

**UNIVERSIDADE SAGRADO CORAÇÃO**

**RENATA JULIANA VASQUES**

**A BIORREMEDIAÇÃO COMO UMA FERRAMENTA  
PARA DESCONTAMINAÇÃO DE SOLOS**

BAURU  
2011

**RENATA JULIANA VASQUES**

**A BIORREMEDIAÇÃO COMO UMA FERRAMENTA  
PARA DESCONTAMINAÇÃO DE SOLOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Química, sob orientação da professora Ms. Alessandra Bizan de Oliveira Stetner.

BAURU  
2011

V335b	<p>Vasques, Renata Juliana</p> <p>A biorremediação como uma ferramenta para a descontaminação de solos / Renata Juliana Vasques -- 2011. 47f.: il.</p> <p>Orientadora: Profa. Ms. Alessandra Bizan de Oliveira Stetner</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Sagrado Coração – Bauru – SP.</p> <p>1. Biorremediação. 2. Petróleo. 3. Descontaminação. 4. Microrganismo. I. Stetner, Alessandra Bizan de Oliveira. II. Título.</p>
-------	---

**RENATA JULIANA VASQUES**

**A BIORREMEDIAÇÃO COMO UMA FERRAMENTA PARA  
DESCONTAMINAÇÃO DE SOLOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Química, sob orientação da professora Ms. Alessandra Bizan de Oliveira Stetner.

Banca examinadora:

---

Prof. Ms. Carlos Henrique Conte  
Universidade Sagrado Coração

---

Prof. Dr. Ana Paula Cerino Coutinho  
Universidade Sagrado Coração

---

Prof<sup>a</sup>. Ms. Alessandra Bizan de Oliveira Stetner  
Universidade Sagrado Coração

Bauru, \_\_\_\_ de dezembro de 2011.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me deu força e persistência nos momentos mais difíceis e que permitiu essa minha realização. Aos meus pais e minha família que sempre estiveram ao meu lado durante todas as etapas sempre me apoiando, ao meu namorado Cezar pelo incentivo e paciência durante a realização deste, aos meus amigos em especial Aline e Josiane que são muito importantes. Aos mestres que com paciência e dedicação me ajudaram chegar até aqui. A minha orientadora Alessandra, que sempre pronta e atenciosa me ajudou, dedico esse trabalho.

## RESUMO

A biorremediação é uma técnica de descontaminação de ambientes por micro-organismos degradadores. Esse processo vem sendo muito utilizado para recuperação de áreas contaminadas por petróleo e seus derivados e tem se mostrado eficiente. Os micro-organismos utilizam os hidrocarbonetos do petróleo como fonte de carbono em seus processos metabólicos e reduzem a concentração e/ou toxicidade dos compostos poluentes. Pode ocorrer de forma aeróbia ou anaeróbia, *in-situ* ou *ex-situ*. A escolha da técnica a ser utilizada dependerá de cada situação, devendo ser analisada suas particularidades. Os fatores como pH, temperatura, umidade, disponibilidade de nutrientes e oxigênio também deverão ser observados para o resultado esperado.

O presente trabalho teve o objetivo de descrever os principais meios de recuperação de áreas por meio de biorremediação com enfoque em recuperação de solos degradados por derramamento de petróleo e seus derivados.

Palavra-chave: Biorremediação. Petróleo. Descontaminação. Micro-organismos.

## **ABSTRACT**

Bioremediation is a technique for decontaminating environments degrading microorganisms. This process has been widely used in the decontamination of environments contaminated by petroleum and its derivatives and has been shown effective. The microorganisms use petroleum hydrocarbons as a source of carbon in their metabolic processes and reduce the concentration and / or toxicity of polluting compounds. It can occur in aerobic or anaerobic, in-situ or ex situ. The choice of technique to be used will depend on each situation must be analyzed its characteristics. Factors such as pH, temperature, humidity, availability of nutrients and oxygen should also be observed to the expected result.

This study aimed to describe the principal means of reclamation through bioremediation focus on restoration of degraded soils by crude oil and its derivatives.

Word-key: Bioremediation. Oil. Degradation. Decontamination. Bioremediation techniques. Micro-organisms.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>BIORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>9</b>
2.1	AERÓBIA.....	12
2.2	ANAERÓBIA.....	12
2.3	<i>IN – SITU</i> .....	13
2.4	<i>EX – SITU</i> .....	13
<b>3</b>	<b>FATORES DETERMINANTES NA BIORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>APLICABILIDADE DA BIORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>TEMPO DE BIORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
6.1	PASSIVA.....	20
6.2	BIOESTIMULAÇÃO.....	21
6.3	BIOVENTILAÇÃO.....	21
6.4	<i>BIOSLURPIN</i> .....	23
6.5	BIOAUMENTAÇÃO.....	23
6.6	<i>AIR SPARGING</i> .....	24
6.7	<i>LANDFARMING</i> .....	25
6.8	COMPOSTAGEM.....	26
6.9	SISTEMA DE BIORREATORES.....	27
6.10	BIOPILHAS.....	29
<b>7</b>	<b>FITORREMEDIAÇÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>PRODUTOS PETROQUÍMICOS.....</b>	<b>31</b>
8.1	CONTAMINAÇÃO POR PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS.....	33
8.2	BIORREMEDIAÇÃO DOS SOLOS CONTAMINADOS POR PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS.....	37
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento crescente da sociedade moderna e contemporânea é fundamentada na exploração do petróleo. O aumento desta demanda e o mundo cada vez mais capitalista, implica no alto risco de derrames acidentais levando a graves conseqüências, que com a biorremediação podem ser minimizados, mas nem sempre totalmente eliminados (PEREIRA; LEMOS, 2004).

Segundo Silveira (1999, *apud* SPAREMBERGER, 2004), problemas ambientais que eram apenas tratados de forma local, em razão da proximidade das vítimas, ganharam universalidade, e hoje são tratados como um problema para a qualidade de vida do homem e das futuras gerações.

Nas duas ultimas décadas, se tem notado um verdadeiro ataque ao ecossistema, onde a poluição causada pelo petróleo e seus derivados tem sido um dos principais problemas ao meio ambiente (CUSTANCE *et al.* 1992 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Dessa forma, houve grande necessidade de desenvolver técnicas que incluem métodos físicos, químicos e biológicos para remediar as áreas contaminadas por petróleo e seus derivados (PEREIRA; LEMOS, 2004).

A biorremediação tem sido uma técnica de descontaminação de crescente pesquisa, pois tem como vantagem oferecer maior segurança e uma menor perturbação ao meio ambiente, além de ser uma ferramenta eficiente a baixo custo (ABBAS, 2003 *apud* SANTOS, *et al.*, 2007).

De acordo com Carneiro e Gariglio (2010), trata-se de um processo no qual se utiliza micro-organismos na remoção de contaminantes tóxicos do meio ambiente, sendo utilizados tanto os micro-organismos do próprio ambiente como também culturas geneticamente modificadas, especialmente adaptadas para uma determinada situação. As substâncias tóxicas são transformadas em atóxicas através do metabolismo microbiano (PELCZAR JR, *et al.*, 1997 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

Esse processo possui grande aplicabilidade e a otimização do mesmo depende das condições ambientais, do tipo de contaminante e da técnica empregada. Os tratamentos se diferenciam por ser "*in situ*" (quando é realizado no próprio local) ou "*ex situ*" (quando há remoção do contaminante para tratamento em outro ambiente). (CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

Inovadora, essa técnica merece atenção e incentivo nos processos de recuperação ambiental, já que se tem mostrado muito eficiente em áreas degradadas. (CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

Portanto, esse trabalho tem como objetivo descrever os principais meios de recuperação de áreas por meio da biorremediação, tendo como enfoque a recuperação de solos degradados por derramamento de petróleo e seus derivados.

Para a realização desse trabalho foi feito uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto por meio da utilização de artigos científicos, livros e revistas especializadas sobre biorremediação.

## 2 BIORREMEDIAÇÃO

De acordo com Gaylard; Bellinaso; Manfio (2005) a biorremediação é um processo no qual, organismos vivos, normalmente plantas ou micro-organismos, são utilizados tecnologicamente para remover ou reduzir (remediar) poluentes no meio ambiente.

No Brasil, a técnica de biorremediação ainda é pouco utilizada, porém, pode ser promissora e eficiente se utilizada nas áreas contaminadas, já que o país apresenta solos e temperaturas favoráveis (GLOEDEN, 2008 *apud* BORGES, *et al.*, 2008).

A biorremediação visa o controle de riscos, atendendo sempre às normas legais, ao bom senso e ao princípio de que a medida será razoável se o risco residual ou contaminação residual forem toleráveis (PAUL; CLARK, 1989 *apud* SILVA, FERREIRA; FERREIRA, 2011). O processo de biorremediação tem sido intensamente pesquisado e recomendado pela comunidade científica atual como alternativa viável para o tratamento de ambientes contaminados, tais como águas superficiais, subterrâneas e solos, além de resíduos e efluentes industriais despejados em aterros ou áreas de contenção (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

A completa biodegradação de um substrato, como os resíduos oleosos, é chamada de mineralização e resulta na formação de biomassa microbiana, CO<sub>2</sub>, água e produtos inorgânicos (ALEXANDER, 1980 *apud* SOUZA 1999).

Embora outras tecnologias que usam processos físico e/ou químicos sejam também indicadas para descontaminar ambientes poluídos, o processo biológico de biorremediação é uma alternativa ecologicamente mais adequada e eficaz para o tratamento de ambientes contaminados com moléculas orgânicas de difícil degradação, metais tóxicos, entre outros (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Mesmo com todos os benefícios, sua utilização deve ser avaliada criteriosamente, pois, existem compostos não biodegradáveis e/ou seus produtos metabólicos intermediários serem mais tóxicos que os próprios compostos originais. Desta forma, o uso da biodegradação pode ser mais prejudicial do que a própria contaminação e, nesses casos, o uso da técnica não é aconselhável (CRAWFORD; CRAWFORD, 1996 *apud* ROSA, 2001).

