



## Fitorremediação de Solos Contaminados por Derramamento de Petróleo

### Phytoremediation of Soils Contaminated by Oil Spills

Milena Marlim Caria de Souza

José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos

Com o crescimento da população mundial e o avanço da economia global, a demanda por bens de consumo vem sofrendo grande ascensão, sendo cada vez mais requisitada a produção de petroquímicos. Os produtos mais conhecidos são: Nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, óleo lubrificante, óleo combustível, asfalto, fertilizantes, detergentes, ceras, Gás Liquefeito do Petróleo (GLP) e plásticos. O petróleo é considerado uma das maiores fontes de energia do planeta e sua produção industrial consiste desde a perfuração de poços, refino, armazenamento, transporte e distribuição. Durante sua prospecção, processo e produção, contaminações do solo podem ocorrer podendo-se citar suas principais fontes: Acidentes com vazamento de combustíveis, descarte de lubrificantes residuais da produção, descarga e vazamentos de solventes em áreas industriais, armazenamento incorreto de óleos lubrificantes, bem como vazamento na exploração do petróleo. Como forma de mitigar os danos ambientais acentuados pelo tempo de residência do petróleo no solo, tem-se investido em técnicas viáveis de remediação. A fitorremediação é uma técnica promissora, economicamente viável, de recuperação de solos contaminados. Baseia-se na utilização apenas de espécies vegetais, que visam remover parcial ou substancialmente a concentração e/ou toxicidade dos contaminantes no ambiente degradado. O presente artigo discute os métodos e técnicas de fitorremediação de solos contaminados com petróleo e seus derivados, suas vantagens e desvantagens.

**Palavras-chave:** Fitorremediação, Petróleo, derramamento de óleo, solo contaminado

With the growth of the world population and the advance of the global economy, the demand for consumer goods has undergone a great increase, with the production of petrochemicals being increasingly requested. The most popular products are: Naphtha, gasoline, kerosene, diesel oil, lubricating oil, fuel oil, asphalt, fertilizers, detergents, waxes, Liquefied Petroleum Gas (LPG) and plastics. Oil is considered one of the largest sources of energy on the planet and its industrial production consists of well drilling, refining, storage, transportation and distribution. During its prospection, process and production, soil contamination can occur with the main sources being accidents with fuel leakage, disposal of residual lubricants from production, discharge and leakage of solvents in industrial areas, incorrect storage of lubricating oils, as well as leaks during oil exploration. As a way to mitigate the environmental damage caused by these contaminations, accentuated by the oil residence time in the soil, investments have been made in remediation techniques. Phytoremediation is a promising, economically viable technique for recovering contaminated soils. It is based on the use of plant species to partially or substantially remove the concentration and / or toxicity of contaminants in the degraded environment. In the present work, we discuss the available methods and techniques for the phytoremediation of soils contaminated by oil and its derivatives, their advantages and disadvantages.

**Keyword:** Phytoremediation, petroleum, oil spill, soil contamination

M.M.C. Souza

Engenheira Química e Especialista em Avaliação de Impactos e Recuperação de Áreas Degradadas, Mestre em Geoquímica: Petróleo e Meio ambiente. e-mail: [milena.eq@gmail.com](mailto:milena.eq@gmail.com)

J.A.S.A. Anjos

Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. R. Barão de Jeremoabo, s/n – Ondina - Salvador - BA, 40170-290. E-mail: [jose.anjos@ufba.br](mailto:jose.anjos@ufba.br) . <https://orcid.org/0000-0002-9343-1605>

## 6.1 Introdução

A produção de petróleo vem crescendo junto com o crescimento da população mundial e o avanço da economia global. A demanda por bens de consumo fabricados a partir do petróleo, tendem a conduzir cada vez mais o foco econômico para as unidades de petroquímicos e unidades de refino, consequentemente os investimentos nesse setor vêm sendo realizados por meio do aumento de capacidade da produção nas plantas de processo. O uso cada vez maior de energia pela humanidade tem exigido um aumento na produção desse importante insumo, o que entra em conflito com a necessidade de conservação do meio ambiente.

De acordo com Andrade, Augusto e Jardim (2010), o petróleo é uma mistura complexa de vários compostos e sua composição, bem como suas propriedades físicas, variam de um campo petrolífero para outro. Compostos como alcanos saturados, alcanos insaturados de cadeia linear (metano, etano, propano), compostos orgânicos aromáticos como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), Hidrocarbonetos Totais (HTP) e hidrocarbonetos aromáticos que em sua fórmula possuem Nitrogênio e Enxofre. Alguns são extremamente prejudiciais ao desenvolvimento da biota e consequentemente comprometem, em diversos níveis, à saúde humana, como o BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xileno), exigindo atenção ambiental bem como para a saúde pública. De acordo com a Agência Internacional de Pesquisa de Câncer (IARC), este composto é englobado na classe I, ou seja, comprovadamente cancerígeno ao homem.

Ambientes contaminados por compostos orgânicos hidrofóbicos, como os HPAs, considerados poluentes perigosos e tóxicos, é uma preocupação ambiental (ZHANG et al., 2016). De acordo com Loureiro (2010) e Rocha (2010), os HPAs são compostos orgânicos que merecem destaque e são formados por dois ou mais anéis aromáticos condensados. Eles são compostos apolares, semivoláteis (a depender da quantidade de anéis condensados), lipofílicos, com alta afinidade pela matéria orgânica, recalcitrantes e hidrofóbicos (RUBIO-CLEMENTE, TORRES-PALMA, PEÑUELA, 2014; PETROBRAS, 2012; GONG et al., 2015; MUFF, SOGAARD, 2010; LOUREIRO, 2010; BISPO, 2005).

