



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CAMPUS DE POMBAL-PB**

MILENA KARELLY MEDEIROS XAVIER

**HIDROGEOLOGIA DA CONTAMINAÇÃO: CONTAMINANTES ORGÂNICOS NÃO
MISCÍVEIS EM AMBIENTE DE SUBSUPERFÍCIE**

POMBAL – PB

2018

MILENA KARELLY MEDEIROS XAVIER

**HIDROGEOLOGIA DA CONTAMINAÇÃO: CONTAMINANTES ORGÂNICOS NÃO
MISCÍVEIS EM AMBIENTE DE SUBSUPERFÍCIE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof.º Dr.º. MANOEL MOISÉS
FERREIRA DE QUEIROZ

POMBAL – PB

2018

X3h

Xavier, Milena Karelly Medeiros.

Hidrogeologia da contaminação: contaminantes orgânicos não miscíveis em ambiente de subsuperfície / Milena Karelly Medeiros Xavier. – Pombal, 2018.

53 f. : il. color.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz".

Referências.

1. Hidrogeologia - Contaminação. 2. Água Subterrânea – Contaminação – Hidrocarbonetos. 3. Água Subterrânea – Contaminação – Ambiente de Superfície. I. Queiroz, Manoel Moisés Ferreira de. II. Título.

CDU 556.388(043)

MILENA KARLLY MEDEIROS XAVIER

HIDROGEOLOGIA DA CONTAMINAÇÃO: CONTAMINANTES
ORGÂNICOS NÃO MISCÍVEIS EM AMBIENTE DE SUBSUPERFÍCIE

Aprovado em 06 / 07 / 2018

BANCA EXAMINADORA

Virginia de Fátima Bezerra Nogueira

Prof.ª Dra. Virginia de Fátima Bezerra Nogueira (Representante do Orientador)

Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz

Orientador – UFCG/Campus de Pombal – PB

Jussara Silva Dantas

Prof.ª Dra. Jussara Silva Dantas

Examinador Interno – UFCG/Campus de Pombal - PB

Maria Aparecida Bezerra Oliveira

Ma. Maria Aparecida Bezerra Oliveira

Examinadora Externa – FSM/Faculdade Santa Maria

Pombal – PB

Julho 2018

A Deus por estar sempre ao meu lado, em especial a minha mãe Ivanira Medeiros e ao meu namorado Kássio Alencar por todo apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, maior mestre que alguém pode ter, por prover todas as soluções para todos os desafios que encontrei durante essa caminhada e que permitiu esse acontecimento. A UFCG, direção e administração que oportunizaram a janela por onde hoje vislumbro um horizonte superior. A todos os professores que participaram da minha jornada acadêmica, por me proporcionarem não só o conhecimento racional, mas também a manifestação do caráter no processo de formação Profissional, os quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos. Ao meu professor orientador Manoel Moisés, pela orientação, confiança, empenho e todo aprendizado que me proporcionou através das disciplinas ministradas e durante a realização desse trabalho. Agradeço a minha mãe Ivanira Medeiros, heroína que me deu total apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço e que sempre acreditou em mim e nunca mediu esforços para esse sonho se tornar realidade. Ao meu namorado Kassio Alencar, pelo amor, paciência ao longo desse curso e auxílio na realização deste trabalho. Meus agradecimentos aos amigos e colegas conquistados durante a convivência acadêmica, companheiros que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida. Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Estrutura e representações simplificadas do anel benzênico	17
Figura 2– Compostos monoaromáticos da série do benzeno (BETEX).....	17
Figura 3– Gânglios de NAPL, presos nos poros do solo- fase residual.....	23
Figura 4– Distribuições típicas de LNAPLs em contaminação do subsolo: a) LNAPL atingindo o nível d'água como fase contínua, b) LNAPL, totalmente retido como fase residual.....	24
Figura 5– Distribuição de DNAPL no subsolo.....	25
Figura 6– Medida no poço de monitoramento.....	25
Figura 7– Na prática, amostragem de água subterrânea.....	26
Figura 8– Demonstração dos riscos de explosão	27
Figura 9– Ampliação das moléculas de contaminantes que estavam na fase dissolvidas.....	28
Figura 10– Comportamento de LNAPL na área subterrânea.....	29
Figura 11– Modelo de definição de áreas em um vazamento de LNAPL.....	32
Figura 12– Plano de avaliação de locais contaminados.....	37
Figura 13– Fotografia aérea do Posto Gigio (Atibaia-SP) com as linhas de investigação.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades de hidrocarbonetos presentes na gasolina.....	18
Tabela 2- Distribuição das fases em derramamento de gasolina.....	30
Tabela 3- Principais técnicas de remediação de áreas contaminadas.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP -	agência nacional do petróleo
BTEX -	benzeno,tolueno,etilbenzeno e xilenos
CONAMA -	conselho nacional do meio ambiente
DNAPL -	dense nonaqueous phase liquids-líquido denso de fase não aquosa
EEA -	european environmental agency
IBGE -	instituto brasileiro de geografia e estatística
GPR -	ground penetrating radar-georradar
LNAPL -	ligh nonaqueous phase liquids-liquido leve de fase não aquosa
NAPL -	nonaqueous phase liquids-líquido leve de fase não aquosa
PCBS -	bifenilos policlorados
RBCA -	risk based corrective action-ação corretiva baseada no risco
USEPA -	agência de proteção ambiental dos estados unidos
VOI -	valores orientadores de intervenção

SUMÁRIO

1	Introdução	12
2	Objetivos	14
2.1	<i>Objetivo Geral</i>	14
2.2	Objetivo Específicos	14
3	Metodologia.....	15
4	Revisão de Literatura	16
4.1	<i>Fases dos Hidrocarbonetos e Características da Pluma</i>	16
4.2	Compostos Orgânicos não Miscíveis	16
4.2.1	<i>Organoclorados Alifáticos, ou Solventes Clorados</i>	18
4.2.2	Hidrocarbonetos Aromáticos Clorados	18
4.2.3	Fenóis Aromáticos	19
4.3	<i>Lei de Raoult</i>	19
4.4	Propriedades Físico-químicas de Compostos Orgânicos NAPLs	20
4.4.1	<i>Solubilidade em Água</i>	21
4.4.2	Densidade.....	21
4.4.3	Viscosidade	22
4.5	<i>Equação de Clapeyron</i>	22
4.6	Migração de Líquidos não Miscíveis nos Solos.....	22
4.7	<i>Distribuição das Fases</i>	25
4.8	Técnicas de Remediação Aplicadas a Áreas Contaminadas	28
4.8.1	<i>Solubilidade de Compostos</i>	30
4.8.2	Áreas Contaminadas	32
4.8.3	Contaminação de Solos e Águas Subterrâneas por Derivados do Petróleo.....	33
4.8.4	<i>Técnicas de Remediação</i>	34
4.8.5	Métodos mais eficaz para Remediação de Áreas Contaminadas.....	36
4.8.6	Diagnóstico e Monitoramento de Plumias de Contaminantes em Ambientes de Subsuperfície.....	40
4.8.7	<i>Geologia e Hidrogeologia da Área</i>	42
4.8.8	Método Georradar-GPR.....	43
4.9	<i>Legislação</i>	44
4.9.1	Toxicologia	45
5	Considerações Finais.....	46
6	Referencial Bibliográfico.....	48

Xavier, Milena Karelly da M. **Hidrogeologia da contaminação: Contaminantes orgânicos não miscíveis em ambiente de subsuperfície.**2018. 53 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) –Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. 2017.

RESUMO

A água subterrânea abastece grande parte da população e sua contaminação é assunto de interesse público. Os postos de combustíveis são fontes potenciais de contaminação, devido à sua extensa malha de distribuição e pelo armazenamento de produto ser predominantemente subterrâneo. Dentro os métodos para detecção de hidrocarbonetos, os geofísicos proporcionam investigação em maiores extensões, com mais rapidez e menor custo. A pesquisa pretende mostrar o método de remediação em ambientes de subsuperfícies que apresentes essas contaminações pelos derivados do petróleo, de menor custo e mais eficaz. Os pressupostos teóricos que fundamentaram este estudo foram a consulta em literatura específica sobre o tema: hidrogeologia da contaminação por hidrocarbonetos do petróleo. A pesquisa possui caráter predominantemente teórico e não visa o esgotamento do tema, e sim servir como fonte de consulta para análise e reflexão sobre os malefícios das contaminações em ambientes de subsuperfície, como também a importância de técnicas de remediação para evitar que a pluma se propague mais, causando grandes danos. Na revisão de literatura abordou-se diversos temas, como por exemplo: Analisar o comportamento de hidrocarbonetos de petróleo em ambientes de subsuperfície; As fases da contaminação em ambientes de subsuperfície; A geologia estrutural para melhor entender a geometria de fraturas e estimar os caminhos preferencias dos DNAPL em fase livre e dissolvida; Os métodos mais eficaz para remediação de áreas contaminadas; Diagnósticos e monitoramento de plumas de contaminantes em ambientes de subsuperfície.

Palavras-chave: Contaminação.Hidrocarbonetos.Subsuperfície.

XAVIER, Milena Karelly da M. **Hydrogeology of contamination: Organic contaminants not miscible in a subsurface environment.** 2018. 53 fls. Final Paper (Graduation in Environmental Engineering) - Federal University of Campina Grande, Pombal-PB. 2018

ABSTRACT

The groundwater supplies much of the population and its contamination is a matter of public interest. Fuel stations are potential sources of contamination, due to their extensive distribution network and also the storage of product being predominantly underground. Within the methods for detecting hydrocarbons, geophysicists provide research in larger extents, with more quickly and at a lower cost. The research intends to show the method of remediation in subsurface environments that present these contaminations by petroleum derivatives, lower cost and more efficiency. The theoretical assumptions underlying this study were the consultation in specific literature on the subject: hydrogeology of petroleum hydrocarbon contamination. The research is predominantly theoretical and does not aim at the exhaustion of the theme, but rather serves as a source of consultation for analysis and reflection on the harm of contamination in subsurface environments, as well as the importance of remediation techniques to prevent the plume from spreading, causing major damage. In the literature review, several topics were discussed, for example: Analyze the behavior of petroleum hydrocarbons in subsurface environments; The phases of contamination in subsurface environments; The structural geology to better understand the geometry of fractures and estimate the preferred paths of DNAPL and in free and dissolved phases; The most effective methods for remediation of contaminated areas; Diagnostics and monitoring of contaminant plumes in subsurface environments.

Keywords: Contamination.Hydrocarbons.Subsurface.

