

MARISSA CHIARELI DE ALVARENGA

**CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
POR RESÍDUOS DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS:
UMA ABORDAGEM NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO**

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro (SP)
2007

MARISSA CHIARELI DE ALVARENGA

**CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
POR RESÍDUOS DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS:
UMA ABORDAGEM NO MUNICÍPIO DE RIO
CLARO**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências
Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como
parte das exigências para o cumprimento da
disciplina Trabalho de Formatura no ano letivo de
2007*

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro (SP)
2007

551.49 Alvarenga, Marissa Chiareli de
A473c Contaminação das águas subterrâneas por resíduos de
postos de combustíveis: uma abordagem no município de
Rio Claro / Marissa Chiareli de Alvarenga. – Rio Claro :
[s.n.], 2007
49 f. : il., figs., tabs., mapas

Trabalho de conclusão (Engenharia Ambiental) --
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas

Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrocarbonetos. 3. Tanques de
armazenamento subterrâneo. 4. Vazamento. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me guiou e nunca me deixou na mão.

A meu orientador, Antonio Celso de Oliveira Braga, pela confiança, orientação acadêmica, estímulo e dedicação durante todo o tempo do meu trabalho.

A minha mãe, pela força, pelo carinho e pela revisão do meu trabalho e por sempre ter sido uma mãe maravilhosa.

A meus tios, meus avós e minha irmã, pelo apoio e carinho durante todo meu tempo na universidade.

A minhas queridas amigas, Gabriela, Renata e Ana Carolina, por serem pessoas tão especiais e que foram sempre muito companheiras.

A Andresa Oliva, pelos mapas e dados cedidos.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | V |
| ABSTRACT | VI |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 3. ETAPAS DE TRABALHO E MÉTODOS | 3 |
| 4. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO..... | 4 |
| 5. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A CONTAMINAÇÃO | 9 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 42 |
| 7. CONCLUSÃO | 43 |
| BIBLIOGRAFIA | 45 |
| ANEXO I – DEFINIÇÕES | |
| ANEXO II – MAPA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO COM A LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS | |
| ANEXO III – MAPA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |
| ANEXO IV – MAPA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |
| ANEXO V – MAPA DAS ÁREAS DE RISCO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 3. ETAPAS DE TRABALHO E MÉTODOS | 3 |
| 4. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO..... | 4 |
| 4.1. LOCALIZAÇÃO | 4 |
| 4.2. ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS | 6 |
| 4.3. HIDROLOGIA..... | 7 |
| 4.4. CONTEXTO PEDOLÓGICO | 7 |
| 4.5. GEOLOGIA LOCAL E HIDROGEOLOGIA..... | 8 |
| 5. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A CONTAMINAÇÃO | 9 |
| 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS | 9 |
| 5.2. DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA | 11 |
| 5.3. AQÜÍFEROS..... | 11 |
| 5.4. VULNERABILIDADE DOS AQÜÍFEROS | 13 |
| 5.5. CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ATRAVÉS DE POSTOS DE COMBUSTÍVEIS | 16 |
| 5.5.1. <i>Considerações Gerais</i> | 17 |
| 5.5.2. <i>Transporte dos Derivados de Petróleo no Meio Físico</i> | 20 |
| 5.5.3. <i>Remediação</i> | 33 |
| 5.5.4. <i>Efeitos do Etanol Presente na Gasolina Brasileira</i> | 40 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 42 |
| 7. CONCLUSÃO | 43 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 45 |
| ANEXO I – DEFINIÇÕES | |
| ANEXO II – MAPA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO COM A LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEIS | |
| ANEXO III – MAPA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |
| ANEXO IV – MAPA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |
| ANEXO V – MAPA DAS ÁREAS DE RISCO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura IV - 1: Mapa de localização de Rio Claro..... | 5 |
| Figura IV - 2: Crescimento populacional do município de Rio Claro..... | 6 |
| Figura V - 1: Representação esquemática do ciclo hidrológico..... | 9 |
| Figura V - 2: A distribuição das águas no planeta..... | 10 |
| Figura V - 3: Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo..... | 11 |
| Figura V - 4: Tipos de Aquíferos..... | 12 |
| Figura V - 5: Resumo dos processos de atenuação dos contaminantes das águas subterrâneas | 14 |
| Figura V - 6: Efeito da densidade na migração do poluente em aquífero poroso. | 16 |
| Figura V - 7: Representação esquemática de distintos tipos de rocha..... | 21 |
| Figura V - 8: Efeitos das camadas de diferentes condutividades hidráulicas na migração do contaminante..... | 23 |
| Figura V - 9: Saturação residual, representada pelos anéis isolados | 24 |
| Figura V - 10: Saturação residual. | 25 |
| Figura V - 11: Curvas das permeabilidades relativas da água e do NAPL em estado líquido num peio poroso. | 26 |
| Figura V - 12: Distribuição vertical das fases dos hidrocarbonetos | 27 |
| Figura V - 13: Progressão do hidrocarboneto vazado de um tanque de armazenamento subterrâneo (TAS). | 29 |
| Figura V - 14: LNAPL retido em estado de saturação residual na zona não saturada. | 30 |
| Figura V - 15: Transporte do LNAPL na zona não saturada e sobre a franja capilar. | 30 |
| Figura V - 16: a) depressão do nível da água subterrânea resultando em grande frente de LNAPL. b) elevação do nível d'água após lixiviação do LNAPL | 31 |
| Figura V - 17: Efeito da elevação e diminuição do nível da água subterrânea sobre o LNAPL em um meio poroso. | 31 |
| Figura V - 18: Franja de DNAPL na zona não saturada..... | 32 |
| Figura V - 19: Partição do DNAPL na fase de vapores densos e de compostos dissolvidos.. | 32 |
| Figura V - 20: Transporte do DNAPL através de fraturas em material impermeável..... | 33 |
| Figura V - 21: Atenuação natural de uma pluma de hidrocarbonetos | 35 |
| Figura V - 22: Vistas em planta e seção transversal de um dreno desenvolvido para a recuperação de LNAPL móvel. | 37 |
| Figura V - 23: Projeto de um sistema de extração de vapores do solo com tratamento do vapor antes do lançamento na atmosfera. | 37 |
| Figura V - 24: Projeto de um sistema de <i>air sparging</i> | 38 |
| Figura V - 25: Esquema de uma parede de tratamento permeável e barreiras de baixa permeabilidade usadas para canalizar o fluxo da água subterrânea. | 39 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela V - 1: Processos que controlam a migração dos contaminantes na zona subterrânea. | 15 |
| Tabela V - 2: Transporte de bactérias na zona saturada. | 16 |
| Tabela V - 3: Densidade e Viscosidade de Alguns Hidrocarbonetos Comparados com a Água | 20 |
| Tabela V - 4: Classificação dos solos quanto à permeabilidade..... | 23 |
| Tabela V - 5: Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados. | 23 |
| Tabela V - 6: Fração de BTEX e etanol degradado pelos receptores de elétrons utilizados... | 41 |

RESUMO

A contaminação das águas subterrâneas é um assunto de grande importância, devido ao fato de que muitas pessoas utilizam essa fonte para abastecimento público. Este trabalho trata de como os postos de combustíveis podem contaminar essas águas e quais são algumas medidas de remediação, utilizadas atualmente para resolver este problema. A contaminação gerada pelos postos de combustíveis pode ter sua origem nos tanques de armazenamento subterrâneo quando sofrem corrosão e apresentam vazamentos. É um tema de extrema relevância, pois os hidrocarbonetos derivados de petróleo contidos nos combustíveis podem permanecer por muito tempo no meio físico. Além disso, fez-se a análise de risco de contaminação por vazamento de postos de combustíveis do município de Rio Claro baseada em três parâmetros: densidade dos postos, profundidade do nível d'água e condutividade hidráulica. Para atingir tal objetivo, foram elaborados mapas levando em conta os parâmetros escolhidos separadamente e conjuntamente. Analisando o mapa com esses três parâmetros, pôde-se perceber que os locais que apresentam maior risco de contaminação no município de Rio Claro localizam-se a centro-oeste e a sudeste.

Palavras-chave: água subterrânea, postos de combustíveis e contaminação.

ABSTRACT

The contamination of underground waters is a subject of great importance, since a lot of people use this kind of source for public supply. This paperwork manages with how gas stations can contaminate these waters and what are some remediation techniques, used nowadays to solve this problem. The contamination caused by the gas stations can have its origin in the underground storage tanks when they suffer corrosion and show leaking problems. It's a topic of great relevance, because the hydrocarbons derivated from petroleum present in the fuels can stay for a long time in the environment. Besides that, an analyses of the risk of contamination by gas stations in the city of Rio Claro was made based on three parameters: density of the gas stations, depth of the underground water and hydraulic conductivity. To achieve such goal, maps were elaborated considering those parameters individually and considering the three of them together. Analyzing those maps, it was concluded see that the spots that represent the biggest risks of contamination in Rio Claro are located southeast and center-west.

Keywords: subsurface water, gas stations and contamination.

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento e urbanização em algumas cidades no Brasil, na maioria das vezes, leva a um não atendimento de alguns quesitos para controle ambiental, acarretando muitos problemas, tais como, a ocupação de áreas de risco, a disposição incorreta de resíduos sólidos, o vazamento de contaminantes no solo, entre outros. Algumas conseqüências destas atitudes não planejadas são enchentes, contaminação do solo e de aquíferos e contaminação atmosférica, os quais estudos mais aprofundados se fazem necessários. Estes problemas por mais que ocorram em pontos isolados, acabam por atingir toda a população.

Um dos principais problemas ambientais a ser reconhecido como de grande importância é a contaminação das águas subterrâneas utilizadas para abastecimento de um modo geral, além do comprometimento de aquíferos, verdadeiras reservas importantes de águas subterrâneas (CETESB, 2001). De acordo com Sánchez (1998 *apud* CETESB, 2001), existem quatro problemas principais gerados pelas áreas contaminadas: existência de riscos à segurança das pessoas e das propriedades, riscos à saúde pública e dos ecossistemas, restrições ao desenvolvimento urbano e redução do valor imobiliário das propriedades.

Segundo CETESB (2001), áreas potencialmente contaminadas, são áreas onde estão sendo desenvolvidas ou onde foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminadoras. Algumas das principais fontes potencialmente contaminadoras são: postos de combustíveis, cemitérios, indústrias, aterros sanitários e esgotos. Essas fontes podem poluir a atmosfera, os rios, as águas subterrâneas, entre outros.

As águas subterrâneas geralmente possuem ótima qualidade para consumo humano, principalmente em depósitos arenosos. Este tipo de depósito contudo, é altamente vulnerável à contaminação por efluentes domésticos, químicos ou de qualquer espécie. Estes depósitos possuem alta condutividade hidráulica, permitindo que vírus e bactérias atinjam as águas subterrâneas rapidamente, quando os efluentes são lançados no solo (GUEDES et. al, 1998).

Segundo Oliveira (1992), nos anos 70, o Brasil passou por um grande desenvolvimento econômico com um conseqüente aumento no número de postos revendedores de combustíveis. Estes combustíveis são estocados em tanques de armazenamento subterrâneo (TAS) e ao longo do tempo, estes interferem diretamente no meio onde se instalam, podendo causar inúmeros problemas ambientais, principalmente, relacionados a vazamentos de hidrocarbonetos. Yamada (2004) considera que os tanques de armazenamento subterrâneo representam um grande risco, pois podem ocasionar vazamentos, originando plumas de contaminação, que penetram no solo e atingem o lençol freático.

A instalação de postos de combustíveis em áreas com características geológico-geotécnicas desfavoráveis, sem a execução de obras de engenharia corretivas, pode elevar o risco de contaminação associado a esses vazamentos (ZAINE, 2000). A experiência mostra que estes tanques construídos em chapa de aço, corroem e vazam num período médio de 20 anos a partir de sua instalação (OLIVEIRA, 1992).

Rio Claro tem cerca de 47 postos de combustíveis que possuem tanques subterrâneos de armazenamento de derivados de petróleo e de álcool, e entre cada uma destas áreas, deve-se ter um tratamento distinto devido a diferentes situações geológicas, geomorfológicas e pedológicas associadas a processos da dinâmica externa (YAMADA, 2004).

Segundo Finotti et al. (2001) as contaminações subsuperficiais com derivados de petróleo podem ser consideradas um dos acidentes ambientais mais sérios por três motivos:

- Postos de abastecimento de combustível fazem parte da vida das cidades e são encontrados espalhados em vários locais;
- Apesar do Brasil ser um país privilegiado em volume de águas superficiais para abastecimento das cidades, sua poluição tem sido tão devastadora, que a necessidade de uso de águas subterrâneas tem aumentado muito na última década, e
- A contaminação subsuperficial é difícil de ser detectada.

Em uma cidade com alto índice de urbanização, como São Paulo, a pluma de contaminação dos casos de vazamentos de hidrocarbonetos pode percorrer caminhos preferenciais, como tubulações de rede de esgoto, galerias de rede elétrica ou de telefonia, fundações, solos de edifícios, garagens subterrâneas e, particularmente, o metrô (OLIVEIRA, 1992).

No caso do metrô, o vazamento de um tanque de armazenamento subterrâneo pode atingir a parede do túnel e infiltrar-se através do concreto, caminhando para o interior do mesmo, colocando em risco a vida dos usuários. Caso não haja a descontaminação adequada do local, a infiltração do contaminante para o interior do túnel pode continuar durante anos devido ao fato de que grande parte do produto fica retida no solo e vai sendo liberada gradualmente (OLIVEIRA, op. cit.).

Esse trabalho aborda a questão da contaminação das águas subterrâneas através dos postos de combustíveis, considerados atividades potencialmente contaminadoras, no município de Rio Claro.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo estudar uma das principais fontes potencialmente poluidoras das águas subterrâneas, que são os postos de combustíveis. Mais especificamente, visou:

- Contextualizar a problemática da contaminação dos solos e das águas subterrâneas por postos de combustíveis;
- Analisar em mapas estas fontes potencialmente poluidoras das águas subterrâneas no município de Rio Claro, e
- Estudar quais as áreas que apresentam potencial de risco de contaminação do meio físico.

Como produto final, foi elaborado um mapa de risco de contaminação das águas subterrâneas por postos de combustíveis.

3. ETAPAS DE TRABALHO E MÉTODOS

O trabalho consistiu em quatro etapas, sendo elas: pesquisa bibliográfica, coleta de dados, análise e tratamento dos dados e conclusão e editoração.

Para a fase de pesquisa bibliográfica foram utilizadas teses, periódicos, revistas e outras publicações a fim de obter um maior conhecimento sobre o assunto para a análise dos resultados.

A coleta de dados teve o objetivo de adquirir mapas de fluxo subterrâneo, mapa da profundidade da água subterrânea, mapa geológico, mapa do município com a localização dos postos de combustíveis, entre outros, para, assim, visualizar a situação atual do local de estudo. Os dados foram obtidos através de consultas com a prefeitura, órgãos competentes e professores da Universidade.

Os dados coletados foram, então, digitalizados e colocados em forma de mapas de isolinhas para uma melhor visualização, utilizando software *Surfer*, e foram analisados e interpretados de maneira quantitativa. Logo após esta etapa, pôde-se obter uma conclusão atendendo aos objetivos do trabalho.

Este trabalho procurou utilizar-se de dados e levantamentos hidrogeológicos existentes. Como dados referentes a vários fatores não estão disponíveis, há uma necessidade de redução e simplificação da lista de parâmetros requeridos para cumprir o objetivo do trabalho. Foram utilizados três fatores:

- a condutividade hidráulica;
- a profundidade do nível d'água, e
- a densidade dos postos de combustíveis por km².

Os mapas finais do trabalho foram obtidos a partir de uma série de dados como a localização dos postos de combustíveis no município, as profundidades do nível d'água, as condutividades hidráulicas e as formações geológicas do município de Rio Claro.

Analisando as formações geológicas presentes, pôde-se perceber que todos os postos de combustíveis ficam sobre a formação Rio Claro, eliminando a necessidade de elaboração de um mapa que considerasse esse parâmetro.

As profundidades do nível d'água foram medidas através de ensaios geofísicos utilizando o método da eletrorresistividade e a técnica da sondagem elétrica vertical. O método da eletrorresistividade tem como base a resistividade elétrica dos materiais que, junto com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam fundamentalmente as propriedades das rochas (DAVINO, 1970 *apud* OLIVA, 2002).

A técnica da sondagem elétrica vertical é uma técnica *in situ* e baseia-se na análise e interpretação das respostas do campo elétrico gerado no subsolo por meio de eletrodos (aplicando uma corrente elétrica) colocados na superfície do terreno (OLIVA, 2002). Os dados das sondagens elétricas verticais foram adquiridos em Oliva, 2002.

As condutividades hidráulicas (K) foram obtidas pelo método do permeâmetro *Guelph* que é um método *in situ* e consiste em um permeâmetro de carga constante que permite escoamento à velocidade constante (com diminuição do nível d'água no aparelho), por meio do equilíbrio entre a pressão externa (atmosférica) e a interna do aparelho (OLIVA, 2006).

Para a elaboração do mapa das áreas de risco, dividiu-se o mapa em quadrados de área de 1 km² para a obtenção de uma densidade aproximada dos postos de combustíveis por km².

4. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização

O município de Rio Claro está localizado na porção centro-leste do Estado de São Paulo, a 173 km a noroeste da capital e situa-se na Região Administrativa de Campinas (ZAINÉ, 2000). Segundo a Prefeitura Municipal da cidade, a área da unidade territorial corresponde a 499,9 km², englobando a zona rural, urbana e mais os distritos de Assistência e Ajapi.

Num raio de 30 km de Rio Claro, encontram-se as cidades: Santa Gertrudes, Cordeirópolis, Itirapina, Corumbataí, Analândia, Ipeúna, Charqueada, Piracicaba, Limeira e Araras. A latitude de Rio Claro é 22° 23' 59'' S e a longitude é 47° 34' 18'' W (ZAINÉ, 2000).

A figura IV – 1 mostra a localização da área de estudo.