A contaminação de ambientes como solo, ar e água tem elevado muito nos últimos anos, assim como estudos de alternativas de remediação de locais contaminados. Existem diferentes tecnologias para atingir o objetivo da descontaminação e um método que tem sido muito viável, tanto tecnicamente quando economicamente, é a fitorremediação. De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007), a colonização vegetal em solos degradados pode ajudar na melhoria de características físicas e químicas da área, principalmente em solos poluídos, ocasionando a redução de teores dos poluentes ou de periculosidade implícita.

Segundo Moreira e Colaboradores (2011), fitorremediação é uma tecnologia biológica que utiliza uma planta para elevar a degradação de contaminantes em solo, sedimento e água subterrânea. É uma técnica que pode ser rentável em grandes áreas com um nível residual de contaminação por orgânicos, nutrientes e poluentes metálicos, quando a técnica é aplicada corretamente.

O objetivo desse trabalho é estudar a fitorremediação como uma técnica viável para a remoção total ou parcial do petróleo e seus derivados, de solos contaminados. Analisar também, a influência de fatores que podem dificultar, acentuar ou influenciar no sucesso desta técnica de remediação.

## 6.2 Metodologia

De acordo com Marconi e Lakatos (1992), a pesquisa bibliográfica é o levantamento de toda a bibliografia já publicada, em forma de livros, revistas, publicações avulsas e imprensa escrita. A sua finalidade é fazer com que o pesquisador entre em contato direto com todo o material escrito sobre um determinado assunto, auxiliando o cientista na análise de suas pesquisas ou na manipulação de suas informações. Ela pode ser considerada como o primeiro passo de toda a pesquisa científica.

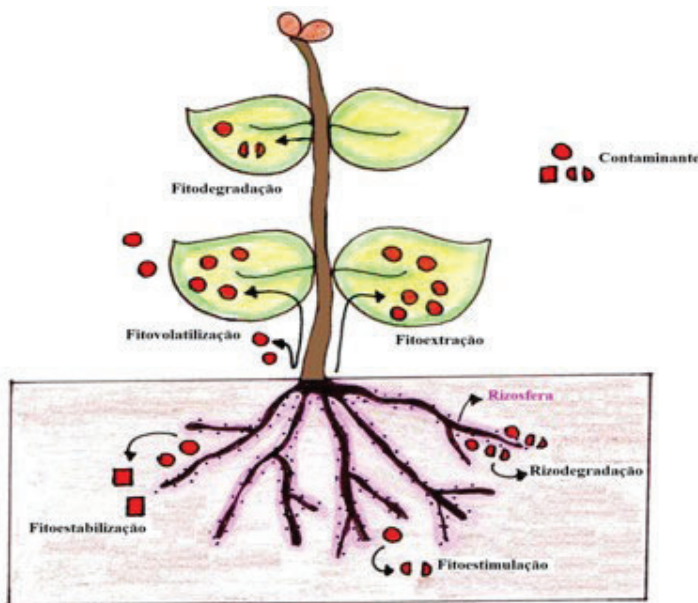
No presente trabalho foram utilizados artigos publicados em períodos científicos, congressos, livro de fitorremediação de petróleo e metais pesados, citados especificamente em referências, ao final deste trabalho. Os termos pesquisados foram: Fitorremediação, espécies fitorremediadoras de petróleo, petróleo, caracterização do petróleo, interação do contaminante com o solo, características do solo que favorecem a técnica de fitorremediação, características do solo que inviabilizam a técnica, noções de atividades microbiológicas.

## 6.3 Resultados e Discussões

Pelo fato de existir uma demanda crescente do petróleo e seus derivados, o número de acidentes tem se elevado, apesar do trabalho de prevenção e ações de segurança estarem mais avançados. Com os acidentes, ocorrem derramamentos de petróleo e/ou de seus derivados, o que proporciona a busca por formas de remediação dessas áreas contaminadas, uma vez que, boa parte das substâncias presentes no petróleo são prejudiciais à saúde humana, animal e ambiental

### 6.3.1 Fitorremediação

A fitorremediação tem sido uma técnica promissora principalmente por não possuir um custo elevado e também sua matéria prima necessária acessível para a realização do processo de re-



**Figura 6.1:** Mecanismos atuantes na fitorremediação. Fonte: Imagem retirada do material presente em: [www.aprenda.bio.br](http://www.aprenda.bio.br)

mediação. Essa técnica é subdividida em cinco diferentes que são: Fitoextração, Fitotransformação, Fitovolatilização, Fitoestimulação e Fitoestabilização (LEITE et al., 2019).

De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007), a fitoextração irá absorver o contaminante utilizando um vegetal fitoextrator. Há assim o armazenamento no tecido vegetal, implicando assim em descarte posterior da planta. Quando colhidas, os vegetais fitoextratores levam consigo os poluentes, deixando o ambiente livre de substâncias tóxicas. A desvantagem da fitoextração é que o contaminante estará apenas sendo transferido e não degradado. O vegetal extrator deverá ter um destino adequado que pode ser: Incineração, deposição em aterros, co-processamento na fábrica de cimentos ou encaminhada para produção de fibras e moveis.

