

# BIORREMEDIAÇÃO DE ÁREAS COSTEIRAS IMPACTADAS POR PETRÓLEO

Ícaro Thiago Andrade Moreira<sup>1</sup>  
Isadora Machado Marques<sup>2</sup>

## Resumo

O petróleo é conhecido como uma mistura complexa e altamente variável, entretanto é o principal fator econômico e gerador de energia na maioria dos países, inclusive no Brasil. Devido a essa grande importância econômica, houve acréscimos de indústrias petrolíferas e conseqüentemente de acidentes nos oceanos e solos. Tendo em vista esta grande problemática o artigo presente teve como objetivo instituir uma revisão bibliográfica relacionada aos mecanismos e técnicas de biorremediação, fitorremediação e ficorremediação, mostrando que os métodos *in situ* possuem uma maior eficácia na degradação, dando maior ênfase ao potencial de aceleração da biodegradação utilizando combinação da fitorremediação e bioaugmentação por bactérias.

**Palavras-chave:** Petróleo; Biorremediação; Fitorremediação; Ficorremediação; Impactos ambientais.

## BIOREMEDIATION OF COASTAL AREAS IMPACTED BY OIL

### Abstract

Oil is known as a complex and highly variable mixture, however it is the main economic and energy-generating factor in most countries, including Brazil. Due to this great economic importance, there were increases in the oil industries and consequently accidents in the oceans and soils. In view of this great problem, the present article aimed to institute a bibliographic review related to the mechanisms and techniques of bioremediation, phytoremediation and phytoremediation, showing that *in situ* methods have a greater efficiency in degradation, giving greater emphasis to the potential for accelerating biodegradation. using a combination of phytoremediation and bio-augmentation by bacteria.

**Keywords:** Oil; Bioremediation; Phytoremediation; Phytoremediation and impacts.

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo, em sua definição é conhecido como uma mistura complexa altamente variável de compostos de ocorrência natural que consiste, predominantemente, de hidrocarbonetos e, em menor quantidade, de derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e organo-metálicos. A composição global do petróleo pode ser definida pelo teor de: hidrocarbonetos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (ZÍLIO; PINTO, 2002).

As etapas das indústrias petrolíferas começam desde a extração do petróleo bruto, ao refino, transporte e distribuição para fins comerciais. Entretanto na transição de uma etapa para outra pode ocorrer acidentes acarretando vazamentos de petróleo no meio ambiente. De acordo com a base de dados da Internacional Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), estima-se que entre os anos de 1979 a 2018, ocorreram acidentes com ATLANTIC EMPRESS (1979), 287.000 toneladas derramadas; CASTILLO DE BELLVER (1983),

---

<sup>1</sup> Professor adjunto Departamento de Engenharia Ambiental Universidade Federal da Bahia. E-mail: icarotam@ufba.br

<sup>2</sup> Curso de engenharia ambiental e sanitária Universidade Salvador. E-mail: isadoramachado1@hotmail.com

252.000 toneladas derramadas; ABT SUMMER (1991), 260.000 toneladas derramadas e SANCHI (2018), 113.000 toneladas derramadas. Em 2019 foram registrados grandes derramamentos na América do Norte, com mais de 700 toneladas de óleo derramado, sendo este resultado de uma colisão entre embarcações.

Outro derramamento de óleo que foi amplamente divulgado pelas mídias em 2019 foi o que contaminou aproximadamente 3.000 km de costa com mais 1000 toneladas de óleo recolhido, atingindo cerca de onze estados e mais de 120 municípios do Brasil. A causa desse derramamento ainda é um grande mistério e pode mudar as estatísticas deste ano se confirmado como um derramamento de navio-tanque (ITOPF, 2019). Ainda que, ao longo desses últimos anos, tenha diminuído o número de incidentes, segundo a ITOPF, os prejuízos causados a biodiversidade no oceano e aos ecossistemas costeiros sensíveis como, o manguezal, continua em estado crítico.

Devido ao seu alto grau de contaminação, o petróleo, por possuir elevada capacidade de cisão em pequenas partes, torna-se a partir do momento em que é derramado no oceano ou no solo, um contaminante de recalcitrante e de difícil captação.

De acordo com a companhia ambiental do Estado de São Paulo uma área contaminada é um local ou terreno que tenha comprovadamente uma poluição introduzida por qualquer substância ou resíduo. Considerando que este poluente pode ser propagado para diferentes vias, como o ar, a água subterrânea ou superficial e o solo, fez se necessário o desenvolvimento de manuais de adaptação das normas holandesas (CETESB, 1996) com vistas ao controle de áreas suspeitas de contaminação. Observa-se que as áreas costeiras possuem a matriz sedimento e a matriz água, o que torna-se indispensáveis estudos referentes a opções de combinações para restaurar a qualidade da água e do solo.

Segundo Ossai (2020), existem diversas estratégias de remediação baseadas em riscos para a recuperação restauração dos ambientes afetados. As técnicas são utilizadas de acordo a natureza da matriz a ser recuperada com sua composição e propriedades, fonte de poluição, tipo de ambiente, transporte e distribuição do poluente, bem como a facilidade em implantar essas técnicas fora ou no local de contaminação.

Os métodos de tratamento podem ser tanto químicos, físicos, térmicos, como biológicos. Existem biotecnologias rentáveis que possibilitam, com baixo custo operacional e de implantação, a descontaminação de oceanos e solos ocasionados por toneladas de óleo dispersos após um incidente (OSSAI et al., 2020). Desta forma, a aplicação de técnicas, *ex-situ* e *in-situ* vem se destacando como uma das estratégias promissoras a serem adotadas no

tratamento de áreas costeiras contaminadas por hidrocarbonetos do petróleo. Este artigo fornece uma visão geral das áreas costeiras sensíveis a contaminação por petróleo, bem como as técnicas de remediação que são utilizadas considerando a recuperação de solos, sedimentos e águas superficiais.