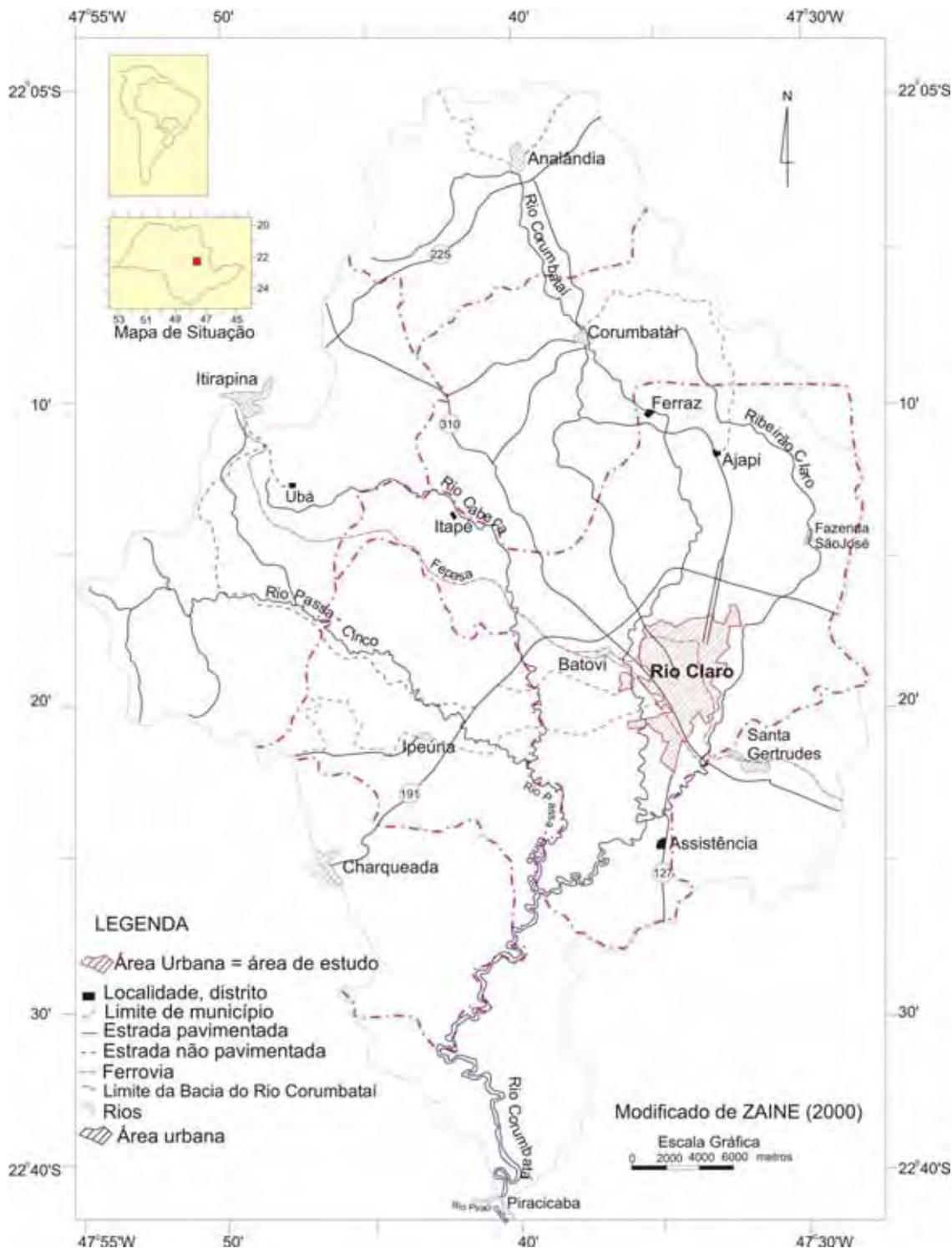


Figura IV - 1: Mapa de localização de Rio Claro. Fonte: ZAINÉ, 2000 apud YAMADA, 2004.

4.2. Aspectos Sócio-Econômicos

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE – Censo 2000), o município de Rio Claro possui uma população de 168.087 habitantes e densidade demográfica de 336,84 hab/km². A população estimada em 2006 segundo o Instituto é de 190.373 habitantes. A figura IV - 2 mostra o crescimento populacional no município de Rio Claro desde 1970.

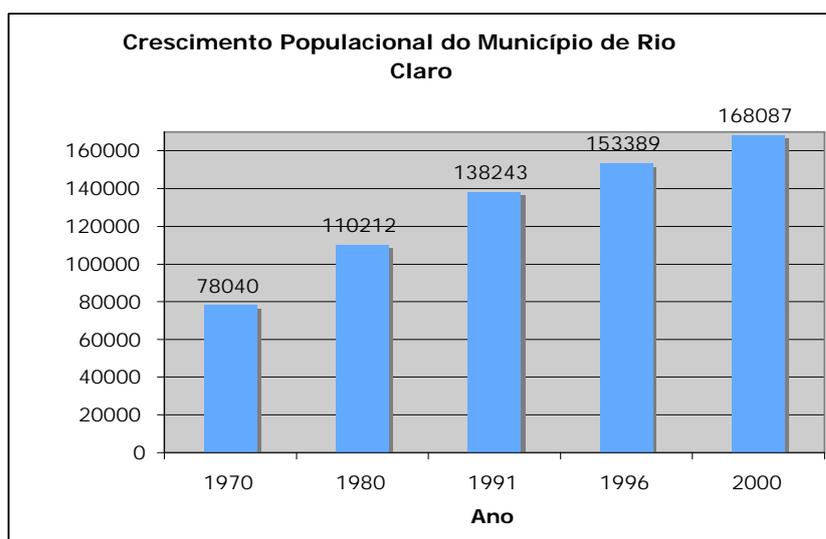


Figura IV - 2: Crescimento populacional do município de Rio Claro (Informação verbal)¹

Segundo a Prefeitura Municipal de Rio Claro, o crescimento populacional apresentado nos últimos anos esteve vinculado ao fluxo migratório que, apesar de ter sido maior no decurso da década de 1970 e parte da década de 1980, continua a ocorrer nos dias de hoje na região de Campinas como um todo.

Com relação à saúde, o município possui um total de 67 estabelecimentos de saúde. Já no setor de educação, Rio Claro apresenta 50 escolas de ensino fundamental (2004), 15 escolas de ensino médio (2004), 28 escolas de ensino pré-escolar (2004) e 3 escolas de ensino superior (2003) (IBGE – Censo 2000).

A cidade possui um Distrito Industrial criado na década de 70, localizado na zona norte do município com uma área de 11 milhões de m². Entre os principais produtos fabricados pelas maiores indústrias de Rio Claro estão: fibras de vidro, tubos e conexões de PVC, produtos da linha branca, produtos químicos leves, cabos para indústrias, balas e caramelos, peças para automóveis, estamparias, agroavícolas, nutrição de animais e cerâmicas (Prefeitura Municipal de Rio Claro).

¹ Dados fornecidos pelo IBGE – Rio Claro em 28/jun/2007.

4.3. Hidrologia

O principal sistema de drenagem das águas superficiais da região de Rio Claro é a bacia do Corumbataí (com 171.050 ha), que recebe afluentes como o Ribeirão Claro, o Cabeça e o Passa Cinco, que irão posteriormente alimentar o Rio Piracicaba. A Bacia do Corumbataí se localiza na porção centro-leste do Estado de São Paulo, na área da Depressão Periférica Paulista e abrange os municípios de Analândia, Charqueada, Corumbataí, Ipeúna, Itirapina, Santa Gertrudes, Rio Claro e Piracicaba (ZAINÉ, 2000).

O Rio Corumbataí, com altitude variada de 800 m na nascente em Analândia (Serra de Santana), a 470 m na sua foz em Piracicaba, possui 120 km de extensão e é utilizado pelo município para captação de água, juntamente com o Ribeirão Claro (ZAINÉ, 2000).

4.4. Contexto Pedológico

Segundo o Instituto Agrônômico (1981), cinco tipos principais de solos são identificados no município de Rio Claro:

1) Latossolo Roxo: encontra-se na parte sudeste e está presente em duas variedades – eutrófico e distrófico. Ambos são argilosos, friáveis e porosos, com horizonte B latossólico e apédico, de cor vermelho-escuro e textura argilosa e muito argilosa. Apesar de apresentarem características morfológicas iguais, o latossolo roxo eutrófico é mais estável devido a sua alta saturação por bases – o que o torna mais básico – fazendo com que ele seja um dos melhores solos para a agricultura em todo o Estado de São Paulo.

2) Latossolo Vermelho-Amarelo: cobre uma faixa que abrange o centro-norte até o sudoeste do município. Este tipo de solo é a classificação do solo sobrejacente à Formação Rio Claro, sendo o material original produto do retrabalhamento dos sedimentos arenosos desta Formação. Quimicamente, são solos muito ácidos, com baixa saturação por bases e com alumínio trocável, sendo ruins para a agricultura. São latossolos de coloração vermelho-amarelada, espessos, apédicos e de textura média.

3) Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos: abrangem grande parte da Depressão Periférica. No município de Rio Claro, as rochas originais são principalmente os siltitos da Formação Corumbataí. Esses solos apresentam profundidade variável não muito profunda entre 1,5 e 2,5 metros, com horizonte B textural, moderadamente drenados, ácidos (baixa saturação por bases), com alumínio trocável e textura argilosa ou média argilosa.

4) Solos Litólicos: sua principal característica é sua pequena espessura (em geral, inferior a 30 cm). Ocorrem em algumas partes do nordeste e do sul do município. Podem

apresentar caráter eutrófico ou distrófico e são de textura bastante variada devido a natureza do substrato, que, ao NE, é representado pela Formação Corumbataí e, ao sul, pela Formação Irati e por intrusões de diabásios.

5) Solos Hidromórficos: estão relacionados aos sedimentos aluvionares dos vales do Rio Corumbataí e Ribeirão Claro, portanto a abrangência deste tipo de solos se restringe a alguns pontos desses dois vales. Devido à alta presença de água, estes solos apresentam acúmulo de matéria orgânica e coloração cinza (pelo processo químico de redução).

4.5. Geologia Local e Hidrogeologia

De acordo com Cottas (1983), o município de Rio Claro encontra-se, principalmente, sobre quatro formações geológicas:

1) Formação Rio Claro (Terciário-Quaternário): formada por arenitos inconsolidados finos a médios, amarelos, com níveis locais de conglomerados e argilitos. No topo existem depósitos coluvionares de cor marrom. Esta formação tem origem de depósito fluvial.

2) Depósitos aluviais (Quaternário): encontram-se, principalmente, na Avenida Visconde de Rio Claro, sobre o Córrego Servidão, formado por areias brancas com níveis conglomeráticos na base, lentes de material argilo-arenoso cinza claro e lentes de turfa negra.

3) Formação Corumbataí (Permiano Superior): encontra-se na borda da porção oeste e leste, é composta por depósitos de origem marinha eptocontinental, siltitos e arenitos muito finos em cores lilás e cinza, com níveis locais em calcário oolíticos. Solo residual síltico-arenoso, com espessura máxima de 1,5 m.

4) Rochas intrusivas básicas (Cretáceo Inferior): sills e diques de diabásio. Parte do Ribeirão Claro encontra-se sobre este tipo de formação. Solo residual vermelho escuro, com espessura máxima de 2,5 m.

Segundo Oliva (2002), ocorrem no município de Rio Claro dois sistemas principais de águas subterrâneas:

- aquífero livre pouco profundo: constituído pelos materiais pouco consolidados da Formação Rio Claro e vazão entre 17 e 25 m³/h;
- aquífero confinado: consiste em sedimentos do Grupo Tubarão, mais especificamente da Formação Tatuí e das camadas do Subgrupo Itararé, com profundidade de aproximadamente 200 m e vazão entre 20 e 37 m³/h.

Além dos dois sistemas citados acima, ocorrem, na região, uma ampla distribuição de

rochas intrusivas básicas de diversas formas. Assim sendo, corpos de diabásio também possuem água em suas fraturas, com vazão entre 5 e 30 m³/h.

5. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A CONTAMINAÇÃO

5.1. Considerações Gerais

Quase toda a água subterrânea existente na Terra (exceto as águas congênicas ou conatas e as juvenis) faz parte do ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e então para os continentes, de onde retorna, superficial ou subterraneamente, ao oceano. Este ciclo é manipulado, no solo e no subsolo, pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade da cobertura vegetal e na atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos) pelos elementos e fatores climáticos, como por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar, insolação, que são os responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera, em uma dada latitude terrestre. (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997)

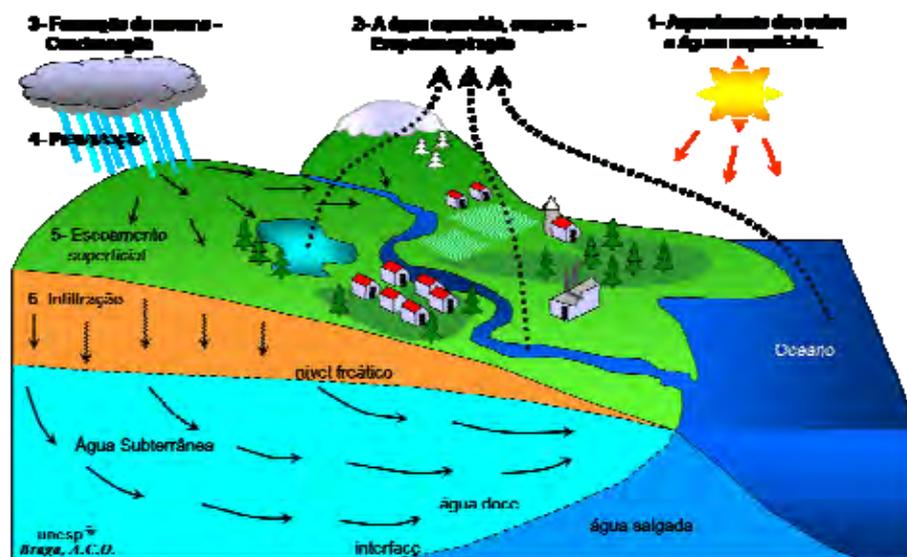


Figura V - 1: Representação esquemática do ciclo hidrológico²

Pelo fato das águas superficiais serem visíveis, muitas pessoas imaginam que os rios, barragens e lagos devem ser a maior fonte de atendimento das necessidades do homem. No Planeta Terra 99,4 % da água encontram-se indisponíveis para consumo humano existindo apenas 0,6 % de água doce líquida, das quais 97,5% são as águas subterrâneas. A figura V – 2 apresenta a distribuição das águas no planeta, mostrando a pequena porcentagem de água disponível para abastecimento e a importância das águas subterrâneas (CETESB, 2004).

² Figura cedida por Antonio Celso de Oliveira Braga em 15/ago/2007.

No Brasil, a falta de controle na utilização da água subterrânea provavelmente não permite fazer estimativas sem erros significativos. Porém, dados do IBGE (1991) revelam que 61% da população é abastecida com água subterrânea (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997).

Segundo CETESB (op. cit.), as águas subterrâneas têm importante papel no abastecimento público e privado no Estado de São Paulo, onde 72% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por esse recurso hídrico.

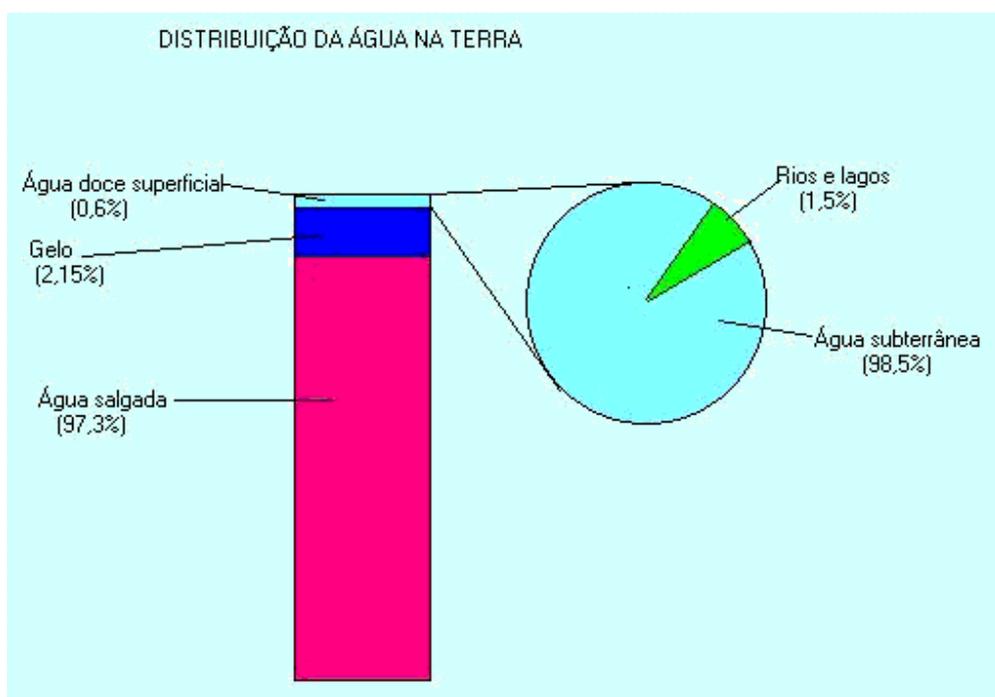


Figura V - 2: A distribuição das águas no planeta. Fonte: www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm

Com a crescente contaminação das águas superficiais, as águas subterrâneas passaram a exercer um importante papel como fonte de abastecimento, constituindo uma grande reserva de água doce do planeta em virtude da sua abundância, qualidade e baixo custo de exploração, e apesar da extrema importância dos aquíferos, as águas subterrâneas estão sendo contaminadas com o uso abusivo de agrotóxicos, fertilizantes, fossas sépticas, aterros sanitários e principalmente por depósitos subterrâneos de produtos químicos e combustíveis. (KULKAMP et. al, 2003)

Ainda de acordo com Feitosa & Manoel Filho (1997), as águas subterrâneas, em condições naturais, encontram-se numa situação de quase equilíbrio, governado por um mecanismo de recarga e descarga. Além dessas águas não estarem expostas diretamente às influências climáticas, o seu movimento é muito lento, implicando em tempo de trânsito muito longo, e, no caso de haver algum tipo de contaminação, isso pode levar um maior tempo de degradação.

5.2. Distribuição Vertical da Água Subterrânea

Abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida ao longo da vertical basicamente em duas zonas horizontais, quando não é confinada, de acordo com a proporção relativa do espaço poroso que é ocupado pela água (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997):

- Zona saturada ou zona de saturação: situada abaixo da superfície freática (lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica) e nela todos os vazios existentes estão preenchidos com água.
- Zona não saturada, zona de aeração ou zona vadosa (= rasa): situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (ar e vapor d'água, principalmente) e por água. Esta zona divide-se em três partes: zona de evapotranspiração (fica entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno); zona intermediária (compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas); e zona capilar (se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água).