Na fitotransformação, o vegetal fitorremediador irá absorver e metabolizar o contaminante. É empregado na remediação de compostos orgânicos, que é presente na composição do petróleo. O poluente irá sofrer bioconversão no interior da planta. Metanos, propanos, etanos, butanos e pentanos são fitotransformadas pelo feijão, uva, noz, pera e milho. De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007), a absorção de compostos orgânicos irá depender do tipo da planta, da idade do contaminante e de inúmeros fatores físicos e químicos do solo.

Na fitovolatilização, o vegetal utilizado, remove os contaminantes por meio da volatilização dos mesmos. Essa biodegradação pode ocorrer na rizosfera ou na passagem do contaminante na própria planta. O poluente pode ser absorvido durante a passagem no corpo da planta que sofrerá processos metabólicos e então será liberado na superfície da folha da planta. Caso não haja absorção, ocorrerá sua liberação na atmosfera em uma

forma transformada ou em sua forma original. Por este motivo, esta técnica deve ser trabalhada com cuidado, já que a planta pode liberar poluente numa elevada concentração na atmosfera.

Na fitoestimulação os microrganismos em conjunto com o vegetal, são envolvidos direta e indiretamente na degradação do poluente. A planta utiliza suas raízes em crescimento para elevar a presença desses microrganismos, que são capazes de degradar o contaminante (LEITE et al., 2019). É chamado de rizodegradação quando a degradação do poluente acontece nas raízes, modificando também alguns fatores do solo como aeração e umidade além de produzir exsudatos que favorecem o aumento dos microrganismos e logo sua biodegradação. É uma técnica adequada para contaminantes orgânicos ou organometálicos.

Na fitoestabilização ocorre um conjunto de mecanismos físicos, químicos e físico-químicos. Mecanismo físico, pois há a proteção, ocasionada pela planta, da incidência direta de ventos e chuvas no solo reduzindo a chance de desagregação do mesmo e lixiviação do poluente. Mecanismo químico, pois ocorre uma mudança química (mudança do pH do solo mediante produção de CO<sub>2</sub>) e/ou microbiológica na parte da raiz. Este processo minimiza a biodisponibilidade desses contaminantes promovendo a prevenção de sua entrada nas águas subterrâneas e/ou cadeia alimentar. Este processo promove a limitação da mobilidade do contaminante no solo, este assim sendo incorporado na raiz da planta (LEITE et al., 2019). Por meio da humificação, as enzimas e os microrganismos presentes na planta, unem os contaminantes ao húmus do solo e por meio da lignificação há a imobilização do poluente em ligninas das paredes celulares. Todos os mecanismos explicados anteriormente estão exemplificados na Figura 7.1.

De acordo com Lambert, Soares e Souza (2012), é importante salientar que cada técnica de tratamento é dependente de alguns fatores como: condições físicas, químicas e biológicas do ambiente contaminado, concentração do poluente e tempo requerido para a degradação ou a remoção do composto alvo, conforme a técnica empregada.

A fitorremediação é uma técnica que possui baixo custo quando comparada a outros tipos de tratamento em ambientes contaminados, Tabela 6.1. De acordo com Lambert, Soares e Souza(2012); Andrade, Tavares e Mahler (2007) ;Figueiredo, Capitani e Colaboradores (2012), essa técnica possui inúmeras vantagens entre elas: Melhoria visual da paisagem, criação de nichos ecológicos, técnica relativamente limpa, vários contaminantes podem ser remediados ao mesmo tempo (sais, metais, pesticidas e hidrocarbonetos de petróleo), máquinas e insumos necessários para a sua aplicação são os mesmos utilizados na

**Tabela 6.2:** Aplicações das técnicas de biorremediação para a remoção de hidrocarbonetos no solo, em condições de campo.

Técnica	Contaminante	Concentração inicial (mg Kg <sup>-1</sup> )	Remoção (%)	Tempo (Dias)	Referência
Biorremediação passiva	Petróleo	18.000	56	480	Chaineau (2003)
Bioaugmentação	Resíduo Petroquímico	69.700	92	360	Mishra (2001)
Bioestimulação	Resíduo Petroquímico	69.700	90	360	Mishra (2001)
Compostagem	HAPs	10.960	70	150	Ahtiainen (2002)
Biorreator	Resíduo Petroquímico	50.000	99	12	Ward (2003)
Fitorremediação	Pireno	488,7	85,02	45	Ling & Gao (2004)
Landfarming	Hidrocarbonetos	46.000	55	60	Marin (2005)

Fonte: Retirado de Andrade, Augusto, Jardim (2007)

agricultura e silvicultura, pode ser aplicada in-situ para solos (tratamento feito no próprio local da contaminação sendo mais economicamente viável do que ex-situ), é menos agressiva para o ambiente quando comparada à outras técnicas, reutilização do solo para produção de madeira e outros vegetais, técnica eleva a fertilidade do solo por incorporar nutrientes das plantas ao solo, redução de erosão e emissão de partículas de poeira minimizando a lixiviação do poluente.

Há como fazer um manejo utilizando a fitorremediação em áreas que possuem deficiência de algum mineral. Com a técnica pode-se transferir o mineral desejado para uma área deficiente

do mesmo, utilizando plantas que após realizarem a fitorremediação, irão absorver e armazenar o mineral. Essas plantas são utilizadas também para servir de alimento para animais deficientes do mineral, assim, este no processo entrará na cadeia alimentar.

Segundo Moreira e Colaboradores (2011), várias técnicas de remoção de HTP em solos e sedimentos, estão sendo usadas para restauração de ambientes, seja ex-situ como in-situ, uma delas é a fitorremediação.

