

Contaminação de águas superficiais e subterrâneas pelo derramamento de combustíveis e suas possíveis remediações

Contamination of surface water and groundwater by fuel spills and their possible remediation

DOI:10.34117/bjdv8n2-010

Recebimento dos originais: 07/01/2022

Aceitação para publicação: 02/02/2022

Deborah Paredes Soares da Silva

Pós graduada em Engenharia Ambiental e mestranda em Ensino de Ciências Universidade UFRJ e FIOCRUZ - FIOCRUZ - Instituto Oswaldo Cruz/Fundação Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ), Laboratório de Educação em Ambiente e Saúde, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Ensino de Ciências, Campus Xerém-RJ
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: deborahpbio@yahoo.com.br

Cesar Carriço

Doutor em Ciências – FIOCRUZ - Instituto Oswaldo Cruz/Fundação Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ) - Laboratório de Educação em Ambiente e Saúde - Instituto Brasileiro de Medicina de Reabilitação - IBMR - Laureate International Universities.
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: carrico82@gmail.com

Julio Vianna Barbosa

Doutorado em Ciências - FIOCRUZ
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: julio.jub@gmail.com

Rebecca Leal Caetano

Doutorado em Ciências – FIOCRUZ - Instituto Oswaldo Cruz/Fundação Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ) - Laboratório de Educação em Ambiente e Saúde
Universidade Estácio de Sá (UNESA)- RJ
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: rebeccalealcaetano@gmail.com

Lilian Beck

Mestrado - FIOCRUZ - Instituto Oswaldo Cruz/Fundação Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ) Laboratório de Educação em Ambiente e Saúde
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: lilianhbeck@gmail.com

Zeneida Teixeira Pinto

Doutorado em Ciências Veterinárias – FIOCRUZ - Instituto Oswaldo Cruz/Fundação Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ) - Laboratório de Educação em Ambiente e Saúde
Avenida Brasil 4365-RJ
E-mail: zeneidateixeirapinto@gmail.com

RESUMO

A contaminação de águas superficiais e subterrâneas por compostos derivados do petróleo como o grupo de hidrocarbonetos denominado **BTEX** (**B**enzeno, **T**olueno, **E**tilbenzeno e **X**ilenos) pode provocar diversos danos ambientais; de contaminação do solo e da água, interferência do ecossistema, mortalidade de espécies, incluindo o ser humano, muitas das vezes com consequências severas. Esses compostos quando presentes no ambiente são difíceis de serem biotransformados, seja através de organismos que fazem a ciclagem da matéria, ou por meio de processos de biorremediação. Nesse contexto, é de suma importância que se reflita sobre as contaminações de corpos d'água superficiais e subterrâneos para auxiliar na definição dos indicadores e sobre quais processos de remediação devem ser utilizados para a tomada de decisões de políticas públicas.

Palavras-chave: Compostos BTEX, Danos Ambientais, Petróleo, Substâncias Químicas.

ABSTRACT

The contamination of surface water and groundwater by compounds derived from petroleum as the group of hydrocarbons called BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene) can cause various environmental damage; soil and water contamination, interference in the ecosystem, mortality of species, including humans, often with severe consequences. These compounds when present in the environment are difficult to be biotransformed, either by organisms that cyclize matter, or through bioremediation processes. In this context, it is of utmost importance to reflect on the contamination of surface and underground water bodies to help define indicators and which remediation processes should be used for public policy decisions.

Keywords: BTEX Compounds, Environmental Damage, Petroleum, Chemicals.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos causados pelas atividades humanas podem ser sinalizados pelas modificações das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, dessa forma podendo prejudicar, direta ou indiretamente, a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades socioeconômicas; a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais. De acordo com a ANP (2015) e a Resolução do CONAMA n.º 01 de 23/01/86, o crescimento econômico e o populacional intensificaram a utilização de recursos naturais, provocando prejuízos ao meio ambiente, além disso o índice de passivos ambientais vem crescendo significativamente, devido ao aumento da demanda por instalações de postos de combustíveis em todo o território nacional (ALVES, 2015; BRITO *et al.*, 2018).

Sendo o Brasil um país de proporções continentais, e o transporte de cargas é feito basicamente através das rodovias, inclusive o transporte dos combustíveis, sendo na maioria das vezes tóxicos e/ou perigosos. Nesse caso, podemos observar contaminações ambientais decorrentes de acidentes causados por batidas e tombamentos dos veículos de carregamento de combustíveis e/ou líquidos tóxicos. Além disso, o país também utiliza o transporte de cargas

perigosas por hidrovias, e nesse caso os derramamentos de combustíveis ou substâncias químicas causam grandes impactos e prejuízos ambientais colocando em risco não só a saúde humana, mas também os ecossistemas através da contaminação do solo e das águas (SANTANA, TACHIBANA, 2004).