1.INTRODUÇÃO

No Brasil, a água subterrânea abastece cerca de 60% do uso doméstico da população (IBGE,2003), sendo que em estados como São Paulo, Maranhão e Piauí, este número alcança 80%. Diante desta inegável importância para grande parte da sociedade e maior conscientização sobre assuntos ambientais, a questão de contaminação de água subterrânea é um assunto que desperta interesse. Dentre as várias fontes de contaminação existentes, os postos de combustíveis são bem representativos, pois em 2006 havia 2.479 postos revendedores autorizados (ANP,2007). Adotando-se que em cada posto exista uma tancagem média de 60.000 litros de combustível, chega-se a montante de quase 150.000.000 litros de produtos armazenados subterraneamente, sem considerar os postos clandestinos ou os consumidores industriais.

Nos Estados Unidos da América (EUA), a questão de contaminação de postos de combustíveis vem sendo tratada desde da década de 80, quando se estabeleceu extenso programa de substituição dos tanques e de remediação dos sítios contaminados. Na década de 90, verificou-se que, dificultava os trabalhos de remediação. Desta maneira, foi estimulada a utilização da geofísica na detecção de hidrocarbonetos, resultando em maior rapidez e menor custo na caracterização de grandes extensões.

Devido ao crescente número de descobertas de casos de vazamentos em postos de combustíveis, as contaminações de solos por hidrocarbonetos derivados de petróleo têm sido alvo de inúmeras pesquisas e constitui um desafio para os profissionais que atuam no saneamento ambiental, em função da complexidade dos fenômenos geoquímicos e bioquímicos que são catalisados a partir de sua inserção no subsolo. Além disso, tem sido motivo de preocupação e repercussão na sociedade, pois essas contaminações com substâncias tóxicas podem atingir as águas subterrâneas, que estão sendo ou serão usadas como fonte de abastecimento para consumo humano.

Quando o combustível atinge o solo, seus componentes separam-se em três fases: dissolvida, líquida e gasosa. Uma pequena fração dos componentes da mistura se dissolve na água do lençol freático, uma segunda porção é retida nos espaços porosos do solo na sua forma líquida pura como saturação

residual e outra parte dos contaminantes passíveis de evaporação dá origem à contaminação atmosférica (NADIM et al., 1999).

No caso de combustíveis como a gasolina e o óleo diesel, os hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, chamados coletivamente como compostos BTEX, são os constituintes que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes com maior potencial de poluir o lençol freático. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico. Para o benzeno, o padrão de potabilidade para água de abastecimento público é de 5 µg/l (BRASIL, LEIS, etc., 2004).

Este produto em exposições crônicas pode causar leucopenia, câncer, vertigens, tremores e afetar o sistema nervoso central (PENNER, 2000).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo apresentar e analisar o comportamento de contaminantes orgânicos não miscíveis em ambientes de subsuperfície em aquíferos livres confinados, com base nas seguintes considerações.

2.2 Objetivo Específico

- Analisar o comportamento de hidrocarbonetos de petróleo em ambientes de subsuperfície;
- Identificar as inter-relações entre aquífero e contaminantes;
- Identificar as fases da contaminação em ambientes de subsuperfície;
- Apresentar os fundamentos teóricos da hidráulica aplicada e do transporte de massa em ambiente de subsuperfície;
- Identificar a geologia estrutural para melhor entender a geometria de fraturas e estimar os caminhos preferencias dos DNAPL em fase livre e dissolvida;
- Mencionar e descrever os métodos mais eficaz para remediação de áreas contaminadas;
- Apresentar procedimentos de diagnósticos e monitoramento de plumas de contaminantes em ambientes de subsuperfície.
- Destacar os principais problemas relacionados a saúde humana, de plantas e animais devido a exposição prolongada em áreas contaminada.

3. METODOLOGIA

Os pressupostos teóricos que fundamentaram este estudo foram a consulta em literatura específica sobre o tema: Hidrogeologia da contaminação: Contaminantes orgânicos não miscíveis em ambiente de subsuperfície. A pesquisa possui caráter predominantemente teórico e não visa o esgotamento do tema, e sim servir como fonte de consulta para análise e reflexão sobre os malefícios das contaminações em ambientes de subsuperfície, como também a importância de técnicas de remediação para evitar que a pluma se propague mais, causando grandes danos.

Esse trabalho se limitou ao tema de forma genérica, já que não houve sujeitos específicos e nem universos amostrais como objetos de análise, ou seja, não será feita uma investigação aprofundada do tema. A pesquisa é válida para o território brasileiro, de modo que foi realizada a partir de leis, resoluções, dados e aplicações nacionais, dissertações de mestrados e estudos de casos, restringindo-se a demonstrar a importância da utilização da Hidrogeologia da Contaminação na redução das emissões de plumas de contaminantes.

4.REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Fases dos Hidrocarbonetos e Características da Pluma

Após o vazamento de combustíveis, os hidrocarbonetos se infiltram no solo e interagem com o mesmo manifestando-se de diversas maneiras, formando algumas fases que contribuem para sua migração.

4.2 Compostos orgânicos não miscíveis

Os compostos orgânicos tóxicos, presentes em grande parte das contaminações de aquíferos subterrâneos, são, em sua maioria, carcinogênicos, apresentam limites de potabilidade muito baixos e são contaminantes com comportamento muito complexo no subsolo.

Os Líquidos Leves de Fase não Aquosa (LNAPLs) são usualmente divididos em dois grupos, de acordo com sua densidade relativa à da água: LNAPLs, de densidade mais baixa que a da água e DNAPLs, de densidade superior à da água. Os LNAPLs estão presentes em combustíveis automotivos e de aviação. As contaminações por Líquidos Densos de Fase não Aquosa (DNAPLs) resultam de diversas atividades industriais, como indústrias químicas e metalúrgicas, manufatura de pesticidas e tratamento de madeiras e ainda vazamento de óleo de transformadores.

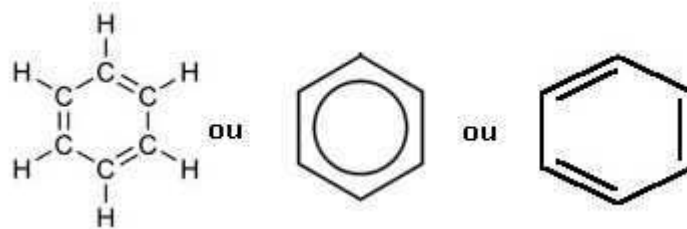
Os principais compostos orgânicos tóxicos e não miscíveis (NAPLs), verificados em contaminações de solo podem ser divididos em:

- Hidrocarbonetos monoaromáticos de petróleo;
- Hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA ou PAH – “polycyclic aromatic hydrocarbon”);
- Orgânicos halogenados / solventes organoclorados; defensivos agrícolas ou pesticidas;

Hidrocarbonetos são compostos constituídos de hidrogênio e carbono. Quanto à estrutura da cadeia, os hidrocarbonetos dividem-se em duas classes, aromáticos e alifáticos. Os aromáticos são aqueles que possuem em sua estrutura anéis benzênicos e os alifáticos são aqueles que possuem uma cadeia aberta. O anel benzênico tem seis átomos de carbono unidos em uma

estrutura fechada (anel), onde se alternam ligações simples e duplas, como mostra a figura 1.

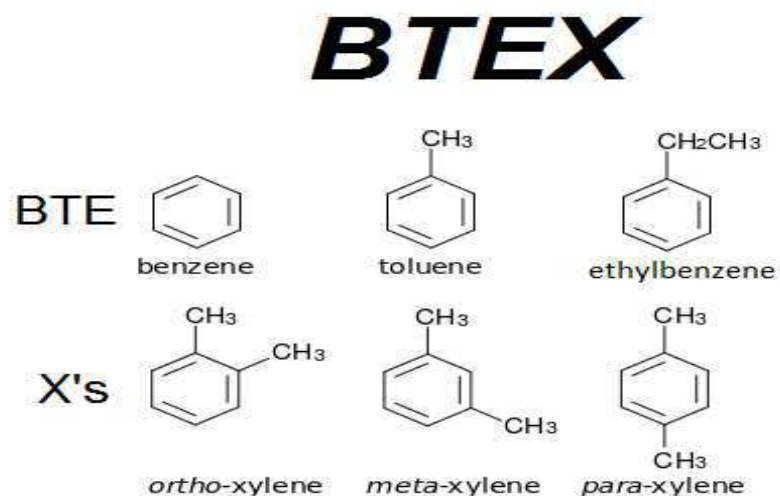
Figura1: Estrutura e representações simplificadas do anel benzênico.



Fonte: Google imagens.

Os principais hidrocarbonetos aromáticos de petróleo são os compostos da série do benzeno, conhecidos como compostos BTEX: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno. Os compostos do grupo BTEX são constituintes da gasolina e comprovadamente carcinogênicos, tendo, portanto, grande importância ambiental. São os mais solúveis e biodegradáveis hidrocarbonetos de petróleo e difundem-se rapidamente quando em contato com a água, podendo contaminar grandes extensões.

Figura 2: Compostos monoaromáticos da série do benzeno (BTEX).



Fonte: Google imagens.

Tabela 1: Propriedades de hidrocarbonetos presentes na gasolina.

Composto	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Solubilidade (mg/L)
Benzeno	C ₆ H ₆	78,1	1790
Tolueno	C ₇ H ₈	92	515
Etilbenzeno	C ₈ H ₁₀	106	230
p-xilenos	C ₈ H ₁₀	106,2	180
n-hexano	C ₆ H ₁₄	86,2	12,7

Fonte: Pereira,2000.

4.2.1 Organoclorados alifáticos, ou solventes clorados

São orgânicos halogenados, onde o cloro substitui o hidrogênio em hidrocarbonetos de cadeia aberta. Os organoclorados líquidos são tóxicos, voláteis, não miscíveis e mais densos que a água, ou seja, Líquidos Densos de Fase não Aquosa (DNAPLs). Não existem na natureza, são produzidos industrialmente, podendo ser derivados de outros compostos clorados. São muito persistentes no solo, devido à sua baixíssima mobilidade e solubilidade.

4.2.2 Hidrocarbonetos aromáticos clorados

São também produtos químicos industriais muito comuns. Entre os hidrocarbonetos aromáticos clorados, os benzenos clorados e o bifenilos policlorados (PCBs) são de grande importância ambiental. Os benzenos clorados são muito utilizados como solventes ou pesticidas, são pouco voláteis, pouco ou moderadamente solúveis e hidrófobos. Os bifenilos policlorados (PCBs) eram utilizados em transformadores e capacitores, como solventes e como fluidos hidráulicos. São pouco voláteis e altamente hidrófobos.