O Quadro 1 demonstra as vantagens e desvantagens do processo de biorremediação:

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Feita no próprio local contaminado	Alguns contaminantes não degradam
Trata-se de uma técnica barata	Necessidade de monitoramento
Redução permanente de contaminantes	Requer um local específico
Aceitação pública positiva	Toxicidade dos poluentes
Recuperação da área contaminada	Intensa pesquisa de biorremediação
Eliminação de custo com transporte	Pode gerar produtos poucos conhecidos
Pode ser usada junto à outra técnica	Técnica pode não ser apropriada

Quadro 1: vantagens e desvantagens do processo de biorremediação  
Fonte: Adaptado de Cookson (1995)

Existem vários micro-organismos responsáveis por diminuir a contaminação do ambiente, tais como as bactérias, os fungos e as leveduras. Embora muitos destes tenham a necessidade nutricional igual a de seres humanos, outros metabolizam substâncias como: metais pesados, petróleo, enxofre, gás nitrogênio, xenobióticos, mercúrio e até mesmo os PCBs (Bifenil Policlorados) (ABBAS, 2003 *apud* TORTORA, *et al.*, 2005 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010). Os micro-organismos podem ser encontrados praticamente em todos os lugares no nosso planeta, tendo uma contribuição muito grande para a manutenção do equilíbrio entre os seres vivos e os compostos químicos do nosso ambiente (TORTORA, *et al.*, 2005, *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

A biorremediação é baseada em três princípios básicos e imprescindíveis: a presença do micro-organismo com capacidade metabólica, a disponibilidade do contaminante e as condições ambientais adequadas para o crescimento e atividade microbiana (PEREIRA; LEMOS, 2005).

O tratamento das áreas contaminadas envolve a identificação da fonte de contaminação e da extensão da área atingida, o conhecimento das características da área e dos contaminantes envolvidos, e informações quanto à legislação aplicável (RISER-ROBERTS, 1998 *apud* KHAN; HUSAIN; RAMZI, 2004 *apud* FERREIRA 2010).

Quando se fala de descontaminação, não se pode deixar de lembrar dos derramamentos de petróleo, onde segundo Aislabe *et al.*, (2004); Marin *et al.*, (2006); Andrade; Augusto; Jardim (2010), estas ocorrências vem motivando a realização de pesquisas relacionadas com a remediação de sítios contaminados.

Independente do processo em que o tratamento é conduzido, as técnicas de biorremediação podem ser realizadas no local do derrame (*in situ*) ou fora deste (*ex situ*), envolvendo inúmeros procedimentos, tais como: biorremediação passiva; bioventilação; “*landfarming*”; compostagem; bioestimulação e bioaumentação (MOREIRA, 2002 *apud* PEREIRA; LEMOS, 2005).

A biorremediação *in-situ* é a mais empregada no mundo. Porém, independente do local de aplicação, a biorremediação, assim como as demais técnicas químicas de degradação, tem como objetivo principal a mineralização completa dos contaminantes, ou seja, transformá-los em produtos com pouca ou nenhuma toxicidade (inócuos), como  $\text{CO}_2$  e água. Em suma, os microrganismos metabolizam as substâncias orgânicas, das quais se obtêm nutrientes e energia. Sendo que, para que isso ocorra, os microrganismos devem estar ativos para desempenharem a sua tarefa de biodegradação (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM 2010).

A Figura 1 mostra de maneira simplificada o processo de biorremediação.

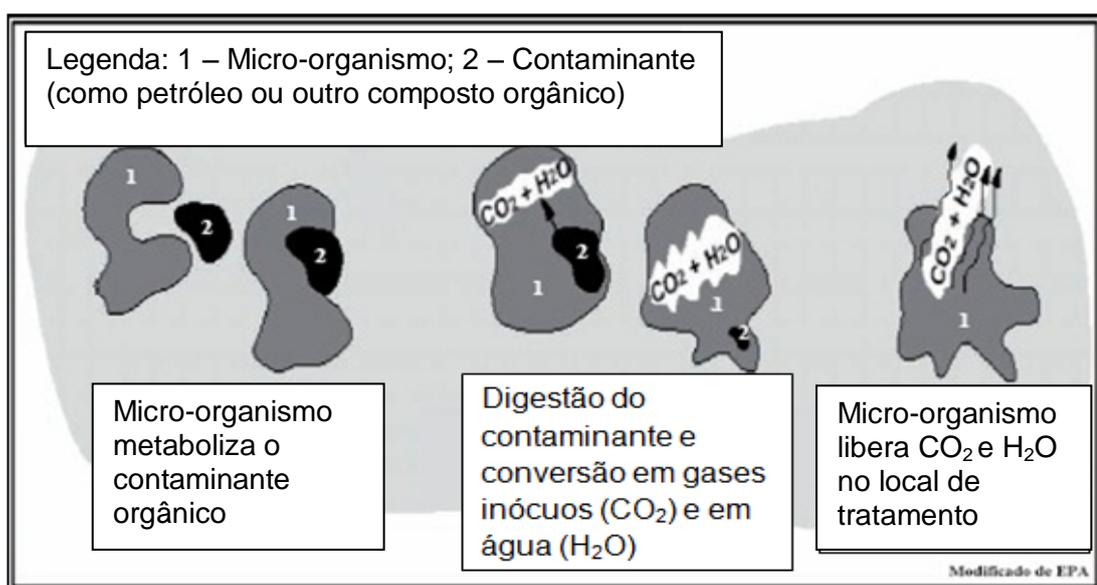


Figura 1: Processo de biorremediação  
Fonte: Adaptado de EPA (2000)

A biorremediação pode ser:

## AERÓBIA

Nesse caso, o oxigênio serve como um receptor de elétrons externo e parte do carbono do contaminante é oxidado pelo oxigênio molecular gerando CO<sub>2</sub> e, a parte não oxidada, é utilizada na produção de biomassa celular (BRITO *et al.*, 2004 *apud* SANTOS, 2007).

Quando o oxigênio é totalmente consumido, os micro-organismos passam a utilizar outros receptores naturais de elétrons disponíveis no solo, sendo que esse consumo ocorre na seguinte ordem de preferência: nitrato (reação de desnitrificação), manganês, ferro, sulfato e dióxido de carbono, sendo este, convertido em ácidos orgânicos para gerar o metano (AELION; BRADLEY, 1991 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM 2010).

## ANAERÓBIA

Suportam a atividade microbiana na ausência de oxigênio. Nesse caso, os micro-organismos hidrolisam os compostos químicos do solo para liberar a energia necessária por reações também mediadas por enzimas. Porém, o nitrato, sulfato, gás carbônico, e outras combinações oxidadas (excluindo oxigênio) servem como aceptores de elétrons. Os produtos da respiração anaeróbia podem ser formas reduzidas de metais, metano, sulfeto de hidrogênio e gás nitrogênio (MORAIS, 2005 *apud* SANTOS, 2007).

Apesar de o tratamento anaeróbio ser menos comum que o aeróbio, existe atualmente uma tendência de se promover a biorremediação anaeróbica, utilizando como fontes de carbono, melação de cana, ácido lático, proteínas do leite e metanol (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

### *IN - SITU*

As técnicas de remediação “in situ”, são utilizadas quando não há necessidade de remoção do material, sendo que a biorremediação pode ocorrer no local onde o processo será conduzido. Isso evita custos e distúrbios ambientais associados ao movimento do material contaminado para o local de tratamento (JACQUES *et al.*, 2007).

Tem como desvantagens a necessidade de adequação das condições do local contaminado e o elevado tempo necessário para que ocorra a descontaminação (BAPTISTA, 2003 *apud* FERREIRA, 2010).

### *EX - SITU*

Esta técnica é utilizada quando há necessidade de remoção do material contaminado para uma área externa onde o tratamento será efetuado (*ex situ*). Sendo que na maioria dos casos de tratamento *ex situ* o material removido é devolvido ao local de origem (JACQUES *et al.*, 2007).

São realizadas em menor prazo uma vez que permitem estabelecer as condições ideais para a atividade microbiana. Entretanto, faz-se necessária a prévia remoção do material contaminante, implicando na escavação do local contaminado e o transporte de todo o material coletado até a área de tratamento (BAPTISTA, 2003 *apud* FERREIRA, 2010).

O sucesso da biorremediação, seja ela *in situ* ou *ex situ*, está ligado a uma compreensão abrangente das condições locais e a uma avaliação criteriosamente da aplicabilidade de uma determinada tecnologia (STIER, 2004 *apud* SANTOS, 2007).

### 3 FATORES DETERMINANTES NA BIORREMEDIAÇÃO

Existem diversos fatores que podem influenciar o processo de biorremediação e devem ser monitorados minuciosamente, tanto na etapa de investigação inicial auxiliando na escolha da melhor tecnologia a ser aplicada, quanto no monitoramento ao longo do tempo de processo. Dos fatores a serem observados, estes incluem a temperatura, o tipo de solo, o tipo de contaminante e sua concentração, disponibilidade de nutrientes e de oxigênio e a concentração de micro-organismos no local impactado (SCHROEDER et al., 2002; MOLINA-BARAHONA et al., 2004; CHAÎNEAU et al., 2005 *apud* SANTOS 2007).

Biorremediação é a aceleração do processo de biodegradação, dessa forma, pode estar limitada à disponibilidade de nutrientes, a umidade, a temperatura, ao pH, a concentração de minerais, ao potencial redox, a natureza do contaminante e as características físicas e químicas dos ambientes contaminados (SOUZA; TRIGUIS, 2005).

Tocchetto e Coutinho (2006), afirma que o desenvolvimento de micro-organismos que vão degradar as moléculas dos resíduos tóxicos exige condições bem definidas, sem as quais os microrganismos não se desenvolvem.

Coneglian (2009) diz que os locais a serem tratados devem estar preparados para suportar a ação dos micro-organismos. Para cada tipo de contaminante, indicam-se espécies diferentes de micro-organismos para o processo de biorremediação.