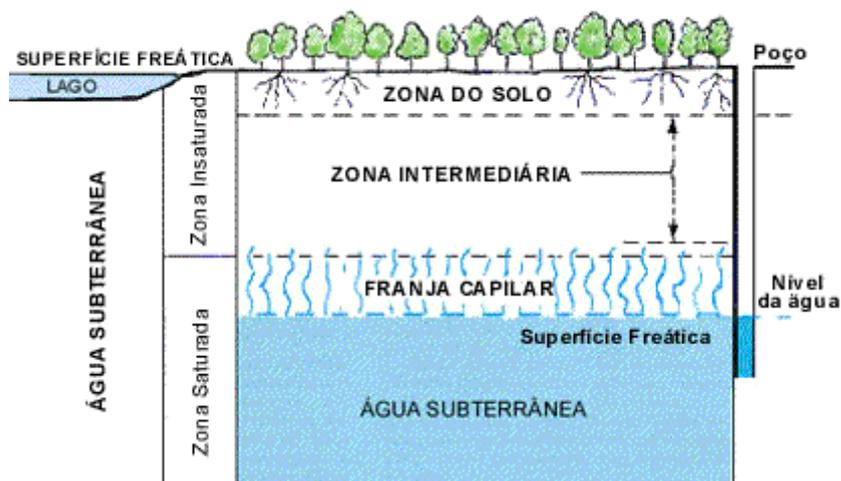


Figura V - 3: Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo.
Fonte: http://www.ambiente.sp.gov.br/aquifero/def_aquifero.htm

5.3. Aquíferos

Os aquíferos são sedimentos e/ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação e são reservatórios de águas subterrâneas. Podem ser livres ou confinados. As águas contidas nos aquíferos livres estão como se estivessem em um reservatório ao ar livre, submetidas, apenas, à pressão atmosférica. Já no segundo tipo, as águas se encontram entre camadas impermeáveis, sob pressão superior à pressão atmosférica (BRAGA, 2005).

Os materiais naturais também podem ser classificados de acordo com sua capacidade

de liberar e armazenar água (BRAGA, 2005).

- aquíferos: materiais ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação e são verdadeiros reservatórios de água subterrânea;
- aquíferos: materiais porosos que, apesar de armazenarem água, permitem a circulação apenas de forma muito lenta. São constituídos de argilas siltosas ou arenosas;
- aquícludes: materiais porosos, saturados, mas não permitem a circulação de água. São basicamente argilosos.
- aquíferos: materiais impermeáveis, com grau de porosidade muito baixo, que não contém e não transmitem água. São constituídos por rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas, sem fraturamento ou saturação.

Quanto às características físicas do terreno, os aquíferos podem ser classificados em (Miotto, 1990):

- granulares ou porosos: formados por rochas sedimentares que, devido ao alto índice de porosidade, permitem a circulação e o armazenamento das águas nos poros ou vazios intergranulares;
- fraturados: apresentam-se em rochas consolidadas que sofreram processos geológicos posteriores e que nelas produziram fraturas, diaclases, juntas, esfoliações ou outras estruturas geológicas de ruptura. As águas de infiltração que atingem esse tipo de aquífero circulam através dessas fendas.
- cársticos: encontram-se em rochas carbonáticas como o calcário (carbonato de cálcio) e o dolomito (carbonato de cálcio e magnésio). Geralmente a porcentagem de poros nessas rochas é desprezível, mas fenômenos geológicos de ruptura permitem a inserção de água nessas rupturas, o que, em zona de dissolução dessas rochas e sob certas condições, produz a dissolução química de alguns componentes, de modo a formar verdadeiras redes de comunicação interna que, quando desenvolvidas, conseguem armazenar grande quantidade de água (DA SILVA, 1986 *apud* MIOTTO, 1990).



Figura V - 4: Tipos de Aquíferos. Fonte: Da Silva, 1986 *apud* Miotto, 1990.

5.4. Vulnerabilidade dos Aquíferos

A qualidade das águas subterrâneas pode ser afetada pelas atividades sócio-econômicas, designadamente pelos usos e ocupações do solo, em particular pelas áreas urbanas, infra-estruturas e equipamentos, agricultura e zonas verdes. Dado que a contaminação das águas subterrâneas é, na maioria das vezes, persistente e que um aquífero apresenta um grande volume de água, a sua recuperação é, normalmente, muito lenta e difícil (PACHECCO, 2007).

A velocidade de contaminação depende do tipo de aquífero. Um aquífero granular, por exemplo, mesmo apresentando altos índices de vazios, manifestam baixas velocidades de circulação de suas águas devido à influência da atração molecular e da ação da capilaridade. Já em um aquífero cárstico ou mesmo em um aquífero fraturado, a velocidade de circulação é maior em função dos grandes espaços encontrados nas fraturas, diaclases, ou outras estruturas geológicas de ruptura. (MIOTTO, 1990)

Ainda de acordo com o autor referido acima, os principais contaminantes das águas subterrâneas são os metais pesados, entre eles estão cádmio, mercúrio, chumbo, cromo e zinco, os compostos orgânicos, as soluções químicas, as bactérias e os vírus. Segundo Feitosa & Manoel Filho (1997), em termos de contaminação ambiental, as substâncias que mais preocupam são as não degradáveis pelas bactérias, seja no solo ou nas estações de tratamento de esgoto. Tais substâncias constituem em compostos refratários. As substâncias mais perigosas para a qualidade da água subterrânea são as relativamente solúveis, não voláteis e refratárias. O principal mecanismo de depuração de muitos desses componentes é a adsorção, que pode evitar a percolação dos mesmos até os aquíferos.

Segundo Miotto (1990), as principais características que determinam a vulnerabilidade de um aquífero são a profundidade do lençol freático, a porosidade, a condutividade hidráulica e o tipo de solo ou rocha que constitui o aquífero. A zona não-saturada é de grande importância pois, agindo com um filtro natural, atenua ou até mesmo elimina o efeito nocivo dos contaminantes, através, dos processos de oxidação, redução, volatilização, microbiológico e neutralização por adsorção iônica (filtração) (MEAULO, 2004). Sua condição química, normalmente aeróbia, aliada ao grande número de vazios entre as partículas e à grande superfície específica desses poros, cria condições potenciais para (MIOTTO, 1990):

- interceptar, adsorver e eliminar bactérias e vírus;
- atenuar a infiltração de metais pesados e outros produtos químicos inorgânicos,

- mediante precipitação, adsorção ou troca iônica; e
- adsorver e biodegradar muitos hidrocarbonetos e compostos orgânicos sintéticos.

A figura V – 5 mostra resumidamente os processos de atenuação de contaminantes nas águas subterrâneas. Caso o contaminante ultrapasse a zona não saturada e entre em contato com o nível da água, ocorre então um equilíbrio de concentrações entre os meios e em seguida a atuação do mecanismo de diluição (MEAULO, 2004).

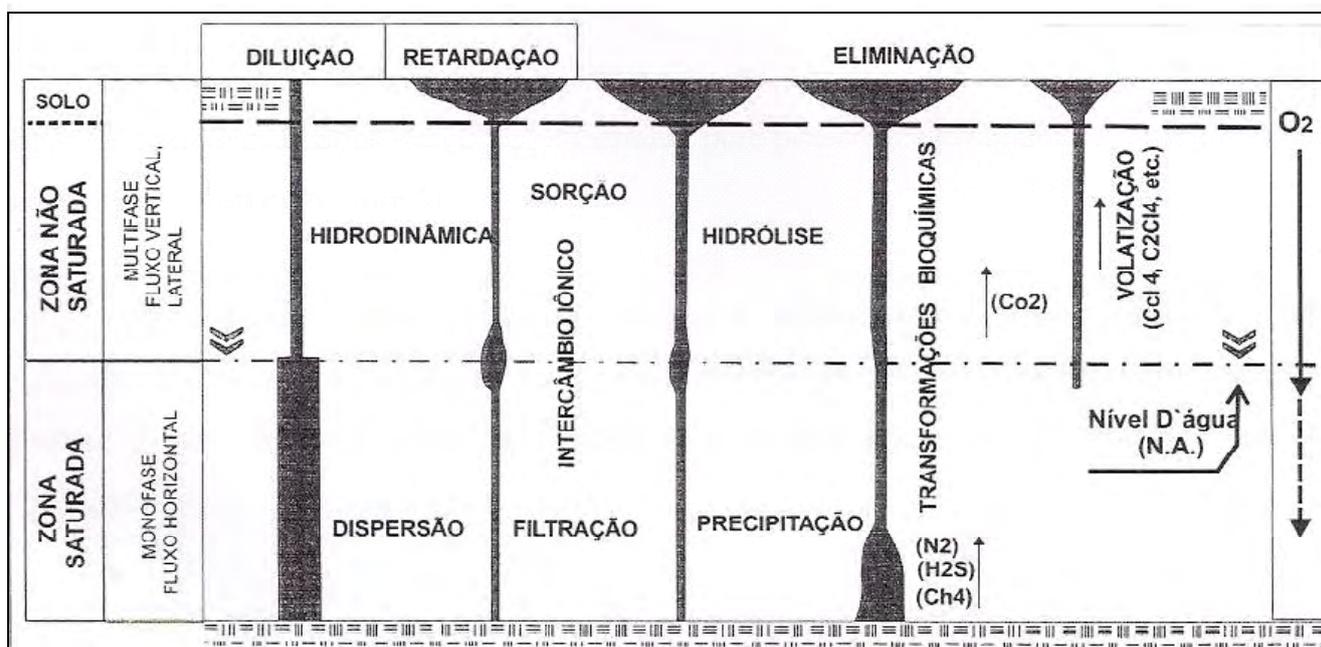


Figura V - 5: Resumo dos processos de atenuação dos contaminantes das águas subterrâneas.

Fonte: Gowler, 1983 *apud* Meaulo, 2004.

O movimento da água na zona não-saturada é complexo, tornando sua capacidade de atenuar contaminantes de difícil previsão, pois podem ocorrer reações químicas do contaminante com elementos do meio produzindo novos compostos. Muitas vezes a zona não-saturada só retarda a migração do contaminante até a zona saturada. Por causa das variações geológicas, na zona saturada, a eliminação dos contaminantes nem sempre é possível. Porém, conhecendo a carga ou fonte de contaminação, estudos e projetos podem ser feitos afim de atenuar ou eliminá-la, evitando assim, a contaminação do aquífero (MIOTTO, 1990).

Na zona saturada também ocorrem dois importantes processos de atenuação do contaminante: dispersão hidrodinâmica e retardação (durante a troca de íons entre os líquidos e os sólidos) (MEAULO, 2004). A tabela V – 1 apresenta os principais mecanismos que controlam a migração dos poluentes nas zonas subterrâneas.

Tabela V - 1: Processos que controlam a migração dos contaminantes na zona subterrânea.

| | Mecanismos | Descrição | Efeitos |
|-----------------------------|-------------------------------|--|---|
| Processos Físicos | Fluxo subterrâneo (advecção) | A água subterrânea flui através de poros e fraturas em solos e rochas | Transporta contaminantes dissolvidos ou em solução |
| | Dispersão hidrodinâmica | A água subterrânea flui mais rapidamente em alguns poros e fraturas que em outros. Há mistura de águas contaminadas e não contaminadas | Reduz a concentração, mas aumenta a área atingida pelos contaminantes |
| | Separação gravimétrica | Líquidos menos densos que a água, como a gasolina, tendem a flutuar no topo dos aquíferos, enquanto os mais densos tendem a localizar-se nas porções basais destes | Dependendo da densidade do contaminante, pode criar zonas de concentração, no topo ou na base dos aquíferos |
| | Filtração | Solos e rochas podem filtrar partículas em suspensão na água subterrânea | Reduz a concentração dos contaminantes em suspensão |
| | Decaimento radioativo | Rearranjo na estrutura atômica, com a formação de elemento mais estável e emissão de energia | Reduz a concentração dos contaminantes radioativos segundo taxas previsíveis, mas com emissão de radioatividade |
| | Volatilização | Contaminantes voláteis evaporam do lençol freático para a zona não saturada ou para a atmosfera | Reduz a concentração dos contaminantes voláteis |
| | Varição térmica | O calor dos contaminantes afeta as propriedades físicas da água e as propriedades químicas dos resíduos (por ex., viscosidade) | Contaminantes com temperatura elevada |
| Processos Químicos | Adsorção e troca iônica | Alguns contaminantes dissolvidos tendem a aderir às superfícies dos minerais | Reduz a concentração e/ou a velocidade de migração |
| | Reação de oxiredução | Alterações da estrutura molecular e propriedades iônicas dos contaminantes | Pode alterar a toxicidade. Comportamento químico e mobilidade dos contaminantes |
| | Hidrólise | Reação com a água, a qual altera a natureza iônica e molecular dos contaminantes | Reduz a concentração dos contaminantes |
| | Complexação | Contaminantes dissolvidos associam-se a outros compostos para formar novos compostos | Pode aumentar a mobilidade dos contaminantes e alterar o comportamento químico |
| Processos Biológicos | Transformação microbioquímica | Bactérias e outros microrganismos alteram ou decompõem contaminantes orgânicos e alguns inorgânicos através de reações enzimáticas e de respiração | Reduz a concentração de alguns contaminantes. Pode criar novos produtos tóxicos |

Fonte: Robertson, 1982 *apud* Meaulo, 2004.

A distância que as bactérias e microrganismos podem percorrer com a água subterrânea depende da velocidade do fluxo de água, da taxa de mortalidade dos microrganismos e da sua concentração inicial. Em aquíferos de permeabilidade uniforme, pode-se calcular sua condutividade hidráulica, para determinar a distância que os microrganismos podem percorrer (Tabela V – 2). Entretanto, os aquíferos uniformes são raros, podendo os contaminantes utilizar vias preferenciais no subsolo, atingindo velocidades maiores que o fluxo da água subterrânea (FOSTER et al., 1988 *apud* GUEDES ET AL., 1998).

Tabela V - 2: Transporte de bactérias na zona saturada.

| Local | Solo | Dist. Percorrida (m) | Velocidade da água subter. (m/d) | Temperatura °C | Investigador |
|----------------------|--------------|----------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------|
| Singapura Malásia | areia média | 21 | 3 | - | Yeager (1929) |
| Alabama USA | areia média | 11 | 0.9-2.5 | 21 | Caldwell & Parr (1937) |
| Alabama USA | areia grossa | 24 | 4 | 17-22 | Caldwell (1937) |
| Alabama USA | areia grossa | 3 | 4 | 17-22 | Caldwell (1938) |
| Alabama USA | areia média | 3 | 0.5 | 17-22 | Caldwell (1938) |
| Bengala Índia | areia média | 3 | 0.7 | 26 | Dyer & Bhaskaran (1945) |
| Long Island USA | areia fina | 122 | - | - | Dappert (1932) |
| California USA | areia | 30-68 | 22 | - | Butler et. all (1954)j |

Fonte: Foster et. al, 1988 *apud* Guedes et. al, 1998

De acordo com Miotto (1990), um mecanismo que influi no transporte dos contaminantes e que levam a uma previsão do comportamento da pluma é a densidade. Quando o contaminante tem a densidade consideravelmente maior que a da água, a tendência é a migração para as partes mais baixas do aquífero.

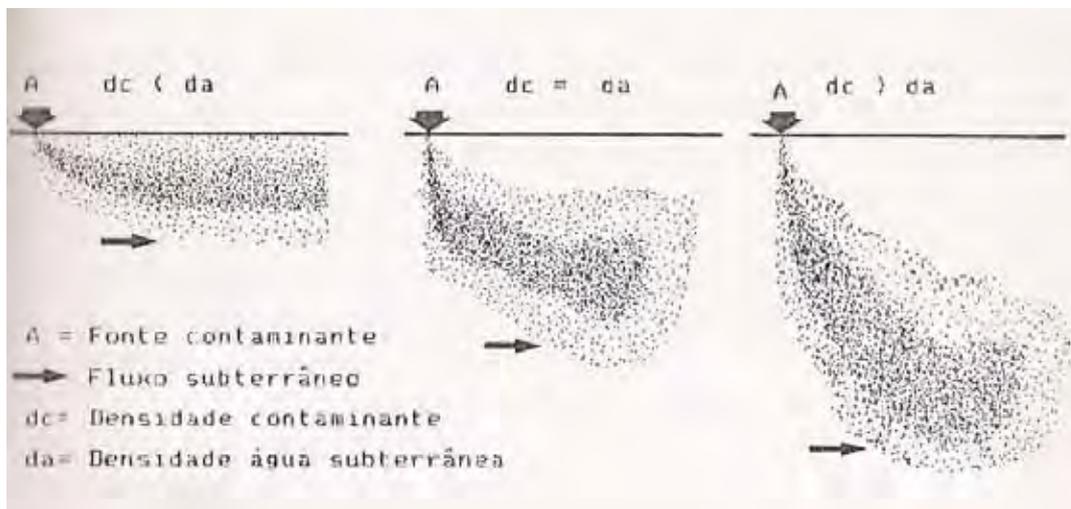


Figura V - 6: Efeito da densidade na migração do poluente em aquífero poroso.

Fonte: Da Silva, 1986 *apud* Miotto, 1990.

5.5. Contaminação das Águas Subterrâneas Através de Postos de Combustíveis

O intenso processo de industrialização que o nosso país passou nos últimos 30 anos, a migração de populações rurais para os grandes centros urbanos, gerando maiores demandas de produtos industrializados e maior volume de resíduos, e a ocorrência de acidentes ambientais, envolvendo o derrame de produtos químicos, vem aumentando as áreas degradadas por poluentes, em praticamente todas as regiões populosas do país (POMPÉIA,

[20--?).

Pode-se destacar como principais causas de contaminação do solo e das águas superficiais e subsuperficiais: vazamentos em dutos e tanques, falhas no processo industrial, problemas no tratamento de efluentes, disposição inadequada de resíduos e acidentes no transporte de substâncias químicas. De acordo com a composição química e características físicas do contaminante, deve-se procurar prever seu destino e comportamento para atuar adequadamente na descontaminação e recuperação da área degradada. (POMPÉIA, op. cit.)

