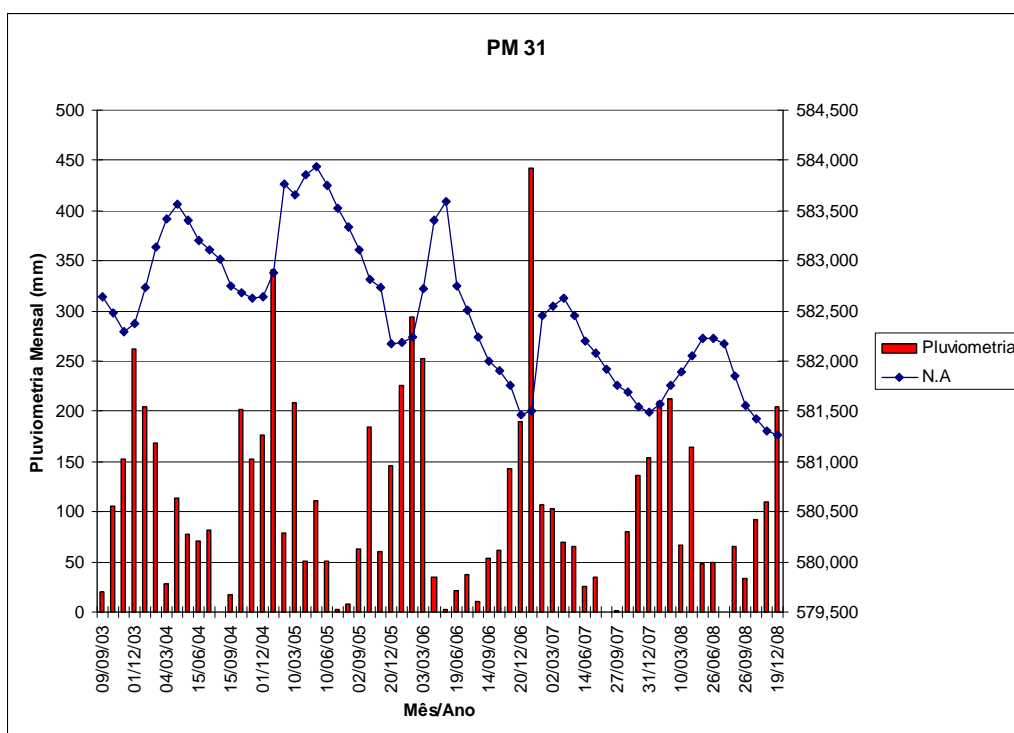


Figura 37 – Gráfico de variação do nível d'água e pluviometria.

O método WTF é diretamente dependente da variável S_y , portanto a sua determinação é fundamental para diminuição das incertezas. Na área de estudo utilizou-se os valores obtidos por meio de ensaios de laboratório (Tabela 7). Optou-se por utilizar os valores S_y de 22% (areia argilosa) para os poços de monitoramento instalados em áreas de sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos e silto-argilosos, pois estes poços apresentam ampla variação litológica dentro do mesmo perfil conforme descrito anteriormente. Para os poços instalados nos paleocanais, onde os pacotes de areia são expressivos, optou-se por utilizar o valor calculado de S_y de 29 % (areias grossas)

Na Figura 38 observa-se que para obtenção do valor (Δh), para cálculo da recarga anual, efetua-se a extrapolação da curva de recessão e a partir do valor máximo do nível d'água projeta-se uma reta até atingir a curva de recessão extrapolada. O poço 61 (Figura 38) representa a unidade B de areias médias a grossas.

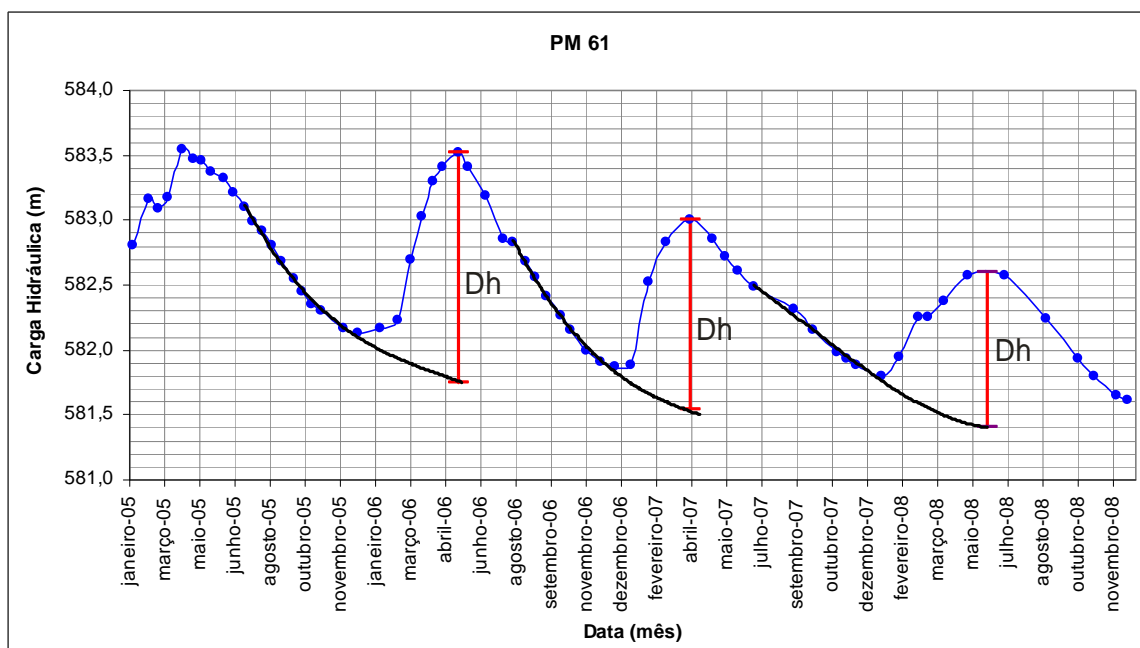


Figura 38 – Gráfico para estimativa de recarga (PM 61).

Os poços de monitoramento utilizados para o cálculo da recarga foram escolhidos em função da ausência de fase livre e distribuição ao longo da área. A Tabela 9 mostra os valores obtidos.

Tabela 9 – Valores de Δh , S_y e Recarga, calculados para os poços de monitoramento

| Poço | Ano | Δh (m) | S_y | Recarga (m) |
|-------|------|----------------|-------|-------------|
| PM-43 | 2005 | 2,41 | 0,22 | 0,53 |
| PM-44 | 2005 | 2,26 | 0,22 | 0,50 |
| PM-47 | 2005 | 2,41 | 0,22 | 0,53 |
| PM-56 | 2005 | 2,33 | 0,29 | 0,67 |
| PM-57 | 2005 | 2,36 | 0,22 | 0,52 |
| PM-43 | 2006 | 2,85 | 0,22 | 0,63 |
| PM-44 | 2006 | 2,61 | 0,22 | 0,57 |
| PM-47 | 2006 | 2,26 | 0,22 | 0,50 |
| PM-56 | 2006 | 2,61 | 0,29 | 0,75 |
| PM-57 | 2006 | 2,23 | 0,22 | 0,49 |
| PM-61 | 2006 | 1,77 | 0,29 | 0,51 |
| PM-68 | 2006 | 1,77 | 0,22 | 0,39 |
| PM-71 | 2006 | 1,79 | 0,29 | 0,52 |
| PM-43 | 2007 | 2,70 | 0,22 | 0,59 |
| PM-44 | 2007 | 2,20 | 0,22 | 0,48 |
| PM-47 | 2007 | 2,57 | 0,22 | 0,57 |
| PM-56 | 2007 | 2,14 | 0,22 | 0,62 |
| PM-57 | 2007 | 2,29 | 0,22 | 0,50 |
| PM-61 | 2007 | 1,46 | 0,29 | 0,42 |
| PM-68 | 2007 | 1,73 | 0,22 | 0,38 |
| PM-71 | 2007 | 1,80 | 0,29 | 0,52 |
| PM-43 | 2008 | 1,68 | 0,22 | 0,37 |
| PM-44 | 2008 | 1,78 | 0,22 | 0,39 |
| PM-47 | 2008 | 1,74 | 0,22 | 0,38 |
| PM-56 | 2008 | 1,54 | 0,29 | 0,44 |
| PM-57 | 2008 | 1,79 | 0,22 | 0,39 |
| PM-61 | 2008 | 1,20 | 0,29 | 0,35 |
| PM-68 | 2008 | 1,23 | 0,22 | 0,27 |
| PM-71 | 2008 | 1,35 | 0,29 | 0,39 |

Para calcular o percentual de recarga em relação à pluviometria (Tabela10) adotou-se como ano hidrológico o período de setembro a agosto. O valor de recarga anual representa a média dos valores obtidos, a partir dos poços.

Tabela 10 – Valores de recarga, pluviometria e percentual (recarga/pluviometria).

| Ano | Recarga (mm) | Pluviometria Setembro – Agosto (mm) | Recarga/pluviometria (%) |
|------|--------------|--|--------------------------|
| 2005 | 550 | 1399 | 39 |
| 2006 | 530 | 1336 | 39 |
| 2007 | 480 | 1298 | 37 |
| 2008 | 370 | 1190 | 31 |

Os altos valores de recarga variando de 370 a 550 mm, representando respectivamente de 31 a 39% do total de chuvas, provavelmente refletem a natureza da área de estudo. A área industrial onde está inserida esta pesquisa é artificialmente plana com grandes extensões não impermeabilizadas, com grama e solo exposto. Outro fator é a presença de dezenas de diques em torno de tanques de armazenamento com fundo não impermeabilizado, formando, na época das chuvas, várias “piscinas” de recarga artificial.

A diminuição das taxas de recarga no período 2005 a 2008 é diretamente proporcional às menores taxas pluviométricas observadas. A diminuição do percentual de recarga em relação à pluviometria reflete provavelmente a distribuição das chuvas ao longo do ano hidrológico.

7 - Remediação da Fase Livre

7.1 – Poços de Bombeamento

O acompanhamento dos dados hidrogeológicos de campo em conjunto com elaboração periódica de mapas potenciométricos e de espessura de fase livre permitiram estabelecer os critérios de instalação e operação dos poços de bombeamento.

Previamente aos trabalhos de perfuração foram estabelecidas as profundidades máximas de instalação dos poços de bombeamento. O principal critério foi a presença, em profundidade, da unidade de argilitos descrita anteriormente, como unidade F. Sabia-se, previamente, que a instalação de filtros abaixo dos argilitos não iria contribuir na remediação da fase livre, aumentando apenas o volume de água bombeada.

No total foram instalados nove poços de bombeamento. Na Tabela 11 pode-se observar os dados construtivos dos poços e a data do início de operação. Na Figura 39 é possível observar a posição dos poços de bombeamento ao longo da pluma de fase livre.

Tabela 11 – Dados dos poços de bombeamento.

| Poço | Profundidade de Instalação (m) | Intervalo da Seção Filtrante (m) | Poço de observação (PM) | Nível d'água médio (m) | Caixa Separadora | Início do Bombeamento |
|-------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|-----------------------|
| PB 01 | 16,50 | 7,50-13,50 | - | 11,50 | não | Maio/2005 |
| PB 02 | 15,00 | 8,00-15,00 | 51 | 11,40 | sim | Maio/2005 |
| PB 03 | 13,00 | 8,00-13,00 | 50 | 11,30 | sim | Maio/2005 |
| PB 04 | 14,50 | 9,50-14,50 | 64 | 11,60 | não | Fevereiro/2006 |
| PB 05 | 15,00 | 9,00-15,00 | 89 | 11,70 | sim | Julho/2006 |
| PB 06 | 15,00 | 9,00-15,00 | 73 | 11,30 | sim | Outubro/2006 |
| PB 07 | 14,60 | 8,60-14,60 | 75 | 11,40 | sim | Dezembro/2006 |
| PB 08 | 15,50 | 9,50-15,50 | 86 | 10,90 | sim | Setembro/2007 |
| PB 09 | 15,00 | 9,00-15,00 | 79 | 10,80 | - | Não operante |

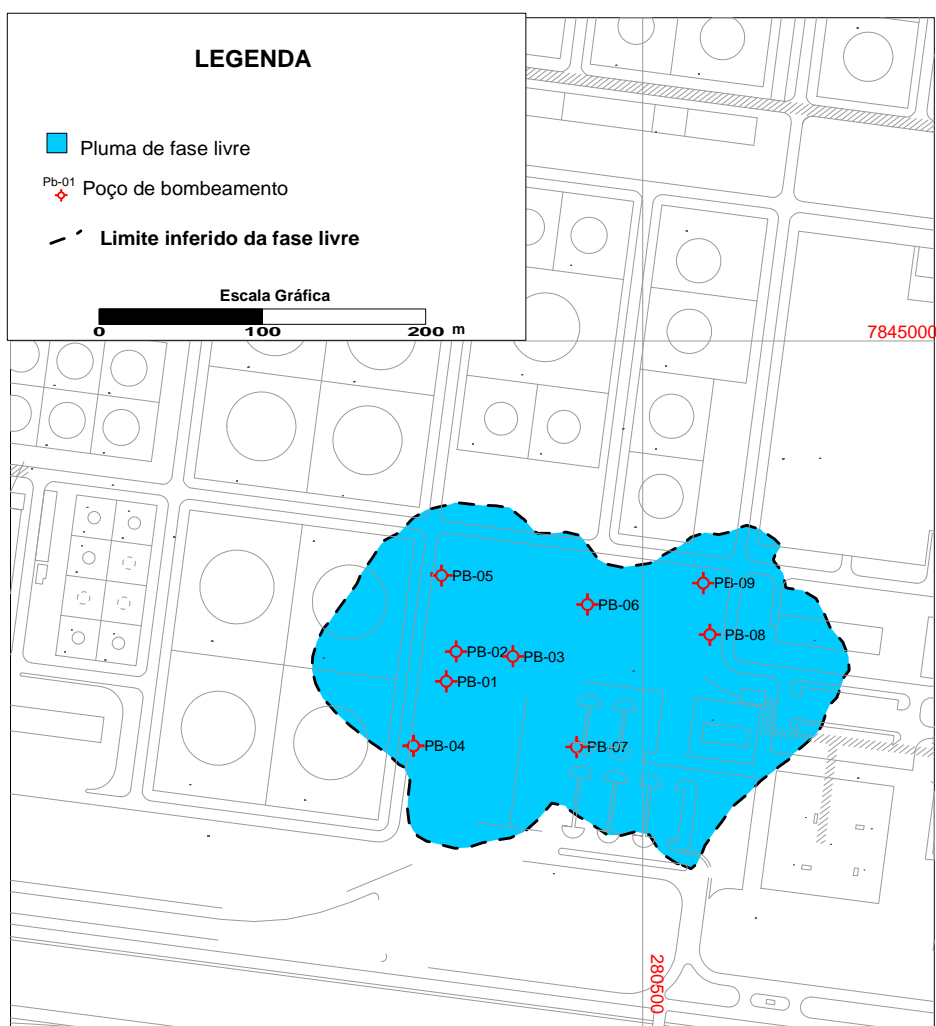


Figura 39 – Mapa de localização dos poços de bombeamento e fase livre.

7.2 – Teste Piloto

O processo de remediação iniciado em maio de 2005, por meio de teste piloto, com o bombeamento dos poços PB 01, 02 e 03 mostrou-se inicialmente falho quanto à recuperação de querosene, muito embora, durante a perfuração fossem observados grandes volumes de querosene na base do *auger*.

Analisando-se o mapa potenciométrico do mês de abril de 2005 (Figura 40 A), nota-se que a fase livre apresenta espessura inferior a 20 cm em todos os poços de monitoramento instalados até então. A Figura 40 B mostra o valor da cota do nível d'água no PM 57.

Durante o teste piloto não se observou a recuperação de querosene a partir do bombeamento do poço PB 01. Durante o processo de instalação deste poço optou-se por uma seção de tubo liso dos 13,50 aos 16,50 m, porção esta correspondente aos argilitos da unidade F. Devido ao diâmetro do furo (40 cm) grandes volumes de solo foram trazidos pelo *auger* durante a perfuração. Durante a subida do material perfurado é provável que argila tenha se aderido à parede do furo, criando assim, uma camada argilosa, de alta capilaridade, entre a formação e o pré-filtro, não permitindo a entrada do querosene. A partir de então procurou-se não perfurar a camada de argilitos durante a instalação dos novos poços de bombeamento.

A água bombeada do poço PB 01 foi lançada diretamente na rede de coleta da estação de tratamento de efluentes industriais (ETDI). Durante o teste piloto a água (emulsão) foi analisada semanalmente pelo método expedito de infravermelho no laboratório presente na área de estudo. Os valores obtidos expressos em ppm (partes por milhão) foram transformados em volume de óleo.

A emulsão bombeada dos poços PB 02 e 03 foi lançada em caixas separadoras individuais, o querosene recuperado armazenado em *containers* e o efluente restante lançado na rede de coleta da ETDI para posterior tratamento. A emulsão dos poços de bombeamento PB 02 03, após passar pela caixa separadora, foi analisada pelo método expedito de infravermelho.

Os poços PB 01, 02 e 03 continuaram a ser bombeados e ao final do mês de maio de 2006 haviam sido recolhidos 4.391 litros de querosene puro (Tabela 12) e lançados 1.133,81 litros de querosene emulsificado (Tabela 13). No mês de fevereiro de 2006 iniciou-se o bombeamento do PB 04 com vazão média de 1600 litros por hora. A emulsão do poço PB 04 foi lançada diretamente na canaleta da ETDI. A Tabela 14 mostra o volume total bombeado no período.