## **2 METODOLOGIA**

Este artigo foi desenvolvido a partir de pesquisas bibliográficas de caráter científico como artigos publicados em base de dados nacional e internacional (Science Direct e Springer Link), dissertações, teses e livros. Este artigo tem como base os acompanhamentos de atividades elaboradas em laboratório referente ao estudo de microrganismos e sua eficiência na biorremediação de sedimentos contaminados por petróleo. Os acompanhamentos foram feitos no Núcleo de estudos ambientais (NEA) e no laboratório de estudos do petróleo (LEPETRO) localizados no instituto de geociências na Universidade Federal da Bahia.

## **3 RESULTADOS E DISCUSÕES**

### **3.1 Áreas costeiras**

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), as áreas costeiras são caracterizadas por apresentarem extensão de 8500 km desde a costa até os limites da plataforma continental. Esses ambientes costeiros possuem uma grande biodiversidade por ser uma área de transição ecológica e de acumulação de nutrientes necessários para a manutenção da cadeia alimentar (CALIJURI; CUNHA, 2013). Estes ambientes possuem elevado valor econômico por ser fonte de renda para muitas comunidades que vivem em seu entorno, porém essas atividades antrópicas são de grande ameaça ao meio ambiente, sendo preciso gerar soluções para a prevenção ou remediação dessas áreas. O derramamento de óleo nas regiões costeiras causa prejuízos ambientais, econômicos e sociais de elevado porte, sendo necessário a remediação destas áreas, porém cada área possui características próprias influenciando na escolha do método a ser empregado.

### 3.1.1 Praias

As praias são ambientes costeiros formados basicamente pelo intemperismo de rochas que acumulam areia (fina, média e grossa), seixos e podem ser formadas por lodo (silte e argila) bem como por restos de cascalhos, pedras, conchas e corais (CALIJURI; CUNHA, 2013). Por sofrer grande influência da maré, possuem um equilíbrio dinâmico que influencia na intensa movimentação de sedimentos o que possibilita que acumulem em suas regiões nutrientes próprios para a manutenção do ecossistema visto que a maioria dos organismos habita os primeiros 10 a 15 cm do substrato (MICHEL, 1992). Outros fatores que influencia a sobrevivência dos microrganismos é a temperatura e a pressão, visto que quanto mais longe da costa maior é a variação de temperatura e pressão, enquanto que mais perto da costa a variação de pressão e temperatura são mínimas, possibilitando a adaptação e equilíbrio ecológico. Com o derramamento de óleo nesta região, os efeitos físicos e químicos são danosos e tóxicos para a biota, visto que o óleo tem propriedade viscosa e menos densa que a água, portanto se espalha uma camada na superfície impedindo que haja trocas gasosas causando o sufocamento de algas, microalgas e microrganismos. O efeito químico do óleo na fauna provoca a ruptura de células o que ocasiona a morte das espécies, ademais muitas aves e outros pequenos animais se alimentam nas encostas, porém ao entrarem em contato com o óleo, acabam morrendo sufocados e presos (CETESB, 2007).

Uma das propostas de limpeza em praias para muitos países está no uso de dispersantes. No Brasil está proibido pela legislação ambiental a utilização destes produtos por ser muito tóxica a biota local. A Cetesb prioriza a seleção de métodos que melhorem esteticamente e que preservem a comunidade biológica. Esses métodos são conhecidos como: remoção do contaminante por recolhimento manual criterioso, o uso de absorventes naturais e bombeamento a vácuo com limpeza natural através da ação das ondas. Se necessário utiliza barreiras para impedir que o óleo se disperse, como mostra a **Figura 1**.

Figura 1 - Limpeza manual do óleo nas praias em São Sebastião, São Paulo



Fonte: Cetesb (2007)

Alguns testes utilizando bactérias de áreas costeiras impactadas por petróleo para biodegradar este contaminante, vem sendo desenvolvidos como uma alternativa barata e eficiente, visto que esses microrganismos isolados possuem resistência a esses impactos e taxas de biodegradação significativas sem a adição de agentes químicos.

González e Marqués (2016), discutem que a comunidade bacteriana presente na costa possibilita na biodegradação dos hidrocarbonetos do petróleo provocados pela atenuação natural no ambiente.

### ***3.1.2 Costões rochosos***

Os costões rochosos são afloramentos de rochas cristalinas na linha do mar (ambiente de transição entre a terra e o oceano), onde possuem influência das ações das ondas, ventos e chuva. São formados basicamente de rocha sedimentar e embasamento cristalino, formados por várias compactações (CALIJURI; CUNHA, 2013). Os costões rochosos apresentam uma rica diversidade ecológica, pois o substrato duro favorece a fixação de larvas e microrganismos, além de faixas densas de espécies de macroalgas, microalgas, mexilhões e ostras, devido as altas taxas de nutrientes que circulam neste micro-habitat. Portanto é possível encontrar centenas de espécies marinhas neste ambiente por ter acesso à comida (CETESB, 2007). Alguns organismos deste sistema são bastante sensíveis ao derramamento de óleo, com exceção das algas pardas que possuem em sua epiderme uma camada de mucilagem que impede a fixação do óleo.

Os costões que são expostos (abertos) são favorecidos pela ação natural das marés que dispersa o contaminante. Os costões abrigados (protegido das ondas) são mais sensíveis, pois não há força das ondas para dispersar e eliminar naturalmente o contaminante, a composição

biológica desse ambiente são bastante sensíveis e delicados, pois não possuem proteção externa e o óleo tende a permanecer por muito tempo nas rochas ou em poços que são formados nas fendas das rochas impedindo a proliferação de algumas espécies (CETESB, 2007).

Figura 2 - Costão abrigado contaminado por petróleo, Paranaguá (PR)



Fonte: Cetesb (2007)

Figura 3 - Costões rochosos contaminados por petróleo bruto na praia da Pituba em Salvador, Bahia



Fonte: Marques (2019)

Os métodos de limpeza mais adequados para costões abrigados estão no jateamento à baixa pressão, lavagem com água corrente, bombeamento a vácuo em costões heterogêneos quando há espaçamento indicado na **Figura 4**, remoção manual quando o espaçamento é estreito para a entrada de máquinas como indicado na **Figura 5** e a utilização de absorventes.