4.2.3 Fenóis aromáticos

São caracterizados pela substituição de hidrogênios por hidroxilas na estrutura do benzeno. O fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) tem apenas uma hidroxila no lugar do hidrogênio. Em grandes concentrações são considerados tóxicos para as bactérias. Atacam o sistema nervoso central, podendo levar à morte com pouco tempo de exposição.

4.3 Lei de Raoult

Foi constituída em 1887 pelo químico francês François Marie Raoult, e se define por estudar as pressões de misturas em expressões matemáticas.

Tratando-se de como ocorre à variação da pressão parcial de um vapor (solvente) ao se adicionar uma substância não volátil (soluto), deduzindo-se juntamente a isso que a pressão parcial do vapor de um solvente é proporcional a sua fração molar.

Soluções ideais são as soluções que obedecem à lei de Raoult. Sendo elas as que possuem número de entalpia mais próximo do zero. Ressalvando que esta lei só se aplica a soluções diluídas.

Esta lei pode ser expressa matematicamente da seguinte forma:

$$P = P_0 X$$

- **P**: é o valor do vapor do solvente
- **P₀**: pressão do vapor do solvente puro
- **X**: fração molar do solvente.

Quando se atinge o equilíbrio da solução a pressão de evaporação pode ser medida de acordo com a seguinte fórmula, onde se somam os constituintes da solução (soluto + solvente).

$$P_{\text{(solução)}} = (P_1)_{\text{puro}} X_1 + (P_2)_{\text{puro}} X_2$$

- **P**=pressão
- **X**= fração molar

E para se medir a pressão individual de cada constituinte da solução usa-se:

$$P_i = (P_1)_{\text{puro}} + X_i$$

- **P_i**= pressão individual
- **(P₁) puro**= pressão inicial do componente.
- **X_i**= fração molar do componente.

Esta lei é estritamente válida para soluções que fazem parte do grupo das soluções ideais, ou seja, o tipo de ligação entre as moléculas da solução tem que ser qualitativamente igual à ligação das moléculas das substâncias individualmente.

Se os valores reais (de evaporação da solução) forem diferentes dos valores teóricos (precedidos pela fórmula) podem se obter dados sobre as ligações da solução. Se os resultados de evaporação real forem menores que os teóricos, significa que a força de ligação entre as moléculas da solução é mais forte do que quando as substâncias estão ligadas individualmente, já se o resultado obtido for maior que o teórico a força de ligação entre as moléculas da solução é mais fraca e mais moléculas escapam e passam para a forma a forma do vapor.

4.4 Propriedades físico-químicas de compostos orgânicos NAPLs

Encontra-se uma série de propriedades físico-químicas que influenciam o comportamento dos Líquidos Denso de Fase não Aquosa (NAPLs) em solos e águas subterrâneas. Essas propriedades são influenciadas por condições do meio ambiente, como temperatura e pressão.

O comportamento de Líquidos Denso de Fase não Aquosa (NAPLs) com apenas um componente é de mais fácil previsão que o de multicompostos,

como a gasolina. Para os NAPLs multicompostos, cada um dos compostos tem propriedades diferentes e o multicomposto adquire propriedades que refletem a contribuição de todos os compostos, proporcional à fração molar de cada um deles. Assim, é variável o comportamento do multicomposto com o tempo, à medida que os componentes vão se solubilizando, volatilizando ou degradando e, portanto, variando sua fração molar.

4.4.1 Solubilidade em Água

É a capacidade de uma substância se solubilizar em água. A solubilidade limite de um composto corresponde à máxima concentração dissolvida desse composto em água pura. Quanto à solubilidade, os compostos orgânicos podem variar de completamente miscível em água, até quase insolúvel. Os NAPLs têm baixa solubilidade.

Para misturas de contaminantes, a solubilidade efetiva de cada composto é proporcional à sua fração molar, conforme a Lei de Raoult como se segue (equação 1):

$$S_{ei} = S_i \cdot X_i$$

S_{ei} = solubilidade efetiva do composto i na mistura;

S_i = solubilidade do composto puro i ;

X_i = fração molar do contaminante i na mistura.

Assim, para compostos múltiplos como a gasolina (+ de 200 compostos), a solubilidade de cada composto na mistura é inferior à solubilidade do composto puro. No caso do benzeno por exemplo, a solubilidade passa de 1780 mg/L para 89 mg/L na gasolina (IBP,2000).

4.4.2 Densidade

É a razão entre o peso específico de uma determinada substância e o peso específico da água. Se a densidade da substância é menor que a unidade essa vai flutuar na água, se é maior, vai afundar; o que diferencia o comportamento de LNAPLs e DNAPLs na migração vertical através do solo. A densidade de um NAPL aumenta com o seu peso molecular e grau de halogenação. Quanto maior a densidade maior a mobilidade vertical. A

densidade depende fortemente da temperatura, decrescendo com seu aumento, o que pode levar a um Líquidos Denso de Fase não Aquosa (DNAPL) passar a Líquido Leve de Fase não Aquosa (LNAPL), com o aumento da temperatura.

4.4.3 Viscosidade

A viscosidade pode ser absoluta ou cinemática. A viscosidade cinemática agrega efeitos viscosos e da densidade e a viscosidade absoluta aumenta com a complexidade molecular, tamanho e polaridade do composto e diminui com o aumento da temperatura e grau de halogenação.

4.5 Equação de Clapeyron

Relacionando as Leis de Boyle, Charles Gay-Lussac e de Charles é possível estabelecer uma equação que relacione as variáveis de estado: pressão (p), volume (V) e temperatura absoluta (T) de um gás.

Esta equação é chamada Equação de Clapeyron, em homenagem ao físico francês Paul Emile Clapeyron que foi quem a estabeleceu.

$$p \cdot V = n \cdot R T$$

Onde:

p=pressão;

V=volume;

n=nº de mols do gás;

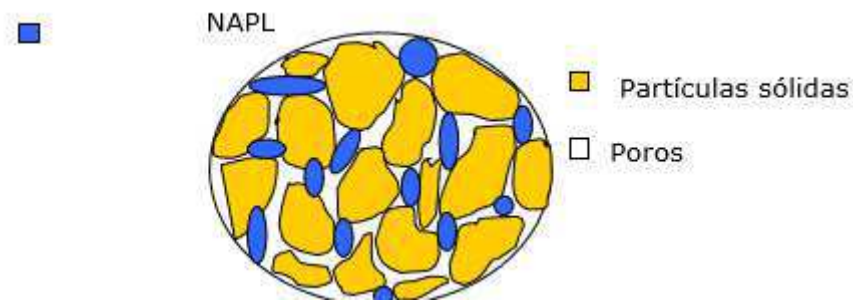
R=constante universal dos gases perfeitos;

T=temperatura absoluta.

4.6 Migração de líquidos não miscíveis nos solos

Os Líquidos Denso de Fase não Aquosa (NAPLs) migram verticalmente através do solo a partir de uma fonte superficial, devido a pressões hidrostáticas em seu próprio corpo contínuo (BEDIENT,1994), descendo através da zona não saturada do solo em direção ao aquífero.

Figura 3: Gânglios de NAPL, presos nos poros do solo- fase residual.

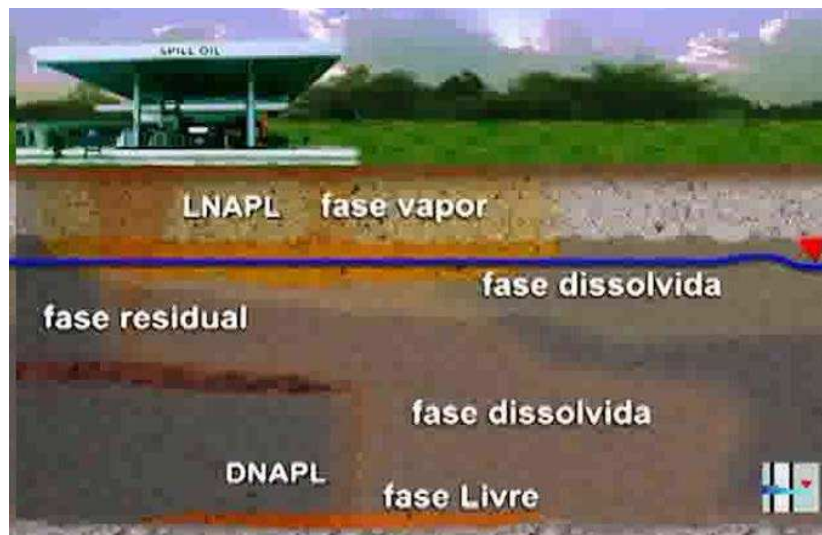


Fonte: Google imagens.

Esses gânglios permanecem no interior do solo como fase residual, de difícil remoção e localização, mantendo-se como uma fonte contínua de contaminação ao se dissolverem na água subterrânea.

Os Líquidos Leve de Fase não Aquosa (LNAPLs), forçados pela fonte, por gravidade, migram através da zona não saturada do solo. A fase livre do LNAPL ao atingir o lençol d'água permanece sobre a franja capilar ou flutuando sobre o nível d'água, gerando uma pluma de LNAPL. Parte dessa pluma se dissolve pelo contato permanente com a água, gerando uma pluma dissolvida na água subterrânea. Quando a quantidade de NAPL é muito pequena, todo o contaminante pode ficar retido nos poros como fase residual. Nesse caso a contaminação atinge o aquífero por infiltração de água onde se dissolvem os NAPLs mais solúveis.

Figura 4. Distribuições típicas de LNAPLs em contaminação do subsolo: a) LNAPL atingindo o nível d'água como fase contínua, b) LNAPL, totalmente retido como fase residual.

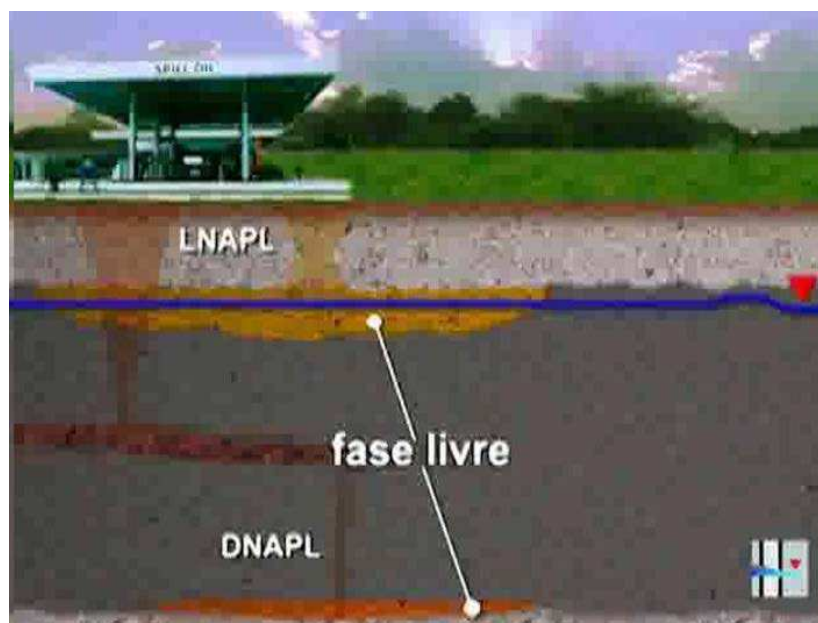


Fonte: Hidroplan (2017).