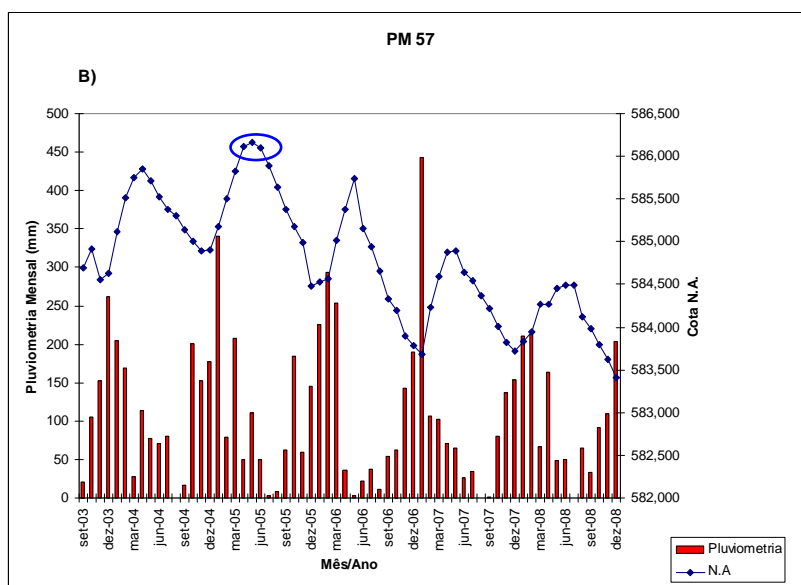
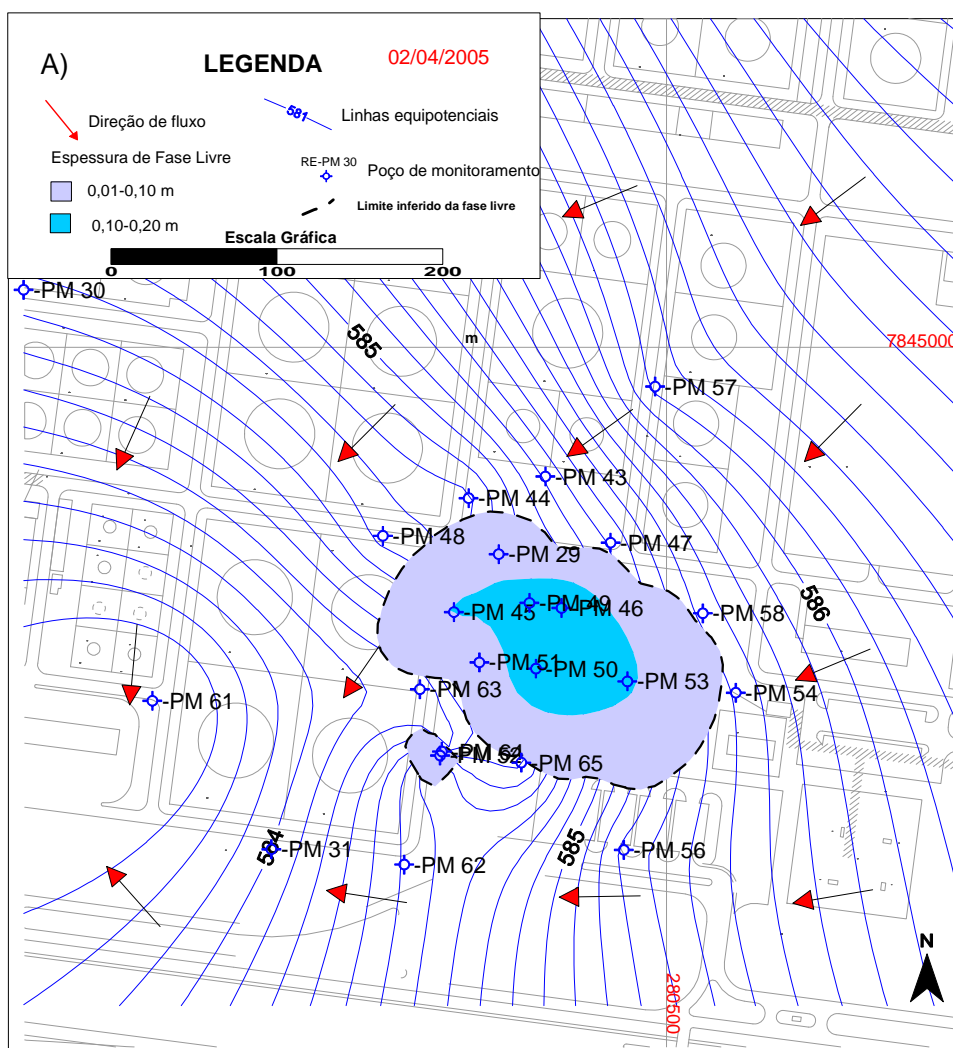


Figura 40 - Pluma de Fase livre em abril de 2005 (A) e cota do N.A. (azul) do PM 57 (B).

Tabela 12 – Volume de querosene recuperado.

| Mês /Ano | Volume de óleo PB 02 (litros) | Volume de óleo PB 03 (litros) | Volume de óleo no mês (litros) |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Junho/05 | 18,20 | - | 18,20 |
| Julho/05 | 45,40 | 0 | 45,40 |
| Agosto/05 | 28,40 | 0 | 28,40 |
| Setembro/05 | 9,60 | 0 | 9,60 |
| Outubro/05 | - | 21,90 | 21,90 |
| Novembro/05 | 80,90 | 141,50 | 222,40 |
| Dezembro/05 | 255,40 | 670,90 | 926,30 |
| Janeiro/06 | 459,00 | 1448,50 | 1907,50 |
| Fevereiro/06 | 209,90 | 854,00 | 1063,90 |
| Março/06 | 136,00 | 11,30 | 147,30 |
| Abril/06 | 0 | 0 | 0 |
| Maio/06 | 0 | 0 | 0 |
| Total (litros) | | | 4.390,00 |

Tabela 13 – Volume de querosene lançado (emulsão) na rede da ETDI.

| Mês (Ano) | PB 01 (litros) | PB 02 (litros) | PB 03 (litros) | PB 04 (litros) | Volume Mensal |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Junho/05 | | - | - | - | - |
| Julho/05 | - | 39,2 | 1,45 | - | 40,65 |
| Agosto/05 | 15,60 | 34,4 | 0,50 | - | 50,5 |
| Setembro/05 | 4,72 | 13,91 | 0,62 | - | 19,25 |
| Outubro/05 | 14,49 | 32,5 | 1,56 | - | 48,55 |
| Novembro/05 | 14,58 | 71,5 | 3,90 | - | 89,98 |
| Dezembro/05 | 32,16 | 192,6 | 36,96 | - | 261,72 |
| Janeiro/06 | 54,92 | 278,9 | 1,77 | - | 335,59 |
| Fevereiro/06 | 30,45 | 40,18 | 6,31 | 25,31 | 102,25 |
| Março/06 | 5,38 | 63,44 | 0,21 | 20,62 | 89,65 |
| Abril/06 | 16,94 | 11,68 | 0,57 | 4,97 | 34,16 |
| Maio | 11 | 34,46 | 1,12 | 14,93 | 61,51 |
| TOTAL (litros) | | | | | 1.133,81 |

Tabela 14 – Volume total de água (emulsão) bombeado entre maio de 2005 e maio de 2006.

| Mês (Ano) | Vol. Bombeado (m³) PB 01 | Vol. Bombeado (m³) PB 02 | Vol. Bombeado (m³) PB 03 | Vol. Bombeado (m³) PB 04 | Vol. total bombeado no mês (m³) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Maio/05 | 0 | 0 | 87,30 | - | 87,30 |
| Junho/05 | 0 | 141,00 | 223,00 | - | 364,00 |
| Julho/05 | 0 | 407,50 | 194,00 | - | 601,50 |
| Agosto/05 | 756,00 | 413,50 | 92,72 | - | 1.262,22 |
| Setembro/05 | 524,40 | 412,50 | 64,80 | - | 1.001,70 |
| Outubro/05 | 690,00 | 459,00 | 69,20 | - | 1.218,20 |
| Novembro/05 | 540,00 | 304,60 | 58,00 | - | 902,60 |
| Dezembro/05 | 545,13 | 224,20 | 30,24 | - | 799,57 |
| Janeiro/06 | 588,72 | 222,81 | 26,04 | - | 837,57 |
| Fevereiro/06 | 366,57 | 240,64 | 28,72 | 1.054,70 | 1.690,63 |
| Março/06 | 306,24 | 438,19 | 58,65 | 1.207,20 | 2.010,28 |
| Abril/06 | 847,32 | 644,42 | 91,60 | 1.136,52 | 2.719,86 |
| Maio/06 | 883,56 | 656,54 | 100,08 | 1.159,68 | 2.799,86 |

A variação dos níveis de água e querosene do poço 50 situado ao lado do poço de bombeamento PB 03 e o ciclo hidrológico da área podem ser observados na Figura 41. Nesta Figura observa-se que a remediação foi iniciada no ápice da recarga do ano de 2004. Nota-se também, no período da recarga, uma diminuição na espessura da fase livre e elevação da mesma.

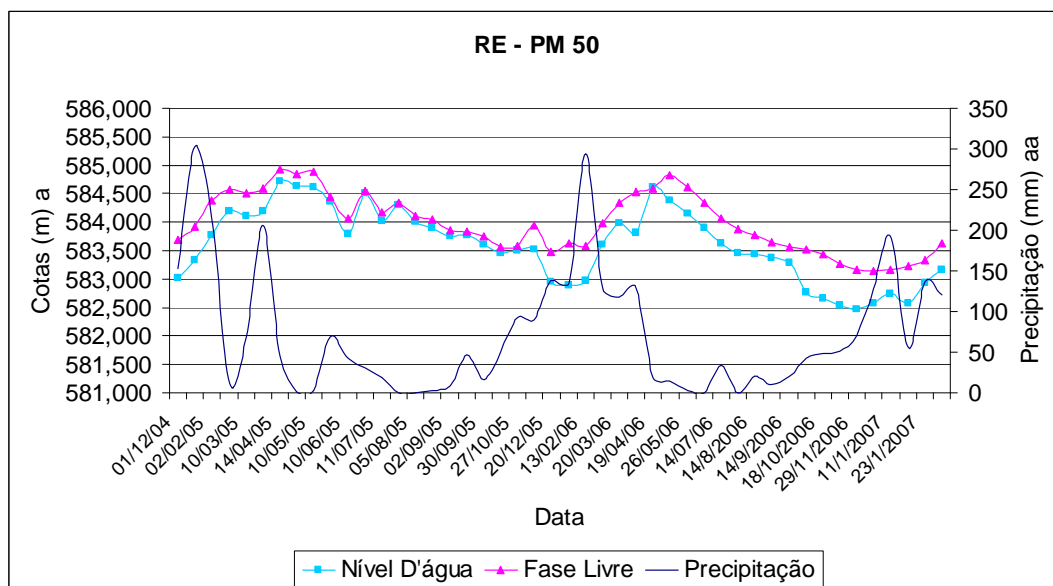


Figura 41 – Variação do nível d'água, fase livre e precipitação.

O aumento nas taxas de recuperação de querosene dos poços PB 02 e 03 a partir do mês de novembro de 2005 coincide com o rebaixamento do nível d'água e aumento da espessura de querosene nos poços de monitoramento. Na Figura 42A, referente ao mês de dezembro de 2005, é possível observar, na porção central da pluma de fase livre, o aumento na espessura de querosene. A Figura 42B mostra a cota do nível d'água no poço de monitoramento 57 referente ao mês de dezembro.

O início da recuperação do nível d'água a partir da segunda quinzena de janeiro de 2006 provocou a diminuição nas taxas de recuperação de querosene. Até o mês de maio de 2006, ápice da recuperação, observou-se uma contínua ascensão do nível d'água (média de 1,35 m). Conjuntamente à subida do nível d'água observou-se a elevação nas taxas de bombeamento da água subterrânea (emulsão e fase dissolvida) e diminuição nos valores de óleos e graxas. Na Figura 43 A, referente ao mês de maio de 2006, é possível observar a distribuição da pluma de fase livre. A Figura 43B mostra a cota do nível d'água no poço de monitoramento 57 referente ao mês de maio de 2006.

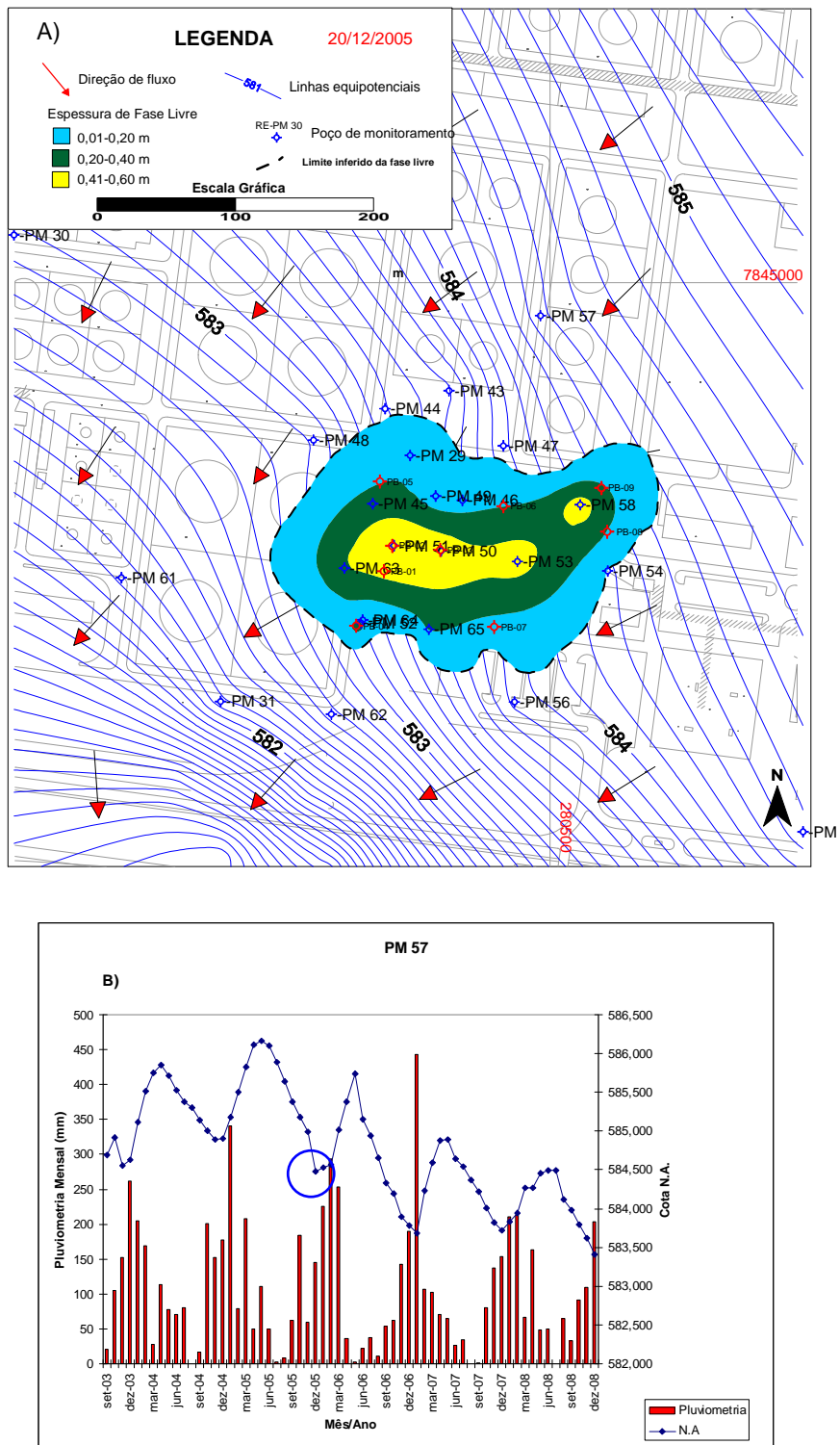


Figura 42 - Pluma de Fase livre em dezembro de 2005 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57B

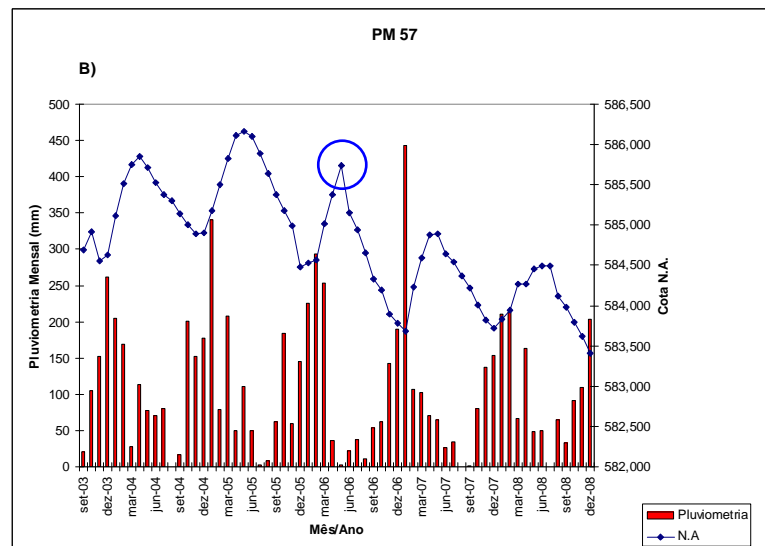
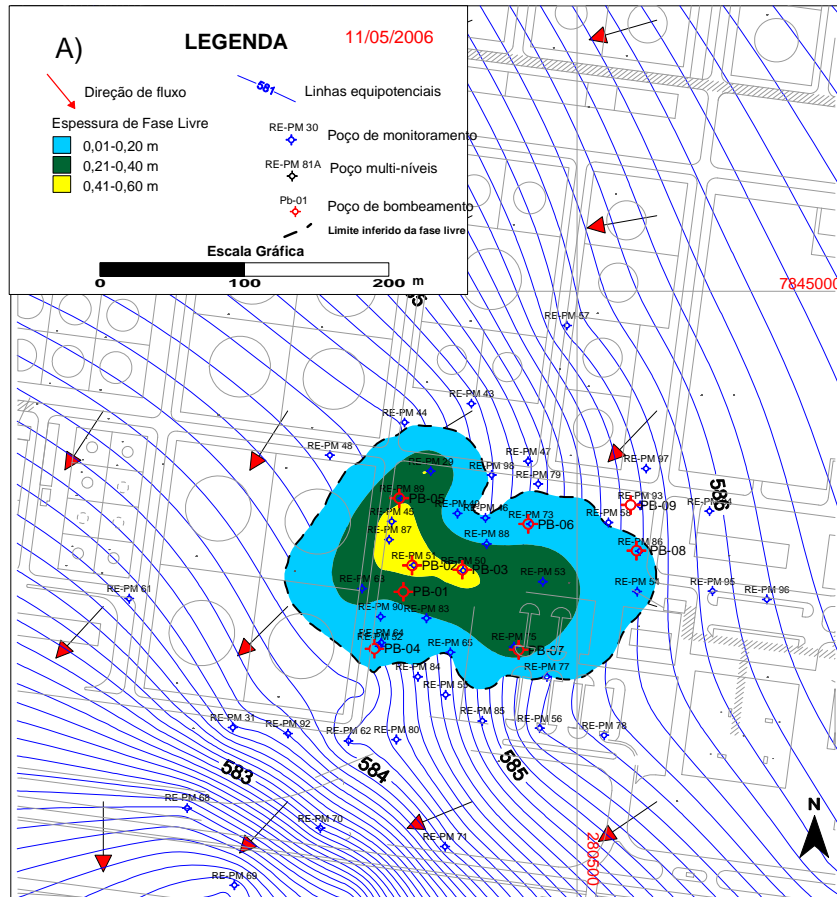


Figura 43 - Pluma de Fase livre em maio de 2006 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B).