CETESB (2001) define áreas potencialmente contaminadas como sendo áreas onde estão sendo desenvolvidas ou onde foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminadoras, como por exemplo: postos de combustíveis, cemitérios, indústrias, aterros sanitários e esgotos. Essas fontes podem poluir a atmosfera, os rios, as águas superficiais e subterrâneas, entre outros.

5.5.1. Considerações Gerais

Os postos de combustíveis interferem diretamente no meio ambiente onde estão instalados, mais especificamente no meio físico, podendo causar inúmeros danos ambientais, como por exemplo, vazamentos de derivados de hidrocarbonetos (como gasolina, óleo diesel), originando plumas de contaminação que infiltram no solo e atingem o lençol freático (YAMADA, 2004). As áreas afetadas são de difícil recuperação e esse processo tem um custo muito alto.

A contaminação de aquíferos por vazamentos de derivados de petróleo em tanques de armazenamento é uma preocupação a nível mundial e tem sido muito discutida também no Brasil, devido a alta toxicidade dos hidrocarbonetos aromáticos presentes. (KULKAMP et al., 2003).

Um ponto muito importante no estudo dos contaminantes de derivados de petróleo no meio ambiente, está diretamente relacionado com a utilização do etanol como combustível. Nas indústrias petrolíferas e químicas, nas companhias de distribuição, e postos de gasolina onde os tanques subterrâneos de armazenamento de óleo diesel são geralmente instalados próximos aos tanques de etanol, em caso de derramamento ou vazamento, grandes proporções de óleo diesel poderão entrar em contato com o álcool, e as interações entre os contaminantes e o etanol podem afetar o comportamento destes no sistema. A adição de etanol pode aumentar a solubilidade dos hidrocarbonetos em água e aumentar a mobilidade do BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) dissolvido, além de dificultar a biodegradação natural e a migração dos contaminantes (KULKAMP, 2003).

Por ser muito pouco solúvel em água, a gasolina derramada, contendo mais de uma centena de componentes, inicialmente estará presente no subsolo como líquido de fase não aquosa (NAPL – *non aqueous phase liquid*). Em contato com a água subterrânea a gasolina se dissolverá parcialmente (YAMADA, 2004). Segundo Ferreira & Zuquette (1998), os NAPLs são conhecidos pela sua persistência em subsuperfície e pela capacidade de contaminar um volume de água relativamente grande.

Existem dois tipos de NAPL (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998; YAMADA, 2004):

- LNAPLs (*light non aqueous phase liquids* ou líquido de fase não aquosa leve): possuem densidade menor que a água e estão comumente associados com a produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, como a gasolina, diesel, querosene, acetona, óleo aquecido e benzeno.
- DNAPLs (*dense non aqueous phase liquids* ou líquido de fase não aquosa densa): possuem densidade maior que a água e estão relacionados a uma ampla variedade de atividades industriais, principalmente em indústrias de conservação de madeira e de pesticidas. Como exemplos, têm-se os clorinados e solventes.

De acordo com Environmental Protection Agency (EPA, 2003), os hidrocarbonetos de petróleo são derivados do óleo cru bruto, que é refinado em vários produtos por meio de vários processos. Os produtos resultantes do petróleo refinado são uma mistura de centenas de compostos, que podem ser classificados com base em sua composição e propriedades físicas. Os maiores grupos de produtos estocados em tanques subterrâneos são:

- Gasolinas:

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos e outros aditivos químicos, como os álcoois (ex.: etanol) e éteres (ex.: metil-terc-butil éter, ou MTBE). Ela é mais móvel que os destilados médios ou os óleos combustíveis. A alta mobilidade da gasolina se deve ao fato de seus componentes possuírem baixos pesos moleculares. Compostos de hidrocarbonetos usualmente encontrados na gasolina têm entre 4 e 10 átomos de carbono por molécula. O peso molecular mais baixo resulta em uma baixa viscosidade, alta volatilidade e moderada solubilidade em água. Ela contém altas porcentagens de hidrocarbonetos aromáticos, que estão entre os compostos de hidrocarbonetos mais solúveis e tóxicos (EPA, 2003).

Os compostos aromáticos mais freqüentemente encontrados são benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX). Pela sua alta volatilidade, alta solubilidade e alta biodegradabilidade, os compostos BTEX estão entre os primeiros a serem esgotados na pluma de contaminação (produto livre) e os primeiros a atingirem as águas subterrâneas. Em

vazamentos antigos de gasolina, a pluma pode conter relativamente pouco BTEX, sendo rica em componentes mais pesados, menos solúveis e menos biodegradáveis. Como consequência, o produto será mais viscoso, levemente mais denso, menos volátil e menos móvel que o produto recém vazado (EPA, 2003).

Estes contaminantes são considerados substâncias perigosas por serem depressantes do sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico com padrão de potabilidade de 10 µg/l, segundo as normas do Ministério da Saúde (CORSEUIL & MARINS, 1997).

Os aditivos (ex.: etanol, MTBE) são muito solúveis e se dissolvem preferencialmente em água subterrânea, a qual diminui a concentração desses aditivos no produto livre, mas resulta na formação de plumas dissolvidas mais extensas. O MTBE (éter-metil-terc-butílico) também se distancia da fonte mais rapidamente que o produto livre e, por ser relativamente não degradável, é de difícil remediação (EPA, 2003).

- Destilados médios:

Os destilados médios (ex.: diesel, querosene, combustível para aviação, óleos combustíveis mais leves) podem conter 500 compostos individuais, mas tendem a ser mais densos, muito menos voláteis, menos solúveis em água e menos móveis que os compostos encontrados na gasolina. Os maiores componentes individuais nesta categoria de hidrocarbonetos contêm entre 9 e 20 átomos de carbono cada. Hidrocarbonetos mais leves como o BTEX, são geralmente encontrados como traços nos destilados médios e quando estão inicialmente presentes, normalmente não são mais encontrados em plumas de antigos vazamentos por terem se biodegradado, evaporado e se dissolvido na água subterrânea (EPA, 2003).

- Óleos combustíveis pesados:

Os óleos combustíveis pesados possuem composição e características similares aos destilados médios. Este tipo de combustível é relativamente mais viscoso e insolúvel em água, sendo imóveis em subsuperfície. A maioria dos compostos encontrados no óleo combustível pesado possuem mais de 14 átomos de carbono, alguns mais de 30. Assim como nos antigos vazamentos de destilados médios e gasolinas, os componentes mais leves estão apenas como traços por serem mais prontamente biodegradados e dispersados (EPA, 2003).

5.5.2. Transporte dos Derivados de Petróleo no Meio Físico

5.5.2.1. Propriedades Físicas Influentes

Segundo EPA (2003), o transporte dos produtos derivados do petróleo em subsuperfície é determinado, principalmente, pelas propriedades do líquido e das características do meio geológico, onde ocorre vazamento do produto. Entre as propriedades mais importantes do líquido estão a densidade, a viscosidade e a tensão interfacial (*interfacial tension*). As propriedades do solo que influenciam no movimento dos hidrocarbonetos são a porosidade e a condutividade hidráulica. Outras propriedades adicionais que são funções de ambos são a pressão capilar, a permeabilidade relativa, a saturação e saturação residual, a molhabilidade, entre outras.

- Densidade (EPA, 2003):

Determina a tendência do produto livre a flutuar na água ou a acumular-se no fundo do aquífero. As densidades dos hidrocarbonetos de petróleo normalmente encontrado em USTs (*underground storage tank* – tanque de armazenamento subterrâneo) são menores que 1.0 e variam de 0.75 g/ml a 0.99 g/ml. Devido a essa baixa densidade, eles tendem a se acumular sobre a água.

- Viscosidade (EPA, 2003):

Descreve a resistência que um fluido tem para se mover e é causada pelo atrito interno das moléculas do fluido. É um fator que controla a mobilidade e recuperabilidade dos hidrocarbonetos líquidos. A viscosidade é inversamente proporcional à temperatura: conforme a temperatura do fluido aumenta, a viscosidade diminui (em lugares muito frios, a recuperação de uma área contaminada com hidrocarbonetos pode ser comprometida devido à alta viscosidade do fluido). Os que têm baixa viscosidade são mais móveis e mais facilmente recuperados que os com alta viscosidade. A gasolina, por exemplo, é menos viscosa que o diesel, portanto se move mais rapidamente que o mesmo, é mais facilmente recuperada em subsuperfície e deixa uma menor saturação residual.

Tabela V - 3: Densidade e Viscosidade de Alguns Hidrocarbonetos Comparados com a Água

| Fluido | Densidade ρ (g/ml) | Viscosidade μ (centipoise, cP) |
|--------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Água | 0.998 | 1.14 |
| Gasolina | 0.729 | 0.62 |
| Diesel combustível | 0.827 | 2.7 |
| Querosene | 0.839 | 2.3 |

Nota: Todas as medidas foram feitas a 15°C.
Modificado de EPA, 2003.

- Tensão interfacial (*interfacial tension*):

Segundo EPA (2003), esta tensão existe na interface entre fluidos imiscíveis (por

exemplo: hidrocarboneto, ar e água) e causa a elevação de um líquido em um tubo capilar, formando um menisco. Em geral, uma maior tensão interfacial resulta em uma maior pressão capilar, o que pode produzir maior saturação residual. Para líquidos completamente miscíveis, a tensão interfacial é 0 dinas/cm e para a água a 25°C é de 72 dinas/cm. Ela é também inversamente proporcional à temperatura e pode ser afetada pelo pH, surfactantes e gás em solução. É difícil a obtenção precisa dos valores da tensão interfacial por dois motivos: 1) a medição em campo geralmente não é prática; e 2) apesar dos valores para alguns hidrocarbonetos de petróleo estarem presentes na literatura, eles tendem a ser somente para compostos puros, sob condições ideais e não são representativos dos produtos que se encontram nas plumas em subsuperfície.

- Porosidade (EPA, 2003):

A porosidade caracteriza a capacidade de um meio de segurar fluidos. É um fator importante no sistema de recuperação de um produto livre. O cálculo da quantidade de um produto livre e imóvel em subsuperfície requer uma estimativa da porosidade efetiva.

A porosidade é classificada como primária ou secundária. A primária é criada quando sedimentos são depositados (ou rochas cristalinas são formadas), e depende da forma, separação e acondicionamento dos grãos. Este tipo de porosidade é maior quando os grãos são aproximadamente do mesmo tamanho e de forma não esférica. Sedimentos não consolidados que contêm tamanhos variados de grãos tendem a ter uma porosidade primária baixa, pois os grãos pequenos preenchem os poros entre os grãos maiores. A porosidade secundária aparece depois das rochas terem sido formadas ou depois de sedimentos serem depositados. Exemplos deste tipo de porosidade são foliações, fraturas e buraco de raízes.

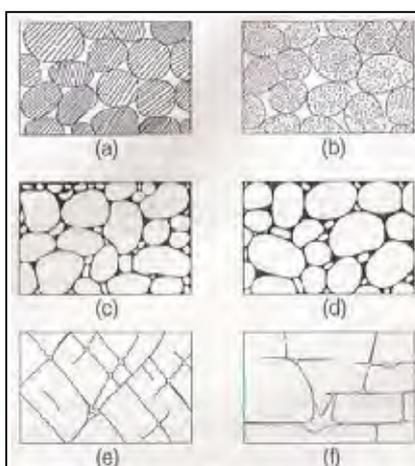


Figura V - 7: Representação esquemática de distintos tipos de rocha, indicando a relação entre a textura e a porosidade: a) rocha sedimentar com granulometria homogênea (porosidade elevada); b) rocha sedimentar de granulometria homogênea cujos grãos são porosos (porosidade muito elevada); c) rocha sedimentar de granulometria heterogênea (baixa porosidade); d) rocha sedimentar de granulometria heterogênea e alto grau de cimentação (porosidade muito baixa); e) rocha com porosidade secundária devido a fraturas; f) rocha com porosidade secundária devido a dissolução. Fonte: Feitosa & Manoel Filho, 1997.

A porosidade total é baseada no volume de todos os vazios (porosidade primária e secundária), estando ou não os poros conectados. Quando os poros não estão conectados, a água subterrânea não pode se mover entre os sedimentos. A relação do volume de poros conectados com o volume total do solo é expressa pela porosidade efetiva. Em geral, quanto menor os grãos da rocha, menor a porosidade efetiva e maior a capacidade de retenção.

De acordo com Feitosa & Manoel Filho (1997), um aquífero pode ser considerado bom se ele apresenta valores elevados tanto de porosidade total quanto de porosidade efetiva. Assim, a argila possui uma elevada porosidade total (média variando entre 35 e 45%), mas possui uma reduzida porosidade efetiva (valores médios em torno de 3%) e não tem utilização como aquífero. Já uma mistura de areia e pedregulho apresenta uma porosidade total um pouco menor (valores médios entre 20 e 35%), porém possui um valor elevado de porosidade efetiva (média em torno de 29%) e forma um bom aquífero.

- Condutividade Hidráulica:

Esta propriedade refere-se à facilidade da formação aquífera de conduzir um fluido, e leva em conta as características do meio, como porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma e arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica, por exemplo). Um fluido viscoso terá, num meio poroso, velocidade diferente da velocidade da água que tem baixa viscosidade. Além disso, um líquido mais denso terá características diferentes de um líquido menos denso (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997).

Ainda segundo Feitosa & Manoel Filho (1997), a permeabilidade intrínseca está relacionada com a condutividade hidráulica e é função do tipo do material poroso, sua granulometria e sua disposição estrutural. Meios com alta condutividade hidráulica são muito permeáveis e podem facilmente transmitir fluidos não-viscosos, como a água e vários produtos derivados do petróleo. Vários estudos comprovam as seguintes conclusões com relação à permeabilidade:

- quanto maior o tamanho médio dos grãos do solo, maior a permeabilidade (maiores vazios);
- quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade (o aumento do desvio padrão indica maior variação do tamanho dos grãos, grãos pequenos ocupando os espaços vazios entre os grãos grandes);
- amostras com um tamanho de grãos uniformes apresentam maior permeabilidade.

De acordo com VARGAS, 1978 *apud* YAMADA, 2004, os solos podem ser classificados quanto a sua permeabilidade, nas seguintes classes:

Tabela V - 4: Classificação dos solos quanto à permeabilidade.

| | Grau de Permeabilidade | Tipo de Solos | Coefficiente de Permeabilidade a 20°C (cm/s) |
|---------------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| Solos Permeáveis | Alta | Pedregulhos | $> 10^{-1}$ |
| | Média | Areias | 10^{-1} a 10^{-3} |
| | Baixa | Silte e Argilas | 10^{-3} a 10^{-5} |
| Solos Impermeáveis | Muito Baixa | Argilas | 10^{-5} a 10^{-7} |
| | Baixíssima | Argilas | $< 10^{-7}$ |

Fonte: VARGAS, 1978 *apud* YAMADA, 2004.

Tabela V - 5: Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados.

| Material | Permeabilidade Intrínseca (cm ²) | Condutividade Hidráulica (cm/s) |
|---------------------------|--|---------------------------------|
| Argila | 10^{-14} – 10^{-11} | 10^{-9} – 10^{-6} |
| Silte; Silte arenoso | 10^{-11} – 10^{-9} | 10^{-6} – 10^{-4} |
| Areia argilosa | 10^{-11} – 10^{-9} | 10^{-6} – 10^{-4} |
| Areia siltosa; Areia fina | 10^{-10} – 10^{-8} | 10^{-5} – 10^{-3} |
| Areia bem distribuída | 10^{-8} – 10^{-6} | 10^{-3} – 10^{-1} |
| Cascalho bem distribuído | 10^{-7} – 10^{-5} | 10^{-2} – 10^0 |

Fonte: Fetter, 1988 *apud* Feitosa & Manoel Filho, 1997.

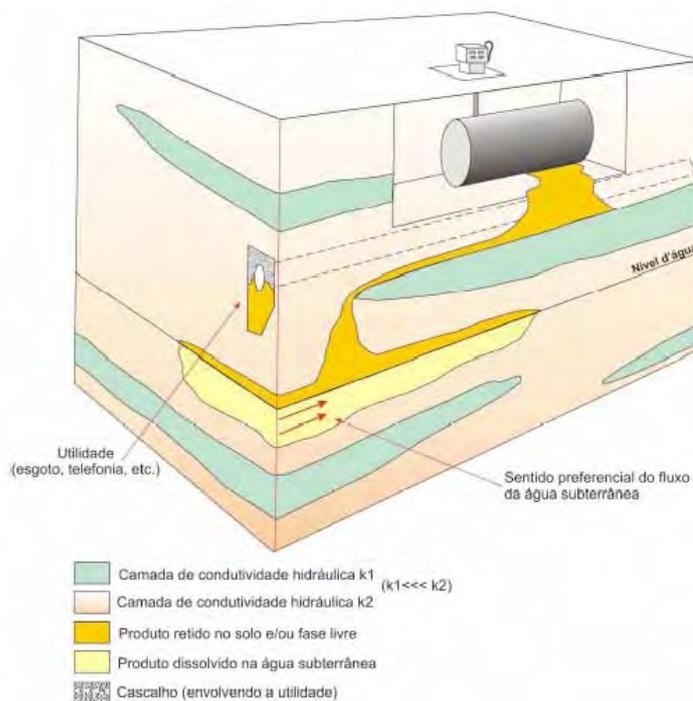


Figura V - 8: Efeitos das camadas de diferentes condutividades hidráulicas na migração do contaminante.

Fonte: Oliveira, 1992 *apud* Yamada, 2004.

- Saturação e Saturação Residual (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998):

Saturação é definida como o volume de hidrocarbonetos (ou de qualquer outro tipo de NAPL) armazenado nos poros, em relação ao número total de poros. Dependendo das

porcentagens relativas do volume de poros ocupados por líquidos diferentes, o grau de saturação do meio poroso será diferente do que se os poros fossem ocupados por um único líquido. Isso interfere significativamente no transporte e na distribuição dos derivados de hidrocarbonetos.

A saturação residual pode ser definida como o grau de saturação no qual o derivado de hidrocarboneto torna-se descontínuo e é imobilizado por forças de capilaridade, onde, segundo EPA (http://www.epa.gov/extrmurl/learn2model/part-one/phases/twophase01_phases.htm), o fluido está numa quantidade muito pequena podendo ser considerada como um resíduo.

A porcentagem relativa de silte e argila nas paredes dos poros e a permeabilidade do meio desempenham um papel mais importante do que as propriedades do fluido no controle da saturação residual.