**Tabela 6.3:** Fatores que interferem e/ou limitam a degradação do poluente, bem como os valores ideais para realizar a técnica.

Fator	Valores ideais	Forma de alteração
Teor de Oxigênio	Elevada	Quanto mais oxigênio maior a velocidade de degradação do petróleo
pH	6 < pH < 8	No pH ideal, o crescimento e atividade dos microrganismos são acentuados.
Teor de água	Teor de Umidade: 50%-70%	A água é responsável pela dissolução dos componentes residuais e pela ação dispersora.
Temperatura	18°C-30°C	Influência nas características físico-químicas do petróleo. Quanto menor a temperatura maior a viscosidade do óleo e menor a volatilização.
Concentração de nutrientes	-	Deve existir uma quantidade necessária de nutrientes para organismos e plantas
Microrganismos	-	Altas concentrações de óleo inibem a atividade dos microrganismos

**Tabela 6.1:** Custo da fitorremediação (biorremediação rizosférica, utilizando raízes de gramíneas) comparado à outras possíveis alternativas tecnológicas.

Técnica de tratamento de ambiente contaminado	Custo variável por tonelada (Dólares)
Fitorremediação	10-35
Remediação no local	50-150
Ventilação no solo	20-220
Tratamento térmico indireto	120-300
Lavagem do solo	80-200
Solificação/estabilização	240-340
Extração por solvente	360-440
Incineração	200-1.500

Fonte: Schnoor, 1997.

O Brasil possui um predomínio de clima tropical que permite o cultivo vegetal durante o ano inteiro, condições que aumentam as taxas de fotoconversão, ocasionam uma maior atividade microbiana e elevam a fototranspiração média, se tornando um país ideal para realização da técnica de fitorremediação. Todos esses fatores aumentam a velocidade da fitorremediação. Há também no Brasil uma grande biodiversidade vegetal que possibilita a formação de novas espécies fitorremediadoras. Em contra partida existe uma grande dificuldade de se recuperar solos impactados por petróleo, uma vez que, os solos brasileiros têm características argilosas de acordo com Lambert, Soares e Souza (2012). Essas características promovem fortes interações entre a matriz do solo e os contaminantes, ocasionados pela baixa permeabilidade inerente a solos com essa característica.

Segundo Celino e Colaboradores (2008), o que ocorrer com o solo e sedimento irá repercutir nas águas subterrâneas, podendo ocasionar mudanças na qualidade dessa água, assim a migração do poluente no solo para as águas superficiais e subterrâneas, pode constituir uma ameaça para a qualidade deste meio hídrico em abastecimento público, industrial, comercial bem como, para os setores de lazer e serviços.

Para que a técnica seja bem sucedida, é necessário caracterizar o local contaminado bem como o seu poluente analisando assim: Concentração do contaminante, nível de toxicidade e suas características físicas e químicas. É essencial estudar licenças ambientais do local, fotografias aéreas e entrevistar pessoas que possuem ligação com a área contaminada (trabalho ou residência). Em seguida, devem ser catalogados os objetivos da recuperação, incluindo quais os planos de utilização da área contaminada após sua remediação, mostrando qual técnica remediadora será implantada. Comparada com outras técnicas, a fitorremediação é a que possui uma das maiores eficiências de remoção do contaminante em menor espaço de tempo, vide Tabela 6.2.

Segundo Lambert, Soares e Souza (2012) e Andrade, Tavares e Mahler (2007), a técnica da Fitorremediação possui algumas desvantagens como: Atingir a capacidade limite de fitorremediação da planta para ambientes altamente contaminados, mortalidade da planta fitorremediadora devido à uma elevada toxicidade, inibição do crescimento da planta, logo sua ação de remediação, além de que essas plantas remediadoras podem entrar na cadeia alimentar de outros seres vivos, transferindo assim, o contaminante para os mesmos. Na fitoextração, plantas que acumulam uma grande quantidade de contaminante tem o crescimento mais lento.

A desvantagem da fitotransformação ou fitodegradação, consiste na metabolização do contaminante pela planta, podendo gerar produtos tóxicos intermediários. Para a fitovolatilização, nível alto de poluentes pode ser liberado na atmosfera, minimizando a qualidade do ar além de apenas transferir o poluente de um meio para o outro. Com a fitoestimulação e fitoestabilização, após a remediação, o poluente continua no local e resultados podem ser lentos pois o vegetal depende da estação, clima, nível de poluição, tipo do poluente, bem como fornecimento de água e por fim o tipo do solo. Alguns fatores no solo podem interferir na degradação do poluente e eles são listados na Tabela 6.3.

De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007), o processo da fitorremediação é aplicável para todos os tipos de contaminantes incluindo: Metais, pesticidas, solventes, explosivos, óleo cru e HPAs. A fitorremediação pode ocasionar a degradação, acumulação e estabilização de substâncias tóxicas.

A adição de fertilizante no solo auxilia na atividade dos microrganismos e no crescimento das plantas. É importante analisar e acompanhar os níveis de Nitrogênio (N) e Fósforo (P) no solo, pois a ausência desses elementos inibirá o crescimento da planta, limitando assim a fitorremediação. Por outro lado, não há beneficiamento no excesso de nutrientes, pois os microrganismos irão utilizar os nutrientes para acelerar a produção de biomassa a partir do carbono, utilizando pouco o carbono do poluente.