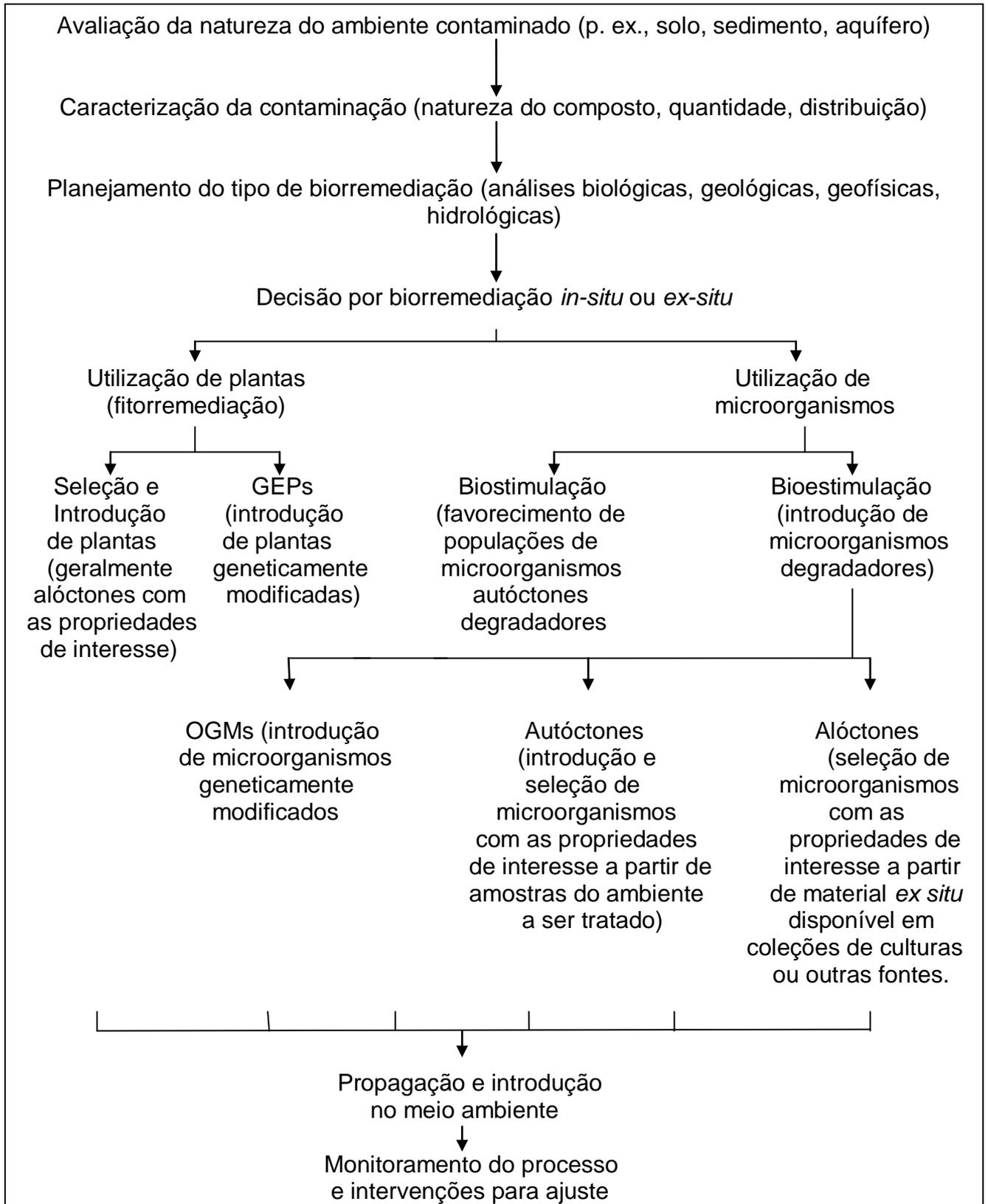
Os poluentes orgânicos possuem uma estrutura química que influenciam a habilidade dos micro-organismos metabolizarem estas moléculas, principalmente na biodegradação (MARIANO, 2006 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

Para que esse processo ocorra de forma esperada, os micro-organismos devem estar ativos e saudáveis (TOCCHETTO; COUTINHO, 2006). Algumas medidas biocorretivas devem ser tomadas, visando aumentar a população microbiana e proporcionando uma condição ambiental ótima (ABBAS, 2000 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

É necessário a avaliação das características físico – químicas e nutricionais do meio externo e o compartimento intracelular microbiano, pois estão estritamente relacionados. Mesmo que um sistema microbiano possua todos os requisitos bioquímicos e genéticos necessários para a degradação, se as características físico

– químicas e componentes nutricionais do meio não condizem com as necessidades metabólicas do microrganismo, a biodegradação não ocorrerá de forma eficiente (GAYLARD; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Gaylarde; Bellinasso; Manfio (2005) demonstram no Fluxograma 1 um esquema geral das etapas para definição e implementação de um processo de biorremediação.



Fluxograma 1. Esquema geral das etapas para definição e implementação de um processo de biorremediação.

Fonte: Gaylarde; Bellinaso; Manfio (2005)

#### 4 APLICABILIDADE DA BIORREMEDIAÇÃO

Para que o tratamento traga resultados satisfatórios, é de fundamental importância o conhecimento dos princípios e das técnicas. Isso possibilita uma utilização e seleção correta de acordo com as condições específicas de cada local e de cada contaminante presente (JACQUES, *et al.*, 2007).

Deve-se analisar o impacto da contaminação no ambiente, a tendência de degradação de cada composto e as condições necessárias para a biodegradação (COOKSON, 1995 *apud* ROSA 2001).

Vários contaminantes podem ser tratados biologicamente com sucesso. Estes incluem petróleo bruto; hidrocarbonetos do petróleo como gasolina, óleo diesel, combustível de avião; pesticidas; preservativos de madeira; solventes diversos, lodo de esgoto urbano industrial (BORGES *et al.*, 2008).

De acordo com Nunes (2008 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010), a presença de substâncias químicas estranhas ao ambiente natural provoca um desequilíbrio físico-químico que, por sua vez, induzirá uma série de transformações nesse local até que seja atingida uma nova condição de equilíbrio.

O Quadro 2 mostra as aplicabilidades da biorremediação em determinadas contaminações.

Classe do contaminante	Frequência	Evidência de Sucesso	Limitações
<b>1. Hidrocarbonetos e derivados</b>			
Gasolina e óleo	Muito freqüente	Fácil, biorremediação aeróbica e anaeróbica	Formação de fase livre e leve (LNAPL).
Poliaromáticos (naftaleno e antraceno)	Comum	Biorremediação aeróbia sob condições específicas.	Forte absorção em superfície.
Álcool, acetona e éster	Comum	Fácil remediação aeróbia e anaeróbica.	
Éter	Comum	Biorremediação aeróbia e anaeróbica sob condições específicas.	
<b>2. Halogenados alifáticos</b>			
Altamente clorados – PCE, TCE	Muito freqüente	Cometabolizado em condições anaeróbicas e aeróbicas em casos específicos.	Forma fase livre densa (DNAPL).
Fracamente clorados – VC	Muito freqüente	Biorremediação aeróbia em condições específicas e cometabolizado em condições anaeróbicas.	Forma fase livre densa (DNAPL).
<b>3. Halogenados Aromáticos</b>			
Altamente clorados (hexaclorobenzeno pentaclorofenol)	Comum	Bioremediação aeróbia sob condições específicas e cometabolizado em condições anaeróbicas.	Absorve em superfície. Forma fase líquida (NAPL) e sólida (NASP).
Fracamente clorados – cloro e diclobenzeno	Comum	Fácil biorremediação aeróbia.	Forma fase líquida (NALP).
<b>4. Bifenilas Policloradas</b>			
Altamente clorados	Pouco freqüente	Cometabolizado em condições anaeróbicas.	Absorve fortemente em superfície.
Fracamente clorados	Pouco freqüente	Biorremedição aeróbicas sob condições específicas.	Absorve fortemente em superfície.
Nitroaromáticos	Comum	Biorremedição aeróbia e anaeróbica.	
<b>5. Metais</b>			
Cr, Cu, Ni, PB, Hg, Cd, Zn etc	Comum	Processos microbianos afetam sua solubilidade e reatividade.	Disponibilidade altamente variável, controlada pelas condições químicas.

Quadro 2: Aplicabilidade da biorremediação  
Fonte: Adaptado de CETESB – GTZ ([2011])

## 5 TEMPO DE BIORREMEDIAÇÃO

O tempo estimado de uma biorremediação é complexo e de difícil obtenção, geralmente é estimada a demanda de oxigênio consumida pela população microbiana do solo. O termo meia vida de degradação é empregado para expressar o tempo em que 50% do composto é degradado. O aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> eliminado pela população microbiana indica a multiplicação de bactérias, fungos e actinomicetos (VANDECAVEYE, 1939 *apud* SOUZA 1999). Este aumento na atividade respiratória sugere que o composto orgânico está em processo de degradação.

A técnica de bioestímulo tem sido utilizada com o interesse de diminuir o tempo de biorremediação, sendo uma vantagem da técnica (BENTO *et al.*, 2005 *apud* ALMEIDA; SILVA, 2010).

Geralmente é feito o monitoramento da quantidade de contaminante no solo para verificar a eficiência e o estado de biodegradação. Porém, a formação de compostos intermediários pode influenciar na determinação do estado de degradação do resíduo (SOUZA 1999).

## 6 TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO

Segundo Peloggia (2011), existem vários tipos de biorremediação – a passiva, a bioestimulada, a bioventilação, a bioaugmentação e a compostagem. Porém, nem todos os contaminantes são facilmente tratados por essas técnicas. Os metais pesados como cádmio e chumbo não são absorvidos nem capturados prontamente pelos micro-organismos, porém podem ser transformados em compostos menos perigosos.

Cabe salientar que em cada caso de contaminação do solo, as soluções para a remediação são particulares. Muitas vezes o melhor método é a combinação ou modificação das técnicas (SOUZA, 1999).

### 6.1 PASSIVA

Biorremediação passiva, atenuação natural, remediação intrínseca, bioatenuação, são sinônimos da técnica. Trata-se de um método de tratamento *in situ* que usa processos naturais biológicos, químicos e físicos (KHAN *et al.*, 2004 *apud* SANTOS, 2007).

Utiliza-se um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos, que degrada o poluente no solo e na água sem intervenção humana (PEREIRA, MARQUES, 2010).

A biorremediação passiva ocorre sem acréscimo de nutrientes ou adequação de qualquer condição ambiental, os micro-organismos presentes no local utilizam o composto orgânico poluente como fonte de carbono, reduzindo assim sua concentração com o tempo (MENEGETTI, 2007 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010). Pode exigir a conciliação de outras técnicas, pois é muito lenta por depender exclusivamente dos processos naturais (JACQUES, *et al.*, 2007).

Das vantagens desse processo, o custo-benefício é o de maior destaque, tendo em vista que está relacionado somente aos custos de avaliação local e monitoramento (JOHNSTON; DAVIS, 1997; ALVAREZ, 2004 *apud* SANTOS 2007).

De acordo com Santos (2007) essa técnica não é indicada para um elevado grau de contaminação e de comprometimento do local contaminado, tendo em vista que por ser um processo mais lento, pode apresentar riscos à população.

## 6.2 BIOESTIMULAÇÃO

De acordo com Coneglian (2009) também é conhecida como biorremediação acelerada, onde se empregam técnicas para estimular a degradação dos contaminantes.