De acordo com o relatório do IBAMA do ano de 2008, os acidentes ambientais são qualificados como episódios casuais, mas não irrelevantes, já que, direta ou indiretamente, acarretam danos ao meio ambiente e à saúde. Esses episódios vêm ocorrendo mais frequentemente e se estendendo, abrangendo mais regiões do território brasileiro, e geralmente, relacionados ao transporte de cargas de substâncias, tóxicas e/ou perigosas, frequentemente há o escoamento destas substâncias para corpos d'água próximos ou há infiltração no solo após estes acidentes

Segundo Santana e Tachibana (2004) os impactos ocasionados pelos sistemas de transporte podem ser categorizados quanto à origem (positivo ou negativo); quanto à natureza intrínseca (direto ou indireto, certo ou incerto, reversível ou não, sendo também analisado com relação ao prazo se é curto, médio ou longo); quanto ao setor atingido (meio ambiente ou socioeconômico).

Além disso, ainda relacionado aos combustíveis, temos os postos de gasolina, álcool e diesel, que quando não equipados corretamente, ou sem manutenção adequada (ex. corrosão dos tanques de combustíveis), podem proporcionar vazamento de combustíveis para o solo e corpos d'água (FORTE, 2007), o que justifica a importância de se investigar como se comportam as substâncias em contato com o solo e com os corpos d'água. Corroborando com a afirmação acima, Vasconcelos e colaboradores (2014) observaram que os contaminantes, benzeno, tolueno e xilenos (**BTEX**) são encontrados regularmente em corpos d'água subterrâneos, devido a rachaduras e ou corrosões dos tanques de combustíveis serem muito antigos. A partir da constatação dos vazamentos devem ser introduzidas as ações de intervenção, como: a eliminação do perigo ou redução dos níveis; o zoneamento e a limitação do uso e ocupação do solo e das águas superficiais e subterrâneas; a aplicação de técnicas de remediação; e o monitoramento, com o intuito de recuperar a área afetada (BRITO *et al.*, 2018).

Quando se relaciona derramamento de combustíveis às regiões oceânicas logo se pensa em processos de remediação para minimizar os danos relacionados a poluição dos corpos d'água e a mortandade de animais, entretanto, quando esse derramamento se dá em corpos d'água em regiões interioranas é dada pouca visibilidade, com isso a sua importância é minimizada. Na realidade, nos dois casos, há danos nos ecossistemas podendo, inclusive, causar consequências ao lençol freático (CADORIN 1996):

Apesar de muitos relatos na literatura, sobre derramamento e disseminação de contaminantes, ainda podemos observar dificuldades na avaliação dos ecossistemas afetados, da frequência de ocorrência; e, dos processos de biotransformação natural e/ou biorremediação assistidos. segundo Coutinho e Gomes (2007), um fator importante para o êxito do processo de remediação, é a qualificação dos profissionais na realização da análise do problema.

Nesse cenário de informações relacionadas ao tema do trabalho, vários autores sugerem a necessidade de mais estudos voltados para a vigilância ambiental em saúde e para outros aspectos relacionados aos processos de remediação de derramamentos do petróleo e de seus derivados, envolvidos na contaminação dos ecossistemas aquíferos. Portanto, esse estudo tem como objetivo avaliar os processos de remediação implicados na contaminação dos ecossistemas.

2 METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica exploratória em bases científicas disponíveis, como: Pubic Medline (PUBMED), Scientific Eletronic Library On Line (SCIELO), Periódicos Capes, Google Acadêmico dentre outras. Para o levantamento dos artigos publicados relacionados a contaminação de águas superficiais e subterrâneas pelo derramamento de combustíveis e suas possíveis remediações, foi feita uma busca utilizando os descritores: Derramamentos de Combustíveis, Derramamento de Substâncias Químicas, Contaminação Solo e Corpos d'água, Compostos BTEX. Foram excluídos aqueles artigos que não abordaram diretamente a temática em questão.

2.1 OS DERIVADOS DE PETRÓLEO

O petróleo é um combustível fóssil de origem animal e vegetal formado há milhões de anos por um processo de deposição destes sedimentos sob altas pressões, possui uma enorme importância econômica, devido à sua matéria prima que origina uma infinidade de produtos comercializados: plásticos, cosméticos, asfalto, remédios, tecidos sintéticos, são alguns exemplos de aplicações de subprodutos originados na destilação do petróleo, inclusive a produção de energia. Entretanto, é necessário destacar que além de ser um recurso natural não renovável há a necessidade de refletir sobre as implicações do seu emprego junto ao meio ambiente. Pois, sua exploração, transporte, distribuição e armazenamento, podem vir a causar derramamentos e/ou vazamentos do óleo e de seus derivados no próprio local, podem ameaçar a fauna e a flora dos ecossistemas costeiros como praias, recifes de corais, costões rochosos e

manguezais, além disso intervenções de despoluição também podem agravar os danos gerados pelo derramamento (CARDOSO *et al.*, 2017; GOMES, 2019; SOUZA FILHO, 2006).