Há 16 elementos que são considerados essenciais para as plantas: Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Ferro (Fe), Cobre (Cu), Mangânes (Mn), Zinco (Zn), Molibdênio (Mo), Cloro (Cl) e Boro (B). Uma concentração de 600mg de NPK (Fertilizante composto por nitrogênio, fósforo e potássio), é considerada suficiente para a espécie remediadora *Brachiaria Brizantha* em um solo com 5% de petróleo segundo Smocking (2006).

#### 6.4 Petróleo

As fontes de poluição mais decorrentes do petróleo são: Vazamento de combustíveis no transporte e em acidentes no tráfego, descarte terrestres de lubrificantes residuais, estocagem incorreta de óleos lubrificantes, descarga e vazamento de solventes em áreas industriais e exploração e prospecção de petróleo.

As famílias dos compostos do petróleo, Tabela 6.4, que se tem por objetivo de fitorremediar, são: Alcanos insaturados de cadeia linear (metano, etano, propano), compostos orgânicos aromáticos (BTEX) e HPAs: Naftaleno, Antraceno, Pireno, Benzopireno entre outros) bem como hidrocarbonetos aromáticos contendo Nitrogênio e Enxofre.

**Tabela 6.4:** Composição do petróleo. Complexa mistura de Hidrocarbonetos

Composição	Grau
Parafinas normais	14%
Parafinas cíclicas	30%
Resinas e Asfaltenos	10%
Parafinas ramificadas	16%
Aromáticos	30%

Fonte: Coletado de [www.galpenergia.com](http://www.galpenergia.com)

Os HPAs são compostos e carcinogênicos aos animais e podem ser introduzidos no meio ambiente em grandes quantidades, devido às atividades relacionadas à extração, ao transporte, ao refino, à transformação e à utilização do petróleo e

seus derivados, segundo Jacques (2007). Os HPAs possuem uma estrutura química muito complexa e são recalcitrantes, devido à estabilidade da sua estrutura molecular, permanecendo assim por longos períodos no solo, elevando a possibilidade de contaminação dos seres vivos.

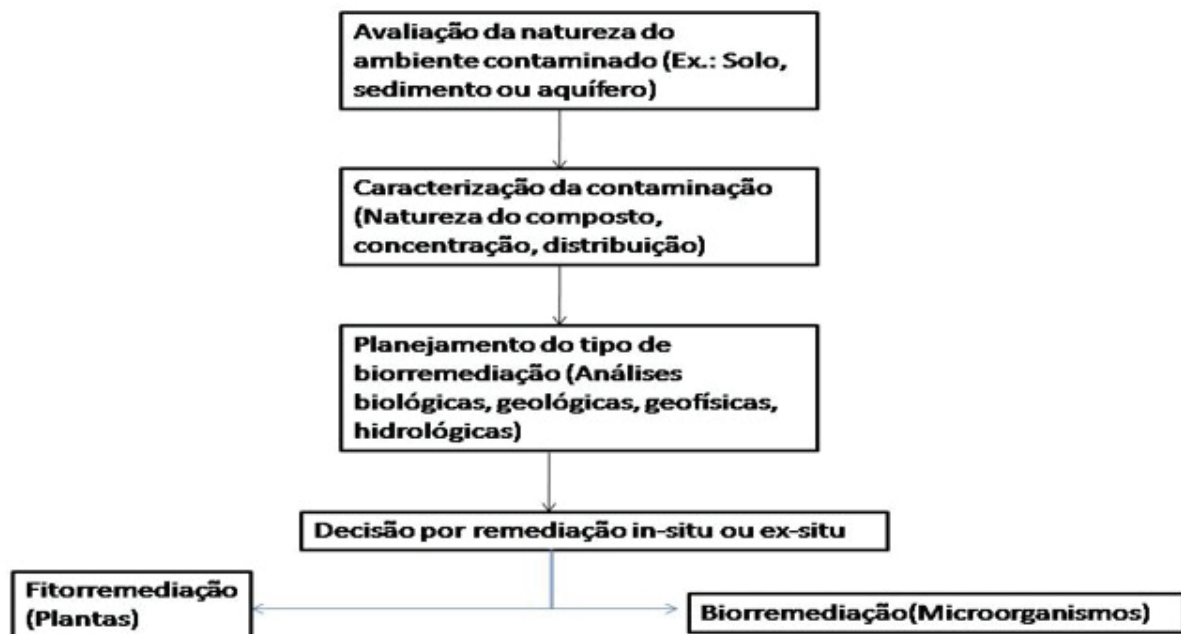
De acordo com Aguiar e Colaboradores (2012), ao ocorrer o derramamento de petróleo há no período inicial um espalhamento, volatilização, dispersão, emulsificação e dissolução do contaminante no solo. A longo prazo ocorre a oxidação, sedimentação e biodegradação do petróleo. Após o derrame, o petróleo sofre mudanças em sua estrutura inicial, deixando de ser como descrito na Tabela 6.5 e com o aumento do tempo de residência no solo, o óleo se torna mais denso, viscoso e recalcitrante.