A aceleração da atividade microbiana é feita com acréscimo de nutrientes orgânicos e inorgânicos (JACQUES, *et al.*, 2007).

Com a adição de populações de micro-organismos autóctones, as taxas de biodegradação aumentam de 5 a 10 vezes e conseqüentemente diminui consideravelmente o tempo de tratamento (ATLAS, 1997 *apud* MARIANO, 2006 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010). Vários nutrientes devem estar disponíveis no meio ambiente, pois os micro-organismos não dependem somente da energia do carbono; o nitrogênio e o fósforo são considerados fatores limitantes para a degradação microbiana. (LIEBEG; CUTRIGHT, 1999 *apud* BAPTISTA, 2003 *apud* CARNEIRO E GARIGLIO, 2010).

No caso do local bioestimulado acontecerá o aumento da atividade microbiana como descrito na Figura 2.

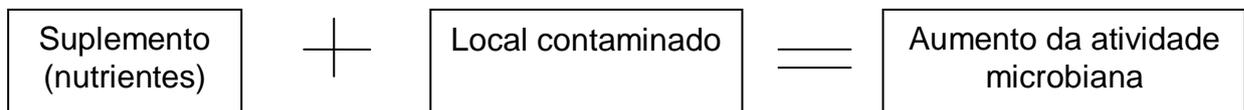


Figura 2: Esquema de biorremediação por bioestimulação.  
Fonte: Elaborado pelo autor

## 6.3 BIOVENTILAÇÃO

A bioventilação consiste na injeção de ar no solo contaminado para maximizar a biodegradação *in situ* e minimizar, ou eliminar, a volatilização dos contaminantes para a atmosfera (TRINDADE, 2002 *apud* SANTOS, 2007).

É uma importante técnica de remoção, que utiliza a volatilização da massa do contaminante (PEREIRA, MARQUES, 2010). O ar é retirado através de exaustores ou injetado através de ventiladores, facilitando a remoção de compostos voláteis e promovendo a aeração para a biodegradação aeróbia (GRUIZ; KRISTON, 1995 *apud* SOUZA 1999).

Caracteriza-se por adição de gases estimulantes, como  $O_2$  e  $CH_4$ , para aumentar a atividade microbiana decompositora (DINIZ, et al., 2011).

Tem como vantagem a minimização da extração de vapores, a utilização de equipamentos de fácil instalação e aquisição, a atuação em locais de difícil acesso e o pequeno impacto na área contaminada (CETESB ON-LINE *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010). É muitas vezes escolhido pela utilização de poucos equipamento, pelo tempo estimado de 6 meses a 2 anos e custo relativamente baixo (USEPA, 2004 *apud* SANTOS, 2007) .

Há certas limitações como baixa umidade, presença de lençol freático alto, solos com pouca permeabilidade e temperaturas amenas (FRTR ON-LINE traduzido *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

Existem critérios importantes a serem observados para que se tenha o resultado esperado. Primeiro, o ar injetado deve ser capaz de passar através das camadas do solo em quantidade suficiente para manter condições aeróbias. Segundo, a população microbiana degradante deve estar presente em grandes concentrações (FRTR ON-LINE traduzido *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

A Figura 3 representa o modelo de bioventilação no tratamento de solos contaminados.

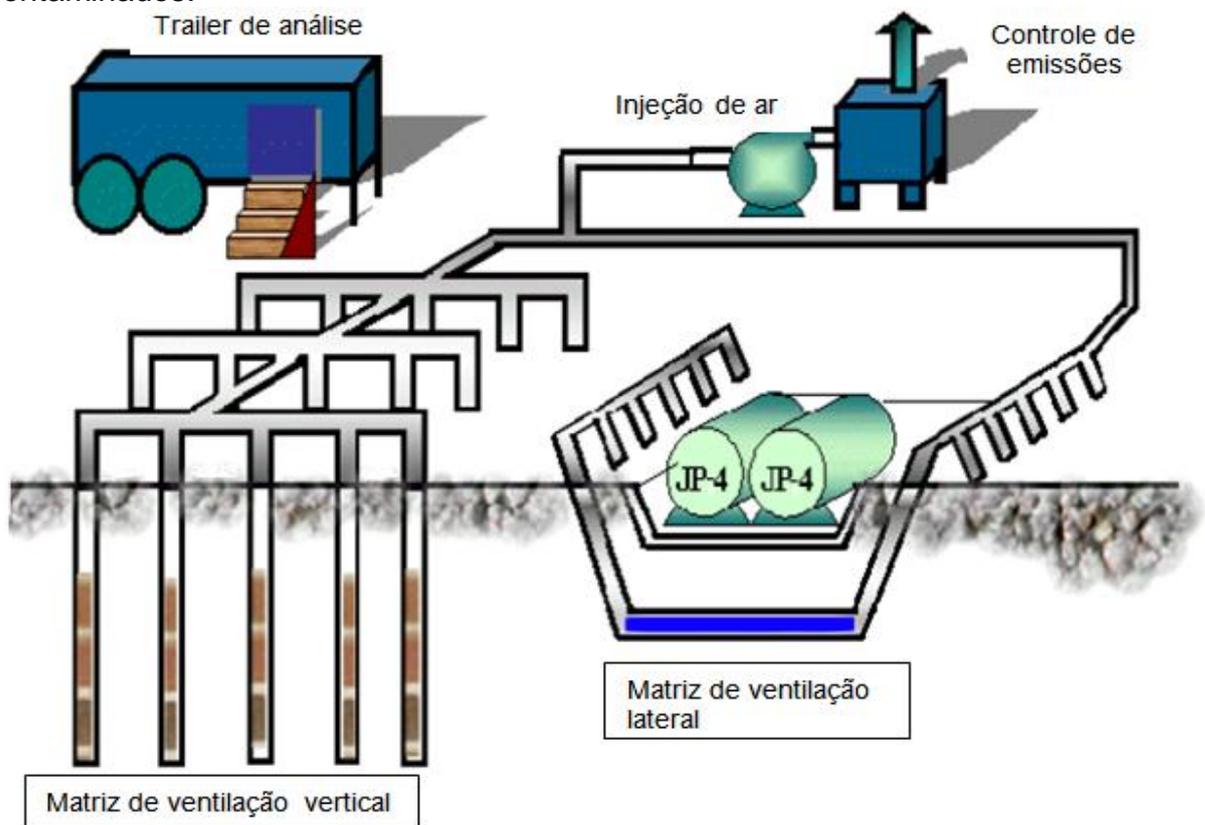


Figura 3: Modelo de bioventilação  
Fonte: FRTR *apud* Carneiro; Gariglio, 2010.

#### 6.4 BIOSLURPIN

Trata-se de nova tecnologia de remediação *in situ* que associa elementos de *bioventilação* e bombeamento para recuperar contaminantes livres de águas e solos subterrâneos promovendo a biorremediação aeróbia de hidrocarbonetos. Esta técnica consiste na instalação de um tubo de absorção, ligado a uma bomba de vácuo, onde o produto livre é removido (vapor) junto com um pouco da água subterrânea. Os líquidos (produto e solução de água subterrânea) vão para um separador óleo/água, e os vapores para um separador de líquido/vapor. Além disso, a extração de vapores pelo tubo promove a aeração da zona insaturada, aumentando o conteúdo de oxigênio e a taxa de degradação aeróbia. Assim como o *bioventilação*, esse processo é ineficaz em solos com baixa permeabilidade (KHAN et al., 2004 *apud* SANTOS, 2007).

#### 6.5 BIOAUMENTAÇÃO

Apesar de ser uma técnica relativamente recente e ainda em fase de desenvolvimento, encontra-se bem documentada na literatura (EPA, 2004 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010). Nessa técnica há a adição de micro-organismos especializados. Pode fazer uso de micróbios que foram previamente selecionados para se desenvolverem em certos poluentes, ou bactérias geneticamente modificadas que são adaptadas para metabolizar determinados produtos (TORTORA et al., 2005, *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

A bioaumentação é um processo de importante utilização em locais contaminados, geralmente é utilizado naqueles que não possuem ou possuem em pequenas quantidades as populações de micro-organismos necessários para que o processo de biodegradação ocorra (MARIANO, 2006 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

De acordo com Mariano (2006 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010) para se obter o resultado esperado devem ser observados os seguintes aspectos: a aprovação do órgão ambiental competente, sua eficiência e inocuidade ao ambiente e os micro-organismos aplicados devem atuar em sinergia sem interferir nos processos biogeoquímicos naturais.

## 6.6 AIR SPARGING

O *Air Sparging* é um importante meio de remoção e destruição do contaminante “*in situ*”. Esta tecnologia é feita através do processo de volatilização, no qual o vapor utilizado em forma de pressão positiva empurra os contaminantes do solo para a atmosfera, onde serão contidos e tratados (FERNANDES; ALCÂNTARA, 2004 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

É utilizado também para a descontaminação de aquíferos. As bolhas de ar injetadas na zona saturada elevam-se através das águas subterrâneas fazendo com que os contaminantes passem para a zona não saturada do subsolo, onde os vapores serão extraídos e tratados (FRTR, ON LINE TRADUZIDO *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

A Figura 4 mostra o modelo da técnica *air sparging* utilizado na descontaminação de aquíferos:

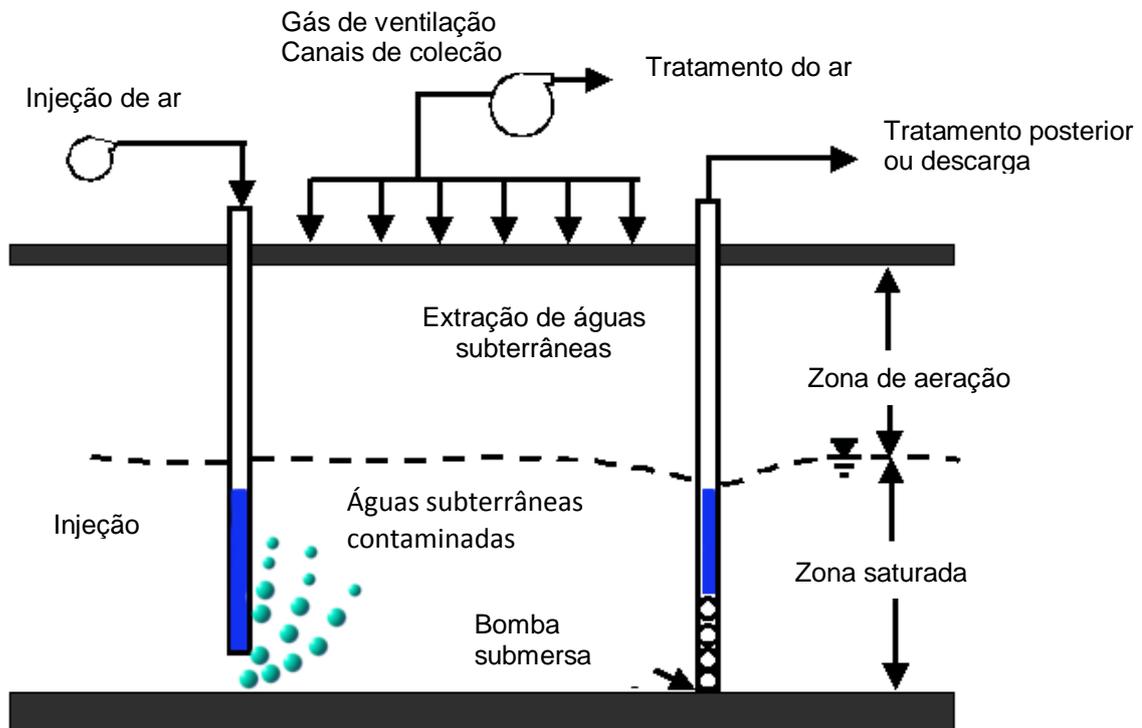


Figura 4: Modelo air sparging para descontaminação de aquíferos.  
Fonte: FRTR *apud* Carneiro; Gariglio, 2010.