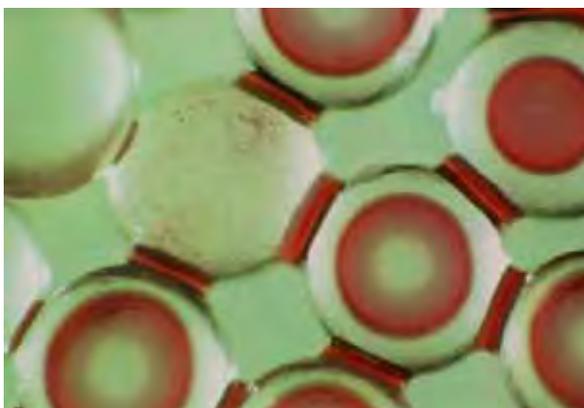


Figura V - 9: Saturação residual, representada pelos anéis isolados, em modelagem feita por EPA (http://www.epa.gov/extrmurl/learn2model/part-One/phases/twophase01_phases.htm.)

- Molhabilidade (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998):

O grau de molhabilidade refere-se à atração relativa de vários fluidos (ar, água ou NAPLs) com os sólidos do solo. O fluido que cobre o grão é chamado molhante. Os derivados de hidrocarbonetos comportam-se como fluidos não molhantes na maioria dos meios saturados, sendo, portanto, armazenados no centro dos poros como bolhas isoladas (saturação insular). Já na zona não saturada, o NAPL comporta-se como um fluido molhante, espalhando-se para os poros adjacentes. Os fluidos molhantes tendem a ocupar os pequenos poros e ficam presos em uma parte estreita nos espaços de ligação entre os poros por forças de capilaridade (saturação pendular).

O espalhamento do fluido molhante resulta em uma concentração residual menor que a do fluido não molhante, significando uma quantidade maior de NAPL absorvida na zona não saturada.

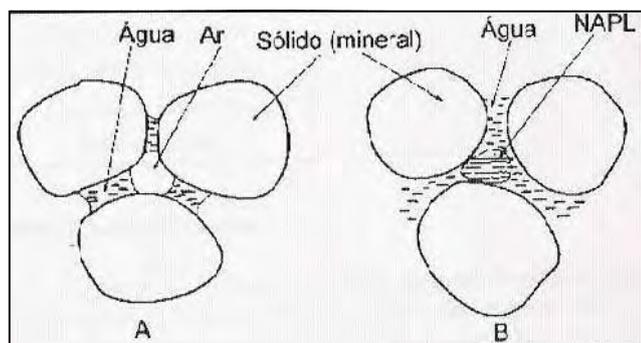


Figura V - 10: Saturação residual resultando em: A) saturação pendular e B) saturação insular.
 Fonte: EPA, 1991a.

- Permeabilidade Relativa:

O coeficiente de permeabilidade de um meio poroso em relação a dois líquidos é menor do que seria em um meio ocupado por um único líquido. Esta redução no coeficiente de permeabilidade é chamada de permeabilidade relativa e é definida como a taxa de permeabilidade para um fluido a uma dada saturação em relação a esta permeabilidade para uma saturação igual a 100% (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998)

A figura V – 11 mostra um gráfico de permeabilidade relativa para um sistema de duas fases, água e NAPL. As curvas representam a saturação da água e a saturação do NAPL que são contrárias e dividem o gráfico em três zonas (EPA, 2003):

I – NAPLs em estado líquido apresentam-se potencialmente móveis, em fase contínua e saturação alta. Água está restrita aos poros pequenos. A permeabilidade relativa da água é muito baixa ou zero. Essas condições podem ser observadas em grandes acumulações do produto.

II – Ambos (NAPL líquido e água) apresentam-se em fases contínuas mas eles não necessariamente ocupam os mesmo espaços nos poros. No entanto, a permeabilidade relativa de cada fluido tem uma grande redução causada pela saturação do outro fluido. Essas condições podem ser representativas de zonas com pequenas acumulações de NAPL móvel no nível d'água.

III – NAPLs em estado líquido descontínuo e preso como fase residual em poros isolados. O fluxo contém quase exclusivamente o movimento da água. Exemplos destas condições podem ser encontrados em zonas de NAPL residual preso abaixo do nível d'água.

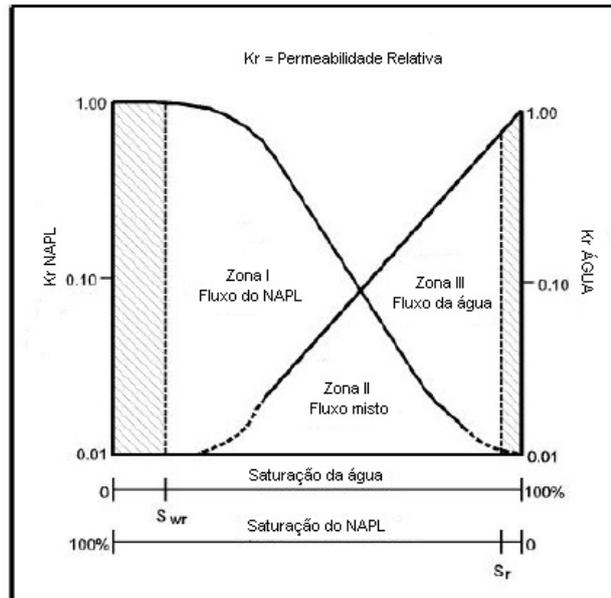


Figura V - 11: Curvas das permeabilidades relativas da água e do NAPL em estado líquido num meio poroso. Fonte: EPA, 2003.

- Pressão Capilar (EPA, 2003):

A pressão capilar é a diferença de pressão observada entre duas fases (por exemplo, hidrocarboneto líquido e água) que ocupam o mesmo espaço no poro. Na zona vadosa a pressão capilar é negativa (menor que a atmosférica) e é referida como sucção ou tensão. A pressão capilar é maior em meios de granulometria fina (por exemplo, silte e argila) que em meios de granulometria mais grossa (por exemplo, pedregulho). A franja capilar acima do nível d'água é uma consequência da pressão capilar, e, como a pressão capilar é inversamente proporcional ao tamanho do poro, a altura da franja capilar é maior em meios de granulometria fina.

A distribuição e acumulação do produto livre em subsuperfície é influenciada pela pressão capilar. Até atingir a franja capilar, a resistência ao movimento descendente será aumentada e os derivados de hidrocarbonetos espalharão lateralmente e se acumularão acima da zona saturada.

Devido ao fato das forças capilares restringirem a migração do produto livre em meios saturados, camadas de granulometria fina podem agir como barreiras capilares, isto é, antes do produto livre penetrar na zona saturada, a pressão do derivado de hidrocarboneto deve exceder a resistência das forças capilares. Na zona saturada, do mesmo modo que na zona não saturada, os derivados de hidrocarbonetos tendem a espalharem-se lateralmente sobre barreiras capilares de granulometria fina e a moverem-se através de fraturas de meios de granulometria mais grossa, quando possível.

5.5.2.2. Etapas dos Hidrocarbonetos no Solo

Após vazarem e serem liberados no solo, os hidrocarbonetos resultam em três fases distintas que regulam o processo de migração do produto (GUIGUER, 2000), onde a partição entre as fases é determinada pela dissolução, volatilização e adsorção (EPA, 2003).

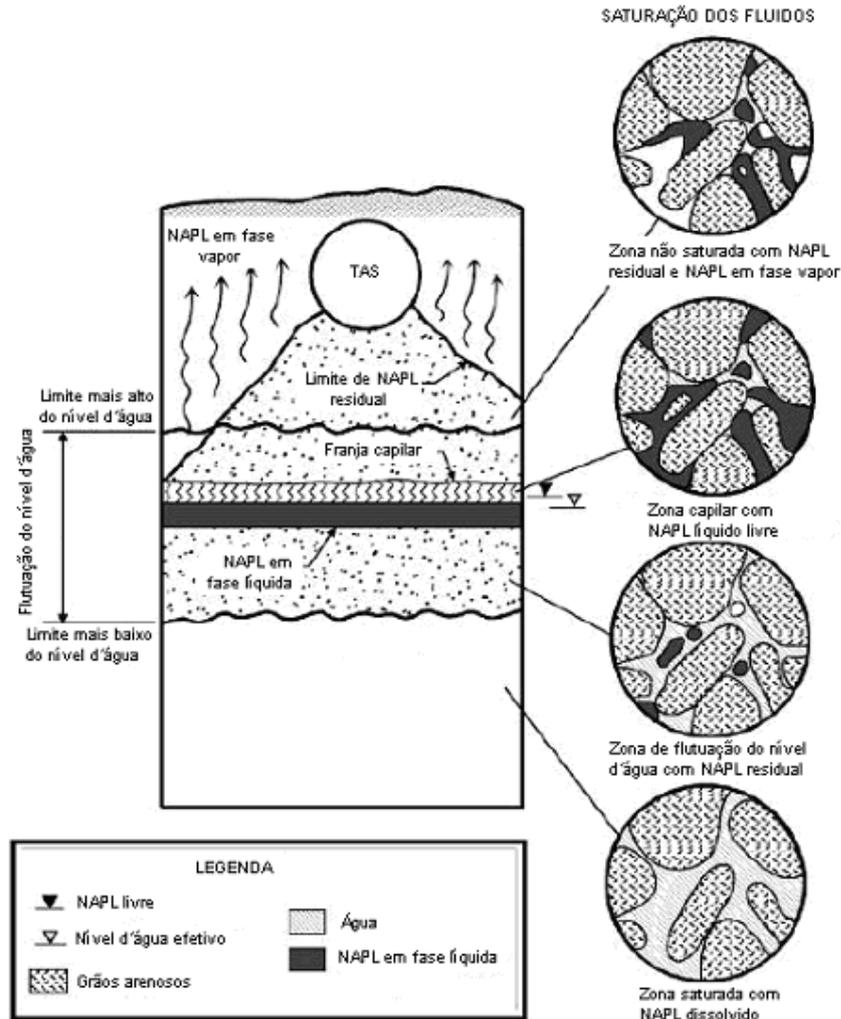


Figura V - 12: Distribuição vertical das fases dos hidrocarbonetos. Modificado de EPA, 2003.

- Hidrocarboneto em fase líquida (ou fase livre): os combustíveis líquidos (como o NAPL), quando atingem o solo, escoam descendentemente pela atuação da gravidade e forças capilares. Durante o processo de migração, ocorre um certo espalhamento horizontal do hidrocarboneto devido a forças capilares e a diferenças na condutividade hidráulica das camadas do solo. As forças capilares influenciam na quantidade de movimento dos hidrocarbonetos em fase líquida pelos espaços vazios do solo (GUIGUER, 2000). De acordo com Ferreira & Zuquette (1998), o NAPL na zona não saturada tende a cobrir os grãos como um filme ao redor dos poros. Este filme se desenvolve ocupando todos os espaços dos poros,

caso haja uma quantidade satisfatória de NAPL. Isto ocorre devido ao fato de que, entre os dois fluidos existentes na zona não saturada (ar e NAPL), o NAPL é o que apresenta maior atração aos sólidos do solo (maior molhabilidade).

Camadas com condutividade hidráulica baixa promovem um acúmulo de hidrocarbonetos em movimento descendente acima destas camadas e, desta forma, o hidrocarboneto irá migrar lateralmente, continuando o fluxo descendente (OLIVEIRA, 1992). Depois que a parte principal da fase líquida passar, parte ficará retida pelas forças capilares e será denominada fase líquida residual, a qual irá agir como fonte constante de contaminação ao longo do tempo, através da dissolução por infiltração, variação do nível d'água e volatilização. Ao atingir o nível d'água, o hidrocarboneto em fase líquida livre irá formar uma pluma de contaminação que irá flutuar, por ser um NAPL (EPA, 2003).

- Hidrocarbonetos em fase dissolvida: esta fase é o resultado do contato entre a água de subsuperfície e o hidrocarboneto em fase líquida, que pode ocorrer pela infiltração de água pela zona não saturada contendo hidrocarbonetos residuais, movimentação da água subterrânea, do contato com a pluma de contaminação de hidrocarbonetos livres, e o fluxo de água pode passar por hidrocarbonetos residuais não dissolvidos e que estão abaixo do nível d'água subterrâneo. As concentrações de hidrocarbonetos dissolvidos e as quantidades de transferência para o sistema de água subterrânea dependem da profundidade do nível d'água, da permeabilidade do solo, da recarga pluviométrica, da flutuação do nível d'água, da velocidade da água subterrânea, da temperatura da água e da concentração dos compostos dentro da fase de hidrocarboneto residual. A quantidade de hidrocarbonetos presentes na fase dissolvida depende da interação entre a água, fase dos hidrocarbonetos e os coeficientes de solubilidade de constituintes específicos numa mistura de combustível (GUIGUER, 2000).

- Hidrocarboneto em fase vapor: esta fase é resultante da volatilização dos hidrocarbonetos livres em fase líquida presentes na zona não saturada, da volatilização de hidrocarbonetos residuais em fase líquida ou, em menor escala, de hidrocarbonetos em fase dissolvida presentes na água do solo (GUIGUER, 2000). Os hidrocarbonetos em fase vapor podem se aderir ao solo ou ser adsorvido, sendo a água redutora desta capacidade de adsorção do solo. Logo, um solo seco poroso adsorve mais hidrocarbonetos em fase vapor que um solo úmido (YAMADA, 2004).

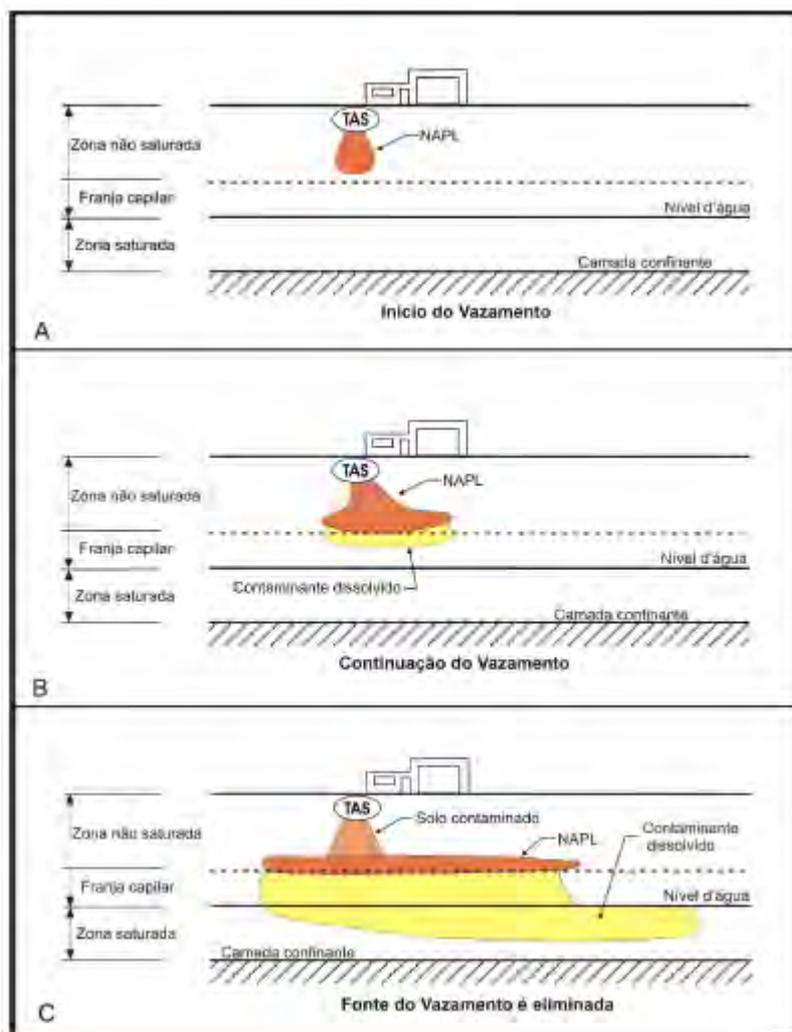


Figura V - 13: Progressão do hidrocarboneto vazado de um tanque de armazenamento subterrâneo (TAS). EPA, 2003 *apud* Yamada, 2004.

5.5.2.3. Transporte dos Hidrocarbonetos no Solo

→ Transporte do LNAPL (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998)

A quantidade de LNAPL liberada na zona não saturada ou saturada, modifica o movimento do mesmo. Por exemplo, um pequeno volume de LNAPL caminha pela zona não saturada até atingir o estado de saturação residual, em razão do grau de molhabilidade: água > LNAPL > ar. A água de infiltração dissolve os componentes solúveis presentes (como o benzeno, o tolueno e o xileno) e os transporta até a zona saturada. Essas substâncias dissolvidas formam uma pluma de contaminação que se distribui por advecção e dispersão. Algumas substâncias presentes no LNAPL tendem a ser voláteis; assim, o gás sofre partição, de modo que uma parte fica no solo e outra no ar. As substâncias voláteis movimentam-se pela zona não saturada até entrar na camada superficial do solo, onde dependendo das condições físico-químicas, retornam para a fase líquida. Esse processo de volatilização, transporte e liquefação facilita o transporte de contaminantes sobre áreas muito extensas.



Figura V - 14: LNAPL retido em estado de saturação residual na zona não saturada. Fonte: Newell et al. – EPA.

Quando o LNAPL é liberado em grandes quantidades, este move-se no sentido da franja capilar próximo à zona saturada. Os componentes solúveis deslocam-se adiante, ultrapassando os componentes menos solúveis. No topo da franja capilar, a água satura um grande volume de poros, portanto o material acumulado reduz a permeabilidade relativa do LNAPL. Como o LNAPL está impedido de mover-se para baixo, ele tende a se espalhar no sentido horizontal, ou seja, na mesma direção da água subterrânea (Figura V - 15). Pela sua baixa densidade, os LNAPLs flutuam próximos ao nível da água subsuperficial, na zona de capilaridade. Devido a esses mecanismos, a gasolina, o querosene e alguns outros óleos, por exemplo, são encontrados como produtos livres sobre o topo da franja capilar.

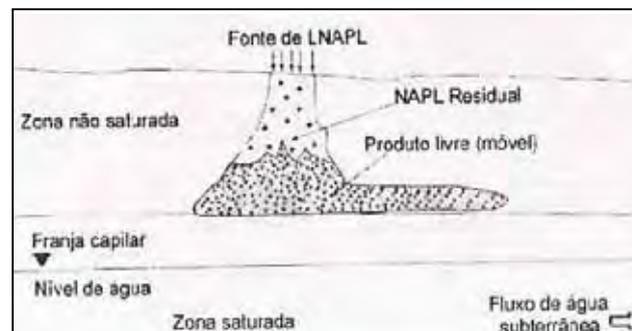


Figura V - 15: Transporte do LNAPL na zona não saturada e sobre a franja capilar. Fonte: EPA, 1991b.