7.3 – Remediação de Querosene

Após o teste piloto realizado entre maio de 2005 a maio de 2006, prosseguiu-se com o bombeamento dos poços.

No mês de Junho de 2006 foi identificada, após diversos estudos e melhor definição da pluma, a fonte da contaminação. A área fonte, localizada na porção nordeste da pluma, é representada por uma tubulação em aço, furada, de $\frac{3}{4}$ de polegada de diâmetro enterrada a menos de um metro de profundidade. Esta tubulação fornecia querosene utilizado na limpeza de vidraria do laboratório da área de estudo. Imediatamente após a descoberta do vazamento cessou-se a utilização da desta linha. O vazamento foi constatado por meio de testes hidrostáticos. Na Figura 44A é possível observar a posição da área fonte.

Somente no mês de setembro de 2006, observou-se novamente a recuperação de querosene de maneira significativa. Na Figura 41 é possível observar o aumento de espessura de querosene no poço de monitoramento 50 a partir do mês de setembro de 2006. No ápice do rebaixamento, ocorrido no mês de novembro de 2006 o poço 50 apresentava a interface óleo/água 40 cm abaixo do rebaixamento máximo observado no ano de 2005. O mapa de outubro de 2006 mostra as maiores espessuras de querosene até então medidas (Figura 44).

Com o início do bombeamento do PB 05 em agosto de 2006 e do PB 06 em outubro do mesmo ano, foi possível recuperar somente no mês de novembro 32.581 litros de querosene. No período de outubro de 2006 a janeiro de 2007 foram recuperados 84.573,70 litros de querosene. As altas taxas de recuperação demandaram novo planejamento, quanto ao manejo e destino do querosene recuperado. As taxas mensais de recuperação de querosene podem ser observadas na Tabela 15.

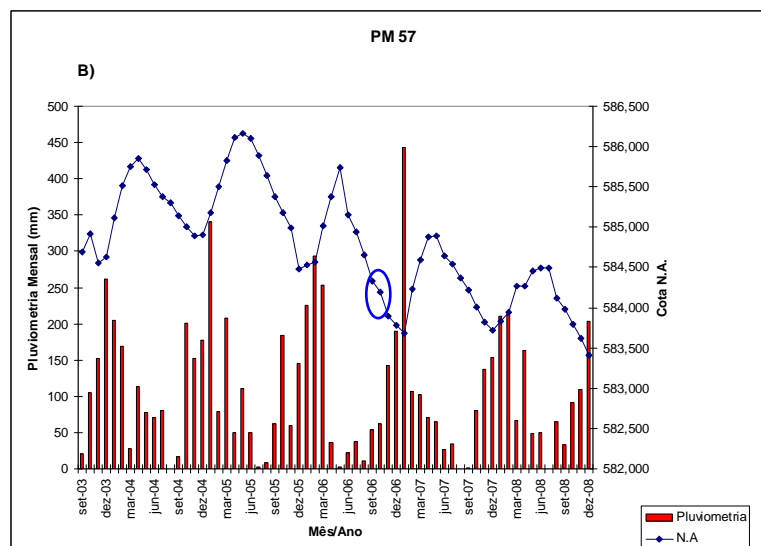
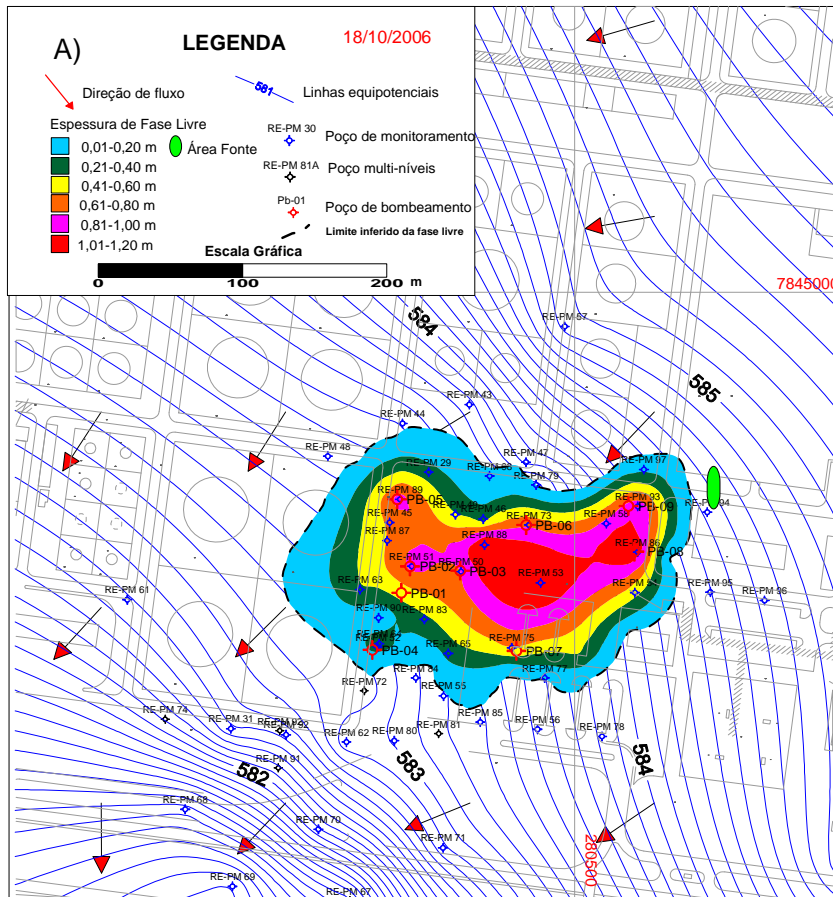


Figura 44 - Pluma de Fase livre em outubro de 2006 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B).

Tabela 15 – Volume de querosene recuperado.

| Mês (Ano) | Volume de querosene PB 02 (litros) | Volume de querosene PB 03 (litros) | Volume de querosene PB 05 (litros) | Volume de querosene PB 06 (litros) | Volume de querosene PB 07 (litros) | Volume de querosene recuperado no mês (litros) |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| Junho/05 | 18,20 | - | - | - | - | 18,20 |
| Julho/05 | 45,40 | 0 | - | - | - | 45,40 |
| Agosto/05 | 28,40 | 0 | - | - | - | 28,40 |
| Setembro/05 | 9,60 | 0 | - | - | - | 9,60 |
| Outubro/05 | - | 21,90 | - | - | - | 21,90 |
| Novembro/05 | 37,00 | 141,50 | - | - | - | 222,40 |
| Dezembro/05 | 255,40 | 670,90 | - | - | - | 926,30 |
| Janeiro/06 | 459,00 | 1448,50 | - | - | - | 1907,50 |
| Fevereiro/06 | 209,90 | 854,00 | - | - | - | 1063,90 |
| Março/06 | 136,00 | 11,30 | - | - | - | 147,30 |
| Abril/06 | 0 | 0 | - | - | - | 0 |
| Mai/06 | 0 | 0 | - | - | - | 0 |
| Junho/06 | 0 | 1,9 | - | - | - | 1,90 |
| Julho/06 | 0 | 7,6 | - | - | - | 7,60 |
| Agosto/06 | 0,80 | 14,65 | 124,30 | - | - | 139,75 |
| Setembro/06 | 2,40 | 194,60 | 342,20 | - | - | 539,20 |
| Outubro/06 | 949,50 | 6.277,50 | 4.355,50 | 1.180,00 | - | 12.762,50 |
| Novembro/06 | 2.331,00 | 7.870,00 | 6.733,00 | 15.647,00 | - | 32.581,00 |
| Dezembro/06 | 2.173,00 | 5.203,00 | 5.584,00 | 11.377,00 | 2.067,00 | 26.404,00 |
| Janeiro/07 | 716,70 | 2.695,00 | 2.449,50 | 3.527,00 | 3.438,00 | 12.826,20 |
| Fevereiro/07 | 76,80 | 63,00 | 54,70 | 6,00 | 5,00 | 205,50 |
| Março/07 | 100,30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,30 |
| TOTAL | | | | | | 89.958,85 |

A Figura 45 mostra a evolução do bombeamento do PB 03. É possível observar que as taxas mensais de recuperação de querosene foram excepcionais no período de outubro de 2006 a Janeiro de 2007, atingindo no mês de novembro 7.870 litros. Nos períodos de recuperação máxima de querosene, o volume de água bombeado foi baixo.

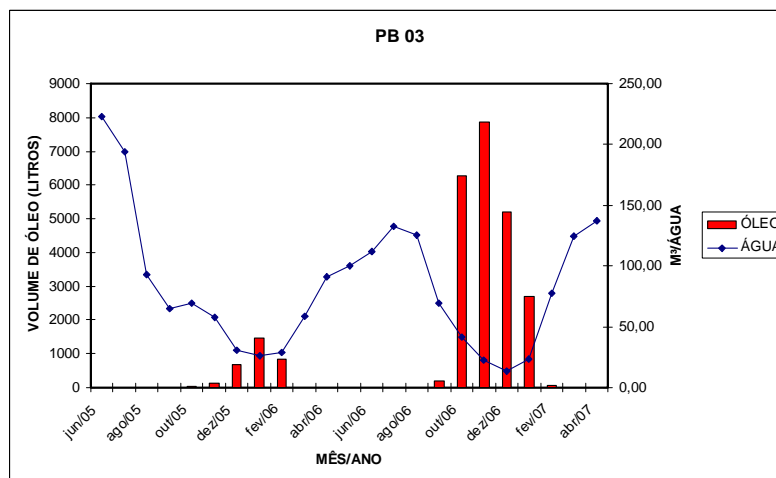


Figura 45 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 03.

O poço PB 02 (Figura 46) apresentou durante o processo de remediação comportamento semelhante ao PB 03, embora demonstrando taxas de recuperação de querosene menores.

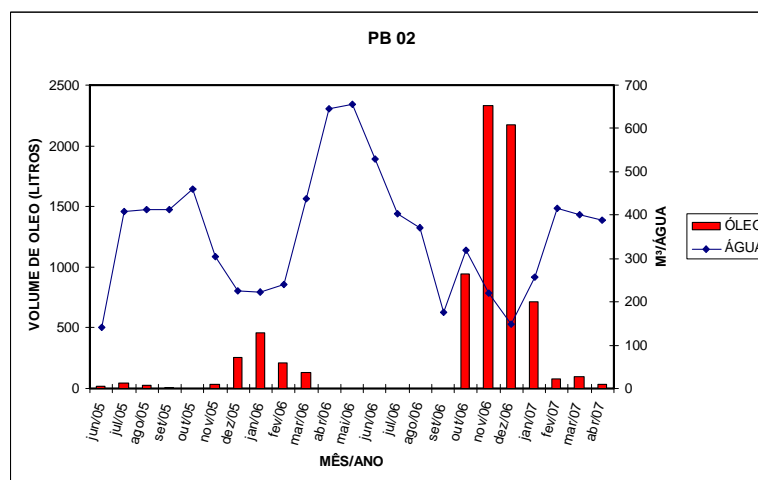


Figura 46 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 02.

Na Figura 47 é possível observar as taxas diárias de recuperação de querosene do poço PB 03 no período compreendido entre setembro de 2006 e fevereiro de 2007. Nota-se o aumento nas taxas de recuperação de querosene ao longo do mês de outubro. O valor diário máximo de 320 litros foi observado no dia 8 de novembro. Após este resultado observou-se uma diminuição constante nas taxas de recuperação.

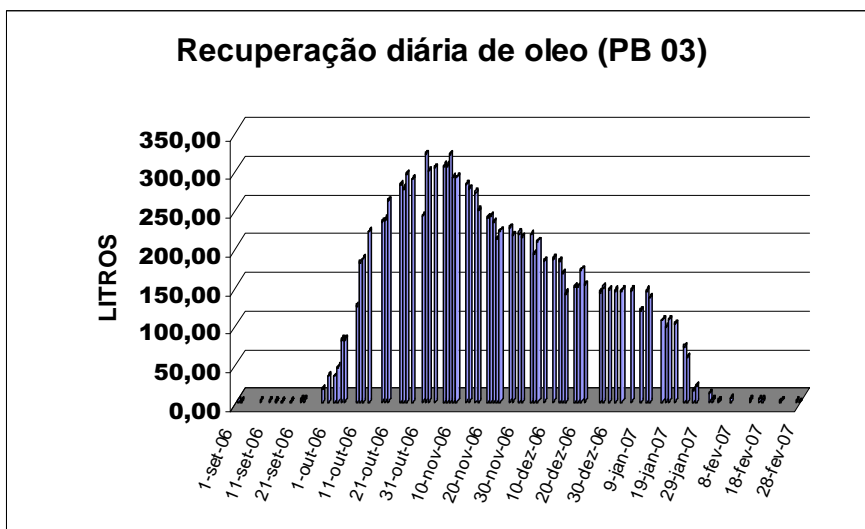


Figura 47 – Recuperação diária de querosene do PB 03.

Na Figura 48 é possível observar as taxas diárias de recuperação de querosene do poço PB 05 no período compreendido entre setembro de 2006 e fevereiro de 2007. Nota-se um acentuado incremento nas taxas recuperação de querosene a partir da segunda quinzena de outubro de 2006. No dia 14 de novembro verificou-se o valor diário máximo de recuperação de 245 litros. Após este valor ocorreu uma diminuição gradual nas taxas de recuperação de querosene.

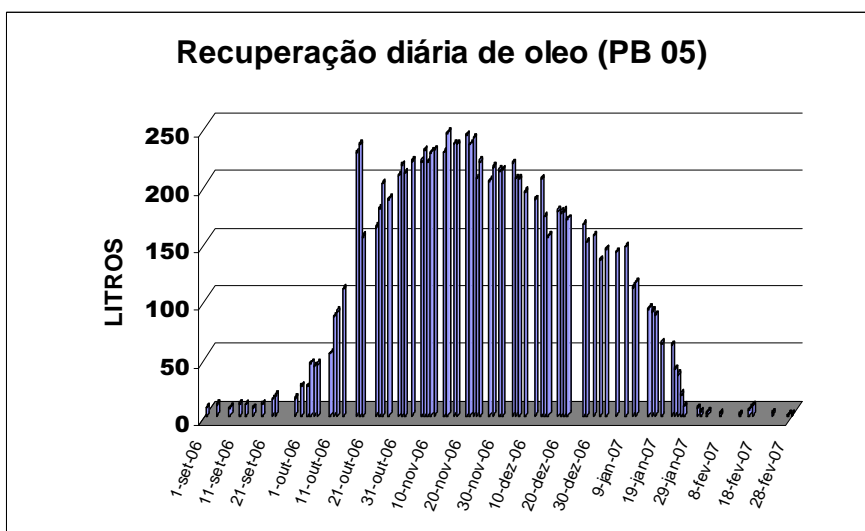


Figura 48 – Recuperação diária de querosene do PB 05

A partir do bombeamento do poço PB 06 foi possível recuperar 31.737 litros de querosene no período de outubro de 2006 a janeiro de 2007. No dia 30 de outubro, início do bombeamento, observou-se uma vazão média de 48 litros/hora de

querosene recuperado para uma vazão de 180 litros/hora de água. A Figura 49 mostra a distribuição da recuperação diária de querosene a partir do mês de novembro de 2006.