## 6.7 LANDFARMING

Pereira; Marques (2010), dizem que o processo de *landfarming* consiste na aplicação e incorporação do resíduo na camada superior do solo, para reduzir as concentrações dos contaminantes por meio de biodegradação microbiana.

Em vários países inclusive no Brasil o “*landfarming*” é bastante utilizado em compostos de hidrocarbonetos de petróleo nas indústrias e refinarias (FERNANDES; ALCÂNTARA, 2004 *apud* JACQUES *et al.*, 2007).

Este processo tem a finalidade específica de degradação de resíduos semi-sólidos, pastosos ou líquidos (SOUZA 1999). A técnica pode ser citada como “*in situ*” ou “*ex situ*” quando é necessário fazer escavação (FERNANDES; ALCÂNTARA, 2004; *apud* JACQUES, *et al.*, 2007).

Esse processo tem sido praticada a mais de 100 anos, e a cerca de 25 anos mais intensivamente pela indústria de petróleo. Para melhorar a tendência natural dos micro-organismos do solo na decomposição de hidrocarbonetos de petróleo, muitas técnicas auxiliares têm sido propostas e testadas: fertilização mineral, aditivos orgânicos, sistemas de aragem etc. (FRANCO *et al.*, 2004 *apud* SANTOS, 2007).

Os hidrocarbonetos de petróleo mais leves, os de gasolina, geralmente são removidos por evaporação durante o processo de aeração, e em menor extensão, degradados através da respiração microbiana. Com os hidrocarbonetos de petróleo mais pesados acontece o inverso, durante a aeração não evaporam, mas podem ser degradados pelos micro-organismos presentes (FRANCO *et al.*, 2004 *apud* SANTOS, 2007).

Uma das desvantagens é a formação de resíduos ou subprodutos de compostos de difícil degradação biológica (ÁHARMSSEN, 1991; BOSSERT; KACHEL; BARTHA, 1984 *apud* SOUZA 1999).

A Figura 5 mostra o modelo da técnica de *landifarming*.

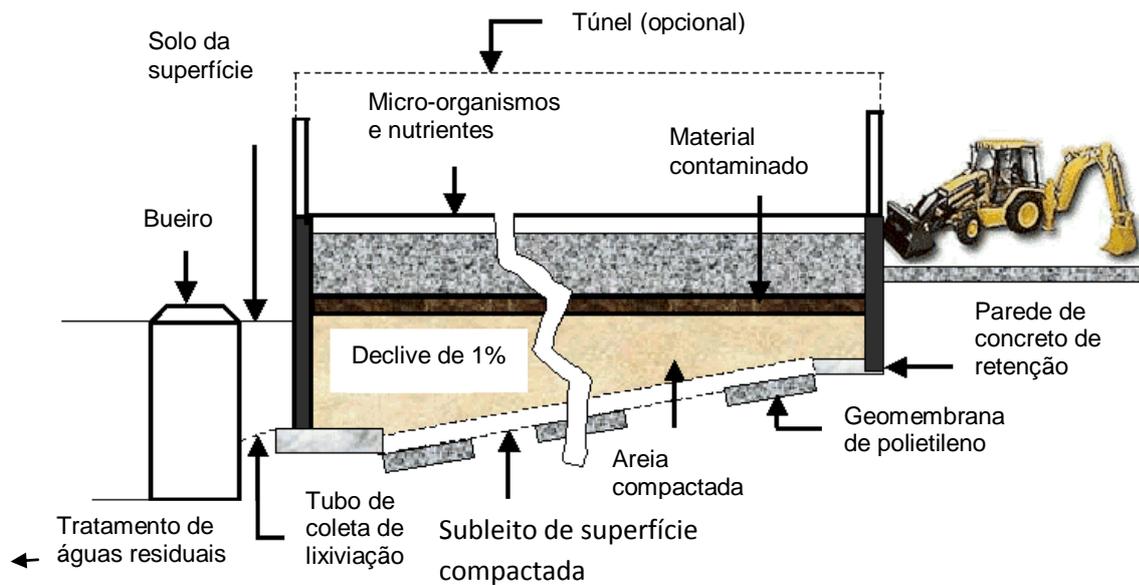


Figura 5: Modelo de tratamento por landfarming  
 Fonte: FRTR *apud* Carneiro; Gariglio, 2010.

Para garantir a otimização do processo, o sistema landfarming deve ser monitorado periodicamente para que se possa verificar a redução da concentração dos constituintes, a emissão de vapores, a migração dos constituintes no solo e as águas subterrâneas (U.S. EPA on line *apud* Carneiro; Gariglio, 2010).

## 6.8 COMPOSTAGEM

Na técnica de compostagem, o resíduo orgânico é metabolizado e transformado em húmus e subprodutos inertes (dióxido de carbono, água e sais minerais), tanto em condições aeróbicas quanto anaeróbicas. É uma forma de estabilização de resíduos (esterços de animais e resíduos urbanos orgânicos) (SANTOS 2007).

Ahtiainen *et al.*, (2002 *apud* JACQUES *et al.*, 2007), afirmam que a técnica é eficiente no caso de solos contaminados com HAPs (Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos). Possui outras aplicações como tratamento de resíduos perigosos, para reduzir grandes volumes como lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto e lixo municipal (LINE, 1995 *apud* SOUZA 1999).

Segundo Santos (2007), muitas publicações utilizam os termos biopilhas e compostagem quase como sinônimos. Porém, a compostagem caracteriza-se pelo

alto teor de matéria orgânica a ser estabilizado, gerando altas temperaturas (na faixa termofílica).

Sob condições favoráveis, bactérias termofílicas irão aumentar a temperatura do composto para 55-60°C em poucos dias. Depois, com temperatura menor a pilha pode ser revirada para renovar o suprimento de oxigênio, e em poucos segundos o aumento de temperatura irá ocorrer. Com o tempo populações microbianas termofílicas são substituídas por populações mesofílicas que continuam lentamente a conversão para um material semelhante ao húmus (TORTORA, *et al.*, 2005 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO 2010).

De acordo com Tremier *et al.* (2005 *apud* SANTOS 2007), essa técnica possui duas principais fases: fase ativa, onde ocorre principalmente as reações de degradação e a fase de cura em que macromoléculas orgânicas, como substâncias húmicas são sintetizadas.

Existe uma técnica derivada da compostagem pouco divulgada que é a vermicompostagem, onde há uma transformação biológica do resíduo orgânico, e sua decomposição o transforma em húmus, que é um adubo valioso. Pode ser usado em locais impactados por derramamento de compostos derivados do petróleo (PEREIRA; MARQUE, 2010).

## 6.9 SISTEMA DE BIORREATORES

De acordo com Lalli e Russel (1996 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO, 2010), o termo biorreator refere-se a qualquer recipiente onde a degradação biológica do contaminante está isolada e controlada, esse processo pode ser utilizado no caso de biorremediação de solo e água.

Esse sistema mostra-se muito eficiente na recuperação de solos e águas contaminados com hidrocarbonetos e orgânicos. Os nutrientes são muitas vezes adicionados aos biorreatores para otimizar a taxa de crescimento dos micro-organismos (LALLI; RUSSEL 1996 *apud* CARNEIRO; GARIGLIO 2010).

Os tipos de biorreatores mais comuns para o tratamento de solos são os de lama ou “*bioslurry*”. Quando se trata de tratamento *ex-situ*, no solo a ser tratado é misturado a uma fase aquosa (teor de sólidos de 10 a 40% p/p) que pode conter micro-organismos, nutrientes, entre outros aditivos (KHAN *et al.*, 2004 *apud*

SANTOS 2007). Existe também um biorreator de fase sólida, onde se trabalha com teores reduzidos de umidade no solo (10 – 20%) (SANTOS, 2007).

A Figura 6 mostra um modelo de biorreator.