Na presença de um grande derrame de LNAPL, existe um fornecimento contínuo do produto na zona não saturada, favorecendo uma condutividade hidráulica progressiva e contínua, e formando uma depressão de interface zona saturada/NAPL, onde os NAPLs se acumulam. Quando a fonte de fornecimento de LNAPL se esgota ou é removida, a contaminação presente na zona não saturada continua a migrar para maiores profundidades, estacionando quando a concentração de LNAPL atingir o nível de saturação residual e não puder mais avançar. Caso contrário, continua a percolar sobrecarregando a depressão localizada sobre o nível d'água subsuperficial (Figura V – 16a), gerando um espalhamento lateral sobre a franja capilar. Grande parte da frente de contaminação na interface LNAPL/zona saturada é reduzida devido à lixiviação do LNAPL existente nas partes superiores da zona não saturada, o que faz com que a zona saturada retroceda (Figura V –

16b). Como o LNAPL próximo à zona saturada apresenta-se no estado de saturação residual, o retrocesso da água subsuperficial consegue mover todo o LNAPL (relativamente imóvel devido à saturação residual). Uma pluma de contaminação pode surgir pelo fato de parte da água subterrânea que migra conseguir dissolver os materiais residuais. Um nível mais elevado de contaminação é criado ainda pela água de infiltração que também pode dissolver os materiais residuais.

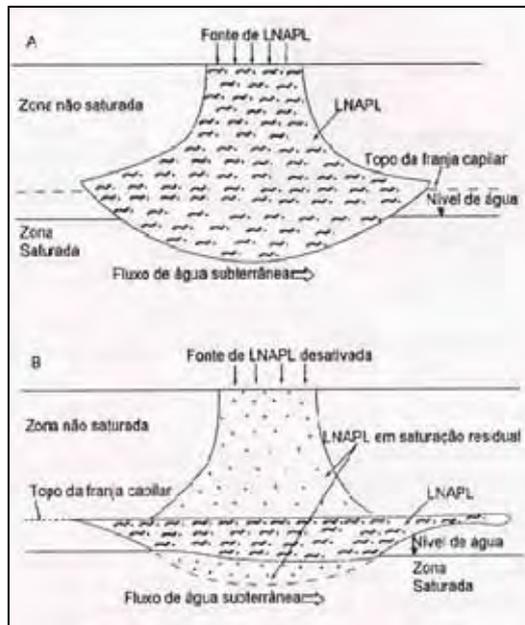


Figura V - 16: a) depressão do nível da água subterrânea resultando em grande frente de LNAPL. b) elevação do nível d'água após lixiviação do LNAPL. Fonte: EPA, 1991b.

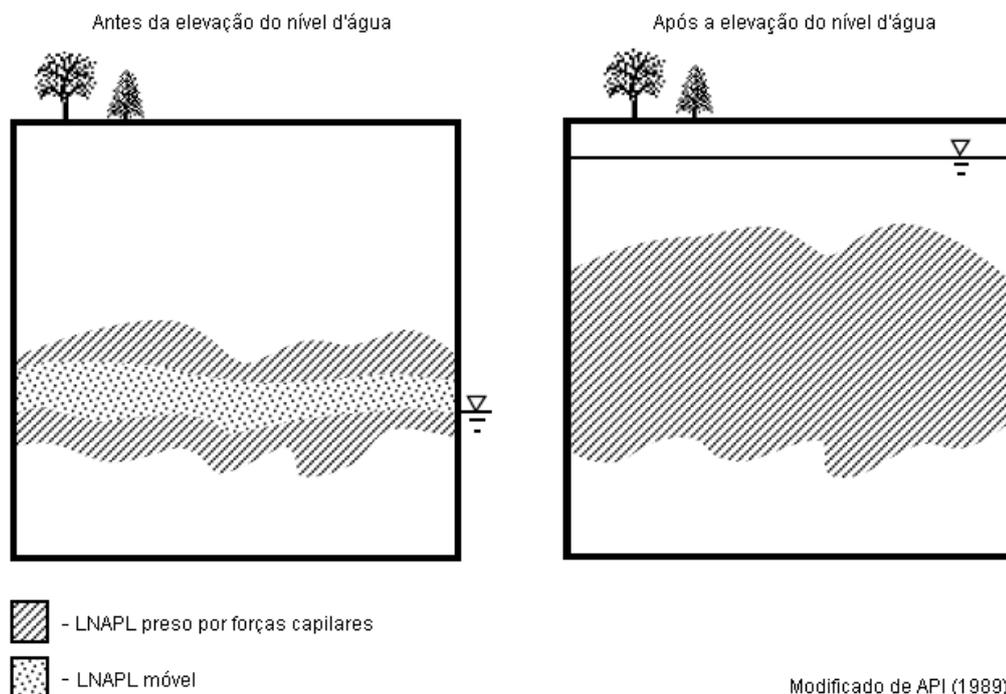


Figura V - 17: Efeito da elevação e diminuição do nível da água subterrânea sobre o LNAPL em um meio poroso. Fonte: Newell et. al - EPA.

→ Transporte do DNAPL (FERREIRA & ZUQUETTE, 1998)

Assim como o LNAPL, o comportamento do DNAPL varia de acordo com o volume derramado. O DNAPL é uma substância altamente mobilizada em subsuperfície, pois apresenta alta densidade, baixa viscosidade e solubilidade relativamente baixa (impossibilita a mistura com a água, proporcionando duas fases). A combinação da alta densidade e da baixa viscosidade faz com que o DNAPL percole até atingir a zona saturada associado ao deslocamento da água. Isso origina, fisicamente, forças instabilizantes e a ocorrência de uma franja viscosa como mostra a figura a seguir.

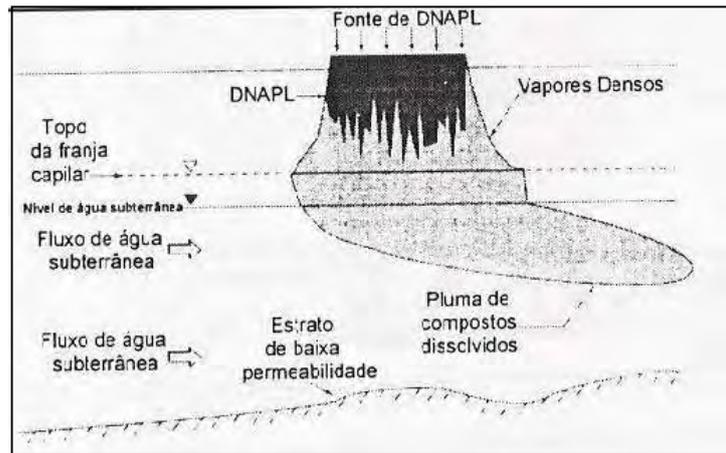


Figura V - 18: Franja de DNAPL na zona não saturada. Fonte: EPA, 1991a.

O volume de hidrocarboneto que migra em direção à zona saturada está diretamente relacionado com a saturação residual, podendo sofrer partição para a fase vapor denso que infiltrará até a zona de capilaridade, a partir da qual poderá migrar dissolvido em água por grandes extensões.

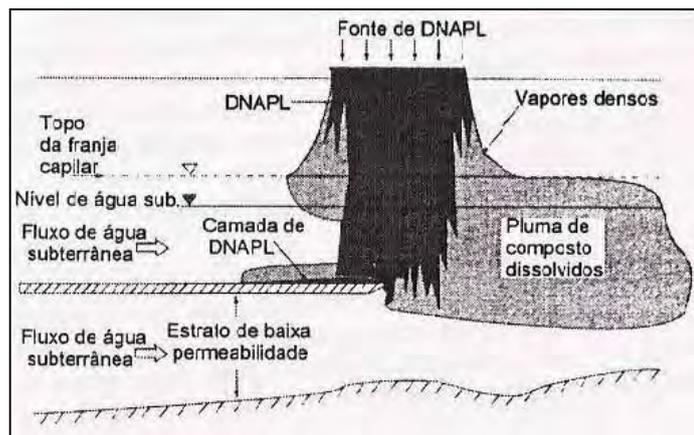


Figura V - 19: Partição do DNAPL na fase de vapores densos e de compostos dissolvidos. Fonte: EPA, 1991a.

Grandes volumes de DNAPL (muito superiores ao nível de saturação residual), migram passando pela franja capilar e atingem a zona saturada. Apesar das forças capilares impedirem a movimentação do DNAPL na zona de capilaridade, a frente de percolação acaba superando essas forças devido ao seu grande volume.

Depois de atingida a zona saturada, o DNAPL continua movendo-se até atingir a condição de saturação residual, constituindo um sistema trifásico – água, sólidos e DNAPL. Os componentes do DNAPL adsorvidos nos sólidos e a parte relativa à saturação residual constituem as fases sorbidas e sem movimento, enquanto que os componentes solúveis em água constituem a fase que migra, podendo originar uma frente de contaminação.

Camadas de baixa permeabilidade ou descontínuas, na forma de pacotes de granulometria fina, causam um acúmulo do DNAPL infiltrante no topo de tais camadas. O DNAPL migra horizontalmente sobre estas camadas até que sua saturação residual seja alcançada ou até que ele encontre uma descontinuidade geológica ou outros locais situados abaixo da camada impermeável, onde o DNAPL se acumula formando um grande reservatório. Caminhos preferenciais para o DNAPL também podem ser fornecidos pela presença de fraturas em materiais impermeáveis (como folhelhos, argilitos e rochas cristalinas) que ocorrem abaixo do nível de zona saturada ou como camadas impermeáveis confinantes.

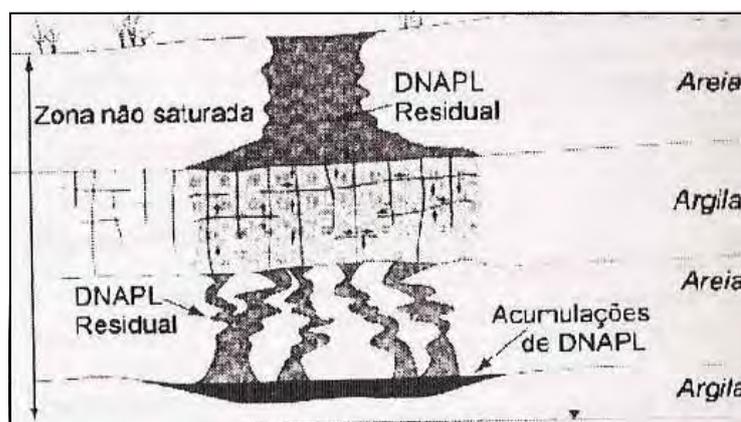


Figura V - 20: Transporte do DNAPL através de fraturas em material impermeável.
Fonte: Newell, C. J. & Ross, R. R. (EPA, 1993).

5.5.3. Remediação

Uma grande variedade de processos físico-químicos e biológicos tem sido utilizados na remoção de hidrocarbonetos de petróleo puros e dissolvidos na água subterrânea. Processos como extração de vapores do solo (SVE), recuperação de produto livre, bioventilação, extração com solventes, incineração, torres de aeração, adsorção em carvão ativado, biorreatores, biorremediação no local, entre outros, tem sido usados para remover contaminantes orgânicos de águas subterrâneas e sistemas de solo subsuperficial. Estes processos podem ser implementados para controlar o movimento de plumas, tratar águas subterrâneas, e/ou descontaminar solos (CORSEUIL & WEBER, 1994). No entanto, segundo Ferreira & Zuquette (1998), longos períodos de tempo e altos custos estão normalmente

associados com a grande maioria dos processos utilizados para remediação de áreas contaminadas. Por outro lado, a biorremediação no local (utilização de bactérias para transformar os contaminantes orgânicos em compostos de menor periculosidade, processo economicamente mais viável, é muitas vezes limitada por dificuldades no transporte de nutrientes ou receptores de elétrons e no controle das condições para aclimação e degradação dos contaminantes nos sistemas subsuperficiais (CORSEUIL & MARINS, 1997).

Mesmo que todos os problemas operacionais dos processos de remediação sejam resolvidos, vários anos são necessários para que os padrões de qualidade de água sejam atingidos. Nos Estados Unidos, país que já investiu bilhões de dólares na recuperação de solos e águas subterrâneas, está se chegando a conclusão que a grande maioria dos locais contaminados não foi remediada a níveis de padrões de potabilidade, e os benefícios esperados não estão correspondendo às expectativas da população (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1993 *apud* CORSEUIL & MARINS, 1997). No entanto, a biorremediação continua sendo a arma mais usada e pesquisada para a descontaminação de aquíferos contendo compostos tóxicos.

É importante lembrar que a aplicação de medidas corretivas para descontaminação das águas subterrâneas requer estudos em escala de detalhe: de caracterização geológica das zonas subterrâneas da água; de entendimento dos processos de migração dos poluentes e de caracterização do tipo e volume do poluente (MEAULO, 2004).

→ Remediação natural

A remediação natural é uma estratégia de gerenciamento que baseia-se em mecanismos naturais de atenuação para remediar contaminantes dissolvidos na água. A atenuação natural refere-se aos processos físicos, químicos e biológicos que facilitam a remediação natural (WIEDMEIER ET AL., 1996 *apud* CORSEUIL & MARINS, 1997).

Após a contaminação do lençol freático, a pluma irá se deslocar e será atenuada por diluição, dispersão, adsorção, volatilização e biodegradação (CORSEUIL et al., 1996), sendo este último o principal mecanismo de atenuação natural e baseia-se na ação dos microrganismos converterem os contaminantes a compostos menos tóxicos (CORSEUIL & FERNANDES, 1999).

A biodegradação dos compostos BTEX pode ser representada por uma reação química onde os hidrocarbonetos, em presença de um aceptor de elétrons, nutrientes e microrganismos são transformados em água, dióxido de carbono, e mais microrganismos. Os aceptores de elétrons, compostos que recebem elétrons e são portanto reduzidos, são principalmente o oxigênio, nitrato, ferro férrico e sulfato (CORSEUIL et al., 1996).

Dados de campo de vários pesquisadores (BARKER, ET AL., 1987, CHIANG ET AL., 1989; CHAPELLE, 1994; DAVIS & KLIER 1994; WIEDEMEIER, ET AL. 1995) tem comprovado que a atenuação natural limita bastante o deslocamento dos contaminantes e portanto reduz a extensão da contaminação ao meio ambiente. A remediação natural não é uma alternativa de "nenhuma ação de tratamento", mas uma forma de minimizar os riscos para a saúde humana e para o meio ambiente, onde monitora-se o deslocamento da pluma e assegura-se que os pontos receptores (poços de abastecimento de água, rios, lagos, etc) não serão contaminados (CORSEUIL & MARINS, 1997).

Dependendo das condições hidrogeológicas do local contaminado, a taxa da reação de biodegradação será mais rápida ou mais lenta. Uma vez que a biodegradação é o principal mecanismo de transformação dos hidrocarbonetos de petróleo, a determinação da taxa de transformação é de grande importância para se prever até onde a pluma irá se deslocar. Quando a taxa de biodegradação for igual ou maior que a taxa de deslocamento dos contaminantes, a pluma deixará de se deslocar e diminuirá de tamanho (Figura VI – 23). Neste caso, se a fonte receptora não fosse atingida, não haveria a necessidade de implantação de tecnologias ativas de remediação, como as citadas acima, e a remediação natural seria a opção mais econômica de recuperação da área contaminada (CORSEUIL & MARINS, 1997).

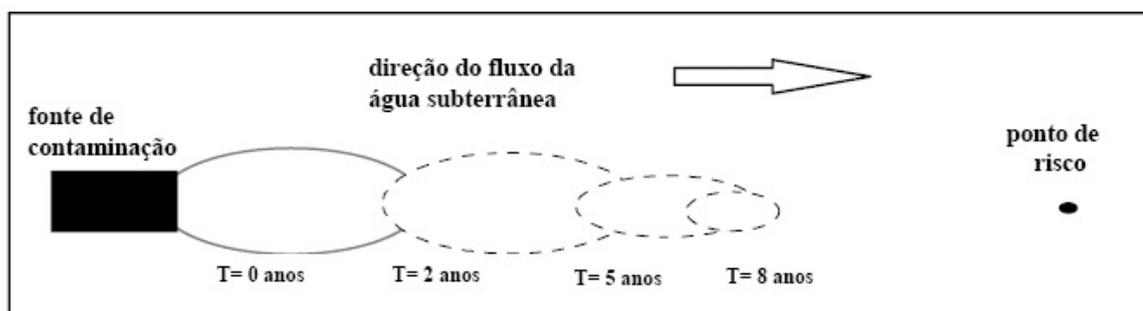


Figura V - 21: Atenuação natural de uma pluma de hidrocarbonetos. Fonte: CORSEUIL & MARINS (1997).

Ainda de acordo com Corseuil & Marins (op. cit.), para que se possa demonstrar que a remediação natural é uma forma adequada de descontaminação de hidrocarbonetos de petróleo é necessário que se faça uma completa caracterização hidrogeológica da área degradada, se determine a magnitude e extensão da contaminação e se demonstre que a pluma não irá migrar para regiões de risco potencial. Para tal, é necessário que se determine as taxas de migração e de redução de tamanho da pluma através de estudos de campo e de laboratório. No entanto, se o processo natural de atenuação não evitar o deslocamento da pluma até locais de risco, tecnologias que acelerem a transformação dos contaminantes deverão ser implementadas.

→ **Escavação** (NEWELL, et. al – EPA)

As alternativas de remediação para um local contaminado com LNAPL dependem do volume liberado do produto. Se o volume é pequeno o suficiente para ser retido na porção superior da zona vadosa, a escavação pode ser uma alternativa satisfatória. Algumas vantagens da escavação são:

- o custo de escavações em pequena profundidade normalmente são baixos se comparados com outras tecnologias de remediação;
- o tempo para a remediação do local é relativamente curto;
- profissionais experientes estão mais disponíveis prontamente; e
- uma grande quantidade de contaminantes pode ser remediada com um alto grau de confiabilidade .

Porém, algumas desvantagens incluem:

- a contaminação não pode ser completamente removida devido à incapacidade de delimitar a distribuição do LNAPL detalhadamente;
- estruturas, estradas ou construções podem restringir a área disponível para a escavação;
- emissões atmosféricas dos constituintes voláteis podem ser significantes;
- o custo de uma escavação profunda, se necessário, pode ser alto.