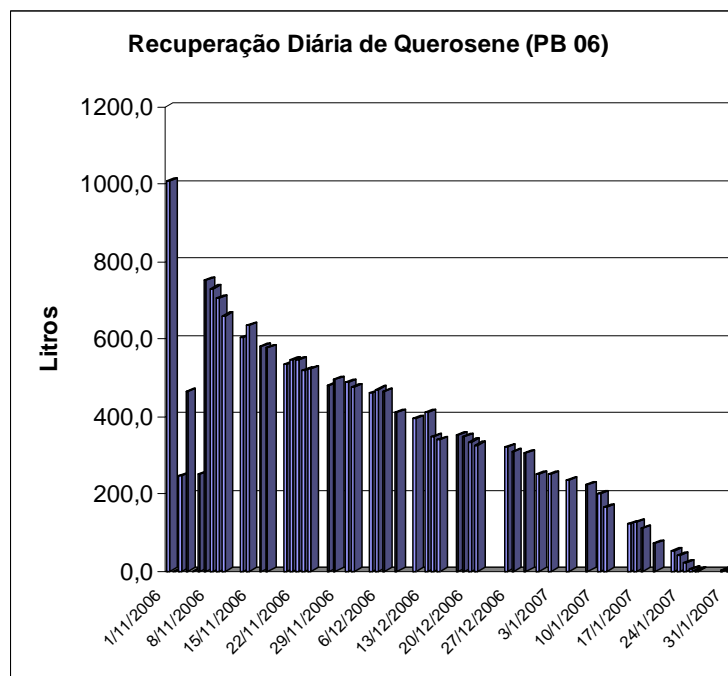


Figura 49 - Recuperação diária de querosene do PB 06.

A partir do dia 15 de dezembro de 2006 iniciou-se, de forma ininterrupta, o bombeamento do poço PB 07. A vazão média de operação foi de 863 litros/hora de água (emulsão). No período de dezembro de 2006 a fevereiro de 2007 foram recolhidos 5.510 litros de querosene. A Figura 50 mostra a distribuição da recuperação diária de querosene a partir do mês de dezembro de 2006.

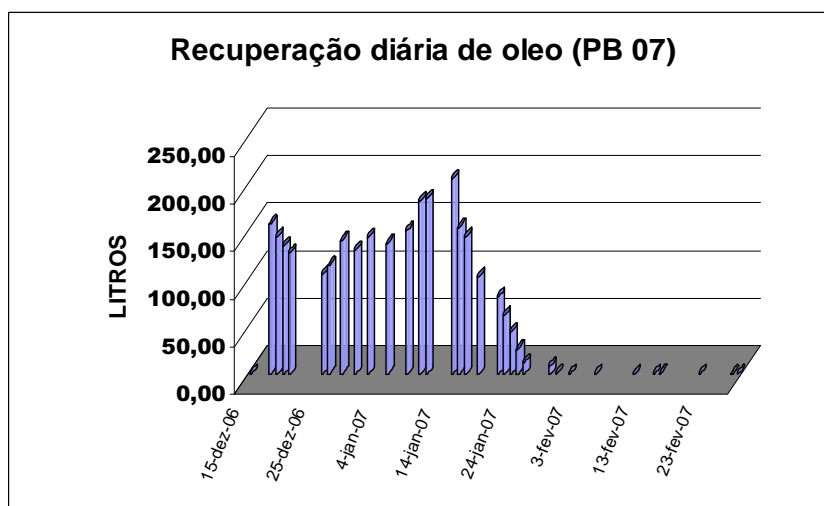


Figura 50 - Recuperação diária de querosene do PB 07.

O mês de janeiro de 2007 foi caracterizado por altos índices pluviométricos (443 mm) e pela rápida elevação do nível d'água nos poços de monitoramento. Entre 11 de janeiro de 2007 a 06 de fevereiro foi observada uma recuperação média de 80 cm do nível d'água nos poços de monitoramento. Este fenômeno de recarga ocasionou o trapeamento do querosene, resultando na diminuição brusca das taxas de recuperação de querosene dos poços de bombeamento (Figura 51).

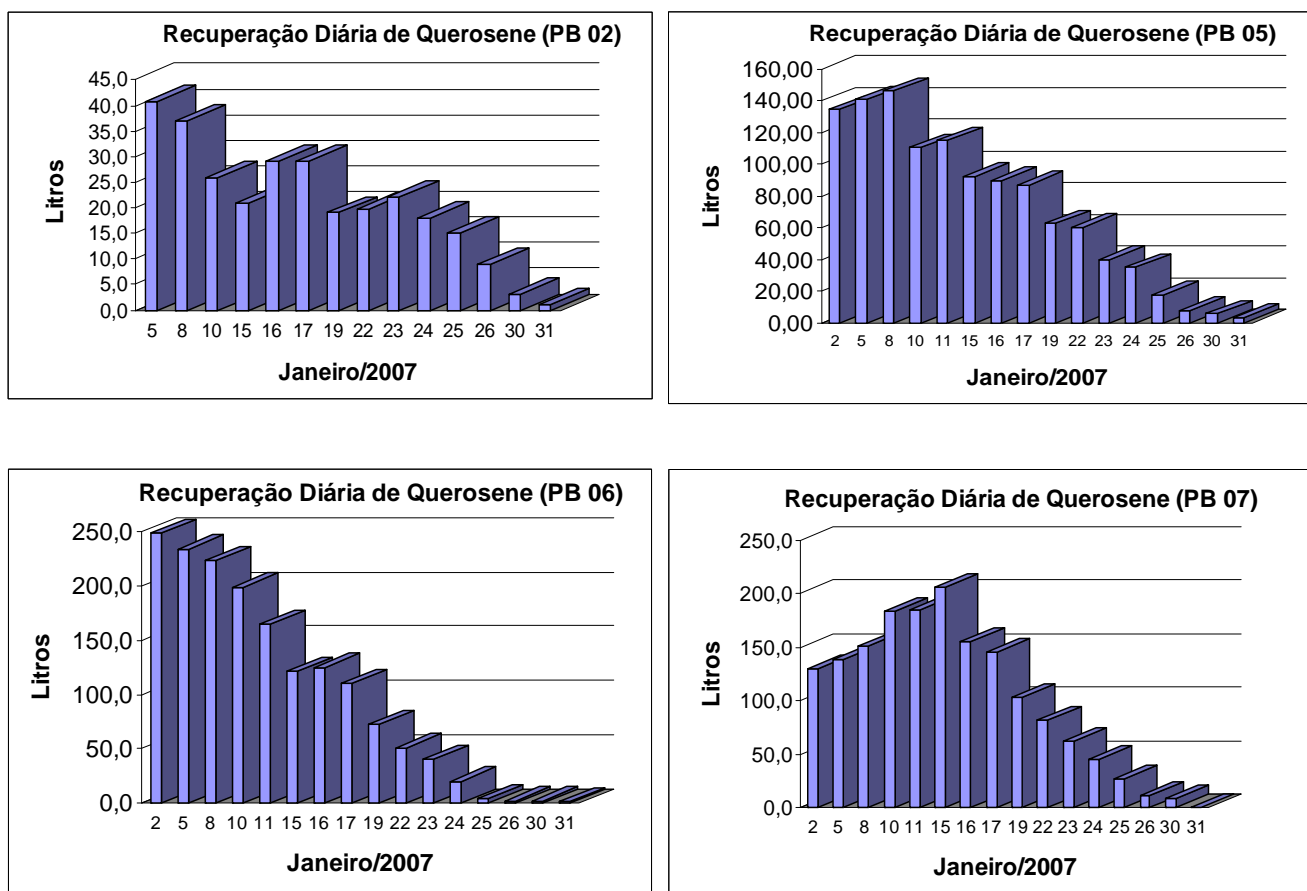


Figura 51 - Gráficos de recuperação diária de querosene

Ao longo do período de recarga do aquífero, iniciado no mês de janeiro de 2007, com o ápice em abril de 2007, não se observou, no mês de março, a presença de querosene nas caixas separadoras dos poços PB 03, 05, 06 e 07. A Figura 52A mostra o mapa de abril de 2007 com as espessuras de querosene e potenciometria da área. Na Figura 52B é possível observar a recarga do aquífero iniciada em janeiro.

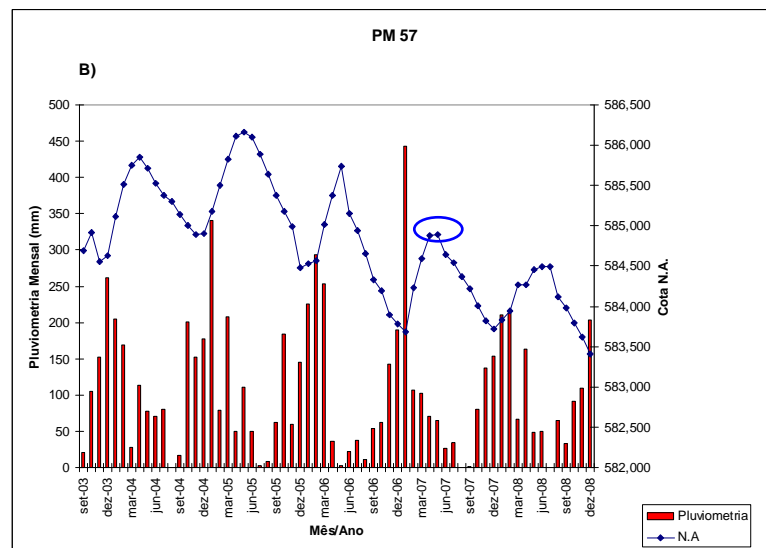
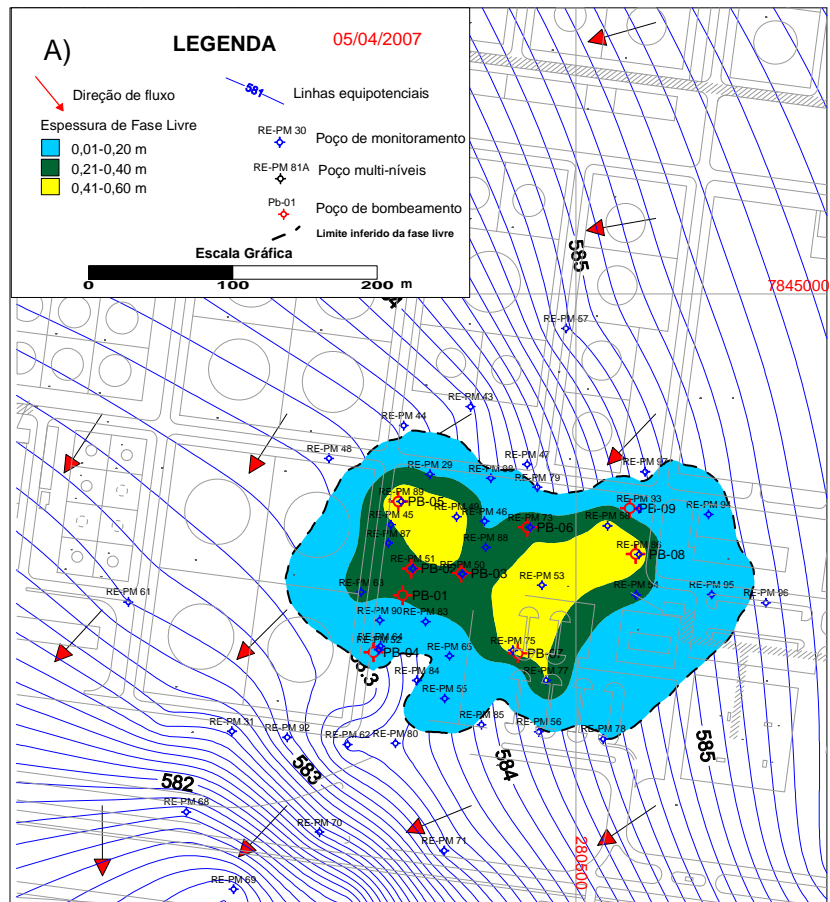


Figura 52 - Pluma de Fase livre em abril de 2007 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B).

A água bombeada do poço PB 06, até então o poço de maior recuperação de querosene, apresentava em março de 2007, aspecto límpido e cristalino (Foto 20). A amostra de água coletada antes da caixa separadora apresentava teor medido de óleos e graxas de apenas 2 ppm.



Foto 20 – Aspecto límpido e cristalino da água bombeada do PB 06.

Os períodos compreendidos entre março a agosto de 2007 e março a agosto de 2008 foram marcados pelas baixas taxas de recuperação de querosene e pelo aumento das taxas de bombeamento de água. Repetiu-se, assim, o fenômeno de trapeamento do querosene observado nos anos de 2005 e 2006. A Figura 53 mostra os valores mensais de recuperação de querosene.

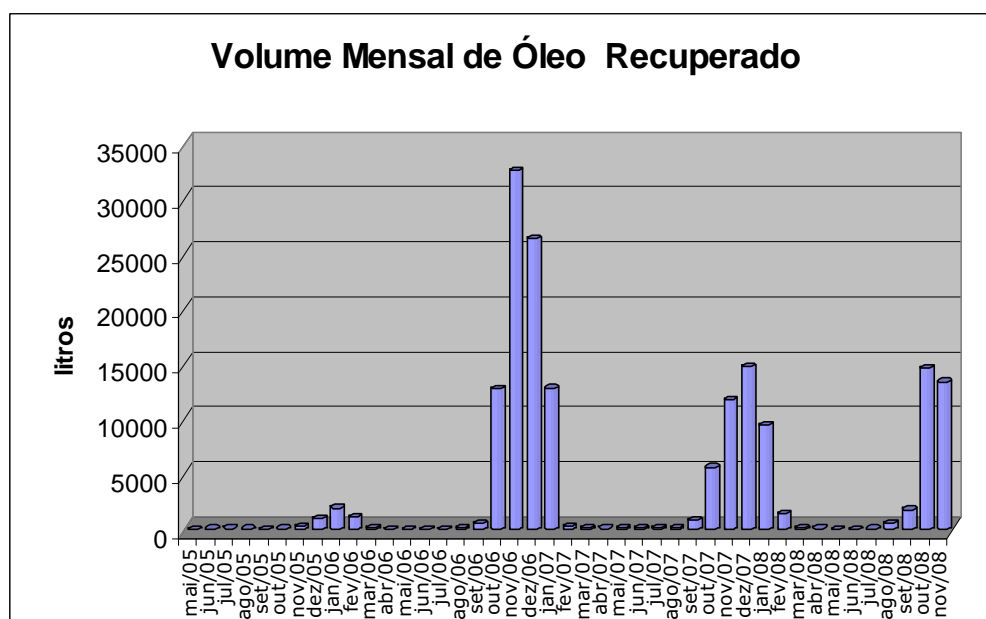


Figura 53 – Gráfico de recuperação de querosene mensal total.

A Tabela 16 mostra os valores mensais de recuperação de querosene de cada poço de bombeamento até o mês de novembro de 2008.

Tabela 16 – Volume de querosene recuperado.

| Mês (Ano) | Volume de querosene PB 02 (litros) | Volume de querosene PB 03 (litros) | Volume de querosene PB 05 (litros) | Volume de querosene PB 06 (litros) | Volume de querosene PB 07 (litros) | Volume de querosene PB 08 (litros) | Volume de querosene recuperado no mês (litros) |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| Junho/05 | 18,20 | - | - | - | - | - | 18,20 |
| Julho/05 | 45,40 | 0 | - | - | - | - | 45,40 |
| Agosto/05 | 28,40 | 0 | - | - | - | - | 28,40 |
| Setembro/05 | 9,60 | 0 | - | - | - | - | 9,60 |
| Outubro/05 | - | 21,90 | - | - | - | - | 21,90 |
| Novembro/05 | 37,00 | 141,50 | - | - | - | - | 222,40 |
| Dezembro/05 | 255,40 | 670,90 | - | - | - | - | 926,30 |
| Janeiro/06 | 459,00 | 1448,50 | - | - | - | - | 1907,50 |
| Fevereiro/06 | 209,90 | 854,00 | - | - | - | - | 1063,90 |
| Março/06 | 136,00 | 11,30 | - | - | - | - | 147,30 |
| Abril/06 | 0 | 0 | - | - | - | - | 0 |
| Maio/06 | 0 | 0 | - | - | - | - | 0 |
| Junho/06 | 0 | 1,9 | - | - | - | - | 1,90 |
| Julho/06 | 0 | 7,6 | - | - | - | - | 7,60 |
| Agosto/06 | 0,80 | 14,65 | 124,30 | - | - | - | 139,75 |
| Setembro/06 | 2,40 | 194,60 | 342,20 | - | - | - | 539,20 |
| Outubro/06 | 949,50 | 6.277,50 | 4.355,50 | 1.180,00 | - | - | 12.762,50 |
| Novembro/06 | 2.331,00 | 7.870,00 | 6.733,00 | 15.647,00 | - | - | 32.581,00 |
| Dezembro/06 | 2.173,00 | 5.203,00 | 5.584,00 | 11.377,00 | 2.067,00 | - | 26.404,00 |
| Janeiro/07 | 716,70 | 2.695,00 | 2.449,50 | 3.527,00 | 3.438,00 | - | 12.826,20 |
| Fevereiro/07 | 76,80 | 63,00 | 54,70 | 6,00 | 5,00 | - | 205,50 |
| Março/07 | 100,30 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 100,30 |
| Abril/07 | 39,50 | 0 | 10,80 | 0 | 0 | - | 50,3 |
| Maio/07 | 34,00 | 0 | 22,90 | 0 | 0 | - | 56,90 |
| Junho/07 | 26,50 | 5,30 | 28,90 | 0 | 0 | - | 60,70 |
| Julho/07 | 10,00 | 16,60 | 47,50 | 2,50 | 13,10 | - | 89,70 |
| Agosto/07 | 5,10 | 28,90 | 90,7 | 1,2 | 3,80 | - | 130,70 |
| Setembro/07 | 6,70 | 21,70 | 106,00 | 55,00 | 2,60 | 686,00 | 878,00 |
| Outubro/07 | 51,30 | - | 641,50 | 961,20 | 22,20 | 3.960,00 | 5.636,20 |
| Novembro/07 | 425,50 | - | 1.682,60 | 2.956,20 | 842,60 | 5.824,00 | 11.730,90 |
| Dezembro/07 | 1.128,20 | 1.630,70 | 2.373,30 | 2.993,00 | 1.653,00 | 5.029,00 | 14.807,20 |
| Janeiro/08 | 1024,00 | 1626,50 | 1568,00 | 734,00 | 1467,00 | 3040,00 | 9.459,50 |
| Fevereiro/08 | 276,50 | 211,40 | 293,00 | 0,00 | 179,90 | 388,60 | 1.349,40 |
| Março/08 | 16,60 | 5,80 | 11,10 | 0,00 | 0,00 | 25,90 | 59,30 |
| Abril/08 | 4,80 | 4,90 | 9,30 | 0,00 | 6,90 | 14,50 | 40,40 |

Tabela 16 – Volume de querosene recuperado (continuação).

| Mês (Ano) | Volume de querosene PB 02 (litros) | Volume de querosene PB 03 (litros) | Volume de querosene PB 05 (litros) | Volume de querosene PB 06 (litros) | Volume de querosene PB 07 (litros) | Volume de querosene PB 08 (litros) | Volume de querosene recuperado no mês (litros) |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| Maio/08 | 3,60 | 0,60 | 3,20 | 0,0 | 0,40 | 2,80 | 10,60 |
| Junho/08 | 4,6 | - | 0,8 | 0,0 | - | 0,0 | 5,40 |
| Julho/08 | 1,0 | 1,3 | 9,5 | 0 | - | 22,50 | 34,30 |
| Agosto/08 | 0 | 1,90 | 18,90 | 0 | - | 491,80 | 512,60 |
| Setembro/08 | 0 | 25,00 | 198,10 | 190,90 | - | 1.345,80 | 1.759,80 |
| Outubro/08 | 209,20 | 722,70 | 1.014,00 | 3.381,00 | 696,00 | 8.649,00 | 14.671,90 |
| Novembro/08 | 801,00 | 1.559,00 | 1.472,00 | 2.995,00 | 1.378,00 | 5.180,00 | 13.385,00 |
| TOTAL (litros) | | | | | | | 164.687,00 |

No ano de 2007, somente a partir do mês setembro, simultaneamente ao início do funcionamento do poço PB 08, é que as taxas de recuperação de querosene voltaram a ser significativas. O poço PB 08 está instalado na porção leste da pluma, próximo à fonte, e operou com vazões médias de 850 litros/hora de emulsão.