**Tabela 6.5:** Tipos de petróleo encontrados na perfuração.

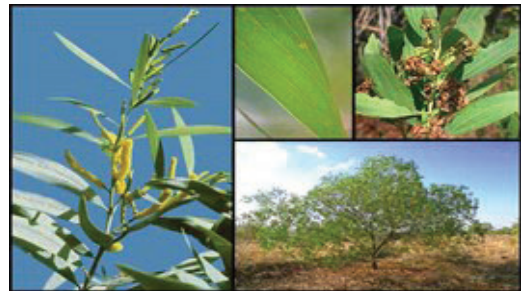
	Petróleo 1	Petróleo 2
Cor	Preto	Castanho ou bastante claro
Característica físico-química	Denso e Viscoso	Baixa viscosidade e densidade
Liberação de gás	Pouco ou nenhum gás	Quantidade razoável de gás

Fonte: Andrade, Tavares e Mahler (2007)

A estrutura dos hidrocarbonetos de petróleo é importante, pois o ponto de ebulição dos hidrocarbonetos dependem do tipo



**Figura 6.2:** Esquema geral das etapas para definição e implementação de um processo de biorremediação. Fonte: Modificado de Gaylard, Bellinaso e Manfio (2005).

**Figura 6.3:** *Ricinus communis* (Mamona)**Figura 7.4:** *Helianthus annuus* (Girassol)**Figura 6.5 :** *Glicine max* (Soja)**Figura 6.6:** *Acacia holosericea***Figura 6.7:** *Brachiaria brizantha***Figura 6.8:** *Tibouchina granulosa* (Quaresmeira)**Figura 6.9:** *Leucaena leucocephala* (Leucena)

de ligação e suas interações intermoleculares, que caso seja intensa, será necessário o fornecimento de maior quantidade de energia para o rompimento de suas ligações. A Tabela 7.6, retrata a quantidade de átomos de Carbono encontrada em análises de hidrocarboneto de petróleo. Quanto maior o número de carbonos na cadeia, maior a sua massa molar, conseqüentemente a substância será mais viscosa e pesada. Os HPAs são formados por anéis benzênicos, que é considerada uma estrutura estável, assim compostos formados por 2 ou mais anéis benzênicos, se tornam mais resistentes a biodegradação por ficarem fortemente adsorvidos no sedimento.

**Tabela 6.6:** Análise da quantidade de moléculas de carbono na estrutura de hidrocarboneto de petróleo.

	Quantidade de átomos de Carbono	Estado físico	Exemplo
Hidrocarbonetos de Petróleo	Até 4	Gás	GLP
	Entre 5 e 25	Líquido	Hexano
	+ 25	Sólido	Constituinte da graxa e parafina

Quanto maior o peso molecular do hidrocarboneto, menor o valor de solubilidade em água que possui o valor de densidade de 1000 mg/L.

Existem inúmeros hidrocarbonetos que compõe o petróleo, a depender do seu poço de prospecção, vide Tabela 6.7, e com o aumento do peso molecular desses compostos, há uma diminuição da solubilidade e como consequência, uma diminuição da mobilidade do contaminante no solo.

**Tabela 6.7:** Lista dos hidrocarbonetos comumente encontrados nas análises de petróleo.

Hidrocarboneto	Peso Molecular	Solubilidade em água (mg/L)	Quant. de anéis benzênicos
Naftaleno	128	31,7	2
Acenaftileno	152	3,93	2
Acenafteno	154	1,93	2
Antraceno	178	0,076	3
Fenantreno		1,2	3
Fluoreno	166	1,68 – 1,98	2
Benzo[e]pireno			5

Hidrocarboneto	Peso Molecular	Solubilidade em água (mg/L)	Quant. de anéis benzênicos
Benzo[k]fluoranteno	252	7,6 x 10 <sup>-4</sup>	4
Dibenzo[a,h]antraceno	278	5x10 <sup>-4</sup>	5
Benzo[g,h,i]perileno	276	2,6x10 <sup>-4</sup>	5
Indeno[1,2,3-c,d]pireno	276	0,062	5
Benzoantraceno	228	0,01	4
Criseno	228	2,8x10 <sup>-3</sup>	4
Fluoranteno	202	0,2-0,26	3
Pireno	252	0,077	4
Benzopireno	252	2,3x10 <sup>-3</sup>	5
Benzofluoranteno	252	1,2x10 <sup>-3</sup>	4

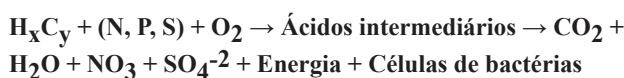
#### 6.4.1 Fitorremediação do Petróleo

Quando ocorre o derramamento, alguns compostos por serem voláteis não permanecem no solo, passando para a atmosfera onde podem ser inalados pelos seres vivos, prejudicando à saúde dos mesmos, a depender da concentração e tempo de exposição ao contaminante. Fazem parte dos hidrocarbonetos aromáticos voláteis: Benzeno, estireno, naftaleno, etilbenzeno, tolueno e xilenos. Compostos grandes que possuem quatro ou cinco anéis aromáticos são mais reaclitrantes.

Para que haja sucesso no processo de fitorremediação é necessário identificar e controlar ou minimizar os fatores que podem afetar a técnica fitorremediadora, através de um estudo do local e do contaminante, bem como sua concentração presente no local.

O petróleo e seus derivados quando liberados no solo, eles se movimentam de duas maneiras: Infiltração da massa de óleo pela força da gravidade versus capilaridade (substâncias hidrofóbicas migram através da massa de óleo) e pela forma individual que os compostos se separam da mistura e os hidrossolúveis podem se dissolver na água ou no ar.

A biodegradação dos hidrocarbonetos de petróleo se da a partir da seguinte reação química, com os elementos: Nitrogênio, fósforo e enxofre.