Em alguns casos é escolhida a limpeza natural, pois a ação das ondas favorece a dispersão do óleo (para costões expostos), ademais a proliferação de microrganismos resistentes e biodegradantes no local acelera a degradação do contaminante a baixo custo e baixa operação de máquinas (para costões abrigados).

Figura 4 - Bombeamento a vácuo de empoçamentos em costões



Fonte: Cetesb (2007)

Figura 5 - Remoção do contaminante manualmente



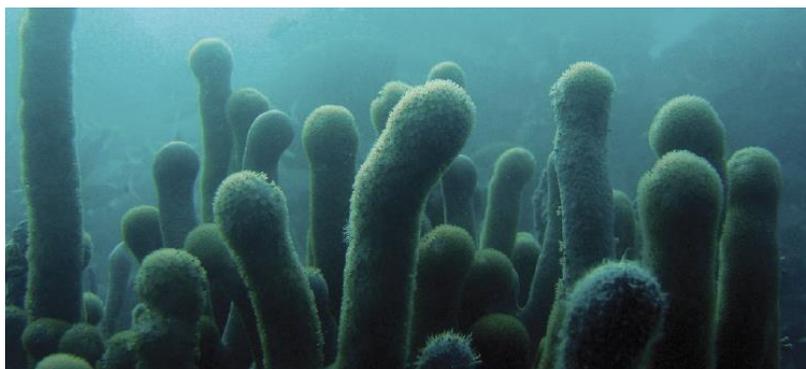
Fonte: Cetesb (2007)

### ***3.1.3 Recifes de coral***

Recifes de coral são formados por estruturas calcárias construídas por pólipos de celenterados que formam colônias em águas rasas, claras e quentes de climas tropicais e subtropicais. Possui alta biodiversidade devido à simbiose entre esses pólipos e as zooxantelas

(microalgas) que se encarregam da produção primária nesse ecossistema, além disso, possuem papel muito importante tanto no ciclo do carbono pois retiram CO<sub>2</sub> da água do mar para a construção dos recifes carbonáticos, quanto na formação de barreiras que protegem as encostas contra a ação das ondas (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Figura 6 - Pólipos dos corais (Plexaurellasp) em Abrolhos (BA)



Fonte: Cetesb (2007)

Recifes de coral são ambientes de grande relevância econômica. No Brasil, apesar de ocupar o 37º lugar com áreas recifais no mundo, possui muitos estados que dependem da economia do turismo e da pesca nesta região, movendo cerca de bilhões de dólares por ano, sendo de essencial fonte de alimento. Estes ambientes são bastante sensíveis à poluição principalmente no que se refere aos impactos causados pelo derramamento de petróleo, pois ocasiona a morte de muitas espécies por recobrimento e toxicação.

Os recifes de coral apresentam seu potencial na bioacumulação de hidrocarbonetos em mucosas e tecidos causando uma série de consequências para outros seres vivos (HAN et al., 2020) entre outras consequências como: A quebra da simbiose entre as microalgas e os corais causando o efeito branqueamento dos corais, a produção excessiva de muco (reação ao estresse) que também recobre a superfície, redução da biodiversidade local pela falta de alimento e pela redução na fecundidade e sucessos reprodutivos. Muitas vezes esse ambiente pode demorar mais de 15 anos para se recuperar (SALAZAR et al., 2017; CETESB, 2007).

As ações de limpeza deste ambiente são extremamente limitadas, dado ao risco de agravar os impactos ocasionados nesta área, portanto a CETESB recomenda a utilização de bombeamento a vácuo para a retirada do óleo na superfície e a utilização de *skimmers* que podem ser estrategicamente colocadas em poças de maré para auxiliar na remoção do óleo na

superfície. A limpeza manual é a mais recomendada, pois não promove riscos adicionais as comunidades.

### **3.1.4 Manguezal**

Estes ambientes são ecossistemas que possuem uma vegetação característica como o mangue vermelho (*Rhizophora Mangle*), mangue branco (*Laguncularia Racemosa*) e mangue preto (*Avicennia Schaueriana*) que são encontrados em regiões tropicais e subtropicais. Desenvolvem-se em estuários com sedimentos finos e locais protegidos por zonas entre marés permitindo que ocorra a reação de oxirredução favorecendo as ciclagens de nutrientes no local (NAIDOO, 2016).

O manguezal apresenta alta biodiversidade, com elevada e diversificada fauna bentônica que habita o sedimento e as raízes sob as árvores do local. Este ecossistema é de extrema importância, pois atua como berçário para muitos organismos estuarinos e costeiros, ademais atua como linha de costa que fornece proteção contra a ação das ondas (CAILIJURI; CUNHA, 2013).

Reconhecendo a alta importância ecológica, econômica e social, este ecossistema no Brasil é considerado como Área de Preservação Permanente (APP) conforme o artigo 2º da Lei Federal 4.771 de 15.09.65, e Reserva Ecológica, “em toda a sua extensão” conforme os artigos 1º e 3º da Resolução CONAMA número 004 de 18.09.85.

Entre muitos ecossistemas costeiros, o manguezal é considerado o mais sensível de todos por ter elevada vulnerabilidade a impactos relacionados ao derramamento de óleo, devido a sua interação da costa com processos físicos que se relacionam com a deposição parcial ou permanente de óleo neste ambiente causando longos danos ambientais e de difícil recuperação, ademais os mangues pretos e brancos, possuem raízes chamadas pneumatóforos que emergem de baixo do sedimento para fora sendo expostos ao ar ou a maré alta, isto permite que haja trocas gasosas, porém se há derramamento de óleo, este se fixa nas raízes sufocando e toxicando a vegetação Os métodos de limpeza são limitados, geralmente são usados absorventes, bombeamento a vácuo ou limpeza natural (ação das marés) (CETESB, 2007).

Figura 7 - Manguezal contaminado por petróleo na Baía de Guanabara



Fonte: Revista Paraíba

Alguns estudos estão sendo desenvolvidos para aprimorar técnicas como a biorremediação, fitorremediação e ficorremediação que possuem poucos riscos ambientais visto que utilizam as espécies nativas da região impactada por petróleo e que apresentam certo grau de resistência ao contaminante e biodegradabilidade. Trabalhos como Silva (2011) que isolou bactérias de sedimentos de manguezal no Rio de Janeiro em placas contendo petróleo e incubadas a 27°C, obtendo como resultado o crescimento desses microrganismos, a biodegradação do contaminante e a produção de biossurfactantes utilizando o petróleo bruto como fonte de carbono.