→ **Recuperação do Produto Livre por Trincheiras, Drenos e Poços** (NEWELL, et. al - EPA)

Sob condições ideais, esses sistemas de recuperação podem remover menos de 50% do volume total de LNAPL em subsuperfície, porém, estima-se que somente 20 a 30% do volume total liberado do produto é recuperado. O LNAPL remanescente pode continuar contaminando a água subterrânea. Entretanto, além da recuperação do produto, pode haver alguns benefícios importantes nesse tipo de recuperação:

- redução da mobilidade. LNAPL residual preso por forças capilares é relativamente imóvel sob condições hidrogeológicas normais. A recuperação do produto móvel diminuirá a migração do produto;
- aumento da transformação do LNAPL. A redução da saturação do LNAPL pode aumentar a área da superfície do LNAPL e pode resultar em mais rápidas dissolução, degradação e volatilização do produto.

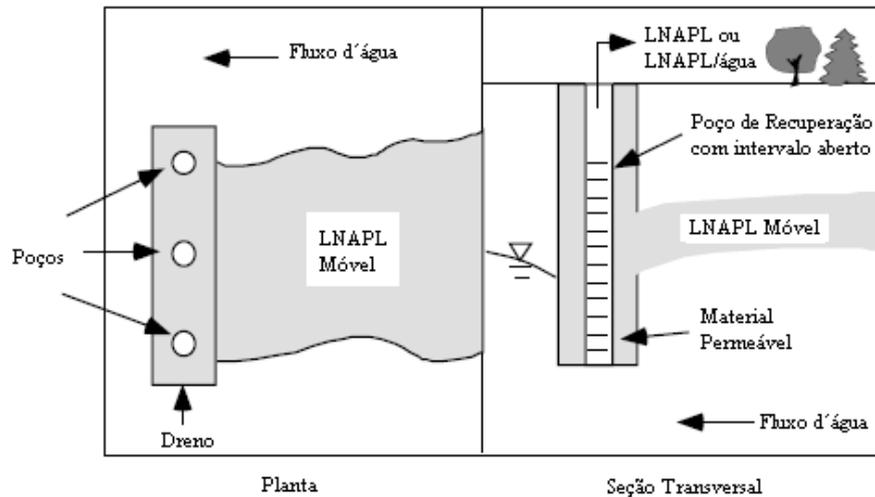


Figura V - 22: Vistas em planta e seção transversal de um dreno desenvolvido para a recuperação de LNAPL móvel.

→ Extração de Vapores do Solo (SVE) (NEWELL, et. al - EPA)

É uma tecnologia desenvolvida com aplicações para a remoção dos contaminantes voláteis da zona vadosa. Em sistemas mais simples, o ar é extraído de toda a área afetada, pela aplicação de vácuo, por poços de extração de vapor (figura V – 25), levando compostos orgânicos voláteis para a corrente de ar. O ar contendo vapores com compostos orgânicos é tratado posteriormente, se necessário, e liberado para a atmosfera. Sistemas mais complexos podem utilizar-se de trincheiras, poços de injeção de ar e selos de superfície para direcionar o fluxo de ar para a zona de remediação desejada. Em geral, SVE pode se enquadrar melhor para a remoção de compostos com pressão de vapor maior que, aproximadamente, 14 mm Hg a 20°C.

Para permitir um adequado movimento do vapor, a subsuperfície deve ser permeável. Velocidades do fluxo do vapor dependem do vácuo de extração dos poços de SVE e das propriedades da zona não saturada (por exemplo, umidade do solo, textura do solo, macroporos e distribuição do LNAPL).

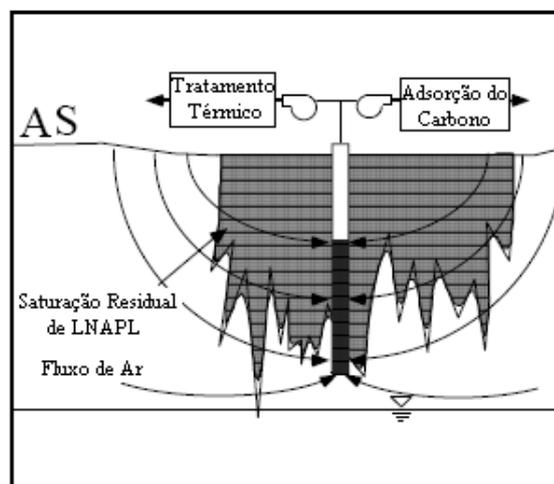


Figura V - 23: Projeto de um sistema de extração de vapores do solo com tratamento do vapor antes do lançamento na atmosfera.

→ **Air Sparging** (NEWELL, et. al - EPA)

Air sparging é uma tecnologia relativamente nova e que está sendo implementada para remover contaminantes voláteis abaixo do nível d'água em aquíferos não confinados, onde o ar é injetado de um poço colocado na zona saturada (Figura V – 26). Sistemas como esse apresentam dois principais objetivos:

- retirar hidrocarbonetos voláteis da fase aquosa e de qualquer NAPL presente no caminho do fluxo de ar; e
- adicionar oxigênio à água para incentivar a biodegradação de constituintes tratáveis.

Os constituintes devem ser voláteis para serem removidos e transportados para a superfície. Além disso, os compostos devem ser biodegradáveis para que a biodegradação tenha sucesso. Depois do ar ter subido para a zona não saturada, um sistema de extração de vapor do solo (SVE) pode ser usado para remover os vapores, para tratamento posterior e liberação para a atmosfera.

Uma limitação do *air sparging* é a sua vulnerabilidade a caminhos preferenciais e heterogeneidades. Um curto circuito combinado com caminhos naturais e artificiais (camadas de condutividade hidráulica alta, janelas estratigráficas, entre outros) reduzem a eficácia total da injeção de ar. Além disso, a injeção de ar abaixo de uma unidade estratigráfica impermeável pode direcionar o ar horizontalmente, espalhando a contaminação.

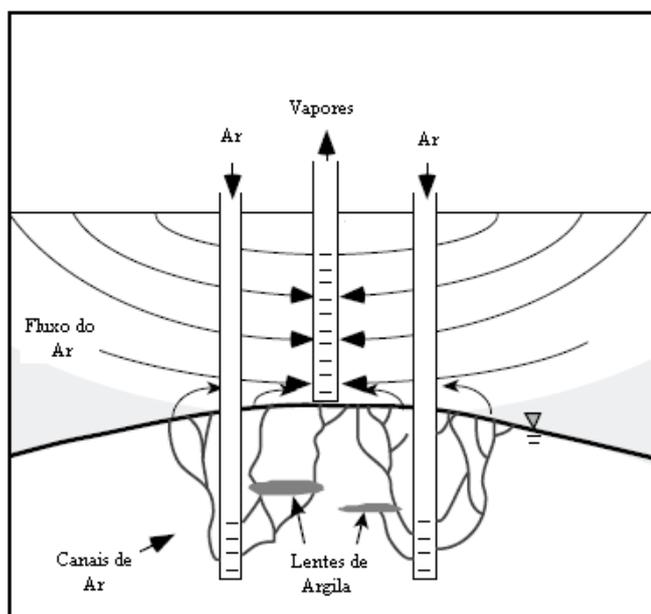


Figura V - 24: Projeto de um sistema de *air sparging*.

→ **Bombeamento e Tratamento da Água Subterrânea** (NEWELL, et. al - EPA)

Esses sistemas foram, primeiramente, desenvolvidos para recuperar contaminantes de fase aquosa e consistem na extração da água subterrânea para posterior tratamento em

superfície. Além da possível necessidade da retirada de dezenas ou centenas de volumes da água subterrânea para diminuir significativamente as concentrações dos contaminantes em alguns locais, muitos dos componentes solúveis do LNAPL podem continuar dissolvidos na água subterrânea resultando na contaminação da mesma, necessitando de outros procedimentos para a contenção desta contaminação.

Este tipo de tratamento pode ser mais útil para estabelecer o controle hidrodinâmico para prevenir a migração do contaminante e também para a remediação da contaminação em fase aquosa onde a fonte do contaminante foi removida ou isolada. Porém, muitos fatores, como por exemplo as heterogeneidades da subsuperfície, podem limitar a eficiência da remoção do contaminante.

→ **Barreiras Físicas** (NEWELL, et. al - EPA)

As barreiras de tratamento permeáveis são empregadas para o controle passivo da migração do contaminante em fase aquosa e utilizam-se de materiais reativos ou substâncias que criam uma zona reativa localizados de forma a criar uma parede (figura V – 27). Os materiais reativos removem ou transformam os contaminantes dissolvidos na água subterrânea que passam pela parede. As barreiras de baixa permeabilidade podem ser incorporadas de modo que a água subterrânea é canalizada para a parede permeável. Por exemplo, uma parede de tratamento biológico pode lentamente permitir a dissolução do oxigênio e de nutrientes na água subterrânea incentivando a biodegradação no local.

As barreiras de baixa permeabilidade (por exemplo, cortinas de argamassa, paredes de argila, vigas de aço) podem ser utilizadas na contenção da água subterrânea e/ou do LNAPL móvel durante a remediação. Porém, existem algumas preocupações quanto à dificuldade de fixar a barreira e aos problemas de compatibilidade dos materiais.

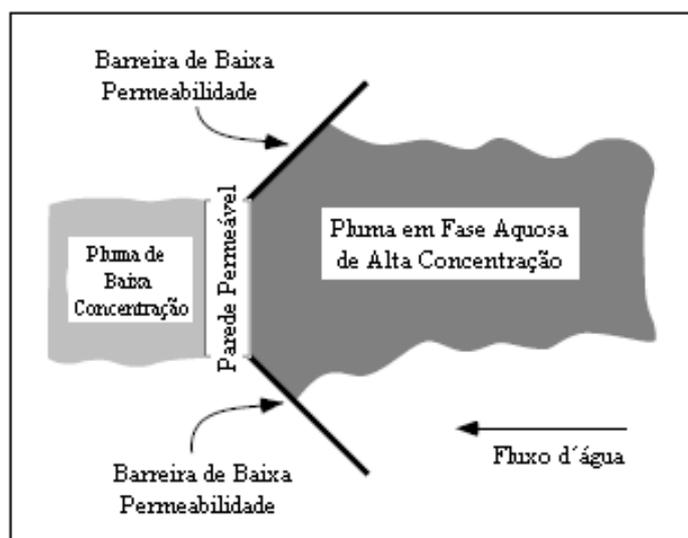


Figura V - 25: Esquema de uma parede de tratamento permeável e barreiras de baixa permeabilidade usadas para canalizar o fluxo da água subterrânea.

→ **Tratamento em Série** (*Treatment train*) (NEWELL, et. al - EPA)

Em alguns casos, a remediação da água subterrânea pode necessitar-se de várias técnicas para uma grande remoção do contaminante. Um exemplo deste tratamento que pode ser eficiente num local contaminado com LNAPL é a utilização de uma tecnologia de bombeamento para remoção do LNAPL móvel, seguida de extração de vapor do solo para remoção do LNAPL residual e uma possível combinação com extração da água subterrânea para abaixar o nível d'água para uma maior remoção do contaminante.

Este método reconhece os pontos fortes e os fracos de várias estratégias de remediação e combina tecnologias promissoras para superar as suas limitações. Para um bom resultado deste método, deve-se fazer um bom estudo das características hidrogeológicas e geoquímicas do local, bem como da migração e distribuição do LNAPL e das tecnologias aplicáveis.

5.5.4. Efeitos do Etanol Presente na Gasolina Brasileira

Segundo Corseuil & Fernandes (1999), é adicionado à gasolina brasileira uma proporção de 20 a 24% de etanol. O etanol é utilizado para aumentar a octanagem da gasolina, diminuindo assim a quantidade de monóxido e dióxido de carbono liberada na atmosfera. No entanto, o etanol pode aumentar a massa dos hidrocarbonetos na água subterrânea devido ao efeito de cossolvência e pode também ser o substrato preferencial para os microrganismos do aquífero dificultando a ação de transformação dos contaminantes BTEX que são mais tóxicos.

Sendo assim, as interações entre o etanol e os compostos BTEX podem causar um comportamento completamente diferente no deslocamento da pluma do que aquele observado em países que utilizam gasolina pura (CORSEUIL & MARINS, 1997).

Os aspectos principais que podem afetar o comportamento dos hidrocarbonetos monoaromáticos (compostos BTEX) em subsuperfície na presença de etanol são as possibilidades (FERNANDES & CORSEUIL, 1996; SANTOS ET AL., 1996):

- do aumento da solubilidade dos BTEX em água;
- do aumento da mobilidade dos BTEX dissolvidos na água subterrânea;
- de que a presença do etanol possa dificultar a biodegradação natural dos BTEX aumentando a persistência destes compostos na água subterrânea.

Como o etanol é completamente solúvel em água, a sua concentração deverá ser maior que a dos compostos BTEX em águas subterrâneas contaminadas com misturas de etanol e gasolina. Como compostos altamente solúveis têm um menor potencial de absorção, o etanol

terá uma mobilidade maior que a dos compostos BTEX na água subterrânea. O etanol pode também ser biodegradado em preferência aos BTEX e consumir todo o oxigênio necessário para a degradação dos hidrocarbonetos monoaromáticos. Além disso, o etanol pode ser tóxico ou inibitório para os microorganismos degradadores de BTEX (CORSEUIL & MARINS, 1997).

De acordo com o que foi descrito acima, pode-se concluir que a contaminação de aquíferos por misturas de álcool e gasolina será mais complicada do que a produzida somente pela gasolina pura. Países em desenvolvimento como o Brasil geralmente tem como base as tecnologias de remediação ambiental largamente utilizadas na Europa e EUA. A extrapolação desta experiência para a remediação de locais contaminados por vazamentos de gasolina no Brasil deve levar em consideração a especificidade da nossa gasolina (CORSEUIL & MARINS, 1997).

Tabela V - 6: Fração de BTEX e etanol degradado pelos receptores de elétrons utilizados.
a) as reações de oxido-redução dos compostos BTEX foram feitas somente para o benzeno. b) a média de todos os compostos BTEX é baseada na estequiometria dos elementos individuais.

| Processos de biodegradação | Estequiometria das reações de oxidação-redução a/ | Massa de BTEX degradado por unidade de massa de receptores elétrons utilizados ou subproduto produzido (mol.g) b/ | Massa de Etanol degradado por unidade de massa de receptores elétrons utilizados ou subproduto produzido (mol.g) |
|----------------------------|--|---|--|
| Respiração aeróbica | $7,5O_2 + C_6H_6 = 6CO_2 + 3H_2O$ | 0,32 | 0,48 |
| Desnitrificação | $6NO_3 + 6H_+ + C_6H_6 = 6CO_2 + 6H_2O + 3N_2$ | 0,21 | 0,31 |
| Redução de ferro III | $6OH + 30Fe(OH)_3 + C_6H_6 = 6CO_2 + 30Fe^{2+} + 78H_2O$ | 0,05 | 0,07 |
| Redução de Sulfato | $7,5H_+ + 3,75SO_4^{2-} + C_6H_6 = 6CO_2 + 3,75H_2S + 3H_2O$ | 0,21 | 0,32 |
| Metanogênese | $4,5H_2O + C_6H_6 = 2,25CO_2 + 3,75CH_4$ | 1,28 | 1,92 |

Fonte: Kampbell, 1995 *apud* Corseuil & Fernandes, 1999.

Um estudo feito na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), mostrou que a presença do etanol, em aquíferos contaminados com derramamento simultâneo de diesel com etanol, além de produzir uma variação nas propriedades físico-químicas do aquífero, requerem uma maior demanda de aceptores de elétrons, para os processo de biodegradação. A biodegradação do etanol consome rapidamente todos os aceptores de elétrons e nutrientes disponíveis, produzindo um aumento nas concentrações de acetato e metano, conseqüentemente uma diminuição na alcalinidade e pH do meio. Estas variações inibem o processo de atenuação natural dos hidrocarbonetos presentes. Sendo assim, somente após a

degradação do etanol, e de seus produtos metabólicos, acetato e metano, é que se iniciará o processo de degradação dos hidrocarbonetos aromáticos mais tóxicos, fazendo com que estes permaneçam mais tempo no aquífero, aumentando a possibilidade dos contaminantes atingirem águas utilizadas como fonte de abastecimento (KULKAMP et al., 2003).

Um outro experimento feito também na Universidade Federal de Santa Catarina comprovou que o aquífero contaminado com a gasolina a 24% de etanol, tende a degradar primeiramente o etanol e, em seguida, os compostos BTEX (CORSEUIL & FERNANDES, 1999).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

→ Mapa da profundidade do nível d'água (ANEXO III):

Pela análise deste mapa nota-se que a maioria dos postos de combustíveis encontram-se sobre áreas em que a água subterrânea está pouco profunda (até 10 metros) e, conforme diminui essa profundidade, aumenta o risco de contaminação no caso de um vazamento.

→ Mapa da Condutividade Hidráulica (ANEXO IV):

As áreas que representam menor risco de contaminação seriam aquelas em que a condutividade hidráulica fosse menor que 10^{-4} cm/s, porém somente dois postos de combustíveis encontram-se nessas áreas. Os outros postos localizam-se sobre áreas em que a condutividade hidráulica varia de 10^{-4} a 10^{-2} cm/s, apresentando médio risco de contaminação.

→ Mapa das Áreas de Risco (ANEXO V):

Neste mapa foram considerados três fatores que determinam o risco de contaminação das águas subterrâneas de uma certa área, quais são:

- profundidade do nível d'água entre 1 e 10 metros;
- condutividade hidráulica entre 0,1 e 0,001 cm/s, e
- densidade de postos de combustíveis a partir de 3 postos/km².

Essas três informações foram sobrepostas, dando origem a um mapa de risco de contaminação das águas subterrâneas por resíduos de postos de combustíveis, sendo que as áreas mais críticas encontradas no município de Rio Claro são:

- à centro-oeste, próxima às coordenadas 234; 7522 km, e
- à sudeste, próxima às coordenadas 236; 7520 km e 236; 7518 km.

As outras áreas onde se encontram postos de combustíveis em densidade menor que 3 postos/km², não deixam de apresentar um certo risco, porém, se o posto for instalado e monitorado corretamente, ele apresenta um risco menor de contaminação da água subterrânea.