O poço PB 08 recuperou 34.659,90 litros de querosene desde o início do seu funcionamento até o dia 29 de novembro de 2008. A Figura 54 mostra a produção mensal de querosene e água do poço PB 08. Destaca-se que durante o mês de setembro de 2008 o bombeamento não foi contínuo devido a problemas de armazenamento e transporte do querosene bombeado. Optou-se por desligar o poço durante alguns dias.

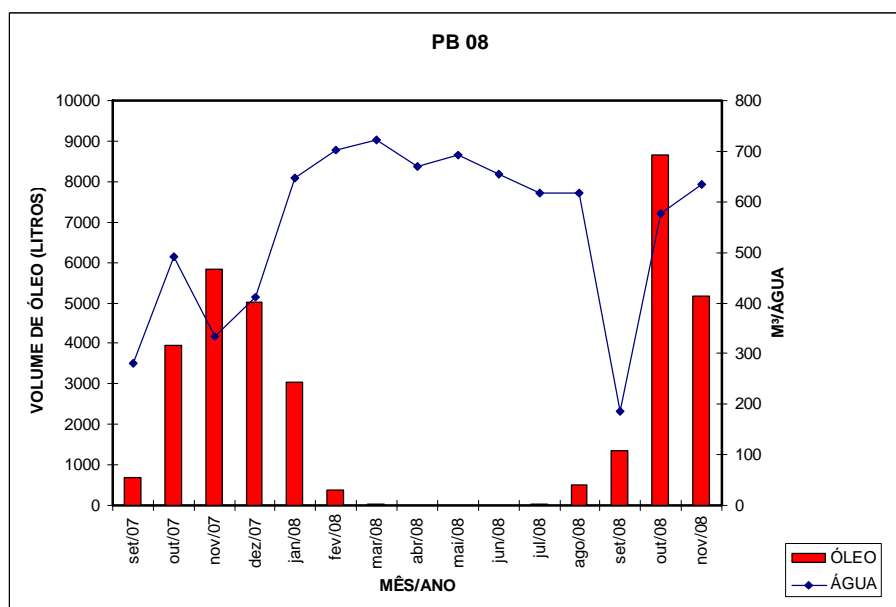


Figura 54 – Gráfico de recuperação de querosene e água do PB 08.

Na Figura 55A é possível observar, no mapa de outubro de 2007, a distribuição das espessuras de querosene, potenciometria e direção de fluxo da área. Os valores potenciométricos são semelhantes aos valores observados na pluma de outubro de 2006 (Figura 44). A principal diferença a ser ressaltada são as espessuras de querosene nos poços de monitoramento, na pluma de outubro de 2007 não se observam espessuras superiores a 80 cm e as espessuras que variam 0,61 e 80 cm ocorrem em porções isoladas da pluma de fase livre. A Figura 55B mostra que os valores de cota do nível d'água no poço PM 57 são semelhantes em ambas as épocas.

A pluma referente ao dia nove de outubro de 2008 (Figura 56A) apresentou uma diminuição das espessuras de fase livre nos poços de monitoramento em relação à pluma de outubro de 2007 (Figura 55A). Não se observam espessuras superiores a 60 cm. Destaca-se o fato de que, em termos potenciométricos, os poços de monitoramento apresentavam valores de cota mais baixos. A Figura 56B exemplifica o rebaixamento do nível d'água do poço 57.

As taxas de recuperação de querosene e água dos poços PB 02, 03, 05, 06 e 07 ao longo de todo o processo de remediação estão representadas na Figura 57.

Destaca-se que somente o poço PB 06 apresentou nos meses de outubro e novembro de 2008 valores superiores de recuperação de querosene em relação aos mesmos meses de 2007.

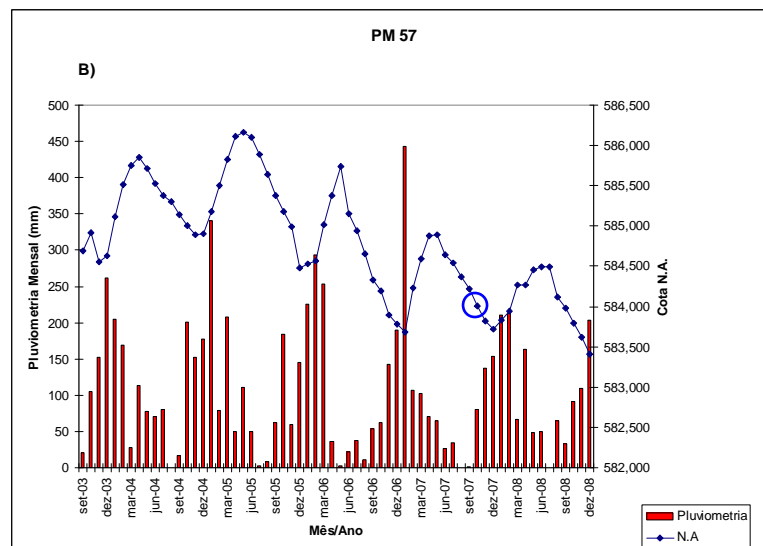
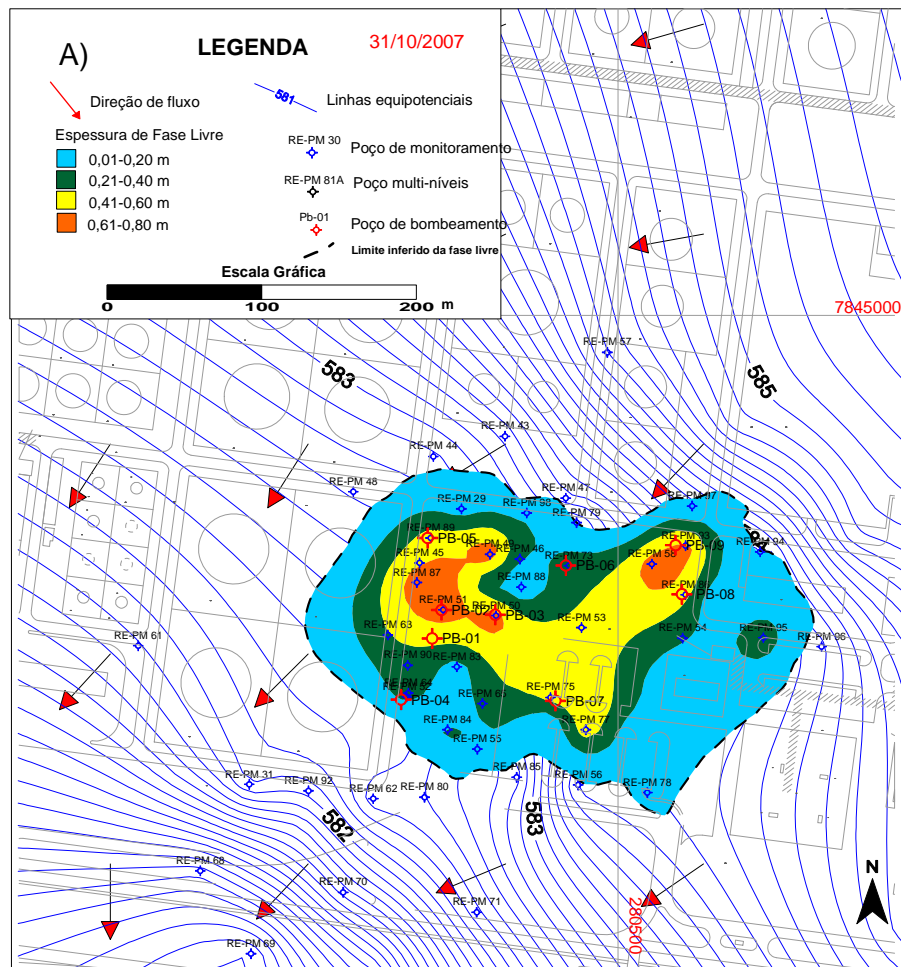


Figura 55 - Pluma de Fase livre em outubro 2007 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B).

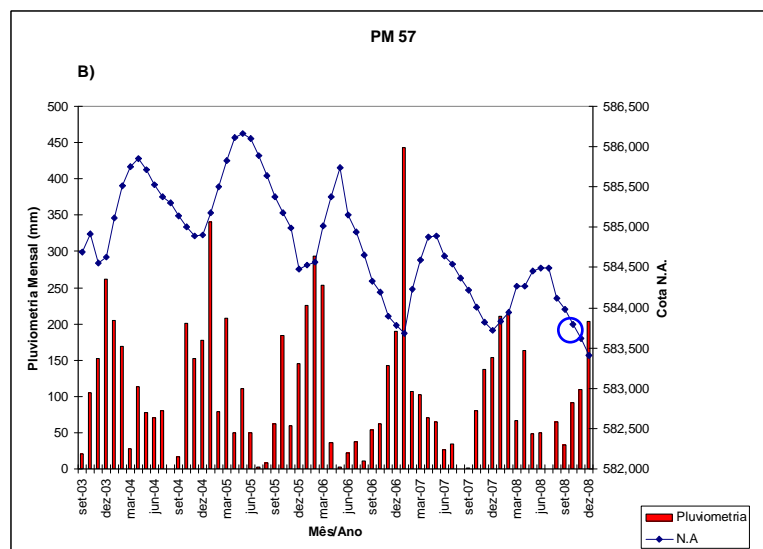
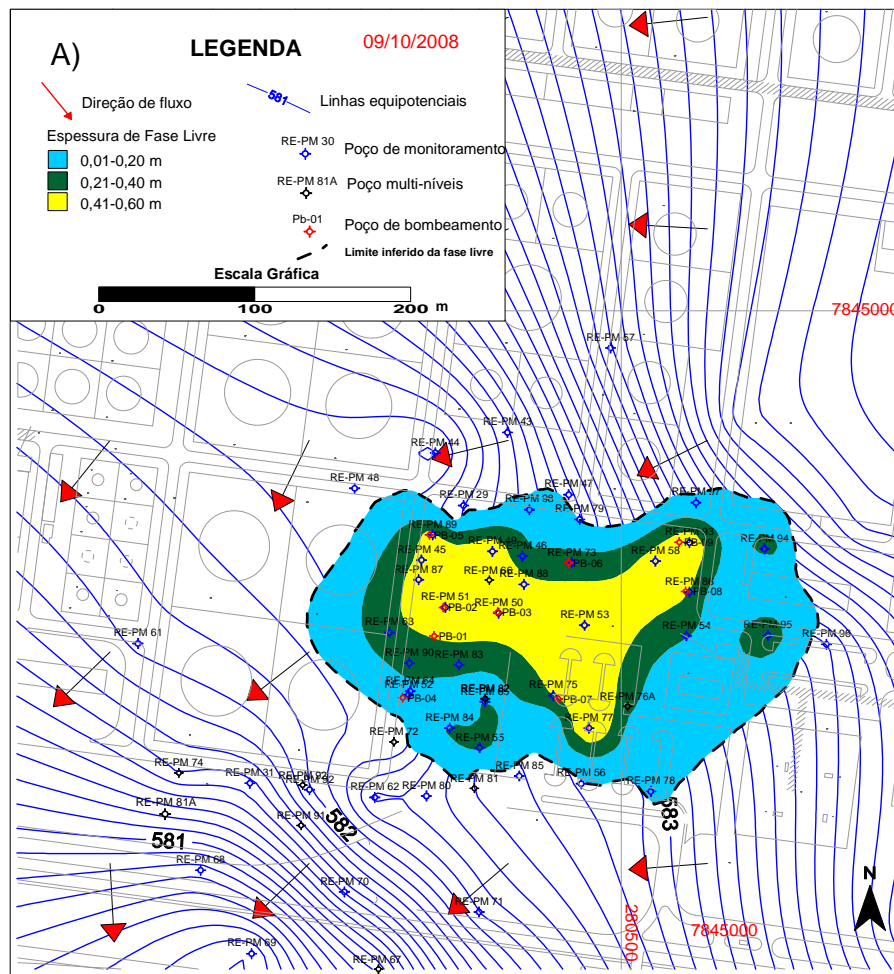


Figura 56 - Pluma de Fase livre em outubro 2008 (A) e cota correspondente do N.A. (azul) no PM 57 (B).

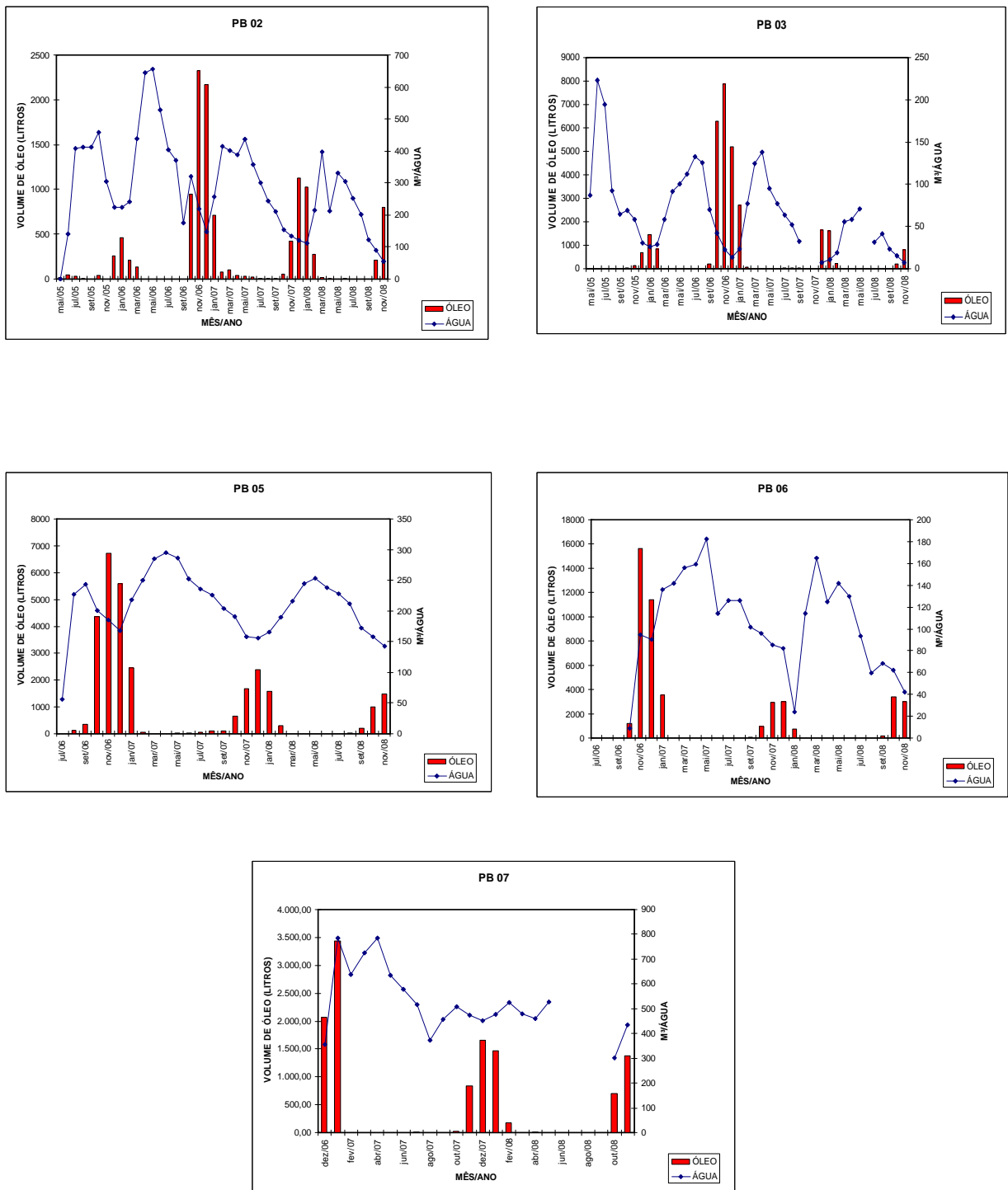


Figura 57 – Gráfico de recuperação de querosene e água dos poços PB 02, 03, 05, 06 e 07.