O petróleo é constituído principalmente por hidrocarbonetos e que, após o processo de refinamento, dá origem a várias frações que são utilizadas cotidianamente. Além dos hidrocarbonetos, o petróleo também contém centenas de compostos químicos, e separá-los em componentes puros ou misturas de composição conhecida é praticamente impossível, normalmente, é separado em frações de acordo com a faixa de ebulição dos compostos. Essas frações são conhecidas como derivados do petróleo, são eles: Gás liquefeito de petróleo (GLP), Gasolina, Óleo Combustível, Óleo Lubrificante, Querosene, Óleo diesel, Parafina, Querosene de Aviação, Querosene de Iluminação, Nafta Petroquímica, Asfalto, dentre outros (GOMES, 2019, MELO *et al.* 2008).

A gasolina e o óleo diesel são subprodutos obtidos a partir da destilação e do craqueamento do petróleo no processo de refinamento, são compostos por mais de 200 tipos de hidrocarbonetos, mas a composição exata varia de acordo com a origem de extração do petróleo (BRAGA, 2018; MORALES, 2008). Além disso, os derivados de petróleo e, outros derivados secundários, correspondem a 38,6% de sua matriz energética e, mesmo com grandes esforços para estimular a produção de energias renováveis, a mesma, deve participar de 37,9% da matriz energética até 2022 (ALVES, 2014; ANP, 2018; BRAGA, 2018).

No Brasil, apenas dois tipos de gasolina, são comercializadas, a Gasolina A, sem adição de etanol anidro, que é vendida pelos produtores e importadores, e a Gasolina C, com adição de etanol, que é vendida aos postos de combustíveis e encaminhada ao consumidor final tendo a seguinte proporção atual, 73% gasolina e 27% etanol anidro O etanol é adicionado à gasolina conforme a sua disponibilidade no mercado brasileiro, essa adição irregular, pode interferir no destino e no transporte dos hidrocarbonetos, o que pode acentuar a contaminação, já que grandes concentrações de etanol podem desempenhar o papel de cossolvente, elevando a solubilidade do BTEX em água, que resulta em concentrações mais elevadas, aumenta a mobilidade, e causando conseqüentemente maiores prejuízos, e elevação de custos dos processos de descontaminação. Alguns autores afirmam que essa mistura pode provocar muitos prejuízos ao meio ambiente, pois pode solubilizar os compostos BTEX, e nesse caso gerar um aumento da mobilidade dos compostos no espalhamento no solo e nos corpos d'água; pode favorecer a biodegradação do etanol em oposição ao BTEX, dessa forma consumindo o oxigênio, que é fundamental para a decomposição dos hidrocarbonetos e, ser o etanol o fator inibidor ou tóxico aos organismos degradadores dos BTEX (ALVES, 2014; ANP, 2018; BRAGA, 2018). Outros estudos assinalam também, que há necessidade de mais investigações

sobre o comportamento dos compostos BTEX, especialmente quanto a uma maior concentração de etanol na gasolina utilizada no Brasil em relação à outros países, pois esse aumento modifica o comportamento da pluma, o que favorece a contaminação de áreas maiores, provocando uma intensificação da persistência dos compostos BTEX no ambiente (CORSEUIL *et al.*, 2011; CORSEUIL; FERNANDES, 1999; CORSEUIL; MARINS, 1997; FORTE *et al.*, 2007; BRAGA 2018). É de suma importância mais pesquisas sobre o comportamento dos compostos BTEX nos ecossistemas devido à concentração de álcool na gasolina brasileira ser superior aos demais países, pois isso modifica o comportamento da pluma. A concentração de etanol na gasolina brasileira é de 22% de etanol e isso pode vir a dificultar a biodegradação aumentando a persistência dos compostos BTEX no ambiente (CORSEUIL E MARINS 1997).

Os hidrocarbonetos podem ser classificados como: hidrocarbonetos alifáticos (alcanos, alcenos e cíclicos), hidrocarbonetos aromáticos (mono e poli aromáticos), asfaltenos (fenóis, ácidos graxos, cetanos e esteres) e compostos polares que incluem as resinas como piridina, quinolinas, carbazóleo, amidas, tiofeno, entre outros (MELO *et al.* 2008).