Moreira (2011) desenvolveu em seu trabalho testes experimentais em escala piloto durante 3 meses utilizando espécies de mangue vermelho (*Rhizophora Mangle*) e um modelo de biorremediação intrínseca como forma de comparação na remoção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos do sedimento. Após 90 dias foi apresentado remoção de 87% dos compostos orgânicos do sedimento pela fitorremediação, entretanto a eficiência aumentou quando bactérias cresceram na rizosfera da planta, comprovando que o uso da biorremediação com a fitorremediação apresentam melhores resultados na remoção de hidrocarbonetos em sedimento de manguezal.

### 3.2 Monitorando os parâmetros

Cai et al. (2015) em seu trabalho, afirma que existe capacidade diferenciada de cada microrganismos em degradar petróleo e seus derivados, pois cada metabolismo precisa de determinadas condições que possibilite utilizar o contaminante como fonte de energia. A taxa

de degradação é diretamente ligada as necessidades microbianas de encontrar condições ambientais favoráveis e específicas, em virtude de facilitar a biodisponibilidade do contaminante para os microrganismos, uma vez que os mesmos não tem tendência ao movimento que permita abranger todo e degradar todo o poluente. Em razão dessa problemática, segue alguns parâmetros a serem monitorados:

### 3.1.2 Composição química do petróleo

A composição química do petróleo compreende em: Hidrocarbonetos Saturados, Hidrocarbonetos aromáticos, Resinas e Asfaltenos (Contém em sua composição Nitrogênio, enxofre e oxigênio denominados - NSO) (FENG et al., 2019).

A análise de Abena et al. (2019) e Al-Hawash et al. (2018) explicam que a depender da composição química do petróleo, alguns microrganismos não apresentam taxas de degradação, outros a taxa é bem pequena e para outros os contaminantes podem ser tóxicos. Microrganismos como fungos e bactérias dependem da composição química do óleo e também dos fatores físico-químicos do ambiente. Segue um pequeno resumo em tabela sobre a composição do óleo e a sua biodegradabilidade.

Tabela 1 - Estrutura química e a biodegradabilidade (U.S. Environmental Protection Agency, 1995)

Biodegradabilidade	Exemplo de Constituintes	Derivados nos quais os constituintes são usualmente encontrados
	n-butano, n-pentano, n-octano	Gasolina
	Nonano	Óleo diesel
	Metilbutano, dimetilpentenos, metiloctanos	Gasolina
	Benzano, tolueno, etilbenzeno, xilenos	Gasolina
	Propilbenzenos	Óleo diesel, querosene
	Decanos	Óleo diesel
	Dodecanos	Querosene
	Tridecanos	Óleos combustíveis para aquecimento
	Tetradecanos	Óleos lubrificantes
	Naftalenos	Óleo diesel
	Fluorantenos	Querosene
	Pirenos	Óleos combustíveis para aquecimento
<b>Menos degradáveis</b>	Acenaftenos	Óleos lubrificantes

Fonte: Microbiologia ambiental, EMBRAPA.

### ***3.1.3 Solubilidade em água***

Hidrocarbonetos misturados em solução aquosa, possuem um comportamento desigual comparado ao solo, pois está relacionado a distribuição do contaminante no meio físico e da presença de material particulado que afeta as características físicas e químicas do óleo e conseqüentemente a sua taxa de biodegradação. Estudo de Jin et al. (2020) demonstraram que os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos de cadeia leve apresentam sensibilidade termodinâmica e que são dissolvidos completamente em água. Já os hidrocarbonetos de cadeia mais densa (seis anéis aromáticos) apresentam mais agregação aos materiais particulados em suspensão na água. A miscibilidade aumenta de acordo a temperatura e densidade (JIN et al.,2020).

### ***3.1.4 Temperatura do solo***

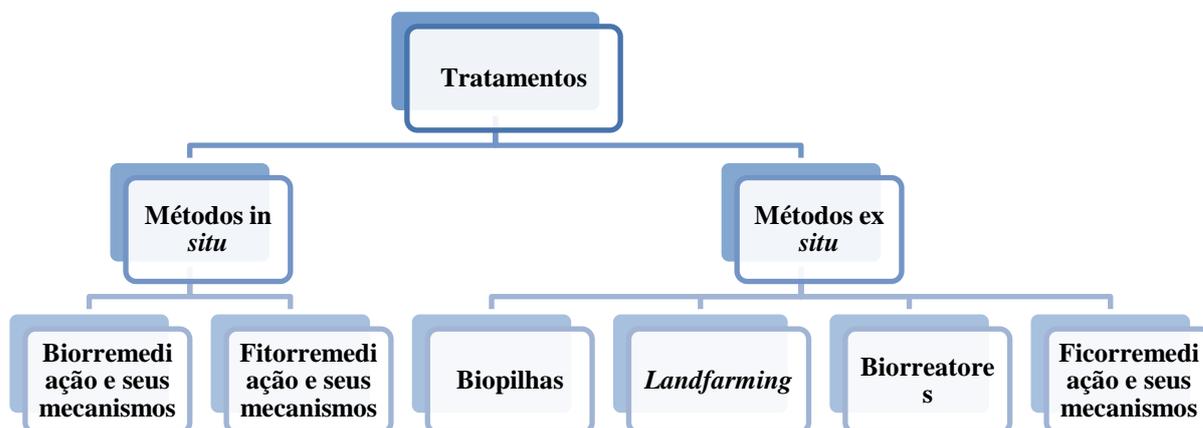
Considerando os estudos de Chang et al. (2011), a temperatura é um importante fator na atividade microbiana por representar um aumento na biodegradação a cada 10°C adicionados no meio até atingir temperaturas inibitórias, que para a maioria dos microrganismos é aproximadamente 40°C. A temperatura proporciona mudanças nas propriedades físicas e químicas do composto que conseqüentemente influencia na sua solubilidade, volatilização e concentração e também proporciona mudanças no metabolismo microbiano. A taxa de biodegradação está diretamente relacionada ao ambiente e a proporção da concentração do contaminante. De acordo com a sua composição química que, a depender da ligação, e de acordo a temperatura do ambiente, que influencia na ligação, pode causar interferência na solubilidade e conseqüentemente na biodisponibilidade do contaminante no meio (CHANG et al., 2011).