Os LNAPLs não ultrapassam o nível d'água (na realidade nível da franja capilar) por terem a densidade mais baixa que a da água. Assim, não deveria ocorrer LNAPL residual na zona saturada do solo. Apesar disso registra-se a existência de LNAPL residual na zona saturada, devido a variações do nível d'água. Ao rebaixar-se o nível d'água, por qualquer motivo, o LNAPL sobrenadante desce junto com a superfície do lençol. Ao retornar o nível à posição anterior, parte do LNAPL, fica retida sob a forma de gânglios, agora na zona saturada.

Os Líquidos Denso de Fase não Aquosa (DNAPLs), mais pesados que a água, ultrapassam a superfície da zona saturada e continuam migrando até encontrarem uma camada de permeabilidade muito baixa, onde permanecem sob a forma de piscinas (pools), que são regiões de alta saturação residual (60 – 70%). Podem ainda romper a estrutura da camada de baixa permeabilidade e penetrar através de fissuras. Por esse motivo os DNAPLs atingem grandes profundidades e são de mais difícil remediação que os LNAPLs. Devido a heterogeneidades no solo a distribuição dos DNAPLs no subsolo é irregular o que torna mais difíceis em relação aos LNAPLs, tanto sua caracterização quanto sua remediação.

Figura 5. Distribuição de DNAPL no subsolo.



Fonte: Hidroplan (2017).

4.7 Distribuição das Fases

a) Fase Livre: Produto em fase separada (imiscível ou parcialmente miscível) que apresenta mobilidade no meio poroso, logo pode ser bombeado por fluir para o interior do poço.

- Representa uma fonte de contaminação para as águas subterrâneas;
- Apresenta risco de explosão e incêndio.

Figura 6: Medida no poço de monitoramento.

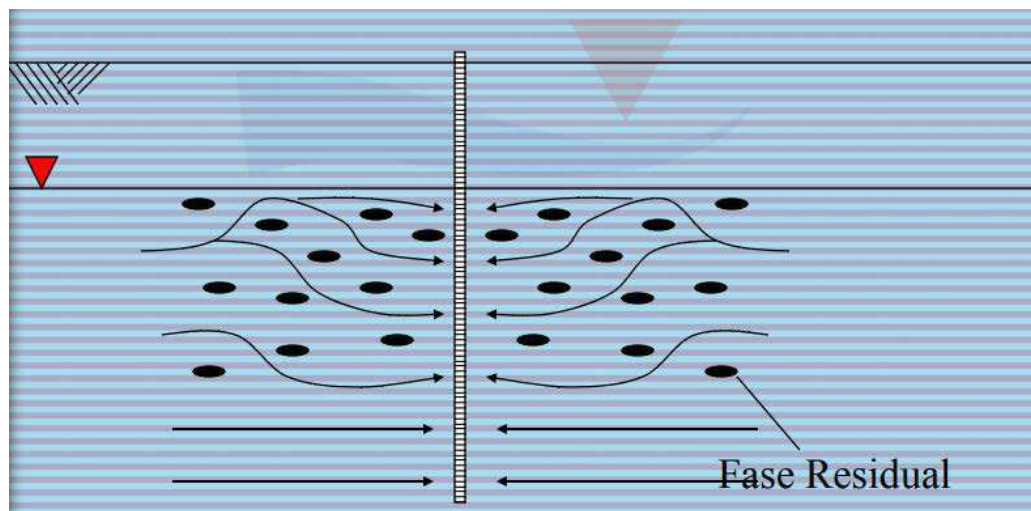


Fonte: Google imagens (2017).

b) Fase Residual: Produto em fase separada (imiscível ou parcialmente miscível) que não apresenta mobilidade no meio poroso, não pode ser bombeado por não fluir para o interior do poço.

- Representa uma fonte de contaminação para as águas subterrâneas;
- Apresenta risco de explosão e incêndio.

Figura 7: Na prática, amostragem de água subterrânea.

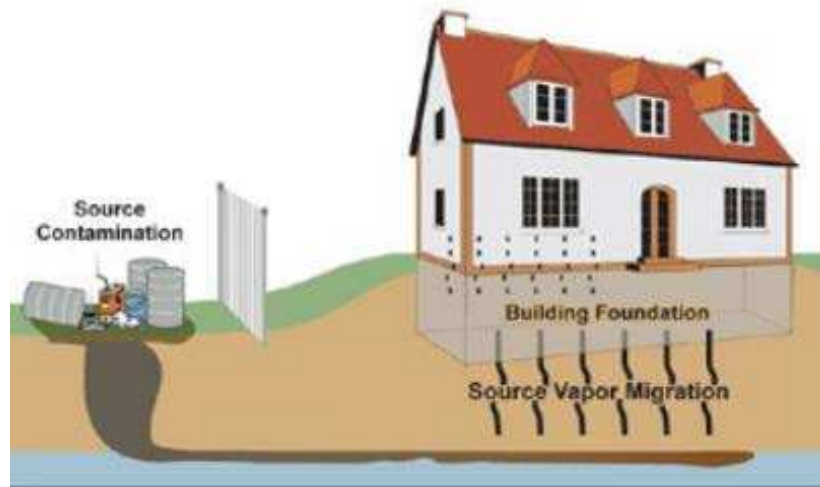


Fonte: Google imagens (2017).

c) Fase Vapor: Presente eminentemente na zona não saturada e em quantidades desprezíveis na zona saturada abaixo do nível d'água.

- Apresenta alta mobilidade podendo acumular-se em espaços confinados como garagens subterrâneas, porões, etc

Figura 8: Demonstração dos riscos de explosão.



Fonte: Google imagens (2017).

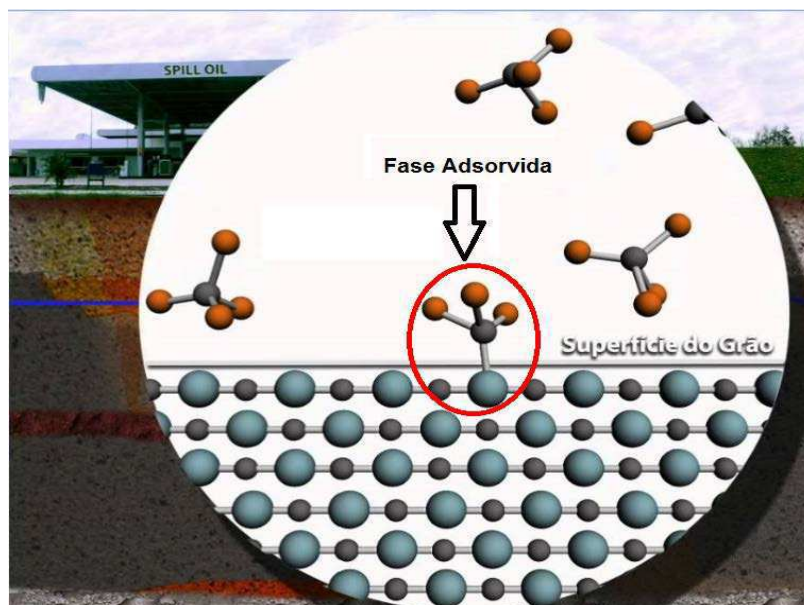
d) Fase Dissolvida: Presente na zona saturada, responsável pelo transporte de contaminantes a grandes distancias da fonte de contaminação.

- Apresenta mobilidade muito elevada.

e) Fase Adsorvida: São moléculas de contaminantes que estavam na fase dissolvida em água e se fixaram por cargas elétricas na superfície do solo. Podendo haver adsorção também da fase residual e da fase livre. Portanto a fase adsorvida é diferente da fase residual.

- Não apresenta mobilidade;
- Representa uma fonte de contaminação para águas subterrâneos (em escala muito maior do que a fase livre e residual).

Figura 9: Ampliação das moléculas de contaminantes que estavam na fase dissolvidas.



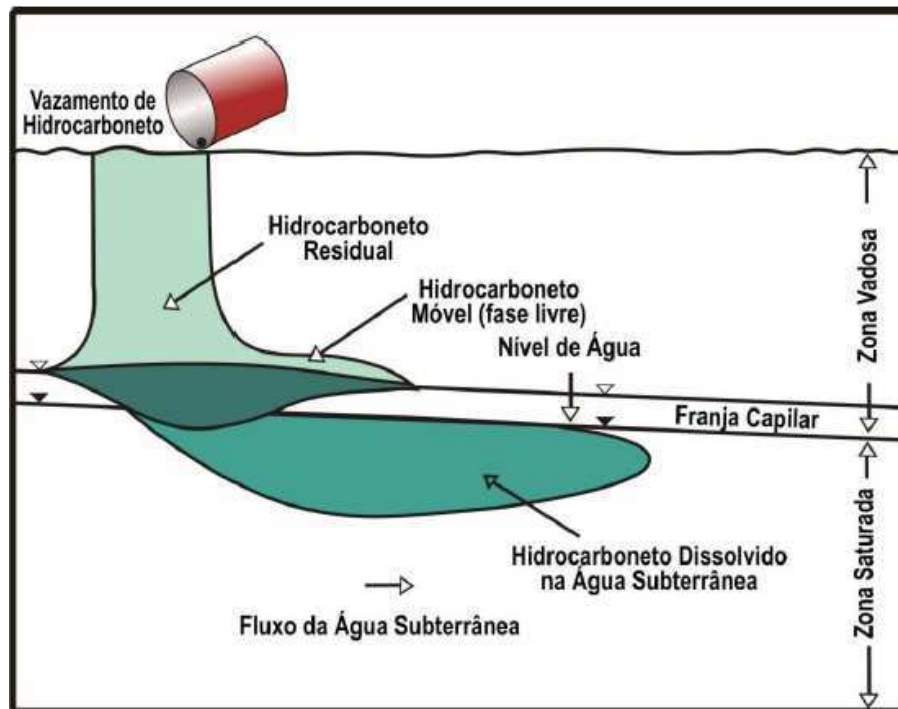
Fonte: Hidroplan (2017).