Dentre estes hidrocarbonetos temos o composto conhecido genericamente por BTEX que é a abreviação das substâncias químicas benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, dentre eles a substância mais tóxica é o benzeno, sendo considerado um problema à saúde pública. São classificados como hidrocarbonetos monoaromáticos, tendo como características moleculares os anéis benzênicos. Estas substâncias presentes no petróleo e seus derivados são lipossolúveis e voláteis e, portanto, podem ser inalados e absorvidos pelas gorduras do organismo. Elas representam um grande problema no mundo, pois são extremamente perigosas quando liberadas no ambiente, tanto para os corpos d'água superficiais quanto os subterrâneos, e tóxicos aos seres humanos, agindo como depressores do Sistema Nervoso Central (SNC), causar câncer, e algumas hemato patologias, como demonstrado em algumas pesquisas recentes. Outros derivados do petróleo, além dos BTEX, também são focos de interesse, quando da contaminação, derramamento, devido a sua “toxicidade, mobilidade e persistência no meio ambiente” (ANDRADE *et al.*, 2010).

De acordo com Silva e Mata-Lima (2019), os hidrocarbonetos representam mais de 55% da oferta total de energia primária, no Brasil, e isso tem justificado o aumento do interesse tanto de pesquisadores quanto de instituições, a caracterizar e determinar os fatores de risco de contaminação dos ecossistemas decorrente do transporte ou da exploração desses compostos.

2.2 O RISCO AMBIENTAL

A contaminação ambiental pela utilização de combustíveis fósseis é uma grande preocupação, tornando-se uma prioridade na área de ciência e tecnologia para que seja possível prevenir e remediar situações envolvendo esse tipo de dano ao ambiente.

A partir das pesquisas na área ambiental e da saúde, sobre o comportamento dessas substâncias, a contaminação por combustíveis vem merecendo cada vez mais atenção tanto da população em geral, como dos órgãos governamentais de controle ambiental, já que causa a poluição dos solos, pode contaminar os aquíferos, podendo chegar até as captações de água para abastecimento (CORSEUIL e MARINS, 1997). Segundo Costa Filho (2011) e Costa (2011) a indústria de petróleo, em suas diversas atividades, produção, refino, transporte e comercialização, apresentam risco ambiental inerente que precisa ser constantemente gerenciado. Desta forma, a resolução do CONAMA Nº 237/2000, define que: “Instalações e locais de armazenamento de derivados do petróleo são empreendimentos, potencialmente ou parcialmente poluidores e que estarão sujeitos ao licenciamento ambiental, pois poderão causar a contaminação de corpos d’água subterrâneos e superficiais, do solo e do ar”.

Nesse contexto, Souza Filho (2006) sugere que a contaminação dos oceanos pelo petróleo e seus derivados e/ou subprodutos pode ser classificada em 4 grupos: 1- Exsudação natural (ocorre em mar aberto, e em baixas vazões); 2- Extração (derramamentos acidentais provenientes de erupções de poços, vazamentos superficiais de plataformas ou desprendimento crônico associados com a disposição de águas produzidas e cascalhos contaminados gerados no processo de perfuração); 3- Transporte (relativo aos locais de passagem de petroleiros ou onde oleodutos estão instalados, áreas próximas a instalações apresentam maior risco por acumularem as atividades de transporte, produção e distribuição); e o 4- Consumo.

Vazamentos acidentais de petróleo têm ocorrido com muita frequência, devido a isso, vários estudos vêm sendo realizados no intuito de melhorar os métodos já existentes, para remoção destes compostos do solo. Existem dois tipos de métodos, os físicos e os químicos que podem ser empregados para remover os contaminantes do solo ou reduzir a concentração destes poluentes, e estes podem ser subdivididos em: diluição, dispersão, adsorção, bombeamento, incineração e biorremediação. Alguns destes processos podem ser implementados para controlar o movimento de plumas, tratar águas subterrâneas, e/ou descontaminar solos (ALVES, 2014).

2.3 A BIORREMEDIAÇÃO

Alguns métodos de descontaminação abrangem processos físicos, químicos e biológicos, dentre eles temos a lavagem de solo, extração de vapores, bombeamento e tratamento de áreas subterrâneas, injeção de ar de zona saturada (air sparging), tratamento térmico, oxidação química e barreiras passivas e reativas. As principais técnicas que envolvem processos biológicos são atenuação natural (ou remediação passiva), biorremediação e fito-remediação devido ao menor custo e interferência nas áreas contaminadas (BRITO et al., 2018). Além desses métodos temos também, a remoção manual por barreiras e skimmers, remoção mecânica por jateamento com água, materiais adsorventes, dispersantes químicos, queima in situ, e limpeza natural. Entretanto, todos estes procedimentos só devem ser postos em prática a partir de uma avaliação apropriada do tamanho do derramamento, da geografia e do clima locais. Alguns autores consideram que a utilização de adsorventes naturais é uma das técnicas de remediação bastante utilizada, e geralmente são constituídas por fibras vegetais que possuem fonte renovável e alta capacidade de adsorver o óleo de forma eficiente (ANNUNCIADO, 2005; CARDOSO et al., 2017; FERRÃO, 2005; IPIECA, 1994; LOPES, 2007; MOREIRA, 2014; NAZARKO, CAMARGO, 2016).