## **3.3 Estratégias de tratamento**

Ao longo de muitos anos, muitos países vêm se preocupando com a contaminação no meio ambiente, desta maneira foram desenvolvendo muitas tecnologias que possibilitasse a descontaminação a baixa custo. O Brasil, visualizando os problemas futuros, vem desenvolvendo suas próprias tecnologias e adaptando outras existentes para a realidade atual. Atualmente, existe 3 (três) estratégias básicas que são utilizadas para a remediação de áreas

contaminadas por petróleo, tais como: destruição ou alteração dos contaminantes, extração ou separação dos contaminantes, imobilização dos contaminantes.

Considerando o artigo de Paulo Seabra (2008), As únicas tecnologias que tem capacidade de destruir contaminantes ou alterar a sua estrutura química são divididas em processos físicos (incineração, dessorção térmica, lavagem com água e outros), químicos (Solidificação/estabilização, oxidação química, entre outros) e biológicos (biorremediação, fitorremediação e ficorremediação). A depender do tipo de contaminação, local que foi atingindo e da matriz a ser tratada. biorremediação sobrevêm em métodos específicos que são classificados como *in situ* e *ex situ*, como especificado no esquema abaixo:



Os métodos a seguir foram, em sua maioria, retirados do livro microbiologia ambiental da EMBRAPA, considerando os editores técnicos Itamar Soares e João Lúcio.

### 3.4 Métodos *in situ*

Os métodos *in situ* são realizados no local em que houve a contaminação. Estes métodos possuem preferência em muitos locais por serem economicamente mais acessíveis. Alguns exemplos:

### **3.4.1 Biorremediação**

Segundo Seabra (2008), define biorremediação como um conjunto de processos de tratamento que utiliza microrganismos (bactérias e fungos) para biodegradar, reduzir ou eliminar o risco de compostos orgânicos e inorgânicos perigosos ao meio ambiente e à saúde humana.

Esta técnica pode utilizar tanto microrganismos nativos como exóticos, porém para acelerar o processo pode ser adicionado nutrientes que estimulam o crescimento microbiano e a biodegradação do contaminante como específica a biorremediação melhorada do solo que é uma otimização da biodegradação, que consiste na utilização de microrganismos nativos ou adicionados na região contaminada, sendo estimulados por soluções aquosas em concentrações razoáveis e adição de biosurfactantes possibilitando a biodisponibilidade do contaminante, a imobilização de poluentes inorgânicos e a biodegradação de poluentes orgânicos. Existem alguns mecanismos empregados a biorremediação, são eles:

#### **3.4.1.1 Bioventilação**

É uma técnica utilizada para remediar solo contaminado por compostos aerobicamente degradáveis. Utiliza bactérias aeróbicas, portanto precisa fornecer oxigênio para a região por meio de tubos, sendo por extração ou por injeção de ar de fluxo lento que auxilia na atividade microbiana (U.S. Army Environmental center, 2002). Como exemplo desta adição, mostra-se na **Figura 6** a implantação de difusores de oxigênio para acelerar a biorremediação em poços de água subterrânea. A utilização deste equipamento é indicada para a biodegradação de produtos petrolíferos de peso médio.

Figura 8 - Difusores de oxigênio sendo instalados em poços de água subterrânea para biorremediação intrínseca



Fonte: Pollutio Engineering

#### *3.4.1.2 Atenuação natural monitorada ou biorremediação intrínseca*

Denominado também de biorremediação passiva ou intrínseca, consiste no uso de processos físicos, químicos e biológicos naturais que possibilita em tempo razoável a degradação do contaminante. Por depender exclusivamente de processos naturais, o processo se torna lento, então faz parte o uso de outras técnicas como volatilização, diluição e sorção para a descontaminação do ambiente (VARJANI; UPASANI, 2019)

Alguns autores afirmam que a atenuação natural impede que o contaminante se disperse o que ocasiona a diminuição do poluente no meio ambiente. Ao se tratar de hidrocarbonetos ocorre uma reação oxi-redução onde este é oxidado e um aceptor de elétrons é reduzido, assim destaca-se a importância da adição de oxigênio, nitrato, sulfato e água, pois são aceptores de elétrons (VARJANI; UPASANI, 2019).

#### **3.4.2 Bioestimulação**

A bioestimulação implica na utilização de microrganismos na área contaminada empregando, oxigênio, água, nutrientes orgânicos e inorgânicos visando estimular o metabolismo microbiano e acelerar a degradação (WU et al., 2019). Fertilizantes, ureia parafinada, octilfosfato, octoato férrico, fosfato duplo de amônia e magnésio parafinado,

também podem ser utilizados para estimular a biodegradação em diferentes ecossistemas aquáticos (WU et al., 2016).

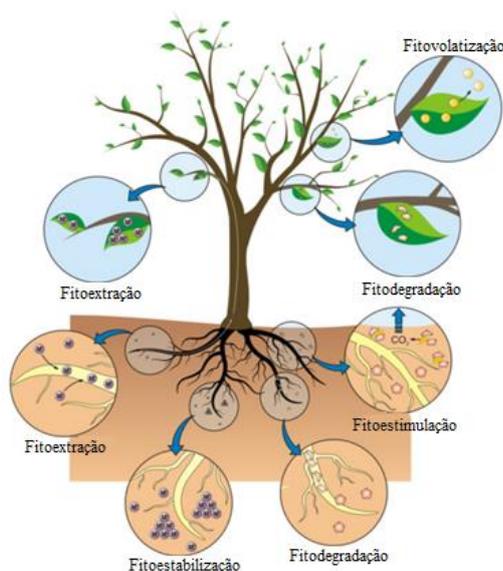
### 3.4.3 Bioaumentação

Rosa (2006) explica que esta técnica visa adicionar microrganismos no local e complementar com surfactantes e solução aquosa os quais biodisponibilizam os contaminantes no solo e ativam as atividades microbianas. Para a utilização desta técnica, necessita avaliar as condições e parâmetros dos microrganismos presentes na região, isolá-los em laboratório para identificar qual o tipo de colônia degrada aquele contaminante, além de saber qual o potencial de biodegradabilidade posteriormente adicioná-los ao local com o objetivo de proliferar os microrganismos que degradam aquele contaminante.