4.8 Técnicas de remediação aplicadas a áreas contaminadas

Em um vazamento de combustíveis, o produto se movimentará descendentemente pela gravidade e de acordo com as forças capilares e condutividade hidráulica do solo. Os hidrocarbonetos liberados em subsuperfície por vazamento, aparecem em diversas fases e sua migração, assim como técnicas de remediação acontece de acordo com cada fase.

Existe algumas variações entre autores na classificação das fases dos hidrocarbonetos: GUIGUER (1996) divide em fase líquida, dissolvida e vapor; OLIVEIRA (1992) classifica em sorvida, livre e dissolvida, SUACK *et al* (1998) divide em imiscível ou livre, residual, vapor e dissolvida etc. A figura 10 traz a classificação de FETTER (1999).

Figura 10: Comportamento de LNAPL na área subterrânea



Fonte: Modificado de FETTER (1999).

- A fase residual é a que fica depois da passagem do contaminante na fase líquida e acontece quando o LNAPL fica retido pelas forças capilares do solo ou preso entre os espaços dos poros. Este material residual atuará como fonte de contaminação, posteriormente provocando dissolução em água subterrânea também provocam um espalhamento do produto, podendo criar fase residual.
- A fase móvel (mais conhecida como fase livre) ocorre quando a saturação de LNAPL excede a saturação residual gerando uma fase contínua entre os poros da matriz do solo. Este volume de LNAPL móvel pode se deslocar vertical ou horizontalmente, de acordo com as flutuações de nível d'água.
- A fase dissolvida acontece quando existe o contato dos hidrocarbonetos com água subterrânea e a quantidade de material dissolvido depende da solubilidade dos constituintes dos hidrocarbonetos.

Embora não representados na Figura 10, os hidrocarbonetos da fase vapor, resultam da volatilização dos compostos da fase líquida presentes na zona não saturada. Estes hidrocarbonetos também podem se volatilizar dos residuais e, em menor escala, a partir daqueles da fase dissolvida.

Entretanto, independente da classificação adotada, a fase dissolvida costuma ser a mais preocupante pelo impacto ambiental que pode causar. A tabela 2 dá um exemplo da distribuição das fases de um vazamento de gasolina em aquífero de areia média e nível de água de 5m.

Tabela 2: Distribuição das fases em derramamento de gasolina.

Fase	Volume contaminado (m ³)	% do Total contaminado	Volume de contaminante (m ³)	% do Total de contaminante
Livre	7.100	1,0	18.500	62
Sorvida	250.000	20,0	10.000	33
Dissolvida	960.000	79,0	333	1 - 5

Fonte: Groundwater Technology Inc.,1983, apund OLIVEIRA,1992.

Percebe-se que a fase livre representou 62% do total de gasolina derramado, mas contaminou apenas 1% do total do sítio. Por outro lado, a fase dissolvida que continha apenas 5% do volume vazado, contaminou 79% do total, demonstrando que o fluxo de água subterrânea é um mecanismo com forte capacidade de espalhamento dos contaminantes, devido sua grande mobilidade.

4.8.1 Solubilidade de compostos

É a máxima concentração que ele pode se dissolver em água em determinadas condições de pressão e temperatura. Entretanto, esta concentração só seria obtida se o LNAPL fosse constituído de um único composto. Como os hidrocarbonetos são constituídos por centenas de compostos, solubilidade final será melhor que a solubilidade de cada um.

A Lei de Raoult (RUSSEL, 2004) define que a solubilidade da mistura é a solubilidade de cada composto multiplicado por sua fração molar na mistura. Desta maneira, considerando que a transferência de massa depende da solubilidade e do percentual de produtos muito solúveis irão se dissolver mais rapidamente que aquela mistura com predominância de compostos de baixa solubilidade. Sendo assim, o impacto da gasolina dissolvida acaba sendo maior que o dos óleos combustíveis.

Com os hidrocarbonetos são constituídos de inúmeros compostos, novamente utiliza-se a Lei de Raoult que estabelece que a pressão de vapor

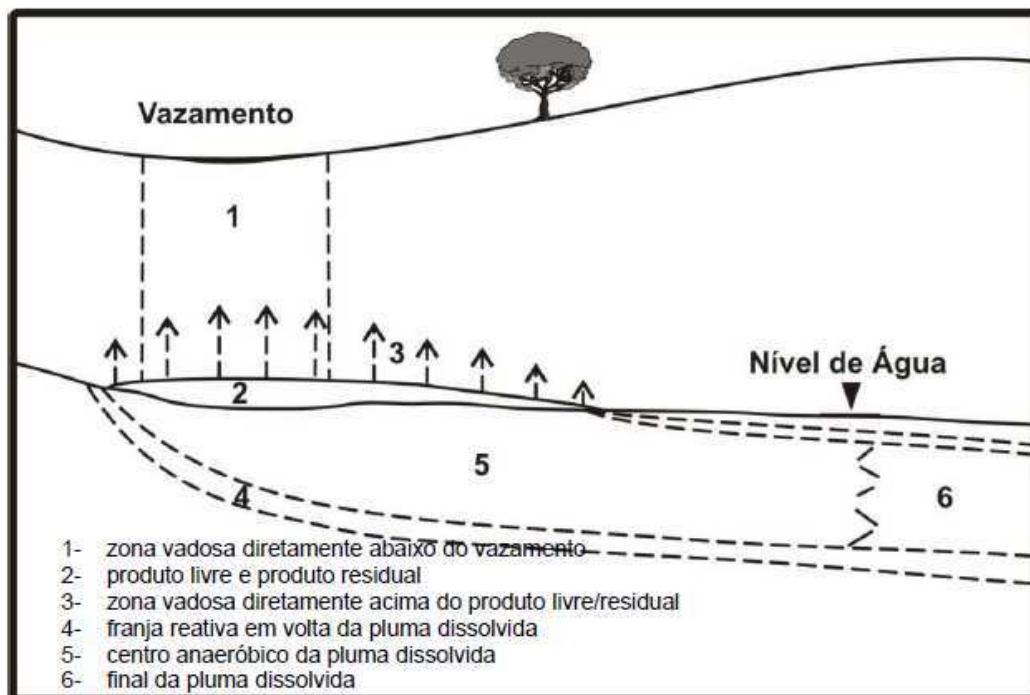
da mistura seja a pressão de vapor de cada composto multiplicado por sua fração molar na mistura. Conclui-se que a gasolina, pelo alto teor de BTEX, apresentaria um impacto de volatilização maior que o diesel ou outro óleo combustível.

Aplicabilidade de cada tecnologia depende dos seguintes fatores: condições hidrogeológicas, natureza e distribuição do LNAPL, objetivos da remediação, recursos e tempo disponíveis etc. A extração do produto residual costuma ser mais problemática e muitas vezes é impraticável se fazer a limpeza rápida no local. Embora fatores físicos possam limitar a movimentação da contaminação e a atenuação natural também contribua para diminuir a migração de pluma dissolvida e de vapor, a extração do produto na fase livre costuma ser muito desejável pelo perigo potencial de contaminar a água subterrânea.

DANIELS *et al* (1995) descrevem que estudos hidrogeológicos mostram que os hidrocarbonetos não se dispersam uniformemente no regolito, mas movem-se na zona não saturada com discretos acúmulos de contaminantes. A migração típica destes contaminantes depende das características físicas e químicas do regolito original. O comportamento dos contaminantes na fase de vapor e na franja capilar são fortemente determinadas pela hidrogeologia da zona vadosa.

Destaca-se que estudos feitos para caracterizar a pluma contaminante em superfície normalmente visam estabelecer o potencial risco que ela pode provocar no local e definir as melhores técnicas de remediação. A figura 2 traz o modelo de pluma proposto por SAUCK (2000), que identifica zonas de contaminação provocadas por vazamento de hidrocarboneto em terreno arenoso.

Figura 11: Modelo de definição de áreas em um vazamento de LNAPL.



Fonte: Modificado de SAUCK (2000).

4.8.2 Áreas Contaminadas

Áreas contaminadas são descritas como locais com concentrações de poluentes representados por quaisquer substâncias ou resíduos que venham a causar danos ou riscos aos bens a proteger, como a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, do solo e a saúde da população humana ou animal (CETESB, 2001). Geralmente, o surgimento de tais áreas está atrelado aos processos socioeconômicos ambientalmente não sustentáveis, que utilizam os recursos naturais sem observância aos parâmetros de proteção ambiental. A necessidade de reutilização das áreas onde foram desenvolvidas atividades potencialmente poluidoras, como o caso de derramamento de combustíveis, tem se intensificado, sobretudo em regiões densamente povoadas e industrializadas.

A sua reutilização de forma indiscriminada representa um grave aumento de risco à população como um todo e ao meio ambiente, pois podem funcionar como fontes dinâmicas de contaminação secundária, extrapolando os contaminantes para além da área afetada e para outros meios, estendendo seus efeitos deletérios (Günther, 2006).

O gerenciamento de áreas contaminadas visa minimizar os riscos que a população e o meio ambiente estão sujeitos, por meio de um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos impactos causados pelos contaminantes, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas (CETESB, 2001). Os principais procedimentos e ações de investigação e de gestão durante esse processo devem seguir as seguintes etapas, segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 420/2009 (Brasil, 2009): identificação, na qual uma avaliação preliminar e investigação confirmatória serão efetuadas; diagnóstico, que inclui a investigação detalhada e avaliação de risco com objetivo de subsidiar a etapa de intervenção; e intervenção, cuja finalidade é executar ações de controle para a eliminação do perigo ou redução a níveis toleráveis dos riscos, bem como o monitoramento da eficácia das ações executadas, considerando o uso atual e futuro da área.

4.8.3 Contaminação de solos e águas subterrâneas por derivados de petróleo

Para se ter uma dimensão da problemática que envolve a contaminação do ambiente por hidrocarbonetos de petróleo, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) estima que atualmente existem nesse país, aproximadamente, 571.000 tanques subterrâneos que armazenam derivados de petróleo e outras substâncias perigosas. Segundo o Programa de Tanques de Armazenagem Subterrâneos dessa agência, já foram registrados mais de 528.000 casos de vazamentos com conseqüente contaminação do solo e da água subterrânea sendo que aproximadamente 456.000 destas áreas contaminadas já foram recuperadas restando, portanto, 72.000 áreas em processo de remediação ou a ser remediada (USEPA, 2016). Na Europa, a Agência Ambiental Europeia (European Environmental Agency - EEA) estima que aproximadamente 1.170.000 áreas potencialmente contaminadas estão presentes em 27 países membros da EEA. A estimativa é que esse número representa 45% do total de áreas contaminadas presentes nos 39 países membros.