De acordo com Braga (2018), das técnicas relacionadas acima a que apresenta maior destaque nos artigos é a biorremediação, pois é considerada de baixo custo em comparação com os demais processos convencionais, é eficaz, e pode ser utilizada em grandes volumes de solo, essa afirmação corrobora com a citação de Andrade et al. (2010): “Os baixos custos envolvidos nas transformações bioquímicas in situ, além da possibilidade de redução ou até mesmo de eliminação total dos contaminantes, são condições que favorecem a atratividade das técnicas de biorremediação”.

A técnica de biorremediação é um processo simples, que utiliza bactérias, fungos filamentosos e leveduras, geralmente de ocorrência natural ou cultivados, para degradar ou imobilizar contaminantes em águas subterrâneas e em solos. As bactérias, são, na maioria das vezes as mais utilizadas, pois são tidas como peça fundamental na biodegradação de contaminantes, apresentam baixo consumo de energia e causam poucas mudanças nas características físicas, químicas e biológicas do ambiente (TONINI et al., 2010). A importância desse processo se dá devido aos seus efeitos bioquímicos e pela destruição ou transformação de substâncias perigosas em compostos menos prejudiciais, ou, até mesmo inócuas, ao meio ambiente e ao ser humano (ANDRADE et al., 2010).

Os fatores mencionados acima, são considerados como os principais responsáveis pelas vastas aplicações e inovações surgidas na área de remediação de solos mediada por

microrganismos. Para Meneghetti (2007), a biorremediação é baseada em três princípios básicos: i) a presença do microrganismo com capacidade metabólica, ii) a disponibilidade do contaminante e iii) as condições ambientais adequadas para o crescimento e atividade microbiana.

A biorremediação realizada no local (*in situ*), é a técnica mais empregada no mundo, pode se dar por atenuação natural (remediação passiva), ou bioaumentação, ou bioestimulação, ou fitorremediação, ou *landfarming*. Emprega organismos vivos integrantes da própria biota do local para acelerar a velocidade do processo natural de degradação dos compostos prejudiciais e danosos (BRAGA, 2018). Vale ressaltar que alguns fatores influenciam a pluma de contaminação que irá se deslocar pelo ambiente, que pode ser atenuada por diluição, dispersão, adsorção, volatilização e biodegradação, esta última pode ocorrer naturalmente ou ser induzida e se acompanhada por especialistas, atinge um resultado altamente satisfatório. Entretanto, de acordo com Andrade e colaboradores (2010) no Brasil, apesar da técnica ser beneficiada principalmente pelas condições climáticas na maioria das regiões do país, poucos projetos de biorremediação e de atenuação natural monitorada foram colocados em prática, mas existem possibilidades de expansão desses projetos.

Os fatores que influenciam a biodegradação são: a presença de microrganismos, indução de enzimas degradadoras, disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura, ausência/presença de substâncias tóxicas ou inibitórias, disponibilidade de receptores de elétrons, condutividade elétrica e potencial eletroquímico, sendo esses três últimos relacionados com os processos de geração de ATP (Adenosina Trifosfato) pelos microrganismos. Estudos realizados mostraram que a biodegradação do petróleo, em ambientes naturais ou em laboratório, não pode ser realizada apenas por uma única espécie microbiana, uma vez que os poluentes são constituídos por vários tipos de hidrocarbonetos e nenhum microrganismo é capaz de degradar sozinho todos os componentes presentes no ambiente contaminado. Também foi constatado que os principais gêneros de fungos e bactérias citados com capacidade de degradação dos derivados de petróleo foram: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Aspergillus Fusarium*, e *Pseudomonas sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Mycobacterium sp.* e *Gordonia sp.*, respectivamente (OLIVEIRA e ALVES, 2013).

Além da utilização das técnicas de biorremediação *in situ*, podem ser também empregadas as técnicas *ex situ*, realizada externamente ao local da contaminação, e que pode ser processada ou pela compostagem, ou por biopilhas e ou por biorreatores. Vale ressaltar que outras estratégias de remediação para contaminações por hidrocarbonetos derivados de petróleo são mais complexas. Alguns autores evidenciam que biodegradabilidade do contaminante é o

sinalizador ideal para a definição da melhor estratégia de biorremediação a ser adotada. (ANDRADE et al., 2010; BRAGA, 2018).