### 3.4.4 Fitorremediação

A fitorremediação utiliza plantas que permite remover, estabilizar, transferir ou destruir os contaminantes orgânicos e inorgânicos presente no solo. Assim como existe muitas técnicas de biorremediação, igualmente para a Fitorremediação, Moreira (2011) revela em seu trabalho cinco principais mecanismos fisiológicos das plantas, sendo:

Figura 9 - Representação simples em forma de desenho dos mecanismos da Fitorremediação



Fonte: Intech open Science

#### 3.4.4.1 *Fitoextração*

As plantas absorvem o contaminante pelas raízes podendo armazenar nesta região ou acumular nas partes aéreas (folhas). Este processo se aplica na extração do contaminante principalmente de metais tóxicos e podendo ser utilizado também para contaminantes orgânicos. Para metais, a planta não possui capacidade em transformar o contaminante, portanto ao extrair-lo é preciso remover esta planta e transferi-la para outro local de remediação, pois o metal é um poluente bioacumulativo, ou seja, acumula-se ao longo da cadeia ecológica. Trabalho desenvolvido por Santos et al. (2015) apresentou a eficiência do mangue preto na remoção dos hidrocarbonetos totais do petróleo, correspondendo a degradação de 66,87%.

#### 3.4.4.2 *Fitodegradação*

Os contaminantes orgânicos são degradados dentro da célula vegetal através de enzimas específicas. Segundo Cunnigham (1996) apud Moreira (2011), destacam-se, em seus trabalhos, as enzimas nitroredutases (degradação de nitroaromáticos), desalogenases (degradação de solventes clorados e pesticidas) e lacases (degradação de anilinas), sendo *Populus* sp. e *Myriophyllum spicatum* exemplos de plantas fitodegradadoras.

#### 3.4.4.3 *Fitoestabilização*

Segundo Cunnigham (1996) apud Moreira (2011), os contaminantes são incorporados à lignina da parede vegetal precipitando os metais sob formas insolúveis evitando a dispersão do contaminante no solo.

#### 3.4.4.4 *Fitoestimulação ou biodegradação na rizosfera*

Este mecanismo está em conjunto com a biorremediação, acelerando na biodegradação, pois as plantas possuem capacidade de liberar substâncias, fornecer oxigênio, fornecer nutrientes, aumentar a permeabilidade do solo naturalmente facilitando no transporte de água e de aeração, assim proporciona a proliferação de microrganismos, auxiliando na

biodegradação de contaminantes orgânicos. Além disso, as plantas podem secretar enzimas próprias biodegradativas no solo (CASTRO; BUCIO, 2019).

#### 3.4.4.5 Fitovolatilização

Há uma conversão dos íons de elementos tóxicos nas raízes das plantas para formas não tóxicas ao meio ambiente, podendo ser convertidos tanto metais pesados quanto derivados de petróleo (MOREIRA, 2011).

### 3.5 Métodos *ex situ*

São técnicas em que há a remoção do substrato contaminado realizando a remediação em outro local previamente adaptado e isolado adequadamente. Essas técnicas utilizam a biorremediação para a degradação do contaminante (BOOKS, 1998)

#### 3.5.1 Landfarming

Consiste em um sistema de tratamento de uma célula impermeabilizada que evite a percolação dos lixiviados onde o solo contaminado será disposto e homogeneizado periodicamente por meio de aragem. Neste sistema, a degradação dos contaminantes é feita pelo metabolismo dos microrganismos nativos. É imprescindível o monitoramento de parâmetros que garantem a sobrevivência e o controle do poluente e dos microrganismos. Estes parâmetros são estabelecidos pela U.S. Army Environmental center de 2002, sendo considerados importantes o controle da umidade, PH, concentração do contaminante, propriedades do solo, temperatura , volatização, dentre outros. Alguns países como a Argentina, utiliza esta técnica para remediar solos contaminados por petróleo, como mostra a **Figura 10**.

Figura 10 - Arando a terra para aplicar produtos que estimulam a biodegradação



Fonte: DeslerIngeniería y serviciosambientales

### 3.5.2 *Biopilha*

É uma tecnologia utilizada em escala industrial como uma adaptação da compostagem. O funcionamento deste sistema é expresso por escavações do solo contaminado, colocando em pilhas em conjunto com a aeração e adição de nutrientes no solo que estimula a atividade degradativa dos microrganismos. Similarmente ao landfarming, as biopilhas são normalmente dispostas em locais impermeabilizados para reduzir o risco de migração do lixiviado em regiões de subsuperfícies. Esta técnica é eficiente para reduzir as concentrações de produtos derivados do petróleo sendo as cadeias de carbono mais leves removido através da evaporação e as cadeias de carbono mais pesadas removidos pela biodegradação mais significativa.

Figura 11 - Biopilhas construídas em uma empresa de São Paulo



Fonte: North Shore Engineering do Brasil

### **3.5.3 Biorreator**

Envolve tratamento controlado do solo escavado, geralmente em estado lama. Primeiramente passa por um processo de retirada de pedras e entulhos, para logo em seguida ser misturado com água, para facilitar a biodegradação. No Brasil, o centro de tecnologias mineral (CETEM) está desenvolvendo um biorreator sólido patrocinado pela Petrobrás com eficiência de remoção de 60% (JACQUES et al., 2007; LIMA, 2010) O Biorreator sólido funciona com o objetivo de tratar solo escavados não homogêneos e argilosos que dificultam no manuseio e que degradam contaminantes orgânicos voláteis e semi-voláteis.