7.4 – Quantificação da Emulsão e Volume Total de Querosene Recuperado

Após o teste piloto, para melhor quantificar a eficiência do processo de remediação, optou-se por manter as análises quinzenais, pelo método de infravermelho, dos teores de querosene da emulsão dos poços de bombeamento. As amostras foram coletadas na saída das caixas separadoras. A emulsão dos poços PB 01 e 04 foi lançada diretamente na rede de coleta da estação de tratamento de efluentes industriais (ETDI). No período de remediação foram enviados 11.784,00 litros de querosene emulsificado para tratamento na ETDI.

A Figura 58 mostra o volume mensal calculado de querosene (emulsão) lançado na rede de coleta da estação de efluentes pelos poços de bombeamento.

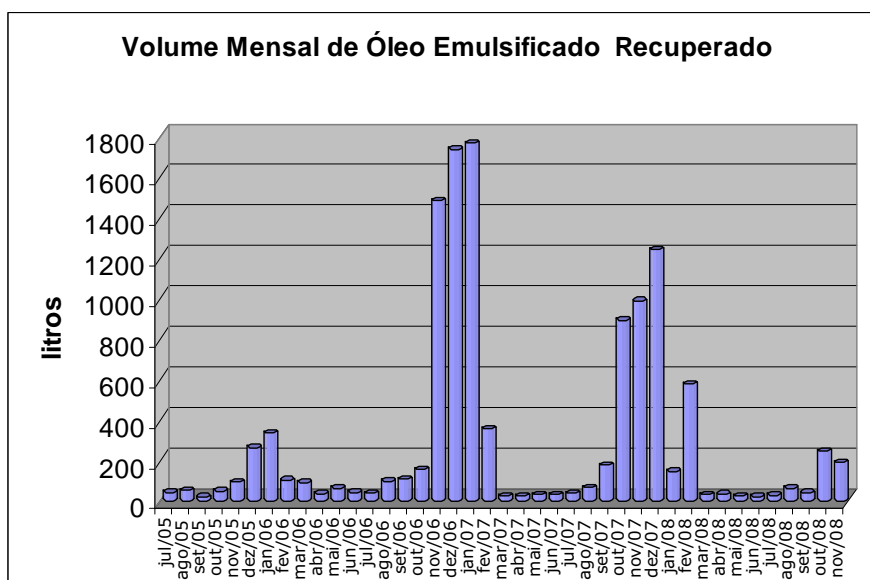


Figura 58 – Gráfico de recuperação mensal do querosene emulsificado.

O volume total de água bombeada desde o início do processo de remediação foi de **90.527 m³** (emulsão e fase dissolvida). Somando-se os volumes relativos ao querosene recuperado e querosene emulsificado obtém-se um volume total de **176.471,00** litros de óleo (querosene) removido desde o início do processo de remediação. A Figura 59 mostra o gráfico com os valores mensais de vazão de água e querosene total recuperado desde o início do processo de remediação.

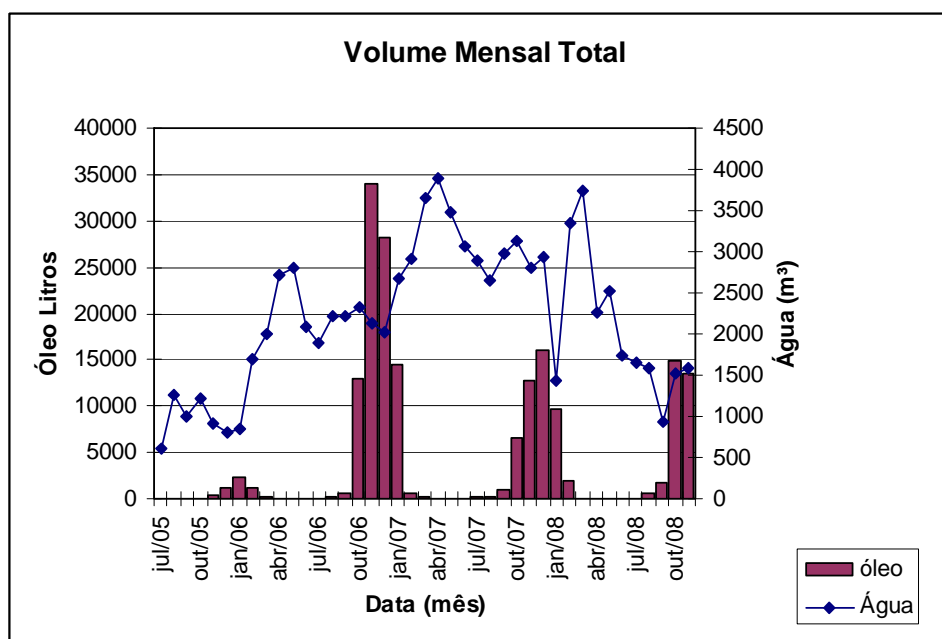


Figura 59 – Gráfico de recuperação mensal do querosene emulsificado.

7.5 – Fase Dissolvida

Embora a discussão sobre o comportamento da fase dissolvida não faça parte dos objetivos desta tese, observou-se que os valores de BTEX na pluma da fase dissolvida são baixos. A relação entre a pluma de fase livre e a de dissolvida é de difícil correlação, já que, ao norte da pluma de fase livre, os valores são superiores aos valores detectados nos poços de monitoramento adjacentes ao limite da pluma de fase livre. Nesta situação é possível que ocorra uma sobreposição de diferentes plumas de fase dissolvida. No mês de junho de 2008, por exemplo, apenas o benzeno apresentou valores acima dos valores orientadores da CETESB (Figura 60).

Ainda que seja difícil a quantificação, parcela significativa dos processos que impedem a migração da pluma está relacionada ao sistema de bombeamento de remoção da fase livre e dissolvida. A redução da massa de querosene ao longo do processo de remediação e o grande volume de água contaminada bombeada promovem a diminuição dos valores de contaminantes na fase dissolvida.

Verificou-se que vários poços de monitoramento apresentaram elevados valores de metano, gás carbônico, alcalinidade e ferro bivalente, fornecendo indícios da presença de processos de atenuação natural.

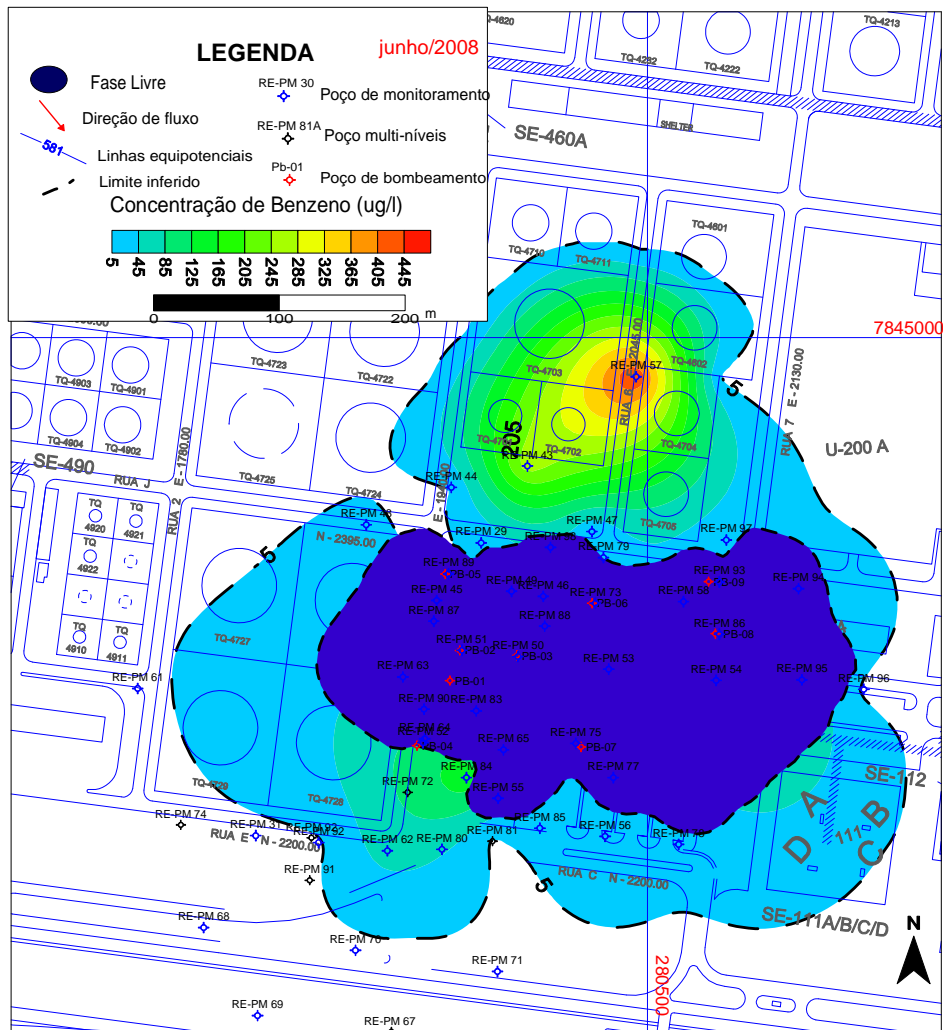


Figura 60 – Mapa de distribuição da pluma de benzeno (junho 2008).

Utilizou-se o cromatógrafo gasoso e espectrômetro de massa (GC/MS) na quantificação da porcentagem de compostos aromáticos e de alifáticos em onze amostras de querosene, coletadas em março de 2008 (Tabela 17). As amostras são representativas da extensão da pluma de fase livre. As análises permitiram mostrar a distribuição da concentração de aromáticos na pluma de fase livre (Figura 61). Os maiores teores de aromáticos se observam na porção central da fase livre e em direção à área fonte. O teor médio de aromáticos nas amostras de querosene novo é de 17 % (Petrobras 2008, comunicação verbal). Os baixos valores de aromáticos das amostras de querosene evidenciam os processos de degradação, atenuação natural e particionamento para a fase aquosa, principalmente nas amostras próximas aos limites da fase livre.

Tabela 17 – Porcentagem de aromáticos e alifáticos na amostras de querosene.

| Amostra (Poço) | Porcentagem (%) dos compostos aromáticos | Porcentagem(%) dos compostos alifáticos |
|----------------|--|---|
| PM 75 | 2,76 | 97,24 |
| PM 86 | 2,50 | 97,50 |
| PM 73 | 2,13 | 97,87 |
| PM 52 | 1,74 | 98,26 |
| PM 46 | 2,00 | 98,00 |
| PM 89 | 2,75 | 97,25 |
| PM 50 | 5,35 | 94,65 |
| PM 93 | 6,96 | 93,04 |
| PM 63 | 7,02 | 92,98 |
| PM 51 | 6,26 | 93,74 |
| PM 53 | 6,89 | 93,11 |

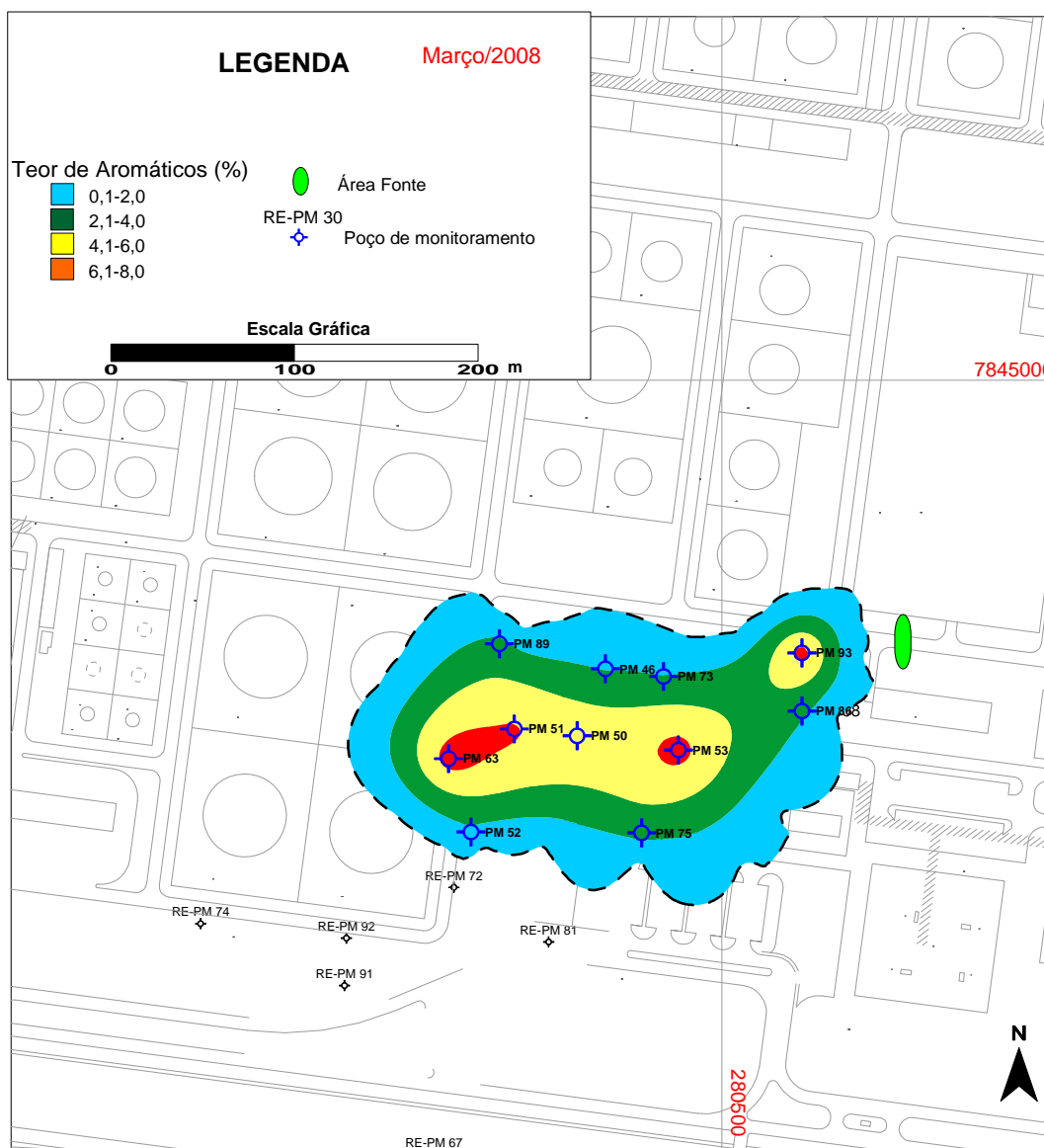


Figura 61 – Mapa de distribuição de aromáticos (março 2008).

7.6 – Simulação Analítica dos Poços de Bombeamento

A pesquisa que contemplava a execução e acompanhamento da remediação foi finalizada no final do mês de novembro de 2008. Os poços de bombeamento foram paralisados, e após 19 dias, foram feitas novas medições da espessura de fase livre nos poços de monitoramento. Após este período sem bombeamento, a pluma mostrou uma nova configuração, mais extensa, com aparecimento de fase livre nos poços 96 e 48 (Figura 62). A porção centro leste da pluma apresentou espessuras significativas de fase livre, entre 61 e 80 cm.