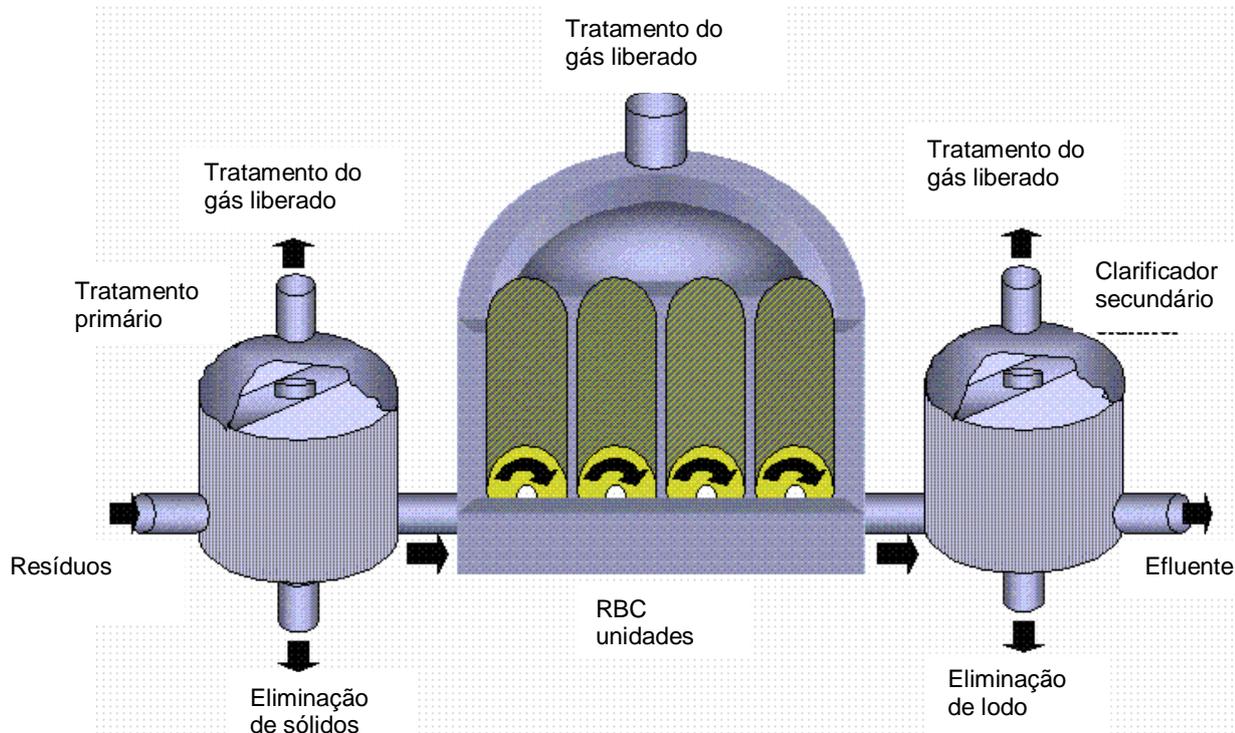


Figura 6: Modelo de biorreator  
Fonte: FRTR *apud* Carneiro; Gariglio, 2010.

Essa tecnologia foi utilizada durante muitas décadas no tratamento de efluentes urbanos e industriais (FRTR *apud* CARNEIRO; GARIGLIO 2010).

No entanto, somente nessa última década é que se intensificaram os estudos para analisar a eficácia dos biorreatores no processo de biorremediação (FRTR *apud* CARNEIRO; GARIGLIO 2010).

Os biorreatores apresentam as seguintes vantagens: monitoramento efetivo do processo, maior controle das variáveis (valor de pH, temperatura, umidade etc.), melhor incorporação de aditivos e redução do tempo de processo por ser sistema fechado com controle de emissões (RAIMUNDO; RIZZO, 2002 *apud* SANTOS 2007).

## 6.10 BIOPILHAS

Segundo Jorgensen *et al.* (2000 *apud* SANTOS, 2007), as biopilhas têm sido muito utilizadas para o tratamento de locais contaminados por compostos orgânicos, em especial, na degradação de hidrocarbonetos de petróleo. Mas, quando estes compostos são voláteis ou semivoláteis tendem a evaporar, e não biodegradar, sendo necessário algumas vezes, esse vapor ser tratado antes de ser descarregado (KHAN *et al.*, 2004 *apud* SANTOS 2007).

É uma tecnologia *ex-situ* de biorremediação conhecida também como biocélulas, que envolve o empilhamento de solos contaminados. Esse processo simula a atividade microbiana aeróbia e acelera a degradação do poluente pela aeração, adição de nutrientes e correção de umidade (KHAN *et al.*, 2004 *apud* SANTOS 2007).

Cobre-se a área da pilha com uma manta impermeável para reduzir a lixiviação do poluente para o solo não contaminado e para prevenir a perda por evaporação e volatilização bem como para manter a temperatura. A aeração dessas pilhas pode ser realizada de duas formas: mecanicamente ou por um sistema subterrâneo de passagem de ar (dutos) (KHAN *et al.*, 2004 *apud* SANTOS 2007).

## 7 FITORREMEDIAÇÃO

Trata-se de uma forma de biorremediação que, segundo Accioly; Siqueira (2000 *apud* PIRES; *et al.*, 2003) , envolve o emprego de plantas e de práticas agrônômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema.

As plantas utilizadas podem ser definidas como uma seleção específica e orientada de espécies de plantas para seqüestrar, assimilar, transformar e também decompor certos contaminantes. Trata-se de um processo natural que oferece a possibilidade de uma ação eficaz na descontaminação de solos, sedimentos e sistemas aquáticos (CORSEUIL; MORENO, 1999 *apud* SILVA 2007).

A utilização de plantas para descontaminação do ambiente não é recente. O primeiro sistema de tratamento de esgoto municipal utilizava plantas aquáticas para a limpeza da água (HARTMAN, 19754 *apud* CUNNINGHAM *et al.*, 1996 *apud* SOUZA 1999).

No processo de remediação de solos contaminados com compostos orgânicos e inorgânicos, algumas espécies de plantas possuem a habilidade de reter ou biovolatilizar o contaminante (BROOKS; BROOKS 1998 *in* Souza 1999), bem como a capacidade de "bombear" o contaminante e removê-lo do solo (*phytodecontamination*) ou imobilizá-lo (*phytostabilization*) (ROCK, 1996 *apud* SOUZA 1999).

A técnica pode ser usada em solos contaminados com substâncias orgânicas ou inorgânicas, como metais pesados, elementos contaminantes, hidrocarbonetos de petróleo, agrotóxicos, explosivos, solventes clorados e ainda subprodutos tóxicos da indústria (CUNNINGHAM *et al.*, 1996 *apud* PIRES; *et al.*, 2003).

Há certa limitação da técnica, pois os solos contaminados apresentam certas limitações à fitorremediação por serem, muitas vezes, tóxicos às plantas, principalmente onde ocorrem misturas de poluentes, o que dificulta a seleção de plantas resistentes e fitorremediadoras para este conjunto de compostos (COUTINHO; BARBOSA, 2007).

A possibilidade de uma planta ser fitorremediadora depende do tipo de poluente, devendo ser testadas várias plantas para que seja detectada aquela que possui maior resistência ao poluente. (PIRES *et al.*, 2003 *apud* COUTINHO; BARBOSA, 2007).

## 8 PRODUTOS PETROQUÍMICOS

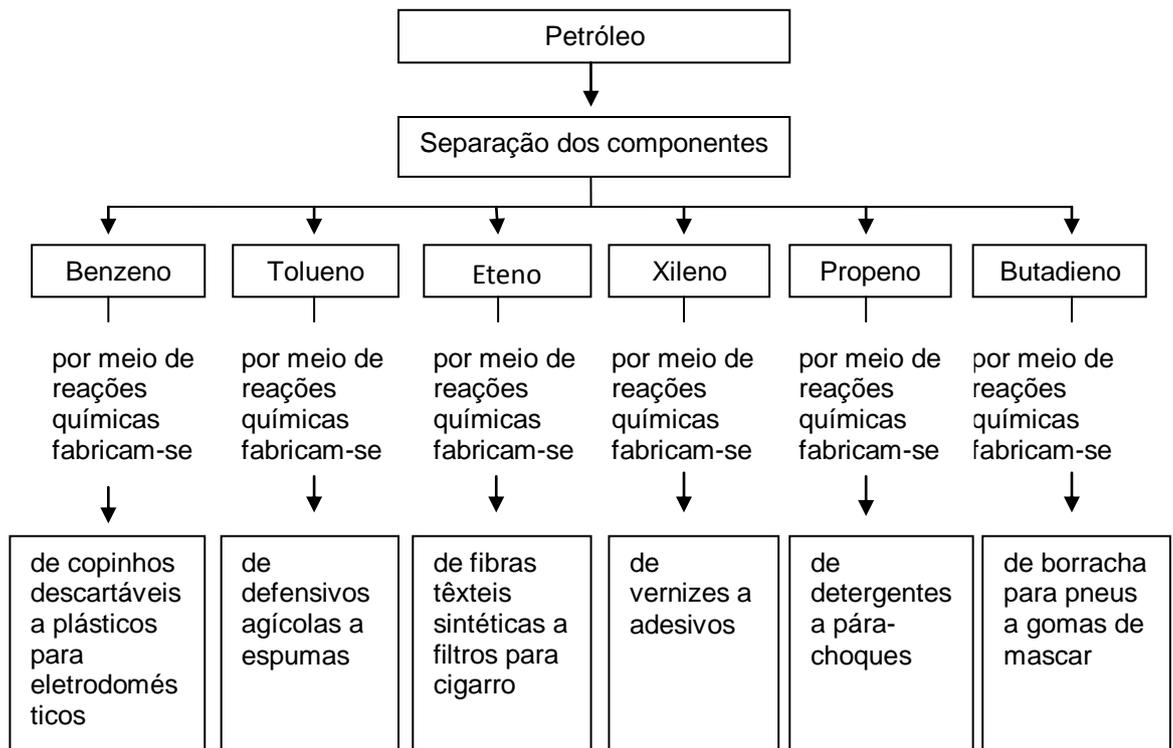
Comercialmente muito explorado desde o século 19, o petróleo foi usado, por muitas décadas, para a iluminação e, em menor escala, como lubrificante. A invenção do motor de combustão interna e sua adoção rápida em todas as formas de transporte ampliaram o emprego desse recurso natural, aumentando a demanda e com isso a produção, o transporte, a estocagem e a distribuição tanto do óleo cru quanto de seus derivados (BORGES *et al.*, 2008).

No estado líquido, o petróleo é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro. Apesar de sua composição química variar em função do reservatório, os diferentes tipos de petróleo apresentam semelhanças na análise elementar, sendo constituídos (%m/m) de: carbono (83-87); hidrogênio (11-14); enxofre (0,06-8); nitrogênio (0,11-1,7); oxigênio (0,1-2); e metais (até 0,3) (FERREIRA, 2010).

Atualmente os produtos petroquímicos são muito comuns, diferente de antigamente, onde os objetos e materiais usados pelos homens eram confeccionados de madeira, pedra, vidro e de metais. Estes produtos revolucionaram o nosso modo de viver e trabalhar. Alguns petroquímicos, como detergentes, pesticidas, farmacêuticos e cosméticos, são usados diretamente. A maioria dos petroquímicos, entretanto, serve como material de partida na produção de outras substâncias sintéticas (ROCCA; CURI, 2010).

Rocca; Curi (2010) ainda afirmam que o petróleo não é importante apenas porque fornece combustível e energia, mas também porque a indústria química atual depende quase totalmente dele. Além de ser fonte de matéria-prima para que os químicos sintetizem inúmeros produtos.

O Fluxograma 2 mostra a utilização do petróleo para a fabricação de produtos do nosso dia -a- dia.