### **3.5.4 Fitorremediação**

A fitorremediação utiliza microalgas ou algas que para remover contaminantes orgânicos e inorgânicos de águas residuais. Diversas espécies de microalgas têm demonstrado adaptação a ambientes contaminados por diferentes poluentes. Em particular, a tolerância das microalgas aos contaminantes antropogênicos vem influenciando na investigação dos efeitos desses componentes nas células microalgáceas. A adaptação desses microrganismos em ambientes contaminados por petróleo depende de vários fatores como: característica do óleo, influência de dispersantes e o tipo do ecossistema afetado. Portanto, algumas pesquisas identificam os processos ficológicos para avaliar a adaptação de estirpes de microalgas em ambientes contaminados por petróleo, bem como analisar a eficiência no tratamento de água produzida ou águas marinhas contaminadas por petróleo no que se refere a remoção de hidrocarbonetos do petróleo (MARTINEZ et al., 2011)

A utilização de biotecnologias a base de microalgas é caracterizada como um tratamento autossustentável, visto que esses seres microscópicos são fotossintetizantes e podem ser mixotróficos, ou seja realizam fotossíntese utilizando a luz solar como fonte de energia e biofixação do CO<sub>2</sub> para seu desenvolvimento próprio, mas também são capazes de absorver outros compostos (seja orgânico ou inorgânico) presentes no meio aquoso, sendo neste caso os hidrocarbonetos do petróleo como potencial fonte de carbono orgânico para as microalgas (AMMAR et al., 2018).

Uma pesquisa foi desenvolvida realizando testes experimentais com duas espécies de microalgas marinhas cultivadas em diferentes concentrações de água produzida que contem hidrocarbonetos provenientes do petróleo (concentrações (v/v %) de 10%, 25% e 50%)

cultivadas em fotobiorreatores de batelada durante 21 dias de cultivo. O objetivo deste trabalho foi verificar a remoção de hidrocarbonetos totais do petróleo e geração de biomassa microalgal. Foi possível observar que as microalgas apresentaram adaptação e crescimento em água residuais contendo 25% e 50% de água produzida, sendo gerado em média 0,856 e 0,311 g L<sup>-1</sup> de biomassa seca. A microalga marinha foi capaz de remover cerca de 66,5% de hidrocarbonetos no tratamento contendo 50% de AP e 89% de hidrocarbonetos no tratamento contendo 10% de água produzida (AMMAR et al., 2018).

Outro trabalho desenvolvido por Marques et al. (2019), apresentou como principal objetivo avaliar a remoção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos provenientes da água produzida do petróleo utilizando uma espécie de microalga marinha. Esta espécie foi cultivada em cinco gradientes diferentes de água produzida diluída em água salina (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Ao final do experimento de 28 dias, a microalga apresentou adaptação e crescimento a alta salinidade da água produzida. A eficiência de remoção dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos foi de 94%. Compostos como o naftaleno, benzo (a) pireno e benzo (k) fluoranteno foram os que apresentam maiores remoções em água com 94% a 98%.

As vantagens de utilizar microalgas para a remediação de águas contaminadas por petróleo é que esses microrganismos absorvem o carbono disponível no meio aquoso para compor suas células e demais atividades metabólicas. Após essa absorção (tratamento da água), é gerado biomassa que pode ser secada após o cultivo e extraído elementos essenciais que forneceram a produção de bioprodutos como: Lípidios para geração de biodiesel, proteínas e carboidratos para a geração de biopolímeros para bioplásticos e a própria biomassa apresenta componentes que influencia na geração de biofertilizantes.

#### **4 CONCLUSÃO**

Analisando as vantagens e desvantagens dos métodos de limpeza supracitados, considera-se a biorremediação como o melhor método de descontaminação de áreas costeiras e solos contaminados por petróleo e seus derivados, evitando-se ocasionar outros danos ao ambiente. Os métodos que complementa a biorremediação aumentam a eficiência da biodegradação devido à estimulação do crescimento dos microrganismos, ademais os métodos *in situ* são considerados mais eficazes em larga escala, pois evita elevado custo de tratamento com a retirada do contaminante e transporte para outro local. Para tratamento em sedimentos se torna apropriado a integração de plantas com microrganismos em sua rizosfera, pois

aumenta a degradação de contaminantes orgânicos e conseqüentemente possibilita a adaptação e crescimento destas plantas em sedimentos contaminados por petróleo. Com relação a remediação em águas contaminadas, a fitorremediação tem demonstrado ser uma técnica de remediação interessante, pois apresenta eficiência na remoção de hidrocarbonetos e biofixação de CO<sub>2</sub>, bem como geração de bioprodutos após a remediação. Diante de muitos resultados vistos, apenas a atenuação natural proporciona uma baixa biodegradabilidade, por haver colônias muito diferenciadas de microrganismos presentes na região em que nem todas possuem capacidade de metabolizar o contaminante e impede o crescimento de outras colônias que conseguem biodegradar, além de não possuir nenhum estímulo extra, como adição de nutrientes.

## REFERÊNCIAS

- ABENA, M. T. B., LI, T., SHAH, M. N., ZHONG, W. Biodegradation of total petroleum hydrocarbon (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation. **Chemosphere**. v. 234, p. 864 – 874, 2019.
- AL-HAWASH, A. B., DRAGH, M. A., LI, S., ALHUJAILY, A., ABBOOD, H. A., ZHANG, X., MA, F. Principles of microbial degradation of petroleum hydrocarbon in the environment. **Egyptian Journal of Aquatic Research**. v. 44, p. 71 – 76, 2018.
- AMMAR, S. H.; KHADIM, H. J.; MOHAMED, A. I. Cultivation of *Nannochloropsis oculata* and *Isochrysis galbanum* microalgae in produced water for bioremediation and biomass production. **Environmental Technology & Innovation**. v. 10, p. 132-142, 2018.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis. **Anuário estatístico Brasileiro do Petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2011.
- BROOKS, P. C. The use of microbial parameters in soil pollution by heavy metals. **Biol. Fertil. Soils**, v.19, p. 269-279, 1998.
- CAI, M., YU, C., WANG, R., SI, Y., MASAKORALA, K., YUAN, H., YAO, J., ZHANG, J. Effects of oxygen injection on oil biodegradation and biodiversity of reservoir microorganisms in Dagang oil field, China. **International Biodeterioration & biodegradation**. v. 98, p. 59 – 65, 2015.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 197p.
- CASTRO, R. O.; BUCIO, J. L. Review: Phytostimulation and root architectural responses to quórum-sensing signals and related molecules from rhizobacteria. **Plant Science**. v. 284, p. 135 – 142, 2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Ambientes costeiros contaminados por óleo, procedimentos de limpeza.** São Paulo, 2007.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório anual de qualidade do ar 1996.** São Paulo, 1996.