Chiaranda (2006) Sabaté e colaboradores (2004), sugerem que a persistência de um contaminante no solo ou na água depende também de suas propriedades físico-químicas, das propriedades do corpo d'água e do solo e da sua interação, já que os solos possuem diferenças nas atividades metabólicas dos microrganismos naturais, afetadas pela sua estrutura, composição e características. Brito e colaboradores (2018) reiteram sugerindo não haver um método absoluto de descontaminação de solo, já que este procedimento está relacionado com a categoria do contaminante, do seu risco, tanto para o ambiente, quanto para saúde humana.

Por fim, além de todas as recomendações sobre quais estratégias de biorremediação empregar, é necessário gerenciar a área contaminada de acordo com a legislação ambiental em vigor, que tem como objetivos regulamentar, fiscalizar, e aplicar multas e/ou punições, caso haja danos aos ecossistemas (BRAGA, 2018). Atualmente três leis abrangem os mais diversos eventos de impactos ambiental, são elas:

✓ Lei nº 6.938/81 – Política Nacional do Meio Ambiente:

“Entre os vários objetivos, destaca-se a recuperação de áreas degradadas, que é obrigatória ao poluidor, em conjunto com a responsabilidade de ressarcimento pelos danos causados ao meio ambiente e a terceiros, independentemente da existência de culpa. Delimita, define e estabelece os bens a se proteger; assegura ao Ministério Público as ações de responsabilidade civil e criminal por danos causados ao meio ambiente.”

✓ Lei nº 9605/98 – Lei de Crimes Ambientais:

“Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.”

✓ Lei nº 7.347/85 – Lei da Ação Civil Pública:

“Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio-ambiente em que poderia ser usado ou pelo Ministério Público ou pelo cidadão comum para assim, submeter o poluidor a ressarcir ou a recuperar os referidos impactos ambientais decorrentes da área contaminada.”

Entretanto, como as leis citadas acima não são exclusivas para o monitoramento de áreas contaminadas, algumas resoluções importantes foram criadas objetivando uma maior efetividade, e direcionadas à prevenção de contaminação do subsolo e corpos água subterrâneos. Também são voltadas à recuperação de ecossistemas contaminados, ao tratamento de efluentes e dos despojos decorrentes dos vazamentos de produtos poluidores, inclusive o petróleo e seus derivados, são elas:

✓ Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009, que:

“Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.”

✓ Resolução CONAMA nº 463, de 29 de julho de 2014, que:

“Dispõe sobre o controle ambiental de produtos destinados à remediação”,

Segundo Braga (2018) ambas as resoluções, possuem caráter protetivo e têm como orientação a restauração e/ou recuperação dos ecossistemas que são patrimônios públicos e reservas estratégicas de abastecimento e desenvolvimento sustentável.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do exposto, foi possível observar que o processo de biorremediação tem eficácia comprovada, representando uma estratégia importante para a descontaminação dos ecossistemas, entretanto, para sua aplicabilidade devem ser observados diversos fatores e a legislações vigentes, objetivando a identificação do processo mais adequado a ser utilizado. Contudo, em alguns casos, há a necessidade de autorização para a utilização de alguns desses processos pelo órgão ambiental responsável.

Grande parte das pesquisas se referem aos processos de descontaminação de solos, de descontaminação dos oceanos e a contaminação de corpos d'água: superficiais, subterrâneas e até mesmo do lençol freático, relacionados ao composto BTEX, já que esse composto pode ser considerado o mais prejudicial, constituindo assim, um grande problema de saúde pública em todo o mundo.

Outro ponto que chama atenção é de como os sistemas de armazenamento de combustíveis são responsáveis por boa parte das origens de contaminação e do grande potencial de impacto para o meio ambiente, se levado em consideração, o número de postos de combustíveis e a dispersão deles mesmos, no território brasileiro. Além dos tanques, são elevados os pontos de contaminação relacionados com tubulações subterrâneas nestes empreendimentos, ausência de bacias de contenção (stump) sob as bombas de abastecimento, áreas de descarga de combustível, áreas de troca de óleo, dentre outras

No Brasil, há também mais um elemento importante que deve ser estudado, é a quantidade elevada de álcool na gasolina, uma vez que o comportamento dos microrganismos pode diferir, e não se adaptar tão bem aos processos de biorremediação de corpos d'água, causando a persistência de muitos compostos nocivos. Portanto, pode-se dizer que a biodegradação é um processo complexo, que depende de uma série de fatores e condições, além

de todas as outras possíveis influências, onde cada local de contaminação deverá ser analisado individualmente. Observa-se, portanto, com relação aos postos de combustíveis, a necessidade de uma maior fiscalização por parte das autoridades com o objetivo de verificação de possíveis falhas no processo de abastecimento ou possíveis vazamentos dos tanques.