Na reação se observa que com a produção dos ácidos orgânicos e CO<sub>2</sub>, há uma queda no pH, pois estes tornam o meio mais ácido, saindo assim do pH ideal (entre 6 e 8) para ocorrer a biodegradação, como visto na Tabela 6.3. De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007) estudos com gramíneas foram



realizados nas pradarias do Canadá na análise da degradação de 4 HPAs (benzo[a]pireno, benzo[a]antraceno, dibenzo[a,h]antraceno e criseno). Foi observado que a mistura de gramíneas obteve um resultado efetivo e concluíram que a degradação está relacionada com a solubilidade desses compostos em água. Quanto mais solúvel o composto em água maior a degradação no sistema solo-planta. De acordo com Lambert, Soares e Souza (2012), os vegetais fitorremediadores do petróleo são: Ricinus communis, Helianthus annuus, Glicine max, Acacia holosericea, Brachiaria brizantha, Tibouchina granulosa e Leucaena leucocephala. De acordo com Andrade, Tavares e Mahler (2007) os vegetais tropicais fitorremediadores de hidrocarbonetos de petróleo são: Mimosa caesalpiniaefolia, Acacia auriculiformis, Eri-trina variegata, Acacia angustissima e Albizia saman.

Por meio desses vegetais fitorremediadores ocorrem também a degradação de alcanos, que são convertidos em produtos não tóxicos, como é possível visualizar na tabela seguinte.

**Tabela 6.8:** Esquema geral das plantas remediadoras por compostos do petróleo bem como sua técnica respectiva

Técnica Fitorremediadora	Vegetal	Compostos degradados	Composto resultante
Fitotransformação	Feijão, Milho, Uva, Noz e Pera	Metanos, etanos, propanos, butanos e pentanos	Álcoois primários, ácidos graxos, acetil-CoA, vários compostos
	Cereais e Milho	Benzeno, tolueno e xilenos	Fenolácidos (Benzeno); Glicol, ácidos fumáricos, succínico ou málico (Tolueno)
Fitoestimulação	Red mulberry	HPAs	Álcoois, ácidos, CO <sub>2</sub> e Água

Fonte: ANDRADE, TAVARES, MAHLER (2007).

Uma planta fitorremediadora muito promissora também é a Typha Latifolia ou “Taboa”, pois ela tem propriedades que são capazes de absorver os nutrientes a partir da água de esgoto ou rejeitos industriais, sobrevivendo assim em ambientes contaminados. Testes realizados segundo Pavanelli (2007) com a Taboa constataram que em conjunto com a ação de fertilizantes, essa planta é capaz de absorver também elementos como: Zinco, potássio, fósforo e nitrogênio. Testes constataram também a remoção de benzeno por meio da utilização dos vegetais listados na Tabela 7.9.

**Tabela 6.9:** Remoção do benzeno proveniente do petróleo que é volatilizado através da fitorremediação.

Vegetal	Inicial (ppm)	Final (ppm)	Removido (ppm)
<i>Dracaena massangeana</i>	14	11	21,4
<i>Chrysanthemum morifolium</i>	58	27	53
<i>Gerbera jamesonii</i>	65	21	67,7
<i>Dracena deremensis</i>	27	13	52
<i>Ficus benjamina</i>	20	14	30

## 6.5 Considerações Finais

Por conseguinte, a análise de todos os dados adquiridos, através da pesquisa bibliográfica, foi possível concluir que a técnica da fitorremediação é um técnica promissora apresentando inúmeras vantagens principalmente o seu custo, além de uma abundante matéria prima que são os vegetais. Muitas das plantas fitorremediadoras são utilizadas para produção de biodiesel e por isso é interessante analisar se é viável, tecnicamente e economicamente, a reutilização dessas plantas, após a fitorremediação. O que significa dizer que é interessante realizar estudos se o contaminante, durante o processo, se encontra no fruto, que é utilizado na produção do biodiesel (mamona, girassol e soja). É essencial estudar a viabilidade da retirada do petróleo contido nas plantas após a remediação, uma vez que o petróleo é uma fonte de energia não renovável. Por ser uma técnica promissora, tem-se a necessidade de mais pesquisas em busca de novos vegetais, através da engenharia genética, que sejam mais resistentes aos contaminantes e minimizando suas limitações, uma vez que atualmente as plantas são inibidas de crescimento quando atingem um limite de toxidez no ambiente. Incentivo em pesquisa de plantas fitorremediadoras em solos tropicais, bem como vegetais com raízes que alcancem uma maior profundidade, uma vez que essa é uma técnica limitada em pequenas profundidades de solos, rios e águas subterrâneas.