O setor de serviços que mais contribui para essa contaminação são os postos de combustíveis com destaque principalmente em países como Holanda,

Finlândia, Hungria, Croácia, Itália e Bélgica (EEA, 2014). No Brasil, em meados de 1970, verificou-se um aumento nas instalações de postos de combustíveis. Nesta época os tanques de armazenamento de combustível eram construídos em chapa de aço simples, com uma vida útil de aproximadamente 20 a 25 anos. Após este período, muitos dos tanques não foram substituídos o que contribuiu para a ocorrência de vazamentos e contaminação ambiental (Oliveira e Loureiro, 1998).

4.8.4 Técnicas de remediação

Uma vez constatada a contaminação de solos e águas, ações para a recuperação ambiental são necessárias para a proteção do ambiente e da saúde humana. Tal procedimento conhecido como remediação, implica em intervenção direta, com intuito de conter, isolar, remover ou reduzir as concentrações dos contaminantes presentes. Diversas tecnologias para a remediação têm sido aplicadas em áreas contaminadas por derivados de petróleo. Dentre as que envolvem processos físicos e químicos podem ser citadas a lavagem de solo, extração de vapores, bombeamento e tratamento de águas subterrâneas, injeção de ar na zona saturada, tratamento térmico, oxidação química, contenção e barreiras passivas e reativas. Também tem se destacado, devido ao menor custo e interferência mínima nas áreas contaminadas, as técnicas que removem o contaminante por meio de processos biológicos. Nesta categoria se destaca a atenuação natural, biorremediação e fitorremediação (Khan et al., 2004).

A Tabela 3 apresenta breve descrição dessas principais técnicas de remediação.

Tabela 3: Principais técnicas de remediação de áreas contaminadas.

(continua)

Técnicas	Descrição
Lavagem de solo	Utiliza líquidos, geralmente água e solvente, e processos mecânicos para extrair os contaminantes do solo. Os solventes são escolhidos baseados na sua capacidade de solubilizar os contaminantes e não possuir ou ter baixa toxicidade.

Técnicas	Descrição
Injeção de ar na zona saturada (air sparging)	Aplicado na remediação de VOCs dissolvidos na água subterrânea e adsorvidos na zona saturada do solo por meio da injeção de ar atmosférico sob pressão. Assim, ocorre a volatilização dos contaminantes em fase adsorvida e/ou biodegradação aeróbica.
Bombeamento e tratamento de águas subterrâneas	Por meio de poços de extração, as águas subterrâneas contaminadas são removidas e tratadas por diversas tecnologias. Uma vez remediadas são reintroduzidas no aquífero ou descartadas em corpos hídricos superficiais.
Tratamento térmico	Envolve o aquecimento do solo a temperaturas que variam de 100 a 600 °C com o objetivo de promover a separação dos contaminantes orgânicos pela volatilização ou destruição.
Oxidação química	Tratamento que utiliza oxidantes químicos como ozônio, peróxidos e persulfatos, para decompor, reduzir ou eliminar a toxicidade dos contaminantes em solos e águas subterrâneas.
Contenção	Consiste basicamente em criar barreiras físicas ou hidráulicas para impedir a dispersão dos contaminantes para áreas adjacentes.
Barreiras passivas e reativas	Consistem na passagem da água subterrânea contaminada através de uma barreira permeável instalada em subsuperfície transversalmente ao

	sentido de escoamento, interceptando a pluma de contaminação. Três tipos de barreiras são utilizados: de adsorção, na qual os contaminantes ficam adsorvidos e são removidos; de precipitação, os contaminantes dissolvidos na água são precipitados e removidos; reativa, que promove a quebra dos compostos tóxicos em produtos inertes.
Atenuação natural controlada	Conhecida também como remediação intrínseca ou passiva, usa processos naturais que ocorrem na área contaminada com o objetivo de reduzir as concentrações dos contaminantes, toxicidade, massa e/ou volume até níveis adequados à proteção da saúde humana e ao meio ambiente.
Biorremediação	Por meio do metabolismo de microrganismos (bactérias e fungos), nativos ou exóticos à área contaminada, os contaminantes são degradados em compostos com menor ou sem toxicidade.
Fitorremediação	Plantas são utilizadas para remediar áreas contaminadas por meio da degradação, extração, contenção ou imobilização dos contaminantes orgânicos e inorgânicos do solo e água subterrânea.

(conclusão)

Fonte: CETESB (2001) e Khan et al. (2004).

4.8.5 Métodos mais eficaz para remediação de áreas contaminadas

Os métodos geofísicos de investigação de superfície normalmente utilizam equipamentos dispostos no nível do solo e apresentam-se como não invasivos e não destrutivos. Em grandes áreas, o método geofísico costuma ser mais rápido e apresentar custo menor.

Até recentemente, a investigação tradicional de locais contaminados era feita através da escavação de poços, monitoramento por coleta de amostras e análise

laboratorial do solo e água. Entretanto, estes procedimentos acabaram trazendo interpretações inadequadas destas áreas, pois muitas vezes assumia-se que as características de subsuperfície era uniformes, resultando em amostragens pouco representativas ou, na hipótese de descrever vários poços, gerando elevados gastos de tempo e dinheiro. Além disto, a provável introdução de novas variáveis na escavação de poços, somada ao perigo de se escavar lugares desconhecidos, adicionavam algumas dificuldades na investigação (BENSON E NOEL 1984).

Sabendo-se que para uma utilização adequada da geofísica na investigação de sítios contaminados é conveniente considerar uma série de informações do local, a Figura 12 apresenta o plano de avaliação destas áreas proposto por BENSON E NOEL (1984).

Figura 12: Plano de avaliação de locais contaminados.



Fonte: Modificado de BENSON E NOEL, (1984).

Na parte central do esquema estão os objetivos primários, que compreendem a localização, tipo e quantidade do contaminante, verificação de barreiras limitadoras, determinação da presença e direção da pluma, distribuição dos contaminantes, direção e profundidade da água subterrânea, retardando dos contaminantes, anomalias na seção hidrogeológica etc. Ao

redor da parte central aparecem como objetivos secundários as condições da superfície do local (topografia, vegetação, cenário natural, geomorfologia etc.), de subsuperfície (solo, rocha, hidrologia etc.), influência de temperatura e precipitação na estabilidade e migração do contaminante, capacidade da área de recarga de promover maior penetração, presença de rochas fraturadas etc. Também devem ser avaliadas características dos resíduos perigosos (tipos, formas, disposição, danos a saúde e meio ambiente etc.), interação dos resíduos e cenários naturais (fluxo de água subterrânea, permeabilidade da rocha, transporte de contaminante por advecção, dispersão e difusão, características físico-químicas da rocha etc.).

As investigações geofísicas têm sido cada vez mais utilizadas na detecção de contaminações de Líquidos Leve de Fase não Aquosa (LNAPL), particularmente as metodologias de resistividade elétrica, GPR e EM (ATEKWANA *et al.*, 2000; CASSIDY *et al.*, 2001). DANIELS *et al.* (1995) ainda sugerem que as técnicas de alta condutividade enquanto as técnicas de alta frequência, como o GPR, seriam melhor aplicáveis na detecção de contrastes em permissividade dielétrica.

Na metodologia geofísica é fundamental que haja contraste entre as propriedades do contaminantes com o meio. O método GPR utiliza o parâmetro de permissividade dielétrica para a detecção dos contaminantes e alto contraste entre a água subterrânea e os hidrocarbonetos contribui para a investigação, pois enquanto a água apresenta constante dielétrica K igual a 80, (OLHOEFT, 1992; DANIELS *et al.* 1995). OLHOEFT (1992) afirma que o GPR apresenta melhores resultados na detecção de hidrocarbonetos quando ocorre o encharcamento do solo, notadamente devido às oscilações verticais do nível de água que espalham o produto. Porém, sabe-se que o problema em confiar nos valores de condutividade elétrica dos hidrocarbonetos para detectá-los. É que estas características podem aumentar, diminuir ou apresentar pouca alteração, dependendo das condições específicas do local, como variação do nível de água, presença de argila etc.

Alguns hidrogeólogos verificam que o produto livre não apresenta fase 100% contínua, pois a saturação de hidrocarboneto não costuma alcançar nem 50%, e o espaço restante seria preenchido por água e ar, circulando ótimas

condições para a ação de micróbios aeróbicos (SAUCK *ET AL*, 1998; SAUCK, 2000). Enquanto isso, FETTER (1999) indica que os hidrocarbonetos formam um substrato para o crescimento microbial, proporcionando uma fonte de energia para os micróbios através de um biofilme nas superfícies sólidas no aquífero, sendo que estudos demonstraram a ocorrência de biodegradação em compostos BTEX, em condições aeróbicas e anaeróbicas. AAL *et al.* (2006) acreditaram que a acumulação das bactérias na superfície dos grãos (biofilmes) aumenta a polarização interfacial e causam as respostas relativamente altas de IP nas amostras contaminantes com hidrocarbonetos, indicando que esta metodologia geofísica se mostra bastante adequada para investigar locais contaminados com hidrocarbonetos.

DELANEY (2000) apresentam alguns experimentos de determinação de eletrorresistividade em contaminação por hidrocarbonetos. Tanto as medições em laboratórios quanto as realizadas em sítio de contaminação antiga indicaram aumento de eletrorresistividade quando se diminuiu o teor de água, aumentou-se o teor de hidrocarboneto ou aconteceu o congelamento. Segundo os autores, este comportamento deve-se à granulometria fina do solo (areia fina e silte) que, duram um vazamento, proporcional aderência dos hidrocarbonetos na superfície das partículas do solo, restringindo a mobilidade dos íons na água capilar.

Percebe-se que os estudos realizados com aplicação da geofísica para detecção de hidrocarbonetos não apresentam resultados totalmente presumível, devido à diversidade de variáveis que interferem no seu comportamento. Entretanto alguns estudos relacionados acima encontram plumas resistivas mesmo para vazamentos antigos que, talvez, demonstrem que a característica condutiva ou resistiva da pluma não estaria tão vinculada à sua idade, mas à possibilidade de haver ou não biodegradação no local.

4.8.6 Diagnósticos e monitoramento de plumas de contaminantes em ambientes de subsuperfície.

Por meio de um estudo de caso, foi avaliado a descrição da área e histórico da contaminação do Auto Posto Gigio que está localizado na Rodovia Fernão Dias km 30, bairro Tanque em Atibaia (SP), ocupando uma área de 30.000km².