CHANG, W., WHYTE, L., GHOSHAL, S. Comparison of the effects of variable site temperatures and constant incubation temperatures on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in pilot-scale experiments with field-aged contaminated soils from a cold regions site. **Chemosphere.** v. 82, p. 872 – 878, 2011.

FENG, S., CUI, C., LI, K., ZHANG, L., SHI, Q., ZHAO, S., XU, C. Molecular composition modelling of petroleum fractions based on a hybrid structural unit and bond-electron matrix (SU-BEM) framework. **Chemical Engineering Science.** v. 201, p. 145 – 156, 2019.

GONZÁLEZ, A. A.; MARQUÉS, S. Bacterial diversity in oil-polluted marine coastal sediments. **Current Opinion in Biotechnology.** v. 38, p. 24 – 32, 2016.

HAN, M., ZHANG, R., YU, K., LI, A., WANG, Y., HUANG, X. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in corals of the South China Sea: Occurrence, distribution, bioaccumulation, and considerable role of coral mucus. **Journal of Hazardous Materials.** v. 384, p. 121299, 2020.

INTERNACIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED – ITOPF. **Oil Tanker Spill Statistics 2019.** Disponível em: <<https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>> Acesso em: 15 de mar. 2020.

JACQUES. R.J.S. et al. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.** Revisão bibliográfica, ago. 2007.

JIN, H., DING, W., CHEN, B., BAI, B., ZHAO, Q., CAO, C. A molecular dynamics simulation investigation on the solubility of polycyclic aromatic hydrocarbon in supercritical water. **Journal of molecular liquids.** v. 301, p. 112464, 2020.

LIMA, D.F. **Biorremediação em sedimentos impactados por petróleo na Baía de Todos os Santos, Bahia:** avaliação da degradação de hidrocarbonetos saturados. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

MARQUES, I. M. **Investigação biogeoquímica da remoção de HPAs de água de produção de petróleo utilizando fotobiorreatores com microalgas marinhas.** 50 fl. 2019. Dissertação (Mestrado em geoquímica: Petróleo e meio ambiente) - Universidade Federal da Bahia. 2019.

MARTINEZ, D. C.; SANZ, A. M.; RODAS, V. L.; COSTAS, E. Adaptation of microalgae to a gradient of continuous petroleum contamination. **Aquatic Toxicology,** v. 101, p. 342 – 350, 2011.

MICHEL, J. et al. **An Introduction to Coastal Habitats and Biological Resources for Oil Spill Response.** NOAA, Seattle, p. 401. Oil Spill Response and Clean up Techniques p. 1-103, 1992.

MOREIRA, I.T.A. **Avaliação da eficiência de modelos de remediação aplicados em sedimentos de manguezal impactados por atividades petrolíferas.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

NAIDOO, G. The mangrove of South Africa: An ecophysiological review. **South African Journal of Botany.** v. 107, p. 101 – 113, 2016.

North Shore Engineering do Brasil. **Consultoria Ambiental.** Disponível em: <<http://www.northshorebrasil.com.br/#servicos>> Acesso em: 25 jan. 2016.

OSSAI, I. C., AHMED, A., HASSAN, A., HAMID, F. S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. **Environmental Technology & Innovation.** v. 17, p. 100526, 2020.

ROSA, A.P. & TRIGÜIS, J. A. Processo de biorremediação usando o fertilizante NPK, em eventuais derrames de óleo – Experimentos Laboratoriais. **Revista Brasileira de Geociências,** v. 36, n. 2, p. 232 – 242, 2006.

SALAZAR, I. V., ARANA, H. A. H., MEAVE, J. A., ZÁRATE, M. A. R., ZEPEDA, A. V., GANIVET, J. P. C., ADAME, H. L. Did the Community structure of a coral reef patch affected by a ship grounding recover after 15 years? **Merging historical and recente data sets.** v. 144, p. 59 – 70, 2017.

SANTOS, N. C. P., MOREIRA, I. T. A., FRANCO, E. D. S., LIMA, J. V., SANTOS, M. B. P. *Avicennia schaueriana* (mangue preto) na fitorremediação de sedimentos de manguezal impactados por atividades petrolíferas. **Jornada de iniciação científica – JUIC UNIFACS,** 2015.

SEABRA, P. **Biorremediação de solos contaminados por petróleo e derivados.** Rio de Janeiro: Petrobrás/CENPES, 2008.

SILVA, A.M.F. **Biodegradação de petróleo e produção de biossurfactante por bactérias nativas do sedimento de manguezal de gargaú, São Francisco do Itabapoana-RJ.** Universidade Estadual do Norte Fluminense, mar. 2011.

VARJANI, S.; UPASANI, V. N. Influence of abiotic factors, natural attenuation , bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil. **Journal of Environmental Management.** v. 245, p. 358 – 366, 2019.

WU, M., DICK, W. A., LI, W., WANG, X., YANG, Q., WANG, T., XU, L., ZHANG, M., CHEN, L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and microbial Community in a petroleum-contaminated soil. **International Biodeterioration & biodegradation.** v. 107, p. 158 – 164, 2016.

WU, M., WU, J., ZHANG, X., YE, X. Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial Community composition in petroleum-contaminated loessal soil. **Chemosphere**. v. 237, p. 124456, 2019.

ZILIO, E; PINTO, U. **Identificação e distribuição dos principais grupos de compostos presentes nos petróleo brasileiro**. Rio de Janeiro: Petrobrás, mar. 2002.