7. CONCLUSÃO

A poluição das águas subterrâneas é um tema de extrema importância devido à escassez de água doce superficial. Portanto, torna-se necessário estudos que subsidiem o planejamento e instalação de fontes potencialmente contaminadoras, minimizando, assim, impactos ambientais.

O enfoque deste trabalho foi na contaminação das águas subterrâneas por postos de combustíveis, sendo assim, a revisão bibliográfica teve como objetivo contextualizar a problemática.

A contaminação das águas subterrâneas por postos de combustíveis é um assunto atual devido ao fato de que somente a partir de 1970 teve um grande aumento no número de postos no Brasil, sendo assim, as contaminações referentes a essas fontes começaram a ser estudadas recentemente.

Os tanques de armazenamento de combustíveis dos postos podem originar plumas de contaminação que são de difícil recuperação e esse processo tem um custo muito alto. Outra preocupação com relação a esse assunto é a alta toxicidade dos hidrocarbonetos aromáticos presentes, que podem afetar a qualidade das águas de abastecimento do município.

Alguns processos de descontaminação e remediação do solo e da água subterrânea foram apresentados neste trabalho, porém cada situação exige um estudo mais aprofundado sobre qual seria o método mais adequado para a descontaminação.

Baseado na análise dos mapas produzidos no decorrer do trabalho, pode-se concluir que Rio Claro apresenta na maior parte de seu território nível d'água pouco profundo, predominando as profundidades de até 10 metros. As áreas que possuem maior profundidade do nível d'água localizam-se na porção central, na porção nordeste, na porção sul e sudoeste, sendo estas, áreas com menor suscetibilidade de contaminação das águas subterrâneas.

Com relação à condutividade hidráulica, a maior parte do município está sobre áreas com valores entre 10^{-4} e 10^{-2} , constituídas por areias bem distribuídas, areias finas e areias siltsas, tendo essas áreas médio risco de contaminação. Uma pequena porção leste e sudoeste

apresentam valores mais baixos, menores que 10^{-4} – areias argilosas e argilas – que conferem à área pequeno risco de contaminação. Uma pequena parte à sudoeste possui condutividade hidráulica maior que 10^{-2} – cascalhos e areias bem distribuídas – sendo esta uma área de grande risco.

O mapa das áreas de risco (ANEXO V) mostra que as áreas com maior potencialidade de contaminação, considerando os postos já instalados no município, estão localizadas na porção centro-oeste e sudeste do município. Este mapa pode servir como subsídio para a elaboração de normas municipais que disciplinem o uso e ocupação do solo no município de Rio Claro.

BIBLIOGRAFIA

- BRAGA, A. C. O. **Hidrologia Subterrânea**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2005. 31 slides: color. Slides gerados a partir do software PowerPoint.
- CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2^a ed. São Paulo: CETESB, 2001. 389 p.
- CORSEUIL, H. X., AIRES, J.R., ALVAREZ, P.J.J. **Implications of the Presence of Ethanol on Intrinsic Bioremediation of BTEX Plumes in Brazil**. *Haz. Was. Haz. Mat.*, v.13, n.2, p. 213-221, 1996.
- CORSEUIL, H.X., FERNANDES, M. **Co-solvency Effect in Aquifers Contaminated with Ethanol Amended Gasoline**. In: Natural Attenuation of Chlorinated Petroleum Hydrocarbons, and other Organic Compounds, 3., 1999, Battelle. Conference proceedings from the fifth International In Situ and On-site Bioremediation Symposium. San Diego: Battelle Press, p. 135-140.
- CORSEUIL, H. X. & MARINS, M. D. M. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamentos de Gasolina: O Problema é Grave?** *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.2, n.2, p. 50-54, 1997
- CORSEUIL, H.X., WEBER, W.J., JR. **Potential Biomass Limitations on Rates of Degradation of Monoaromatic Hydrocarbons by Indigenous Microbes in Subsurface Soils**, *Wat. Res.*, v.28, p.1407-1414, 1994.
- COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro – SP**. Tese de doutorado – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo, v. 2, 171p., 1983.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Behavior of Hydrocarbons in the Subsurface**. Cap. III. 2003. Disponível em: <www.epa.gov/oust/pubs/fpr_c3.pdf> Acesso em: 19.out.2006.

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Groundwater Issue**. Report n. EPA/540/4-91/002. 1991a, 21p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Handbook of Groundwater**. v. II: Methodology. Report n. EPA/625/6-90/016b. 1991b, 141p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Disponível em: http://www.epa.gov/extrmurl/learn2model/part-one/phases/twophase01_phases.htm. Acesso em: 27/02/2007.
- FEITOSA, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. (Coord.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412 p: il.
- FERNANDES, M., CORSEUIL, H.X. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derrramento de Gasolina: Efeito Cossolvência**. In: 3º Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA), Gramado, 1996.
- FERREIRA, J. & ZUQUETTE, L. V. **Considerações Sobre as Interações entre Contaminantes Constituídos de Hidrocarbonetos e os Componentes do Meio Físico**. Revista Geociências, Universidade Estadual Paulista - UNESP, São Paulo, V. 17 (2), p. 527 – 557, 1998.
- FINOTTI, A. R.; CAICEDO, N. O. L. & RODRIGUEZ, M. T. R. **Contaminações Subterrâneas com Combustíveis Derivados de Petróleo: Toxicidade e a Legislação Brasileira**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. 6, n. 2, p. 29-46, jun.2001.
- GUEDES, A, Jr.; ORTH, D. M.; NASCIMENTO, G.; SANTOS, C. **Uso da Água Subterrânea como Fonte de Abastecimento da Praia Brava, Florianópolis, Análise Ambiental e Riscos de Contaminação**. Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI. Lima, APIS, 1998, p.1-9 Ilus., tab. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98); Lima, 1-5 nov. 1998. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/peru/bracca214.pdf>. Acesso em: 22/02/2007.

→ GUIGUER, N. **Poluição das Águas Subterrâneas e do Solo Causada por Vazamentos em Postos de Abastecimento**. Ontario: Waterloo Hydrogeologic Inc., 2000. 356 p.

→ IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2000**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>> Acesso em: 28.out.2006.

→ INSTITUTO Agrônomo (SP): **Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo – Quadrícula de São Carlos**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1981.

→ KULKAMP, M. S.; KAIPPER, B. I. A.; CORSEUIL, H. X. **Influência do Etanol na Atenuação Natural de Hidrocarbonetos de Petróleo em um Aquífero Contaminado com uma Mistura de Diesel e Etanol**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Saneamento Ambiental : Ética e Responsabilidade Social. Joinville, ABES, set. 2003, p.1-7 Ilus. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental No. 22; V Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental; Joinville, 14-19 set. 2003. CEPIS. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/dx.pdf>. Acesso em: 22/02/2007.

→ MEAULO, F. J. **Vulnerabilidade Natural à Poluição dos Recursos Hídricos Subterrâneo da Área de Araraquara (SP)**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2004.

→ MIOTTO, S. L. **Aspectos Geológico-Geotécnicos da Determinação da Adequabilidade de Áreas para Implantação de Cemitérios**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Geociências – Área de Concentração: Análise Ambiental. Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – UNESP – Rio Claro, 1990.

→ NEWELL, C. J.; ACREE, S. D.; ROSS, R. R. & HULING, S. G. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Ground Water Issue – Light Nonaqueous Phase Liquids**. EPA/540/S-95/500. Disponível em: <http://www.epa.gov/ada/download/issue/lnapl.pdf>. Acesso em: 27/02/2007.

→ NEWELL, C. J. & ROSS, R. R. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Evaluation of the Likelihood of DNAPL Presence at NPL Sites – National Results**. 1993,

114 f. Disponível em: <http://www.epa.gov/superfund/resources/remedy/pdf/540r-93073-s.pdf>. Acesso em: 27/02/2007.

→ O AQUIFERO – Ciclo Hidrológico. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/aquifero/def_aquifero.htm. Acesso em 22 fev. 2007.

→ O CICLO Hidrológico. Disponível em: www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm. Acesso em: 15 jul. 2007.

→ OLIVA, A. **Estudo Hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro – SP.** 2002. 71 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Rio Claro – SP.

→ OLIVA, A. **Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro – SP.** 2006. 196 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Rio Claro – SP.

→ OLIVEIRA, E. **Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos Provenientes de Vazamentos de Tanques de Armazenamento Subterrâneo.** 1992. 112 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação: Recursos Minerais e Hidrogeologia – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo.

→ PACHECCO, A. **Cemitérios** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <apacheco@usp.br> em 20/04/2007.

→ POMPÉIA, S. L. **Procedimentos Técnicos para Recuperação de Áreas Degradadas por Poluição.** CETESB – Divisão de Tecnologia de Recuperação Ambiental – São Paulo – [20--?].

→ Prefeitura Municipal de Rio Claro. <http://www.rioclaro.sp.gov.br/>. Acesso em: 22/03/2007.

→ RIO CLARO, Prefeitura Municipal de. Departamento de Sistematização e Análise da Informação Municipal. Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente. **Postos de Combustíveis e Serviços de Veículos Automotivos (Localização) – Município de Rio Claro – SP.** Rio Claro, 2005. 1 mapa, color., 90 cm x 120 cm. Escala 1:10.000. Acompanha uma legenda expandida.

→ SÃO PAULO (Estado). Instituto Geológico (IG); Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e Secretaria do Estado do Meio Ambiente. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo.** 1997.

→ SANTOS, R.F., MONTENEGRO, M.A.P, LUZ, L.B., CORSEUIL, H.X. **Influência do Etanol da Biodegradação do Benzeno em Aquíferos Contaminados com Derramamentos de Gasolina.** In: 3º Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA), Gramado, 1996.

→ ZAINÉ, J. E. **Mapeamento Geológico-Geotécnico por Meio do Método do Detalhamento Progressivo: Ensaio de Aplicação na Área Urbana do Município de Rio Claro (SP).** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – Universidade Estadual Paulista – Rio Claro – SP – 2000.

→ YAMADA, D.T. **Caracterização Geológico-Geotécnica Aplicada à Instalação de Postos de Combustíveis em Rio Claro – SP.** Curso de Pós Graduação em Geociências – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – Universidade Estadual Paulista – Rio Claro – SP – 2004.

ANEXO I:
DEFINIÇÕES

→ Poluição: É definida através da Lei Federal nº 6938/81:

Art 3º: III - “Degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;

c) afetem desfavoravelmente a biota;

d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;

e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”.

→ Contaminação: Introdução no meio ambiente de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos, em concentrações que possam afetar a saúde humana. É um caso particular de poluição.

→ Pluma de contaminação: Delimitação da extensão da contaminação de um meio (água, ar e solo).

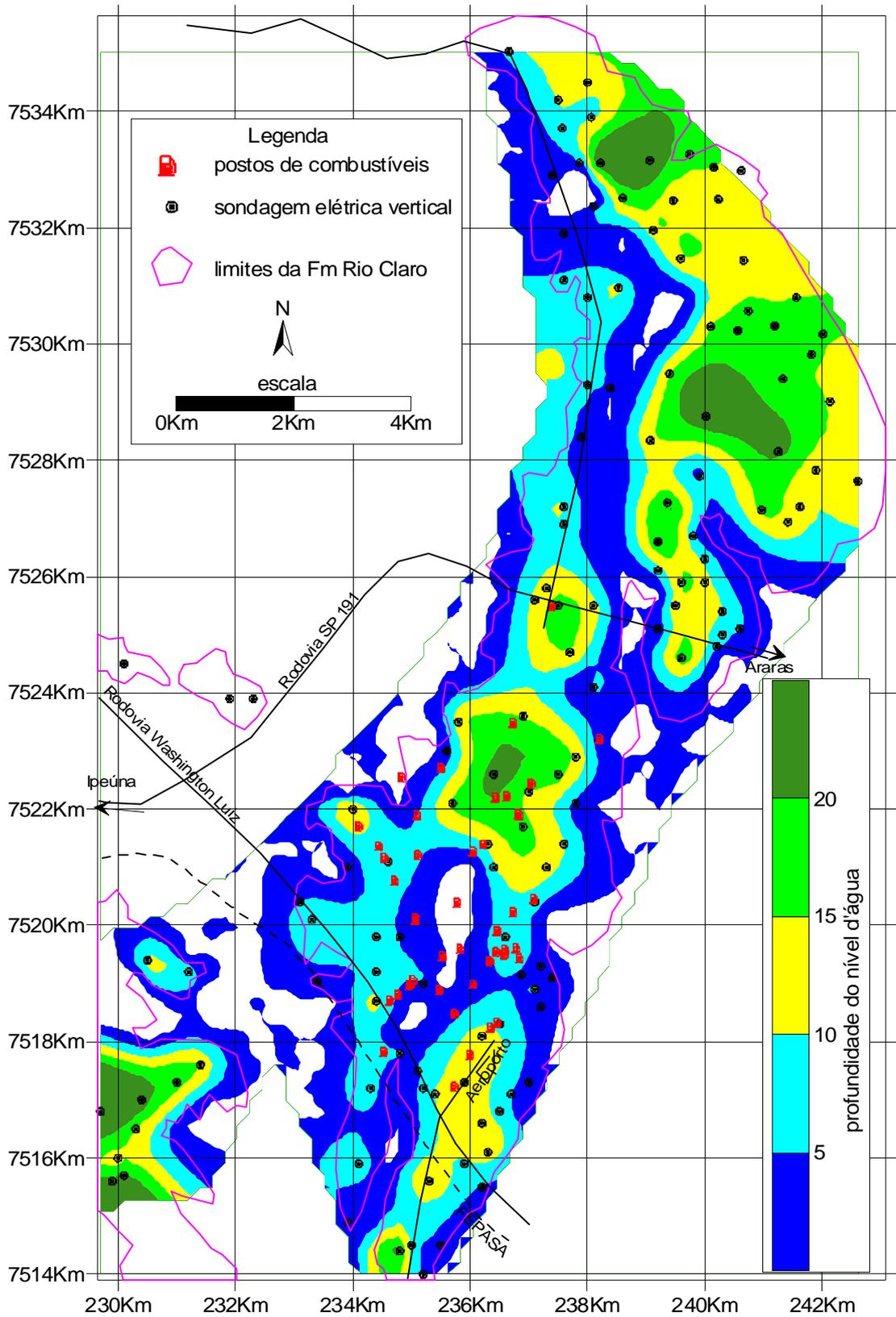
Fonte: CETESB, 2001.

ANEXO II:
MAPA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO COM A LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE
COMBUSTÍVEIS

ANEXO III:

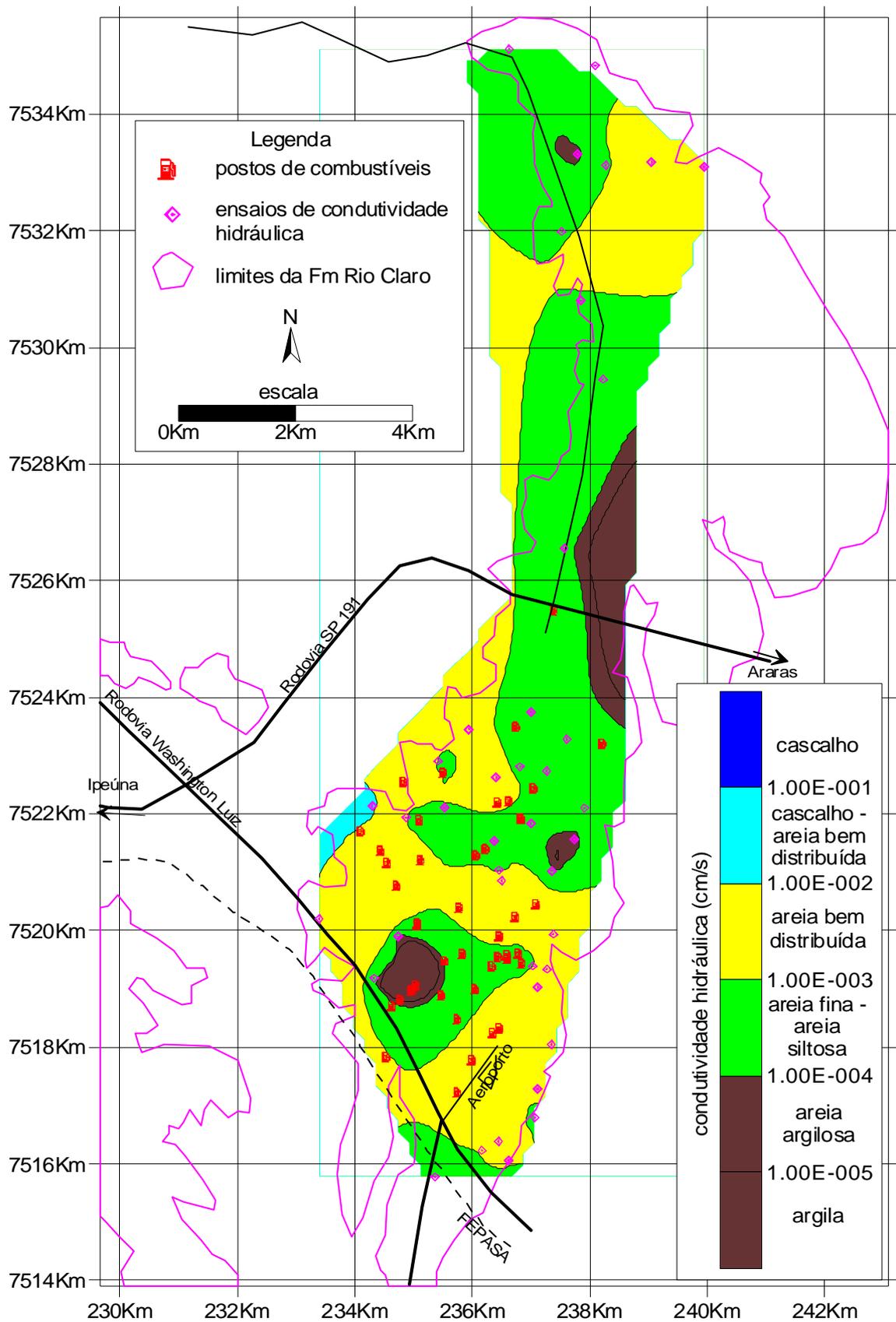
MAPA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO

MAPA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO



ANEXO IV:
MAPA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO

MAPA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO



ANEXO V:
MAPA DAS ÁREAS DE RISCO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO

MAPA DAS ÁREAS DE RISCO DO MUNICÍPIO DE RIO CLARO