Fluxograma 2: Alguns produtos petroquímicos  
 Fonte: Peruzo; Canto (2003)

Segundo Aislabe et al., (2004 *apud* ANDRADE, AUGUSTO; JARDIM, 2010), devido a dependência do petróleo e seus derivados para a manutenção de sua atividade industrial, podem vir ocorrer derrames acidentais.

Dessa forma, a contaminação se dá frequentemente, afetando meios que rapidamente devem ser tratados.

## 8.1 CONTAMINAÇÃO POR PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS

O petróleo contém hidrocarbonetos que variam da simples molécula, como o metano, a moléculas com alto peso molecular. Seus componentes são usualmente agrupados em frações, dependendo de suas propriedades físico-químicas. As principais frações são a saturada, a aromática e uma fração asfáltica ou polar. A fração saturada compreende os n-alcenos, os alcenos ramificados e os cicloalcenos (naftenos). Os n-alcenos são considerados os mais facilmente degradáveis. Os hidrocarbonetos aromáticos possuem um ou mais anéis benzênicos. Um, dois ou três anéis aromáticos são degradados facilmente e há linhagens capazes de degradar compostos com até cinco anéis aromáticos. Os compostos aromáticos são moléculas hidrofóbicas que apresentam baixa solubilidade em água, o que contribui para sua persistência no meio ambiente (FENIMAN; *et al.*, 2010).

Para que os derivados possam ser obtidos, é necessário o processamento do petróleo, no qual é chamado de Refino. No refino, o petróleo passa por processos de separação, conversão e de tratamentos para obter as frações oriundas do petróleo (ANTUNES, 2007).

No Quadro 3 é mostrado os derivados de petróleo e a obtenção de seus derivados através de destilação do petróleo.

Fração	Temperatura de Ebulição (°C)	Composição Aprox.	Aplicações
Gás residual Gás Liquefeito de Petróleo – GLP	Até 40	C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub> C <sub>3</sub> – C <sub>4</sub>	Gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial.
Gasolina	40 – 175	C <sub>5</sub> – C <sub>10</sub>	Combustível de automóveis solvente.
Querosene	175 – 235	C <sub>5</sub> – C <sub>10</sub>	Iluminação, combustível de aviões a jato
Gasóleo leve	235 – 305	C <sub>13</sub> – C <sub>17</sub>	Diesel, fornos.
Gasóleo pesado	305 – 400	C <sub>18</sub> – C <sub>25</sub>	Óleos lubrificantes.
Lubrificantes	400 – 510	C <sub>26</sub> – C <sub>38</sub>	Óleos lubrificantes.
Resíduo	Acima de 510	C <sub>38+</sub>	Asfalto, piche, impermeabilizantes.

Quadro 3: derivados de petróleo e sua obtenção de seus derivados através de destilação do petróleo em frações de diferentes pontos de ebulição  
Fonte: Thomas (2004)

Após a destilação, as frações são submetidas a alguns processos químicos de síntese, como a alquilação e a reforma catalítica, e de craqueamento. Esses processos químicos têm por objetivo modificar as frações sem interesse econômico para gerar produtos de alto valor agregado (THOMAS, 2004 *apud* FERREIRA 2010).

A maior parte do volume de derivados de petróleo se destina ao uso energético. O petróleo processado nas refinarias brasileiras é transformado, principalmente em óleo diesel (34%), gasolina (23%) e óleo combustível (19%) (ANTUNES, 2007).

Segundo o Portal São Francisco (2010) cada vez está mais comum vazamentos em postos de combustíveis, as contaminações de solos por hidrocarbonetos derivados de petróleo têm sido alvo de inúmeras pesquisas. 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.

Os componentes presentes no petróleo e seus derivados podem ser tão tóxicos que a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) dos Estados Unidos da América lista vários desses compostos como poluentes de prioridade nacional, que devem ser freqüentemente monitorados em efluentes industriais, por serem considerados como carcinogênicos, mutagênicos, teratogênicos, além de terem a capacidade de se bioacumularem nas diferentes cadeias alimentares (FENIMAN; *et al.*, 2010).

O combustível atinge o solo e seus componentes separam-se em três fases: dissolvida, líquida e gasosa. Sendo assim, uma vez comprovada a contaminação, esta poderá atuar em três níveis diferentes: solo, água subterrânea e atmosfera. Percebe-se então que a tarefa de avaliação da extensão, dinâmica, concentração das contaminações, análise de riscos e possíveis estratégias de remediação tornam-se complexa (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2010).

No caso de combustíveis como a gasolina e o óleo diesel (atualmente muito usados), 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 (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2010).

Os compostos aromáticos (BTX e outros alquilbenzenos) perfazem cerca de 10 a 59% da gasolina (massa/massa), enquanto que os hidrocarbonetos alifáticos

compreendem 41 a 62%. Os hidrocarbonetos aromáticos são geralmente mais tóxicos que os compostos alifáticos com o mesmo número de carbonos e possuem maior mobilidade em água, em função da sua solubilidade em água ser da ordem de 3 a 5 vezes maior (TIBURTIUS; PERALTA, 2004).

Os compostos aromáticos são tóxicos tanto ao meio ambiente como ao ser humano. Atuam como depressores do sistema nervoso central e apresentam toxicidade crônica mais significativa que os hidrocarbonetos alifáticos (também presentes no petróleo e derivados), mesmo em concentrações menores (WATTS *et al.*, 2000 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM 2010). O benzeno é reconhecidamente o composto mais tóxico dentre os BTEX e, por isso, pode ser apontado como o agente mais preocupante no tocante à saúde pública sendo também cancerígeno (MARIANO, 2006).

Outro contaminante que traz muita preocupação são os HAPs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), são compostos químicos constituídos unicamente de átomos de carbono e hidrogênio, arrançados na forma de dois ou mais anéis aromáticos. São lipossolúveis na membrana celular e prontamente absorvidos no organismo dos humanos via inalação, exposição oral e dermal, com posterior acúmulo no tecido adiposo (NETTO *et al.*, 2000 *apud* JACQUES, *et al.*, 2007). Seu metabolismo gera compostos epóxidos com propriedades carcinogênicas e mutagênicas, tendo vários casos de câncer no pulmão, intestino, fígado, pâncreas e na pele, devido à presença desses compostos (CHAKRADEO *et al.*, 1993 *apud* JACQUES, *et al.*, 2007 ).

Além dos BTEX e dos HAPs, geralmente, outras classes de compostos também são alvos de atenção, como os compostos orgânicos voláteis (COV) totais e os hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP). Os compostos BTEX, HPA e HTP são escolhidos, principalmente, pela toxicidade, mobilidade e persistência no meio ambiente; os COV totais, por representarem o total de emissões gasosas, como perdas por volatilização provenientes do derramamento. Dessa forma, toda contaminação oriunda dessas fontes merece muita atenção, não apenas pelo contato direto (como a inalação de vapores) desses compostos indevidamente dispostos no solo, mas também quanto à sua presença em águas utilizadas para o consumo humano (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM; 2010).

Devido a grande necessidade de solucionar esse problema, diversas técnicas físicas, químicas e biológicas, vêm sendo desenvolvidas para a remoção ou a

degradação *in-situ* ou *ex-situ* de petróleo derramado e para a redução de seus efeitos, especialmente os tóxicos. Dentre as técnicas desenvolvidas, a “biorremediação” vem se destacando como uma alternativa viável e promissora (BENTO *et al.*, 2003; DUA *et al.*, 2002; RAHMAN *et al.*, 2002 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM 2010).

## 8.2 BIORREMEDIAÇÃO DOS SOLOS CONTAMINADOS POR PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS

Não é de hoje que se sabe a capacidade de certos micro-organismos serem capazes de utilizar hidrocarbonetos como fonte de carbono e que esses micro-organismos são amplamente distribuídos na natureza, e a utilização de hidrocarbonetos era altamente dependente da natureza química dos compostos existentes na mistura do petróleo e das condições ambientais (FENIMAN; *et al.*, 2010). Dessa maneira, reduzem a concentração e/ou toxicidade dos compostos poluentes (ATLAS, 1977; PRITCHARD E COSTA, 1991; PRINCE, 1993; ATLAS, 1995 *apud* SOUZA; TRIGÜIS 2005).

Desde os meados dos anos 80 do século XX, as técnicas de biorremediação têm sido adotadas como uma maneira eficaz e de custo baixo para o tratamento de solos contaminados por petróleo (DELFINO; MILES, 1985; TSAO *et al.* 1998; VAN DER HOEK *et al.*, 1989 *apud* ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Reações bioquímicas acontecem mediadas por micro-organismos. Geralmente, quando um composto orgânico é oxidado perde elétrons para um acceptor final de elétrons, que é reduzido (ganha elétrons). O oxigênio normalmente atua como acceptor final de elétrons quando presente e a oxidação de compostos orgânicos com a redução do oxigênio molecular é conhecida de respiração aeróbia heterotrófica.

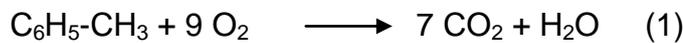
De acordo com o Portal São José (2010) se o oxigênio não está presente, micro-organismos podem usar compostos orgânicos ou íons inorgânicos como aceptores finais de elétrons alternativos, condições estas chamadas de anaeróbias. No caso essa, pode ocorrer pela desnitrificação, redução do ferro, redução do sulfato ou condições metanogênicas. (CORDAZZO, 2000 *apud* MARIANO 2006).

No caso de hidrocarbonetos, a degradação é essencialmente uma reação de oxi-redução onde o hidrocarboneto é oxidado (doador de elétrons) e um acceptor de elétrons é reduzido. Existem vários compostos que podem agir como aceptores de elétrons, tais como o oxigênio ( $O_2$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), óxidos de ferro (por exemplo  $Fe(OH)_3$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), água ( $H_2O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Foi observada a seqüência de preferência de utilização desses aceptores: oxigênio > nitrato > óxidos de ferro > sulfato > água. Esta seqüência reflete a diminuição do potencial de oxidação dos aceptores. (CORSEUIL; ALVAREZ, 1996 *apud* MARIANO 2006).

Díaz (2004 *apud* TONINI, REZENDE E GRATIVOL, 2010) citam que a degradação microbiana do petróleo e seus produtos refinados é muito mais rápida em condições aeróbicas do que em condições anaeróbicas.

Oxigênio é um cosubstrato para a enzima que pode inicializar o metabolismo do hidrocarboneto e por fim é utilizado como aceptor final de elétrons para a gerar energia (YOUNG, 1984 *apud* MARIANO 2006). A maior limitação na biodegradação aeróbia em subsuperfície é a baixa solubilidade do oxigênio em água. (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2010).