Os equipamentos instalados no posto eram sete tanques de 15.000 litros de Diesel, um tanque de 10.000 litros de gasolina, um tanque de 10.000 litros de álcool, três filtros e 8 bombas. O piso da pista de abastecimento, pátio de estacionamento e o piso sobre os tanques eram em concreto armado. Em 1998 foi constatado que estes pavimentos apresentavam várias rachaduras e estavam em mau estado de conservação, podendo ter contribuído para transferir ao subsolo eventuais vazamentos ocorridos na superfície do local.

Em 1998 ocorreu um vazamento de óleo diesel sem registro de volume, detectado pela presença de produto em um poço cacimba de residência da estrada do povoado, Estrada Assembleia de Deus, a jusante do posto.

Em 1999 iniciou-se a remediação da área por bombeamento do aquífero e tratamento com carvão ativado nas estações de tratamento com carvão ativado nas estações de tratamento e efluentes. Foram instalados poços de monitoramento (PM) com diâmetro de 3” dentro e fora da área do posto e, também poços de bombeamento (PB) com diâmetro 8” nas proximidades dos poços de monitoramento que apresentavam maior espessura de lâmina de hidrocarbonetos. Adicionalmente, foi construída uma trincheira de 2,00 metros de comprimento por 0,50 metros de largura e 1,20 metros de profundidade no seu interior foi instalado um poço de injeção (PI) com diâmetro de 3, que recebia águas de rebaixamento do aquífero, após serem tratadas.

No final de 2011 foi feita avaliação de risco RBCA (Ação Corretiva Baseada no Risco) para estimar possíveis danos à saúde e ao meio ambiente provocados por vazamento de combustíveis. Foi constatada a presença de produto em fase livre no PM19 (1,5 cm de espessura de hidrocarboneto). Deste estudo foi constatado que as amostras de solo não ultrapassam os VOI (Valores Orientados de Intervenção) estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Entretanto, as amostras de água subterrânea

ultrapassam os limites para benzeno, tolueno, xileno e naftaleno, dentro e fora área do posto. Nesta época o consumo médio de combustível no posto era de 1,2 milhão litros/mês, sendo que 80% era óleo diesel.

No final de 2002, foram encontrados 36 cm de fase livre no PM-21 e presença de película nos poços PM-09 e PB-03. Foi constatado o mau estado de conservação da rede de poços de monitoramento e que, indevidamente, os poços cacimbas que deveriam estar desativados estavam com fácil acesso de uso pela população local. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) solicitou readequações nas redes de poços e remoção da fase livre encontrada.

Em meados de 2003, entrou em operação um novo sistema de bombeamento da fase livre e foram readequadas as redes de poços, de acordo com a solicitação da CETESB no ano anterior.

Em 2004 foram instalados tanques e bombas novas no posto, construção de canaletas no perímetro da cobertura, caixa separadora de água e óleo coletar eventuais derramamentos na pista e, construção de pavimento de concreto armado na pista de abastecimento e sobre os tanques novos. A instalação de tanques, bombas e linhas seguiu modelo ecológico com tubulações contínuas e de alta densidade, compartimentos de concentração de derrames e sensores de vazamentos. Posteriormente foram retirados os tanques antigos, sendo que o relatório técnico desta etapa citou um vazamento de linha diesel ocorrido em 2000 e outro vazamento de tanque diesel em 2003. Também foram apresentados resultados maiores que os de referência para o tolueno, xileno e naftaleno. A inspeção visual do solo removido não indicou presença hidrocarbonetos.

No final de 2004, para elaboração desta dissertação, foram realizados levantamentos geofísicos pelos métodos de eletrorrestividade e IP (Polarização Induzida), em duas linhas a jusante do Posto Gigio.

No início de 2005, continuando os trabalhos de setembro, as duas linhas anteriormente investigadas foram analisadas pelos métodos eletromagnéticos (EM) e georradar (GPR Ground Penetrating Radar).

No primeiro semestre de 2005 foram instalados novos poços de monitoramento, poços de extração multifásica, poços de extração de vapores e

um poço de injeção de ar. Os resultados das análises químicas da água subterrânea indicaram valores acima dos VOI nos PM-19 e PM-34.

A Figura 13 traz uma fotografia aérea do Posto Gigio com as duas linhas de investigação, sendo que a Linha 1 é a que se situa ao longo do canteiro central que separa as duas pistas da Rodovias Fernão Dias. A Linha 2 é da Estrada assembleia de Deus, de terra batida e tráfego de um pequeno povoado local.

Figura 13: Fotografia aérea do Posto Gigio (Atibaia-SP) com as linhas de investigação.



Fonte: Google Earth-acessado em abril de 2018

4.8.7 Geologia e Hidrogeologia da Área

A geologia local do Posto Gigio, é relatada a presença de uma camada de aterro com espessura de 0,30 a 3,00 metros, concentrando-se na área próxima aos tanques e nas imediações da Rodoviária Fernão Dias. Esta camada tem característica silto-argilosa contendo níveis de cascalho. Abaixo do aterro é identificada uma camada de argila orgânica pertencente à planície aluvial do Córrego da Divisa, afluente do Rio Atibaia. Na sequência, é caracterizado um perfil de alteração de rocha gnáissica com dois horizontes: o primeiro possui composição argila-arenosa e espessura variando de 1,30 a 10,00 metros; o segundo horizonte, subjacente ao anterior, apresenta

composição argilo-siltosa e espessura variando entre 1,00 a 7,00 metros. CETESB (2003).

4.8.8 Método Georradar-GPR

O *ground penetrating radar* (GPR) é um método geofísico desenvolvido há mais de 30 anos, que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, geralmente na faixa entre 10 MHz e 1000 MHz. Embora a sigla GPR (*ground penetrating radar*) seja muito utilizada, o ensaio também é conhecido com georradar, radar de penetração.

Uma das razões da popularidade do GPR é seu formato gráfico contínuo e de alta resolução, pois normalmente os dados do radar são interpretados pelo aspecto visual do gráfico impresso, permitindo rapidez na verificação das anomalias encontradas (BENSON E NOEL 1984). O GPR costuma ser citado como um dos métodos geofísicos que apresenta melhor resolução em subsuperfície, sendo muito apropriado para investigação rasas.

Uma vantagem do *ground penetrating radar* (GPR) em relação a outros métodos é a utilização de alta frequência, gerando dados de boa resolução. Entretanto, deve-se atender para escolha correta da frequência de operação, de maneira a obter-se a melhor relação entre penetração do sinal e a resolução do alvo que se deseja estudar. Altas frequências, por sua vez, propiciam baixas resoluções e maiores profundidades de penetração.

Embora o GPR seja um método conhecido como investigação rasas até 10m, OLHOEFT (1999) indica que a profundidade de investigação do GPR, na faixa de 1 a 1.000 MHz, varia de 5.400m no Polo Antártico e menos e 1m em água do mar e argila com montmorilonita. Porém, na maioria dos solos e rochas a penetração é menor que 10m.

Geralmente os melhores resultados são encontrados em áreas secas, rochosas e arenosas; enquanto os menos expressivos são obtidos em áreas úmidas, argilosas e em solos condutivos (BENSON E NOEL 1984). Devido ao bom desempenho em subsuperfícies resistivas, o GPR foi usado durante muitos anos em áreas com solos congelados e no mapeamento de espessuras de gelo Ártico e na Antártida.

Um dos fatores que limitam a profundidade de penetração do georradar é a atenuação das ondas eletromagnéticas nos materiais terrestres, sendo que a atenuação é resultado da conversão de energia eletromagnética em energia térmica devido a altas condutividades do solo, rocha ou fluidos (EPA 2003).

Portanto o método *ground penetrating radar* (GPR) apresentou melhores resultados em solos resistivos, que proporcionam maior penetração e melhores reflexões do sinal. O Posto Gigio não apresentou os resultados esperados pelo método GPR, revelou-se inadequados.

4.9 Legislação

Os compostos BTEX são contaminantes de alto nível, em razão disso as legislações ambientais tomam medidas mais severas para tentar reduzir a ação desses contaminantes. Tais legislações ambientais afirmam que o método de biorremediação só é válido se recuperar o solo integralmente. Visando a proteção do meio do ambiente e a segurança da população são propostas normas e leis de segurança nos postos de combustíveis. A Resolução ANP nº 12/2007, publicada no Diário Oficial da União em 22/03/2007, regulamenta a operação e desativação das instalações de ponto de abastecimento e estabelece os requisitos necessários à sua autorização.

O risco de acidentes nos postos de gasolina é uma problemática antiga, no ano de 2013, a Comissão de Constituição e Justiça e de Cidadania aprovou o então Projeto de Lei nº 866/2011, que regulamenta a construção e a reforma destes postos. De acordo com a ANP, o posto não é obrigado a trocar os seus equipamentos para atender ao sistema ecológico, porém, se o fizer, deverá encaminhar àquela agência a ficha com a alteração dos equipamentos. A ANP é responsável por fiscalizar os postos, estes quando não aderem às leis que lhe são impostas, são encaminhados diretamente para a lista de postos autuados/interditados. Para que haja a retirada desta lista, o revendedor tem algumas opções, dentre elas o pagamento de multa.

4.9.1 Toxicologia

Toxicologia é a ciência que estuda os mecanismos básicos pelos quais compostos químicos ou orgânicos vivos podem causar efeitos adversos à saúde humana. Os efeitos tóxicos podem ser não carcinogênicos e carcinogênicos (Maximiano,2001; CONCAWE,1992).

A toxicologia dos hidrocarbonetos é avaliada em função do tipo de exposição, que está relacionada ao caminho de entrada do composto do organismo e pode ser aguda, crônica ou sub-crônica, diferenciando-se pelo tempo e duração de exposição do indivíduo/receptor.

A contaminação dos corpos d'água por hidrocarbonetos pode representar um risco para os ecossistemas aquáticos e para a saúde humana. “Os efeitos variam, dependendo do composto. Alguns hidrocarbonetos são carcinogênicos e, portanto, podem aumentar o risco de desenvolvimento de câncer. Outros são tóxicos e podem causar diversos efeitos à saúde humana e aos organismos aquáticos”, (Domenico e Schwartz,1990).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante o que foi apresentado no presente trabalho é notório que o setor de gerenciamento de áreas contaminadas configura um grande desafio ambiental para órgãos reguladores, empreendedores e sociedade em geral, considerando que o uso dessas áreas pode conferir riscos à saúde humana. Neste trabalho, foi abordado um estudo de caso de contaminação de hidrocarbonetos no Auto Posto Gigio que está localizado na Rodovia Fernão Dias km 30, bairro Tanque em Atibaia (SP), ocupando uma área de 30.000km².