É visível uma diminuição da contaminação dos ecossistemas devido a medidas preventivas em todos os seguimentos da cadeia de processamento / exploração do petróleo, entretanto, ainda há muito a ser feito com relação aos vazamentos e derramamentos de produtos químicos e derivados do petróleo. Para que se tenha um resultado contundente são necessários mais investimentos, visando uma diminuição das vulnerabilidades e o uso de ações corretivas e preventivas, esta última se mostrando a melhor alternativa. É de suma importância que as legislações sejam sempre atualizadas e as ações aperfeiçoadas, com o intuito de proteger e preservar o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B.S. Levantamento de informações sobre técnicas de biorremediação da contaminação de solos e aquíferos por derramamento de gasolina. Trabalho de conclusão para obtenção de título de Especialista na Pós-Graduação em Gestão Ambiental em Municípios, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, 88 f., 2014.
- ALVES, R.S.C. Avifauna em matas ciliares: caracterização visando ações de emergência, mitigação e compensação em caso de derramamento de combustíveis em vias hidroviárias. Trabalho de conclusão de curso (Ecologia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro, São Paulo, 50 f., 2015.
- ANDRADE, J.A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I.C.S.F.J. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclet. Quím*, 35(3):17-43, 2010.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>, Acesso em: 10 de março de 2021.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Nota Técnica. Brasil, 2018.
- ANNUNCIADO, T.R. Estudo da *Chorisia speciosa* e outras fibras vegetais como sorventes para o setor de petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná (UFP), Curitiba, Paraná, 91p., 2005.
- AVANZI, I.R. Áreas afetadas por BTEX na região de Cubatão: Isolamento de microorganismos com potencial para biorremediação e impactos socioambientais causados por estes compostos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 135 f., 2012.
- BRAGA, L.G.C. Estudo de biorremediação aplicada em áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 46 f., 2018.
- BRITO, E.A.; SIQUEIRA, I.C.; SILVA, L.A.; PAULA, L.L.; SILVA, V.L.; ANDRAUS, M.P. Contaminação do solo por poluentes derivados de petróleo em postos de combustíveis. *Anuário de Produções Acadêmico-Científicas dos Discentes da Faculdade Araguaia*, 7: 57-63, 2018.
- CARDOSO, C.K.M.; CARDOSO, R.P.G.; MOREIRA, I.T.A. Avaliação de sorventes naturais para remediação de petróleo derramado em águas marinhas costeiras: o estado da arte e um estudo de caso aplicado. XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2017. <http://www.revistas.unifacs.br/index.php/sepa/>
- CHIARANDA, H.S. Volatilização de compostos BTEX em ambientes subsuperficiais contaminados com gasolina e etanol: Comparação entre concentrações medidas e simuladas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 95 f., 2006.

- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 273, de 29 de novembro de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, nº 5, Seção 1, p. 20-23, 8 de janeiro de 2001.
- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Diário Oficial da União, Brasília, nº 249, p. 81-84, 30 dez. 2009.
- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 463, de 29 de julho de 2014. Diário Oficial da União, Brasília, nº 144, Seção 1, p. 85, 30 julho 2014.
- CORSEUIL, H.X. Enhanced Degradation of Monoaromatic Hydrocarbons in Sandy Aquifer Materials by Inoculation Using Biologically Active Carbon Reactors. PhD dissertation, Environmental Engineering, University of Michigan, EUA. ProQuest Dissertations Publishing, 1992.
- CORSEUIL, H.X.; FERNANDES, M. Efeito do etanol no aumento da solubilidade de compostos aromáticos presentes na gasolina brasileira. *Rev Eng Sanitária e Ambiental*, 4(1): 71-75, 1999.
- CORSEUIL, H.X.; MARINS, M.D. Contaminação de Águas Subterrâneas por derramamento de gasolina: O problema é grave? *Rev Eng Sanitária e Ambiental*, 2(2): 50-54, 1997.
- CORSEUIL, H.X.; MONIER, A.L.; FERNANDES, M.; SCHNEIDER, M.R.; NUNES, C.C.; ROSARIO, M. et al. BTEX plume dynamics following an ethanol blend release: geochemical footprint and thermodynamic constraints on natural attenuation. *Environ. Sci Technol*, 45(8): 3422–3429, 2011.
- COSTA, M.D. Notas de aula: Biorremediação de solos contaminados. MBI 650 Microbiologia do solo. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 2011
- COSTA FILHO, G.F. Biodegradação de óleos derivados do petróleo e de origem vegetal estimulada por biossurfactantes em meio aquoso e monitoramento de sua toxicidade. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Ecologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro, São Paulo, 64 f., 2011.
- COUTINHO, R.C.P.; GOMES, C.C. Técnicas para remediação de aquíferos contaminados por vazamentos de derivados de petróleo em postos de combustíveis. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 20 p. 2007.
- FERRÃO, C.M. Derramamentos de óleo no mar por navios petrolíferos. Monografia de conclusão do curso, Pós-graduação Executiva em Meio Ambiente, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 36f., 2005.
- FORTE, E.J. Contaminação de aquífero por hidrocarbonetos: estudo de caso na Vila Tupi, Porto Velho – Rondônia. *Quim. Nova*, 30(7): 1539-1544, 2007.
- GOMES, S.R.L. Petróleo I: História do Petróleo. Publicado em 10 de setembro de 2019. Disponível em <https://betaeq.com.br/index.php/2019/09/10/petroleo-i-historia-do-petroleo/>, Acesso em 05 de março de 2021.