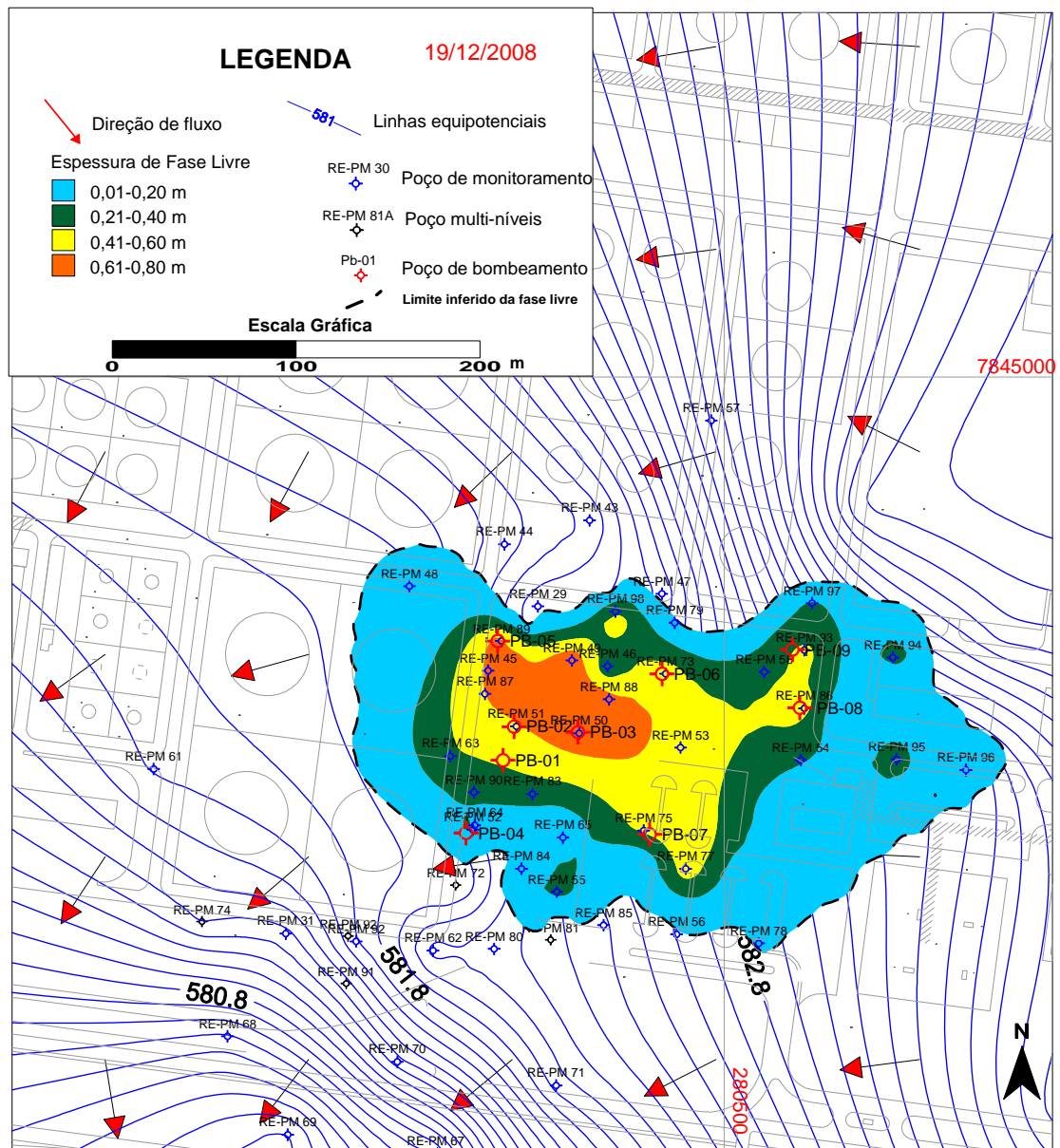


Figura 62 - Pluma de Fase livre e mapa de fluxo em dezembro 2008.

As maiores espessuras de querosene coincidem com as unidades litológicas areno argilosas (unidade C) e argilo arenosas (unidade D). A unidade B de areias médias a grossas apresentou espessuras inferiores a 60 cm.

As medições nos poços de monitoramento mostraram que mesmo após o final do bombeamento os níveis continuaram rebaixando, seguindo o período de recessão do aquífero. O poço de monitoramento PM 10 instalado ao norte da pluma distante cerca de 330 m, apresentou comportamento semelhante aos poços próximos da zona de bombeamento (Figura 63). Todos os poços monitorados apresentaram como nível mais baixo o de dezembro de 2008.

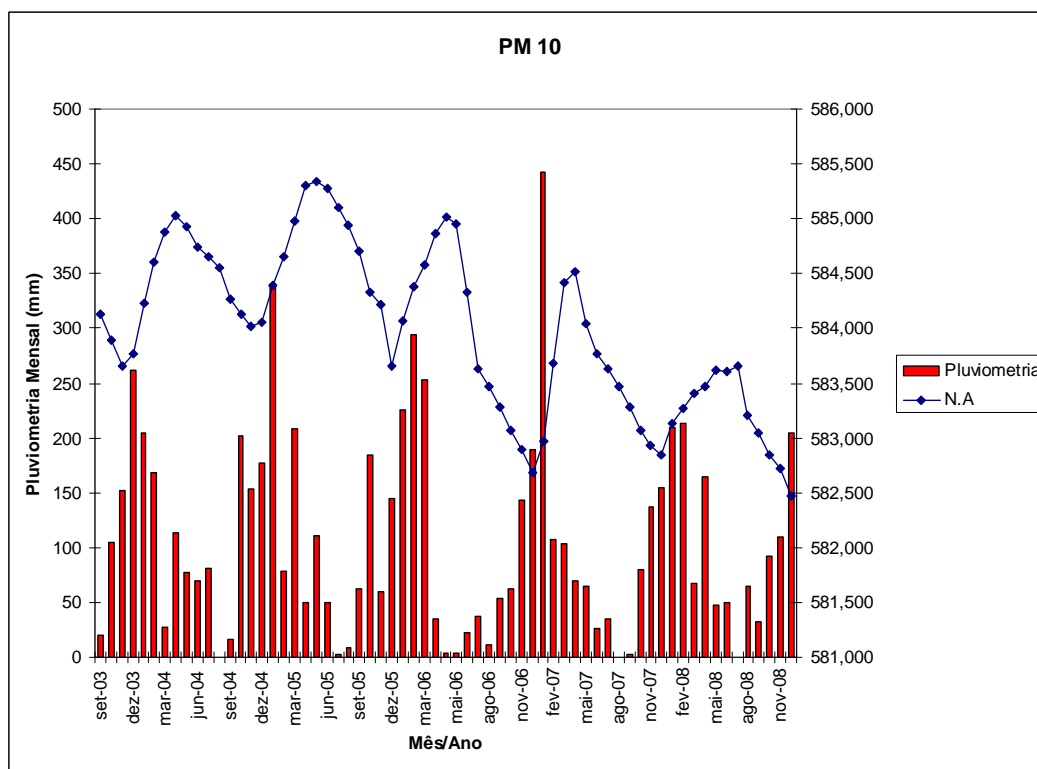


Figura 63 – Variação do nível d'água no poço de monitoramento PM 10.

Muito embora a área apresente grande flutuação nos níveis d'água e de querosene, ocasionando o trapeamento e destrapeamento da fase livre, não permitindo o equilíbrio vertical entre as fases querosene/água, procurou-se estimar de maneira expedita, a saturação de querosene e o volume recuperável do mesmo

nos poços de bombeamento, através do programa LDRM (*LNAPL Distribution and Recovery Model*), elaborado Charbeneau 2007 para a API (American Petroleum Institute).

Para a estimativa, assumiu-se que os valores de espessura de fase livre referentes à pluma de dezembro de 2008 representam o máximo destrapeamento e que as três fases (querosene, água, ar) estão em equilíbrio.

Para a simulação foram utilizados os dados de viscosidade, tensão superficial/interfacial, viscosidade e densidade do querosene (Tabela 18). Foram utilizados também os valores dos índices físicos e os parâmetros de Van Genuchten (Tabela 7).

Tabela 18 - Parâmetros físicos do querosene.

| Poço de monitoramento amostrado | Densidade (g/cm ³) | Viscosidade Cinemática (cSt) | Viscosidade Dinâmica (cP) | Tensão Interfacial (água/óleo) (dina/cm) | Tensão Superficial Água (dina/cm) | Tensão Superficial Óleo (dina/cm) |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| PM-50 | 0,8013 | 3,43 | 2,748459 | 28,78 | 70,71 | 27,93 |
| PM 89 | 0,7968 | 3,074 | 2,449363 | 28,25 | 71,87 | 28,61 |
| PM 75 | 0,7977 | 3,255 | 2,596514 | 27,48 | 71,73 | 27,57 |
| PM 58 | 0,7997 | 3,292 | 2,632612 | 26,80 | 69,51 | 28,26 |
| PM 51 | 0,7991 | 3,246 | 2,593879 | - | - | - |
| PM 86 | 0,8038 | 3,584 | 2,880819 | - | - | - |
| Valor Médio | 0,7997 | 3,314 | 2,650 | 27,83 | 70,96 | 28,09 |

Utilizando os dados dos ensaios, simulou-se o perfil de saturação de água, óleo e saturação residual de óleo do poço de bombeamento PB 06 através poço de monitoramento PM 73, distante 2,9 metros. Estes poços são representativos da unidade litológica de arenitos argilosos.

Para a espessura medida em dezembro de 2008 de 53 cm, a zona capilar apresenta saturação máxima de querosene (S_n) igual a 25,7% (Figura 64). O valor do volume específico (D_n) é de 0,0573 m e o volume recuperável (R_n) é igual a 0,026 m.

Para simular a recuperação de querosene do PB 06, utilizou-se a vazão média de água de 110 l/h observada no final de novembro de 2008. O raio estimado de recuperação do querosene usado foi de 50m. Simulou-se um período de quinze

anos de bombeamento em condições ideais sem oscilação do nível freático (Figura 65). Ao final dos quinze anos da simulação, o volume recuperado seria de 192.568 litros. O percentual de recuperação seria de 42% e a espessura final de fase livre no poço de monitoramento igual a 5,7 cm. A taxa inicial de recuperação de querosene da simulação é de 86 litros por dia, valor próximo ao observado no final do mês de novembro para o poço PB 06 (Figura 66).

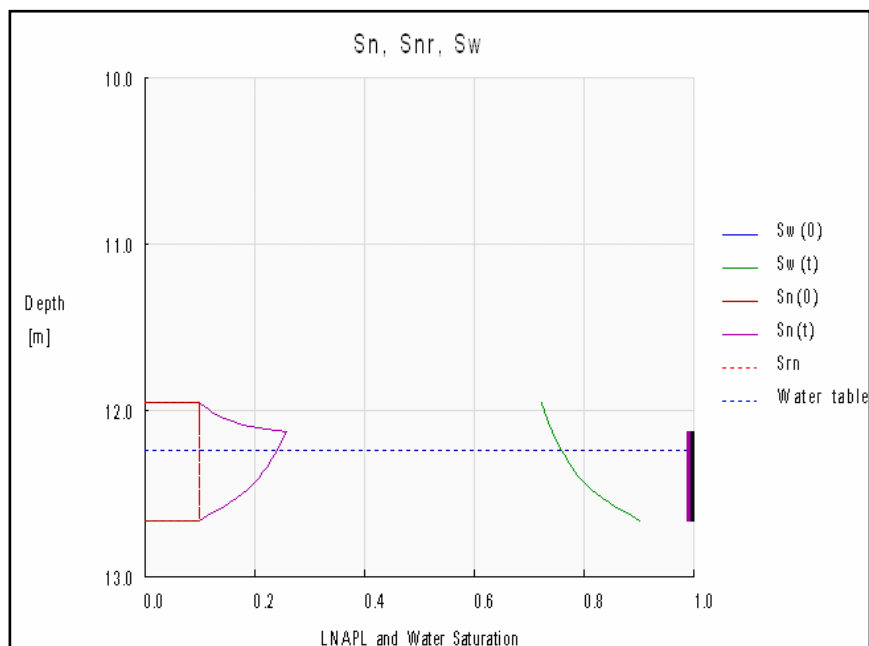


Figura 64 – Perfil simulado de saturação de querosene e água do poço de bombeamento PB 06.

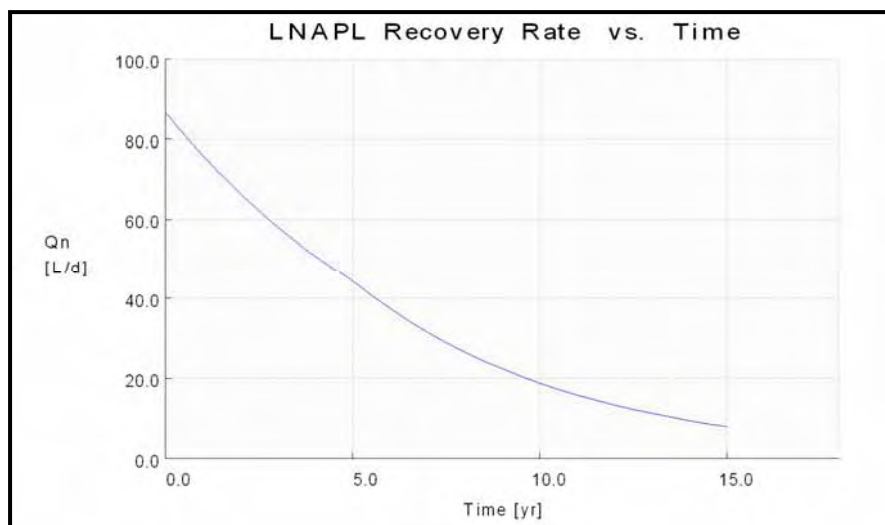


Figura 65 – Simulação da recuperação de querosene para o prazo de quinze anos PB 06.

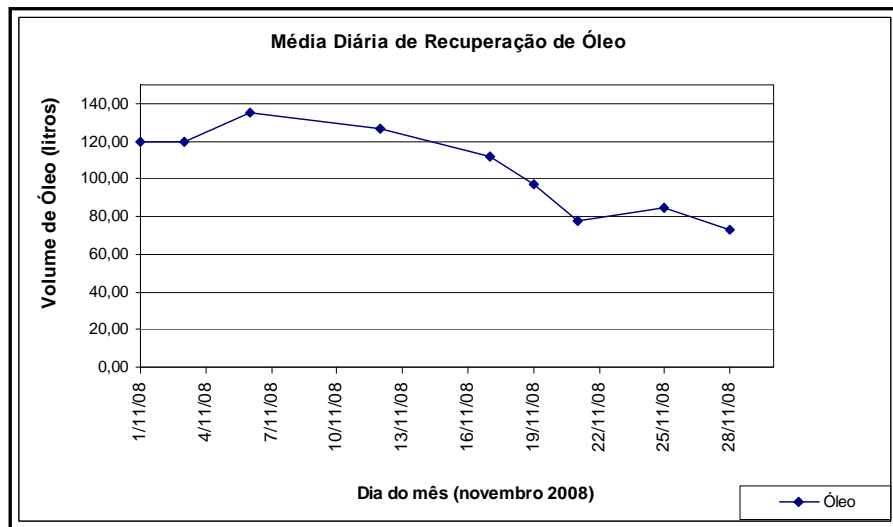


Figura 66 – Recuperação diária de óleo do PB 06 no mês de novembro de 2008.

Para a simulação poço PB 07 mediu-se o poço 75, distante cerca de 3,0 m, que apresentava no dia 19 de dezembro 48 cm de fase livre. Estes poços são representativos da unidade litológica de areias médias a grossas.

Para a espessura medida, a zona capilar apresenta saturação máxima de querosene (S_n) igual a 48% (Figura 67). O valor do volume específico (D_n) é de 0,0783 m e o volume recuperável R_n é igual a 0,0352 m.

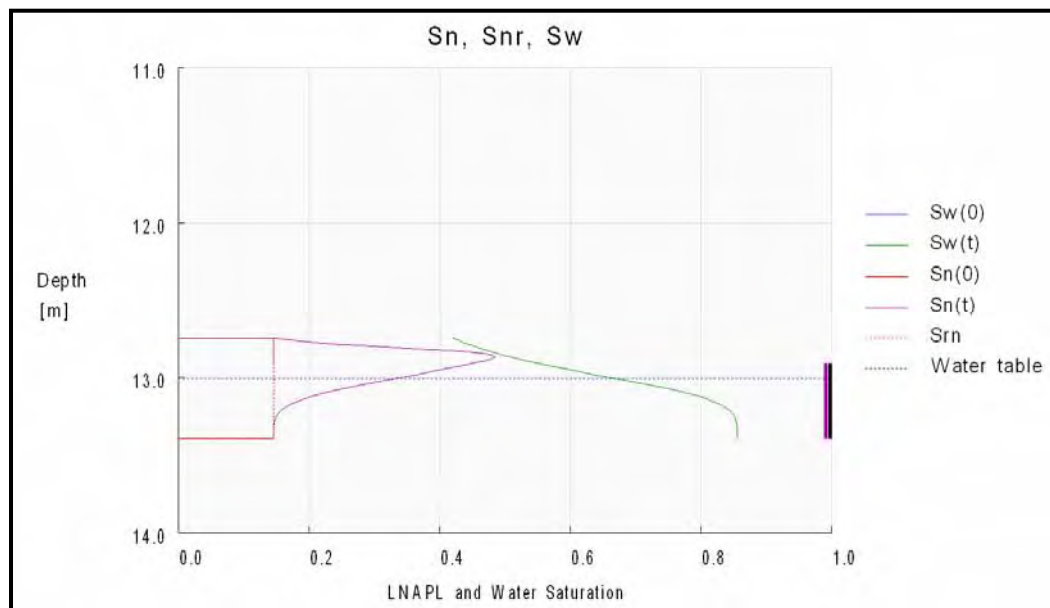


Figura 67 – Perfil simulado de saturação de querosene e água do poço de bombeamento PB 07.

Para simular a recuperação de querosene do PB 07 utilizou-se a vazão média de água de 580 l/h observada no final de novembro de 2008. O raio estimado de recuperação do querosene usado foi de 50m. Simulou-se um período de quinze anos de bombeamento em condições ideais sem oscilação do nível freático (Figura 68). Ao final dos quinze anos da simulação o volume recuperado seria de 218.560,00 litros. O percentual de recuperação seria de 35,5% e a espessura final de fase livre no poço de monitoramento igual a 30 cm. A taxa inicial de recuperação de querosene da simulação é de 105 litros por dia, valor superior aos 58 por litros dia observado no final do mês de novembro para o poço PB 07.