Como já citado durante o trabalho, alguns pesquisadores tem encontrado na utilização das árvores, cuja penetração de raízes é mais profunda, uma limitação menor para descontaminação de solos mais profundos. O que se pode constatar a necessidade de pesquisa por espécies de árvores fitorremediadoras com o propósito de combater essa limitação da extensão da raiz (rizodegradação). Deve-se, com a fitoextração, avaliar a necessidade futura da disposição final da massa vegetal contendo o contaminante e qual a forma menos impactante de realizar essa disposição. É uma área, que também necessita de estudo para definir uma boa utilização desse material, contendo o contaminante, como reutilização em algum processo industrial. De modo geral, a fitorremediação de solos apresenta-se como uma técnica de elevada eficiência, de baixo custo, de boa adaptação ao clima tropical, com matéria prima acessível na degradação de petróleo e seus derivados, mesmo em condições ambientais extremas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. R. C.; LOPES, B. C. ; BARBOSA, M.V.D. ; BALIEIRO, F.C. ; GOMES, M.M.;** Fitorremediação de solos contaminados. *Revista trópica-Ciências Agrárias e biológicas*. v.6. n.1. p. 1-7. 2012.
- AGUIAR, C. R. C.;** Desempenho de soja e braquiária na fitorremediação de solos contaminados com petróleo. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.
- ANDRADE, J.;** TAVARES, S., MAHLER, C., Fitorremediação: o uso na melhoria de qualidade ambiental. *Oficina de Textos*, 176f. São Paulo, 2007.
- ANDRADE, J.A.;** AUGUSTO, F; JARDIM, I. C. S. F. ; Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*. v. 35, n. 3, p. 17-43, 2010.
- BISPO, J. R. L.** Determinação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em água produzida por extração em fase sólida e cromatografia gasosa com detector de ionização de chama. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Sergipe, Alagoas, 2005.
- BOSZCZOWSKI, R. B. ;** Fitorremediação. In: Seminário de qualificação de doutorado. Programa de Engenharia Civil/Geotecnia. PUC- Rio de Janeiro, 2003.
- CELINO, J. J. ; TRIGUIS, J. A. ; CORSEUIL, H. X. ; FERNANDES, M. ;** Valores orientadores para hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em água e sedimentos de manguezais na Baía de Todos os Santos. Avaliação de impactos ambientais na Baía de Todos os Santos: Aspectos geoquímicos, geofísicos e biológicos. UFBA. 2008.
- COUTINHO, H. D.;** BARBOSA, A. R.; Fitorremediação: Considerações Gerais e características de utilização. *Silva Lusitana*, v. 5, n. 1, p. 103-117., 2007
- FIGUEIREDO, B. R. ; CAPITANI, E. M. ; ANJOS, J. A. S. A. ; LUIZ-SILVA, W;** Chumbo, ambiente e saúde. O desafio do controle da exposição humana. São Paulo, 276 f. 2012.
- FRICK, C. F.,** Richard G. J Assessment of phytoremediation as an in-situ technique for cleaning oil-contaminated sites. *Petroleum Technology Alliance of Canada*. p.1-81, 2000.
- GAYLARD, C. C.;** BELLINASO, M. L. ; MANFIO, G. P.; Biorremediação: Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. *Biotechnology Ciência e desenvolvimento*. n.34, p. 36-43, 2005.
- GONG, Y.;** FU, J.; O'REILLY, S.E.; ZHAO, D. Effects of oil dispersants on photodegradation of pyrene in marine water. *Journal of Hazardous Materials, Auburn*, v. 287, p.142-150, abr. 2015.
- LAMBERT, L. F. M. ; SOARES, R.P.S.;** SOUZA, S. C.; O uso da fitorremediação para recuperação de solos contaminados por petróleo. Instituto Brasileiro de estudos Ambientais. p. 1-5, 2012.
- LEITE, M.;** GUAJAJARA, E. P. V. ; SILVA, S.; SILVA, W. L. SANTOS, S. C.; Fitorremediação de solo contaminado por metais pesados. *Caderno de prospecção*, v. 12, n. 2, p. 327-335, 2019.
- LOUREIRO, M. A.** Estudo do tratamento por oxidação avançada de solos da refinaria Abreu e Lima(PE) contaminados por hidrocarbonetos. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- MARCONI, Marina de Andrade;** LAKATOS, Eva Maria. Metodologia do trabalho científico. São Paulo: Editora Atlas, 1992. 4ª ed. p.43 e 44.
- MOREIRA, I. T. A. ; OLIVEIRA, O. M. C. ; TRIGUIS, J. A. ; SANTOS, A. M. P. ; QUEIROZ, A. F. S. ; MARTINS, C. M. S. ; JESUS, R. S. ;** Phytoremediation using *Rizophora mangle* L. in mangrove sediments contaminated by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's). *Microchemical Journal*. v. 99, n. 02, p. 376-382, 2011.
- MUFF, J.;** SOGAARD, E. G. Identification and fate of halogenated PAHs formed during electrochemical treatment of saline aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials, Dinamarca*, v. 186, n. 2-3, p. 1993-2000, fev. 2010.
- PAVANELLI, A. G.;** Fitorremediação de solos contaminados com petróleo utilizando *Typha Latifolia*. 2007. Dissertação (Mestrado em Química dos Recursos Naturais.) Universidade Estadual de Londrina. Londrina. 2007.
- PETROBRAS;** Atividade de perfuração marítima no Bloco BM-P-02, Bacia de Pelotas: Estudo ambiental de perfuração. p. 1-44. 2012.
- ROCHA, O. R. S.** Avaliação de diferentes processos oxidativos avançados no tratamento de resíduo de petróleo. 2010. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- ROSA SMOCKING, G.;** Avaliação do potencial de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por petróleo. 144f. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). UERJ. Rio de Janeiro, 2006.
- RUBIO-CLEMENTE, A.;** TORRES-PALMA, R. A.; PEÑUELA, G. A. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous environment by chemical treatments: A review. *Science of the Total Environment, Medellín*, v. 478, p.201-225, abr. 2014.
- ZHANG, A.;** ZHAO, S.; WHONG, L.; YANG, X.; ZHAO, Q.; FAN, J.; YUAN, X. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay, China. *Marine Pollution Bulletin, Vol.113, nº 1-2*, p. 592-599, 2016.
- Composição do petróleo. Disponível em: [www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Origem-e-composicao-do-petroleo.aspx](http://www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Origem-e-composicao-do-petroleo.aspx)