É oportuno esclarecer que, a contaminação por hidrocarbonetos está associada aos compostos como o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, hidrocarbonetos denominados BTEX. Ao contaminar as águas subterrâneas, esses compostos inviabilizam fontes alternativas de abastecimento e, quando ingeridos, dependendo da concentração e tempo de exposição, podem afetar o sistema nervoso central. O benzeno, o mais tóxico dos compostos, já está associado a cânceres.

Nesse sentido, a revisão de literatura teve como principal objetivo alertar, por meio de informações sobre as causas da contaminação do subsolo, causadas por vazamentos em postos de gasolina, os seus efeitos e as técnicas para o tratamento das áreas afetadas, especificando algumas estratégias utilizadas na remoção dos poluentes, além de apontar os principais derivados do petróleo atuantes na poluição.

De acordo com a pesquisa realizada, é notória a deficiência no armazenamento de gasolina. Apesar da tecnologia existente atualmente, ainda não foram desenvolvidos reservatórios com maior precisão ou resistência aos possíveis danos que o mesmo está sujeito. A poluição dos aquíferos, causada pelos derivados do petróleo, é um problema socioambiental, pois além de prejudicar a área afetada, a população também sofre danos. Diante do exposto acima é necessário que a regulamentação seja cumprida e que ocorra uma fiscalização com mais rigor aos postos de gasolina, objetivando a diminuição de riscos.

Como apresentado acima do pressuposto trabalho, o estudo de caso, foi avaliado a descrição da área e histórico da contaminação do Auto Posto Gigio que está localizado na Rodovia Fernão Dias km 30, bairro Tanque em Atibaia

(SP), ocupando uma área de 30.000km². Foi aplicado o método Georradar - GPR, a partir disto quando se emprega a geofísica na detecção de plumas de hidrocarbonetos é inadequado pressupor a direção dos resultados nas respostas elétricas e eletromagnéticas dos contaminantes, pois eles se relacionam com as variáveis de cada situação, tipo de hidrocarbonetos e suas associações.

Neste estudo de caso, em que se considera o vazamento como antigo, contrapondo-se ao modelo vigente em solos arenosos, foi encontrada pluma contaminante resistiva, provavelmente devido ao solo local ser fino, o que poderia provocar aderência do hidrocarboneto à superfície, dificultando a mobilidade dos íons e conseqüentemente ocasionando uma região mais resistiva.

Portanto o *ground penetrating radar* (GPR) não apresentou resultados correlacionáveis à contaminação, pois a antena escolhida possibilitou profundamente de investigação da ordem de 3m, enquanto o nível freático situava-se a mais de 5m, inviabilizando a detecção da contaminação na água subterrânea.

6.REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ANP 2007-Agência Nacional de Petróleo-<<http://www..anp.gov.br.htm>>. Acesso em: 07 abril 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 13786/97 - Seleção de Equipamentos e Sistemas para Instalações Subterrâneas de Combustíveis em Postos de Serviço. Rio de Janeiro, 1997. Acesso em: 01 de maio de 2018.

ATEKAWANA,E.A;SAUCK,W.A;WERKEMA,D.D.2000-Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated sites.Journal of Applied Geophysics , Amsterdam,V.44,n.2,p.167-180.

BAUGARTNER, A. & LIEBSCHER, H. J. Allgemeine Hydrologie-Quantitative Hydrologie; In Lehrbuch der Hydrlogie, bd. 1, Berlin-Stuttgart, 1996.

BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J. Ground water contamination: transport and remediation. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994.

BENSON, R.C; NOEL, M.1984- Geophysical Techniques for sensing buried wastes and waste migration (NTIS PB84-1984449) In: U.S.EPA Environmetal Monitoring Systemas Laboratory.

BITAR, O. Y. & ORTEGA, R. E. Gestão Ambiental; In OLIVEIRA, A. M. S. (ed.) & BRITO, S. N. A. (ed.) - Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo 1998.

BRASIL, Leis, etc. **Lei n. 8.974 de 05 de Janeiro de 1995**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/legis/leis/8974_95.htm>. Acesso em: 08 abril 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAUDE. Áreas contaminadas expondo população à riscos, Disponível em <http://www.saude.gov.br/>, Acesso em: 12 de agosto de 2017.

CASSIDY;J 2001-The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements.V.6,n.1,p.47-52.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2ed. São Paulo: CETESB, 2001.

CETESB 1999- Manual de Gerenciamento de Área Contaminadas-Capítulo Métodos Geofísicos.São Paulo,CETESB.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2001. Disponível em: <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/manual-de-gerenciamento/>. Acesso em: 20 de abril de 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, CONAMA. Resolução n. 273 de 29 novembro de 2000. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>> Acesso em: 18 de agosto de 2017.

Dados sobre áreas contaminadas e processos de remediação no estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>, Acesso em 13 agosto de 2017.

DANIELS, J.J.2000-Ground Penetrating Radar Fundamentals:ls;APPENDIX TO REPORT TO THE U.S.EPA,REGION.S.Chicago.

DANIELS,J.J;ROBERTS,R; VENDL,M.1995-Ground penetrating radar for the detection of liquids contaminants.Jound of Applied Geophysics,Amsterdam,V.33,n.1,p.195-207.

DELANEY,A.J;PEAPPLES,P.R;ARCONE,S.A.2000-Eletrical resistivity of frozen and petroleum conta minated fine-fine-graind sail.Cold Regions Science and Technology,ottawa,V.32,n.2-3,p.107-119.

DOMENICO, P.A.; E SCHWARTZ, F.W. (1990) -Tratabilidade de água subterrânea contaminada com hidrocarbonetos do petróleo. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005, CETESB, 2005. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>, Acesso em 12 de agosto de 2017.

EPA 2003. Overview of Federal Underground Storage tank Program. Disponível em <http://www.epa.gov/swerust1/overview>, acesso em 01 de julho de 2018.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. Progress in the management of Contaminated Sites in Europe. Ispra: Institute for Environment and Sustainability, 2014, 72 p

FEITOSA, F. A. C. – Hidráulica de Poços; in FEITOSA, F A.C. (coord.) & MANOEL, J.F. (coord.) – Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações; CPRM; Fortaleza, 1997.

FERNANDES, M. - Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos monoaromáticos em aquíferos contaminados com gasolina. (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC. Florianópolis, 1997.

FETTER, C.W. Contaminant Hydrogeology; Prentice – Hall; Nova Jersey, 1992. Applied Hydrogeology 4th ed.; Prentice – Hall; Nova Jersey, 2001.

FETTER, C.W. 1999-Contaminant Hydrogeology. 2 ed. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 500 p.

GUGUER, N. 1996-Poluição de Águas Subterrâneas e do solo causados por vazamentos em posto de abastecimento.

HIDROPLAN, Hidroplan. Hidrogeologia e Planejamento Ambiental: Hidrogeologia e Planejamento Ambiental. 2018. Disponível em: <<http://www.hidroplan.com.br/index.php>>. Acesso em: 05 dez. 2017.

IBGE 2003-Instituto Brasileiro de Geografia Estatística <<http://www.ibge.gov.br.htm>>. Acesso em: 07 abril 2018.

KITTEL, J.A., HINCHEE, R. H. & MILLER, R. Bioslurping-Vacuum Enhanced Free Product Recovery Coupled with Bioventing: A case study Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater, 1994 NGWA/API Conference Proceedings, Houston; In U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Multi-Phase Extraction: State-of-the-Practice; EPA 542-R-99-004, 1999.

KHAN, F. I.; HUSAIN, T.; HEJAZI, R. An overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management, v. 71, n. 2, p. 95–122, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003/>. Acesso em 21 de abril de 2018.

KRESIC, N. Quantitative Solutions in Hidrogeology and Groundwater Modeling, LEWIS PUBLISHERS, Boca Raton, 1997.

MAXIMIANO A.M.S. (2001) - Determinação de Níveis Aceitáveis no Ambiente para Hidrocarbonetos Utilizando o Procedimento de Ação Corretivas Baseadas no Risco (RBCA) Aplicação para a Cidade de São Paulo. São Paulo 221 p. (Dissertação de Mestrado-Instituto de Geociências -USP).

MANOEL, J.F. Contaminação das Águas Subterrâneas; In FEITOSA, F A.C. (coord.) & MANOEL, J.F. (coord.) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações; CPRM; Fortaleza, 1997.

NADIM, F.; HOAG, G. E.; LIU, S.; CARLEY, R. J.; ZACK, P. Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview. J. of Petrol.Sci. and Eng., v.26, p. 169-178, 1999.

NBR 13895/97 - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem. Rio de Janeiro, 1997. Acesso em 15 de março de 2018.

NYER, E. K. Groundwater and Soil Remediation: Pratical Methods and Strategies; Ann Arbor Press; Chelsea, 1998.

OLIVEIRA, Everton.Hidroplan, cursos e lista: hidrogeologia e planejamento ambiental.Hidroplan, 2017.Disponível em <http://www.hidroplan.com.br/cursos_lista.php>. Acesso em 26 de agosto de 2017.

OLIVEIRA, E.1992-Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos provenientes da vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo. São Paulo,112 p. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, L. I.; LOUREIRO, C. O. Contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em Belo Horizonte: avaliação preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10., 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1998.

OLHOEFT,G.R.1992-Geophysical Derection of Hydrocarbon and organic chimacal contamination In: PROCEEDINGS ON APPLICATION OF GEOPHYTSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMETAL PROBLEM, o akbrook,p.587-595.

OLHOEFT,G.R.1999-Applications and Frustrations in using ground penetrating radar.In:PROCEEDINGS ULTRA WIDEBAND CONFERENCE,Washington,p.27-29.

PENNER, G. C. Estudos Laboratoriais da Contaminação do Solo por Gasolina com o Uso de Detetor de Fotoionização. São Carlos, 2000. 109p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000. Acesso em: 07 abril 2018.

PEREIRA, M.A.C. (2000) -Alteração da espessura da fase livre da gasolina sob ação co-solvente do etanol. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Resolução n. 293 de 12 dezembro de 2001. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=290>. Acesso em 19 de agosto de 2017.

RUSSEL, J.B.2004-Química Geral.2 ed.São Paulo,Pearson Makron Books.V.1,527 p.

SAUCK, W.A.; ATEKAWANA, E, NASH.M.1998-High Conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated by geophysical techniquis. V2, M.3, p.203.

SAUCK, W.A.2000-A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and the environs in sanoly sediments.V.44, n.2, p.151-165.

SAUK,W.A;ATEKAWAMA,E;NASH,M.1998-High Conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated by gephysical techniques.Journal of Environmental and Engineering Geophysies Publications,Colorado,V.2,n.3,p.203.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency - USEPA. Cleaning Up Underground Storage Tank (UST) Releases. Disponível em:
<https://goo.gl/WBj6DY>. Acesso em: 30 abril 2018.