Mariano (2006) exemplifica o que diz, com a mineralização aeróbica do tolueno ( $C_6H_5-CH_3$ ) é representada pela equação 1:



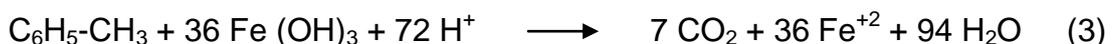
A biodegradação utilizando nitrato é utilizado quando a quantidade de oxigênio diminui e o nitrato está presente (ou outras formas oxidadas de nitrogênio), alguns micro-organismos anaeróbios facultativos utilizam nitrato ( $NO_3^-$ ) ao invés de oxigênio como aceptor final de elétrons. (MARIANO, 2006 *apud* FRANCISCO; FRANÇA, 2007).

Exemplo de reação com tolueno na equação 2:



França (2007), ainda mostra que também é possível a biodegradação a partir do íon férrico, onde quantidades de oxigênio e nitrato reduzem; os micro-organismos podem utilizar o íon férrico (FeIII) como aceptor de elétrons. As formas que são mais facilmente reduzidas são as formas amorfas e pouco cristalinas de hidróxidos, oxi-hidróxidos, e óxidos de Fe (III).

Ainda usando o tolueno como exemplo na equação 3:



De acordo com a USEPA (1991 *apud* MARIANO, 2006), um plano típico de remediação possui quatro fases principais:

- contenção do produto livre e produto dissolvido;

- remoção do produto livre;
- remoção do produto dissolvido;
- remoção do produto adsorvido

De acordo com Souza (1999) existem fatores que podem influenciar na degradação que devem ser observados como aeração, nutrição, umidade, quantidade, características físico-químicas, temperatura, pH e características do resíduo.

Dois principais técnicas podem ser usadas para a descontaminação de solos impactados pelo petróleo. A primeira delas é a bioestimulação que consiste no favorecimento das condições ambientais (pH, teor e disponibilidade de nutrientes inorgânicos e aceptores finais de elétrons) para estimular a ação dos micro-organismos presente no material contaminado. A segunda técnica é a do bioaumento, na qual são introduzidos micro-organismos com capacidade de degradar determinados poluentes (MAGALHÃES; CUNHA , 2003).

Tocchetto e Coutinho (2006) cita também a biorremediação passiva como forma de tratamento *in-situ*. E quando se trata de tratamento *ex-situ*, cita as técnicas de compostagem e biorreatores.

Para a certeza de que a remediação natural é uma forma adequada de descontaminação de hidrocarbonetos, é necessário que se faça uma completa caracterização hidrogeológica da área contaminada, que se tenha o conhecimento da magnitude e extensão da contaminação e que se demonstre que a pluma não irá migrar para regiões de risco potencial (CORSEUIL; MARINS, 1997 *apud* MARIANO 2006).

Para a escolha do tipo de tratamento de locais contaminados, cada caso deve ser analisado individualmente, avaliando suas particularidades. A aceitação da biorremediação como uma tecnologia viável de remediação, porém, ainda depende da relação custo/benefício e os métodos empregados precisam ter no máximo os mesmos valores dos tratamentos químicos e físicos existentes (MAGALHÃES; CUNHA , 2003).

## 9 CONCLUSÃO

Em um mundo capitalista, onde o consumo cresce a cada dia, cresce também as poluições e contaminações oriundas de vários processos industriais, os quais têm interferido diretamente na qualidade de vida do ser humano e mudanças climáticas do planeta.

Diante do exposto, surge a necessidade de remediar essas áreas de forma menos agressiva, descontaminando o ambiente ou que pelo menos transformando as substâncias tóxicas em atóxicas.

Portanto, como já havia o conhecimento sobre capacidade de degradação de contaminantes através de micro-organismos, a técnica de biorremediação começou a ser mais estudada e praticada, como por exemplo, no caso de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo, que são utilizados como fonte de carbono nos processos metabólicos fazendo com que dessa forma ocorra a degradação do poluente. O método tem a vantagem de ser eficiente e ter um baixo custo, além dos microrganismos estarem em todo ambiente facilitando o processo.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Juliano de Almeida; AUGUSTO, Fabio; JARDIM, Isabel Cristina Sales Fontes. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, São Paulo, v.35, n.3, set. 2010.

ALMEIDA, Leo G. **Gerência de processo**: mais um passo para a excelência. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 1993. 144p.

ALMEIDA, Larissa Villela de; SILVA, Janaína Juliana Maria Carneiro. **Principais técnicas de biorremediação *in situ* utilizadas na recuperação de áreas contaminadas por derivados de petróleo**, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pernambuco, 2010.

ANTUNES, Adelaide. **Setores da indústria química orgânica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007.

BIANCHINI, Vivian Karina; ASSUMPÇÃO; Marta Rita. A diferenciação de produtos na cadeia produtiva do açúcar: o processo de produção dos açúcares líquido e líquido invertido. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2002, Curitiba, **Resumos...** Curitiba: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, out. 2002.

BORGES, André; et al. Biorremediação. **Sorocaba.unesp**, 2008. Disponível em: <<http://www.sorocaba.unesp.br/professor/amartins/aulas/pea/biorremed.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

CAMPOS, V.F. **TQC**: Controle de qualidade total no estilo japonês. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Universidade Federal de Minas Gerais, 1992.

CONEGLIAN, Cassiana Maria Reganhan. **Biodegradação**: microbiologia aplicada. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2009.

COUTINHO, Henrique Douglas; BARBOSA, Alyne Rats. **Fitorremediação**: Considerações Gerais e Características de Utilização. *Silva Lusitania*, Lisboa, v.15, n.1, jun. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0870-63522007000100008&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0870-63522007000100008&script=sci_arttext)>. Acesso em: 25 nov. 2011.

DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador, **Resumos...** Salvador: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2005.

DINIZ, Bruno; et al., O uso da biorremediação na recuperação de áreas degradadas. **Ecologia.icb.ufmg**, [2011]. Disponível em: <[http://ecologia.icb.ufmg.br/~rpcoelho/BEDS/Seminarios/2SS2009/seminario\\_7\\_T1.pdf](http://ecologia.icb.ufmg.br/~rpcoelho/BEDS/Seminarios/2SS2009/seminario_7_T1.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2011.

FENIMAN, D. P. G.; et al. **A biodegradação Ambiental: Petróleo e pesticidas**, 2010. Disponível em: <<http://www.herbario.com.br/bot/toxicologia/biodegre.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

FERREIRA, Douglas Guedes. **Biorremediação de Solo Argiloso Contaminado com Gasolina Aditivada com Diferentes Teores de Etanol**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2010.

GAYLARD, Christine Claire; BELLINASSO, Maria de Lourdes; MANFIO, Gilson Paulo. Aspectos biológicos e técnicas da biorremediação de xenobióticos. 2005. **Revista digital: Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**. Disponível em: <<http://www.biotecnologia.com.br/edicoes/ed34.php>> Acesso em 10/10/2011.

JACQUES, Rodrigo Josemar Seminoti; et al. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol.37, n.4, p. 1192-1201, jul./ago. 2007.

MAGALHÃES, Hugo Monteiro de; CUNHA, Cláudia Duarte da. Avaliação da técnica de bioaumento no tratamento de solo impactado por petróleo. In: Jornada de Iniciação Científica, 11., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2003.

PEREIRA, Jairce; MARQUES, Rávila. **Uso da biorremediação na recuperação de áreas degradadas**, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2010.

PEREIRA, Lucas Tupi Caldas; LEMOS, Judith Liliana Solorzana. **Degradação de hidrocarbonetos de petróleo por *aspergillus niger* e *penicillium corylophilum***. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PIRES, F.R.; et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta daninha**, Viçosa, vol.21, n.2, maio/ago. 2003.

PORTAL SÃO FRANCISCO. Biorremediação de solos. **Portalsaofrancisco.com**, [2011]. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/biorremediacao-de-solos/biorremediacao-de-solos.php>>. Acesso em: 24 nov. 2011.

ROCCA, Rosana Amici Della; CURI, Denise. Química: módulo 6. **Cienciamao.usp**, c2010. Disponível em: <[http://www.cienciamao.usp.br/dados/pru/\\_quimica-modulo6.apostila.pdf](http://www.cienciamao.usp.br/dados/pru/_quimica-modulo6.apostila.pdf)>. Acesso em 24 nov. 2011.

ROSA, Anabela Porto. **Processos de biorremediação na mitigação do impacto ambiental, devido a eventuais derrames de óleo na bacia de campos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense, MACAÉ, 2001.

SANTOS, Renata da Matta. **Avaliação da adição do pó da casca de coco verde, como material estruturante, na biorremediação de solo contaminado por petróleo**. Tese de Mestrado, 144 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SEESP. Viabilidade ambiental, mudanças climáticas e fitorremediação. **Seesp.org**, [2011]. Disponível em: <<http://www.seesp.org.br/site/cotidiano/137-viabilidade-ambiental-mudancas-climaticas-e-fitorremediacao-.html>>. Acesso em: 24 nov. 2011.

SILVEIRA, Ana Cristina da; SPARAMBERGER, Raquel Fabiana Lopes. **A relação homem e meio ambiente e a reparação do dano ambiental: reflexões sobre a crise ambiental e a teoria do risco na sociedade**, 2004. Monografia (Direito Ambiental) – Universidade Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

SILVA, Rogério R. R. da; FERREIRA, Ana Paula do Nascimento Lamano; FERREIRA, Maurício Lamano. **O processo de biorremediação na recuperação de solos contaminados**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SOUZA, Eliane Soares de; TRIGUIS, Jorge Alberto. Degradação do petróleo em derrames no mar – intemperismo x biorremediação. In: CONGRESSO BRASILEIRO

SOUZA, Sérgio Luiz de. **Revegetação de área de biorremediação contaminada por resíduos oleosos de petróleo**. Curitiba, 1999. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

TIBURTIUS, Elaine Regina Lopes; PERALTA, Patricio. contaminação de águas por BTXS e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Química Nova**, São Paulo, vol.27, n.3, maio/jun. 2004.

TOCCHETTO, Marta Lopes; COUTINHO, Heloise Lunardi. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais**. Novo Hamburgo: Abes, 2006.

TONINI, Rita Maria Costa Wetler; REZENDE, Carlos Eduardo de; GRATIVOL, Adriana Daudt. **Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias**: revisão. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2010.