- GOMES, S.R.L. Petróleo IV: Derivados do Petróleo. Publicado em 10 de setembro de 2019. Disponível em <https://betaeq.com.br/index.php/2019/09/10/petroleo-i-historia-do-petroleo/>, Acesso em 05 de março de 2021.
- IBAMA. Relatório Acidentes Ambientais 2008. Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, Diretoria de Proteção Ambiental – DIPRO, Coordenação Geral de Emergências Ambientais – CGEMA, 36 f., 2009.
- IPIECA. International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. Biological Impacts of Oil Pollution: Saltmarshes. Report Series IPIECA, United Kingdom, 6: 1-21, 1994.
- LOPES, C.F.; MILANELLI, J.C.C.; POFFO, I.R.F. Ambientes Costeiros contaminados por óleo Procedimentos de limpeza - Manual de orientação. São Paulo: CETESB, 120 p., 2007.
- MENEGHETTI, L.R.R. Biorremediação na descontaminação de solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, da Universidade Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 113 f., 2007.
- NAZARKO, M.; CAMARGO, A.T. Bioadsorção de resíduos de óleos vegetais por massas de plantas. XXV Encontro Anual de Iniciação Científica (EIAC), II Encontro Anual de Iniciação Científica Júnior. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, 2016.
- OLIVEIRA, R.M.; ALVES, F. Diversidade microbiana utilizada na biorremediação de solos contaminados por petróleo e derivados. Trabalho apresentado ao Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, como requisito para obtenção de Título de Licenciatura em Ciências Biológicas, Belo Horizonte, Minas Gerais, 16 f, 2013.
- SABATÉ J.; VIÑAS M.; SOLANAS A.M. Laboratory-scale bioremediation experiments on hydrocarbon contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(1): 19-25, 2004.
- SANTANA W.A., TACHIBANA O.I. Caracterização dos elementos de um projeto hidrovial, vantagens, aspectos e impactos ambientais para a proposição de metodologias técnico-ambientais para o desenvolvimento do transporte comercial de cargas nas hidrovias brasileiras. *ENGEVISTA*, 6(3): 75-85, 2004.
- SANZOVO, S.A.P.P.; REZENDE, L.B. Derramamento de óleo no ambiente marinho. *Revista Fatecnológica*, 11(1): 70-76, 2018.
- SILVA, E.F. Gestão ambiental dos postos revendedores de combustíveis no Estado do Rio de Janeiro: Uma visão crítica na visão ocupacional e ambiental da presença do benzeno na gasolina automotiva. Dissertação de Mestrado profissional em sistema de gestão da Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 97 f., 2004.
- SILVA, M.C.G.; MATA-LIMA, H. Gestão de Riscos de Derramamento de Hidrocarbonetos e Derivados na Zona Costeira: O Caso do Porto de Santos. *Finisterra, LIV (111): 61-80, 2019.*

SILVA, L.; TEODORO, R.; AVELINO, M.C. Biorremediação de solos. Revista Conexão Eletrônica, 13(1): páginas ??, 2016.

SOUZA FILHO, A.M.A. Planos Nacionais de Contingência para Atendimento a Derramamento de Óleo: Análise de Países Representativos das Américas para Implantação no Caso do Brasil. Dissertação - Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 217 p., 2006.

TONINI, R.M.; REZENDE, C.E.; GRATIVOL, A. Biodegradação bacteriana de petróleo e seus derivados. Rev Virtual Química 3(2): 78-87, 2011.

VASCONCELOS, B.S.; SANTOS M.L.L.M.; VILELA, M.M.O.P; CARVALHO, T.D.; FONSECA, F.L.A.; SILVA, O.R.; JUNQUEIRA, V.B.C.; AZZALIS, L.A.; SOLDÁ, P.L. Áreas contaminadas por postos de combustível e medidas de remediação no município de São Bernardo do Campo. Saúde Meio Ambiente, 3(1): 73-83, 2014.