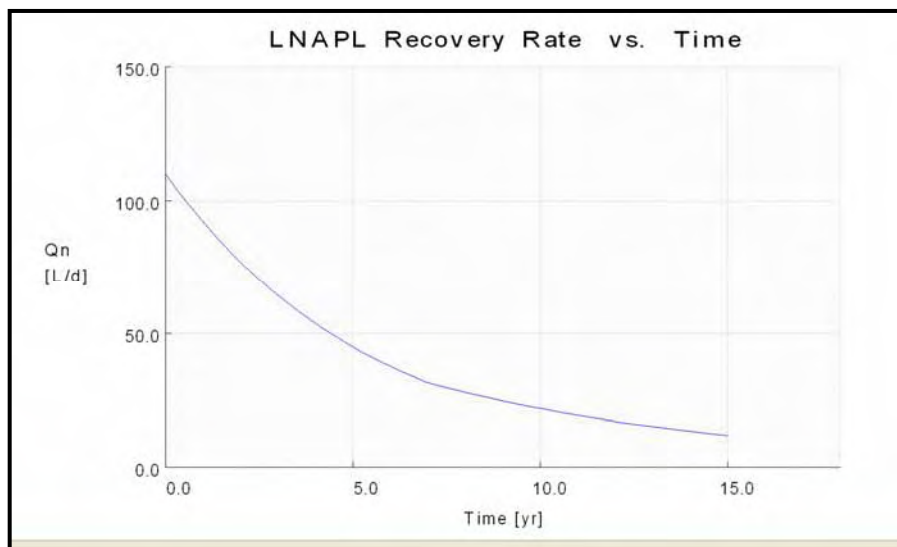


Figura 68 – Simulação da recuperação de querosene para o prazo de quinze anos para o PB 07.

O melhor ajuste da simulação de recuperação de querosene do PB 06 em relação ao ajuste do PB 07 explica-se pelo fato que o poço PB 06 encontra-se no meio da pluma da fase livre, onde as espessuras de querosene e a litologia são compatíveis com os dados raio de captura simulado (50m). Já para poço PB07 o raio de captura real encontra porções do aquífero onde a espessura de óleo é menor.

8 – Discussões e Conclusões

No contexto deste trabalho foi possível avaliar o comportamento da remediação de uma pluma de fase livre de querosene sob influência da variação do nível d'água.

O aparecimento de dez centímetros de querosene em um poço de monitoramento isolado (PM 29), durante investigação hidrogeológica, realizada em 2003, levou ao estudo de uma pluma de grandes dimensões.

A investigação detalhada, através do uso da amostragem contínua, mostrou os diferentes tipos litológicos presentes na área e permitiu a diferenciação dos mesmos, ainda que de maneira aproximada, dada à grande variedade lateral e vertical dos litotipos. A presença de paleocanais preenchidos por areias grossas observados por meio da amostragem, e em campo mostrou ser uma feição geológica de destaque na área.

A definição da unidade de argilitos que se sotopõe às demais unidades foi de extrema importância, principalmente na escolha da profundidade máxima de instalação dos poços de bombeamento.

A amostragem com o uso de *liners* permitiu a identificação em subsuperfície da presença de querosene trapeado em poços que, nos primeiros meses de monitoramento, não apresentaram a presença de óleo. Como exemplo, o poço PM 55 cujo monitoramento foi iniciado no mês setembro de 2003 e somente apresentou espessura de querosene no mês de Janeiro de 2007.

De maneira geral, os poços de bombeamento e de monitoramento foram instalados de maneira correta e permitiram monitorar desde setembro de 2003 a ampla variação da espessura da fase livre e da potenciometria da área.

As grandes variações dos níveis d'água e de espessura de fase livre observadas nos poços de monitoramento ao longo dos anos mostraram a importância do monitoramento sistemático e de longo prazo.

O teste piloto de remediação, realizado entre maio de 2005 a maio de 2006, mostrou a necessidade do conhecimento prévio, de longo prazo, da variação pretérita da superfície potenciométrica e do comportamento da fase livre.

Após o monitoramento dos níveis dos poços, pode-se concluir que o teste piloto foi iniciado no pior mês relativo à mobilidade do querosene. O nível potenciométrico encontrava-se em cotas elevadas e o querosene estava trapeado.

O bombeamento através do uso de bombas submersas elétricas mostrou ser confiável quanto à técnica de remediação, muito embora, inicialmente, o volume de 4.390,00 litros de querosene recuperado durante a fase piloto ser considerado insuficiente pela agência ambiental, dada à dimensão da pluma. O bombeamento de maneira ininterrupta em conjunto com a medição individual da produção de querosene permitiu avaliar comparativamente a eficiência de cada poço de bombeamento.

O rebaixamento contínuo da superfície freática iniciado em abril de 2006 permitiu a remobilização em outubro do mesmo ano de grandes volumes de querosene. Os 84.573,70 litros de querosene recuperados em quatro meses representaram cerca de 50% do total de querosene recuperado em 40 meses de bombeamento. O aumento repentino nas taxas de recuperação de óleo, a partir da segunda quinzena de outubro de 2006, sugere a entrada de ar no meio poroso ocupado pelo querosene e água. Neste sistema trifásico, a água é o fluido molhante, o ar o não molhante e o querosene possui molhabilidade intermediária.

O grande volume de querosene recuperado provocou uma rápida diminuição nas espessuras dos poços de monitoramento, mesmo aqueles distantes dos poços de bombeamento, como o PM 86 (Figura 69) distante cerca de 160 m a leste e a montante do PB 06. No caso do PM 86 houve uma diminuição em 72 dias de 65 cm na espessura de óleo.

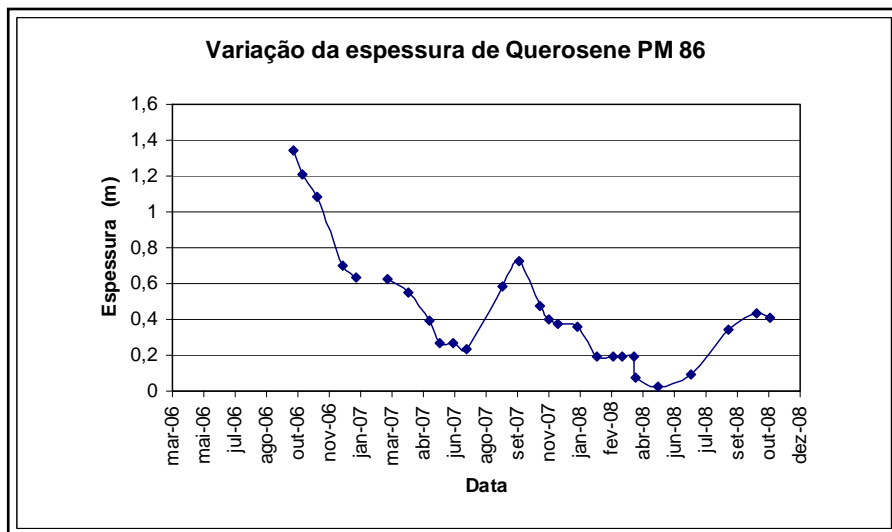


Figura 69 – Variação da espessura de fase livre do PM 86.

É interessante ressaltar que em outubro de 2006 observou-se um intervalo de aproximadamente 20 dias entre o aumento da espessura de fase livre nos poços e o início do aumento das taxas de recuperação. Este intervalo de tempo sugere que o querosene durante o processo de destrapeamento migra primeiro para o poço, como se este fosse um grande poro. Somente quando é estabelecida a condição trifásica e que óleo começa a fluir, sendo então, capturado pelos poços de bombeamento.

Os altos índices pluviométricos observados no mês de janeiro de 2007 (443 mm), provocaram uma rápida ascensão do nível d'água nos poços de monitoramento, ocasionando a diminuição acentuada das taxas de recuperação de óleo a partir da segunda quinzena de janeiro.

O método utilizado para o cálculo da recarga, o de variação dos níveis (WTF) mostrou que área estudada apresenta altas taxas de recarga variando de 550 mm em 2005 a 370 mm em 2008. Estas altas taxas estão relacionadas principalmente a superfície plana e pouco impermeabilizada da área. O valor de recarga observado em 2005 representou 39 % do total das chuvas.

A recuperação dos níveis em janeiro de 2008 iniciou-se de forma suave devido a melhor distribuição das chuvas e menor recarga (370 mm). Com isso foi possível recuperar um volume ainda expressivo de óleo em janeiro.

Ao longo do processo de remediação observou-se que, invariavelmente, os períodos compreendidos entre os meses de março a agosto foram marcados pelas

baixas taxas de recuperação de querosene e pelo aumento nas taxas de bombeamento de água. Exemplificando, no período de março a agosto de 2007, foram bombeados 19.607,00 m³ de água para uma recuperação total, já somada a emulsão, de 698 litros. Este volume de querosene é menor que o recuperado em dois dias de bombeamento durante o mês de novembro de 2007. A média diária de 108 m³ de água bombeada representa um volume que se justifica somente quando a área impactada possui uma estação de tratamentos de efluentes.

O conceito amplamente difundido de que um sistema de remediação deva operar ininterruptamente, quando da presença de fase livre, não é válido neste caso.

O sistema de remediação deveria operar somente nos meses de outubro a janeiro, pois a recuperação do querosene não está diretamente relacionada com as taxas de bombeamento, mas sim, com o óleo disponível após o fenômeno de destrapeamento. Neste período a operação da remediação deveria ser ampliada além dos poços de bombeamento. Poder-se-ia, por exemplo, trabalhar com sistema móvel de vácuo retirando o óleo presente nos poços de monitoramento que, nesta época, seriam utilizados como poços de remediação.

A simulação de quinze anos do poço de bombeamento do PB06, sem a variação da superfície freática, e com base na espessura observada de fase livre em dezembro de 2008, permitiu estimar um volume recuperável de 192.000 litros de querosene.

9 – Referências Bibliográficas

ADAMSON, A.W. **Physical Chemistry of Surfaces**, 4 ed., New York: Wiley-Interscience, 1982.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. ANP. **Anuário estatístico – 2008**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2007.asp>. Acesso em: 16 maio de 2008.

ALFARO SOTO, M.A.A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle da sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. 206 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ALMEIDA, F. F. M. de. Geologia do Estado: Grupo São Bento. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, v. 41, p. 85-101, 1964.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API, **Interactive LNAPL Guide, Version 2.0**. Version 2.0 User Guide for Data Retrieval, API Publication No. 4731, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter - **ASTM D 4052**. West Conshohocken, PA, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method - **ASTM D 971**. West Conshohocken, PA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)- **ASTM D 445**. West Conshohocken, PA, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem – NBR 13895**. Rio de Janeiro, 1997.

BALLESTERO, T.P.; FIEDLER, F.R.; KINNER, N.E. An Investigation of the Relationship Between Actual and Apparent Gasoline Thickness in a Uniform Sand Aquifer, **Ground Water**, v. 32, n. 5, p.708-718, 1994.

BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size data, **Trans.A.I.M.E.**, v. 198, p. 71-77,1953.

CARNIER NETO D. **Análise das séries temporais de monitoramento de nível d'água em poços no aquífero Rio Claro**. 2006. 61f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. CPTEC. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br>> Acesso em 15.07.08

CETESB. **Decisão de Diretoria n. 103/2007**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solos/areas_contaminadas>. Acesso em 07.07.08

CHANDLER, R. J., AND GUTIERREZ, C. I. The filter paper method of suction measurement. **Geotechnique**,v. 36, p.265-268, 1992.

CHANG. H.K.; CARNIER NETO, D. **Winslug – Programa de aquisição e tratamento automatizado de testes de slug**. Unesp-Fundunesp 2000. Registro INPI # 000332760.

CHARBENEAU, R.J.; JONHS, R.T.; LAKE, W. **Free-product recovery of petroleum hydrocarbon liquids**. API Publication Number 4682, Washington D.C., 1999.

CHARBENEAU, R.J. **Groundwater hydraulics and pollutant transport**. Englewood Cliffs; Prentice Hall, 2000. 593 p.

CHARBENEAU, R.J. **Models for design of free-product recovery systems for petroleum hydrocarbon liquids**. API Publication Number 4729, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2003.

CHARBENEAU, R.J. **LNAPL distribution and recovery model (LDRM)**. API Publication Number 4760, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2007.

CHATZIS, I. Visualization of oil displacement mechanisms and enhanced oil recovery. **ANNUAL CONFERENCE OF ONTARIO PETROLEUM INSTITUTE**, London, 1983. v. 22 p.1-20.

CHATZIS, I.; DULLIEN, F. A. L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets :theory versus experiment. **Journal Colloid Interface Science**, v. 91, p.199, 1983.

DELIN, G.N.; HEALY, R.W.; LORENZ, D.L.; NIMMO, J.R. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. **Journal of Hydrology**, v. 334, no. 1-2, p. 231–249, 2007.

DU NOÛY, P. L. The ring method. **Journal Genetic Physiology**, 1, p. 521, 1919.

FARR, A. M.; HOUGHTALEN, R. J.; McWHORTER. Volume estimation of light nonaqueous phase liquids in porous media. **Ground Water**, v.28, n. 1, p. 48-56, 1990.

FERNANDES, A. J. **Tectônica Cenozóica na Porção Média da Bacia do rio Piracicaba e sua Aplicação à Hidrogeologia**. 1997. 244 f. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - São Paulo.

FERNANDES, A. J.; RUDOLPH, D. The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 9, p.151-167, 2001.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598p.

HASUI, Y.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. O embasamento pré-cambriano e eopaleozóico em São Paulo. In: SAO PAULO (Estado). Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, PROMOCET, 1981. v.1, p.12-45. Escala 1:50.000.

HEALY, R.W., COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v.10, n.1, p. 91-109, 2002.

HILMMESTEIN M.S; GRIVETTI. M; PADEN E.; Large scale pilot test for remediation of submerged petroleum hydrocarbons on a 1.5 acre pilot plot at a refinery redevelopment site. In: *Proceedings of the 2007 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Conference, Houston, TX*, Ground Water 2007. p. 446-460.

HUNTLEY, D. ; HANK. R. N. ; CORLEY, H. P. Nonaqueous phase hydrocarbon in a fine-grained sandstone: 1. Comparison between measured and predicted saturations and mobility. **Ground Water**, v. 32, n.4, p. 626-634. 1994.

HVORSLEV, H.J. Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. **U.S. Army. Corps of Engineers**, Waterways Experiment Station, Bulletin n. 36, 1951.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, Pró Minério/Promocet: 1981a. 126p + 1 mapa. Escala 1:500.000.

KEMBLOWSKI, M. W. ; CHIANG, C. Y. Hydrocarbon thickness fluctuations in monitoring wells. **Ground Water**, v.28, n.2, p. 244-252, 1990.

KRAMER, W. H. Ground water pollution from gasoline. **Groundwater Monitoring Rev.** v.2, n.2, p. 18-22, 1982.

LENHARD, R.J J.C PARKER. Estimation of free product hydrocarbon volume from fluid level in monitoring wells. **Ground Water**, v. 28; p. 57-67, 1990.

LERNER, D.N, ISSAR, A.S, SIMMERS, I. **A guide to understanding and estimating natural recharge**. IAH Int Contrib Hydrogeol 8., Hannover: Heinz Heise 1990. 345p.

LERNER, D.N. **Groundwater recharge**. Chapter 4 in: O.M. Saether & P de Caritat (eds.), *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*. Rotterdam: Balkema, 1997, p.109 -150..

LUNDEGARD, P.D.; B.S. Mudford. 1998. LNAPL volume calculation: Parameter estimation by nonlinear regression of saturation profiles, **Ground Water and Remediation**, v18 (3), p. 88-93. 1998.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel de filtro. **Anais... X COBRAMSEF**, 1994. v. 2, p. 515 – 522.

MARINELLI, F.; DUNFORD, D.S. LNAPL thickness in monitoring well considering hysteresis and entrapment. **Groundwater**, v. 34 (3); p. 405-414, 1996.

MAZALAN, P.; LYVERSE M.; KUEHNE, D. Characterization and numerical simulation in support of LNAPL recovery in the presence of a fluctuating water table, In: *Proceedings of the 1997 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Conference, Houston, TX*, Ground Water. 1997. p. 446-460.

MELO, S.M. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenozóica na Depressão Periférica Paulista**. 1995. 144 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo.

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

MUALEN, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resources Research**, v.12, p. 513-522. 1976.

PARCHER, M.A.; JONHOSON J.A.; PARKER J.C. Effects of soil type on separate phase hydrocarbon recovery under fluctuating water conditions, In: *Proceedings of the 1995 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Conference*, Houston, Texas, Ground Water, 1995.p. 439-451.

PASTROVICH, T.L.; BARADAT Y. R.; BARTHEL, A. **Protection of ground water from oil pollution**, Concawe Report n. 3/79, The Hague, Netherlands. 1979.

PEDE, M.A.Z. **Caracterização da Condutividade Hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na Região Metropolitana de São Paulo**. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

PEDE, M.A.Z. Remediação de fase livre. **Revista Águas Subterrâneas**, ABAS, v. 7, p. 24-25. 2008.

PETROBRAS. **Querosene de Aviação QAV-1**. Rio de Janeiro; Petrobras, 2000. 25p.

RATNAM, S.; CULLIGANG, J.; GERMAINE, J. T. Geotechnical centrifuge modeling of LNAPL entrapment in sands samples under hydraulic flushing. **Geotechnical News**, 14 (3); 22-26. 1996.

SOLE, M. D. **Characterization and modeling of a fractured crystalline aquifer contaminated with hydrocarbons**. 2003. 108p. Dissertação (Mestrado). Department of Geology, University of Pretoria, Pretoria.

USGS. **Water table fluctuation method (WTF)**. Disponível em <<http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/wtf/>> . Acesso em 10 de dezembro 2008.

WICKLAND, C.D.; MAILLOUX, M.P.; KATAYAL. Application of field and laboratot analysis to modeling light non aqueous phase liquid volume and recoverability at Texas Refinery. *Proceedings of the 1995 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation Conference*, Houston, Texas, **Ground Water Publishing Company**, pp. 184-198. 2000.

YOSHINAGA-PEREIRA, S. **Proposta de representação cartográfica na avaliação hidrogeológica para o estudo de planejamento e meio ambiente, exemplo da região metropolitana de Campinas-SP**. 1996. Tese (Doutorado) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - São Paulo.