

APLICAÇÃO DA BIORREMEDIAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO

EDILEINE APARECIDA DO NASCIMENTO*

JOÃO CARLOS DE SOUZA BATISTA ARAUJO**

KÁTIA MARIA GOMES MACHADO***

RESUMO

Os resíduos da atividade industrial afetam diretamente os ecossistemas naturais, poluindo os recursos hídricos e degradando o solo com substâncias tóxicas. Nesse contexto, a biorremediação vem sendo avaliada como uma nova estratégia para reduzir ou eliminar compostos orgânicos e inorgânicos, nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. No Brasil, a biorremediação tem sido pouco aplicada, embora exista potencial real para a aplicação desta tecnologia para a descontaminação de áreas contaminadas com diferentes compostos tóxicos e recalcitrantes, como organoclorados e petroderivados. O presente trabalho apresenta a situação atual do uso da biorremediação por empresas do Estado de São Paulo, com especial atenção para sua aplicação na recuperação de áreas contaminadas com petróleo e seus derivados. As empresas que atuam com biorremediação no Estado de São Paulo foram identificadas por meio de pesquisa na internet. Foram aplicadas entrevistas estruturadas com representantes das empresas para a coleta de informações buscando identificar as estratégias de biorremediação que estão sendo aplicadas, principais contaminantes e os fatores que limitam a implementação da biorremediação no estado. Foi feito ainda uma comparação do custo da remediação de solo de um posto de gasolina contaminado com petroderivados, empregando uma estratégia convencional (extração multifásica) e a biorremediação otimizada *in situ*. Foram identificadas 32 empresas atuando no mercado da biorremediação no Estado de São Paulo e 15 delas contribuíram com as informações solicitadas. Foi possível constatar que as empresas estão aplicando variadas técnicas de biorremediação, com ênfase para a atenuação natural e a biorremediação otimizada com oxigenação e adição de nutrientes. Os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos estão entre os contaminantes mais tratados por processos de biorremediação no estado. O tempo de operação do sistema e a dificuldade de adquirir equipamentos e insumos foram apontados como os principais fatores limitantes para o emprego da biorremediação no estado de São Paulo. Em relação ao custo operacional, o estudo comparativo evidenciou a grande vantagem da biorremediação, com custo 53% menor que a extração multifásica.

* Aluna do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Santos.

** Aluno do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Santos.

*** Graduação em Ciências Biológicas - Licenciatura e Bacharelado pela Universidade Federal de Minas Gerais (1985), Mestrado em Ciências Biológicas (Microbiologia) pela Universidade Federal de Minas Gerais (1991) e Doutorado em Ciências Biológicas (Microbiologia Aplicada) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1998). É Assistente Doutor da Universidade Católica de Santos, onde exerce a Coordenação do Curso de Ciências Biológicas (2014-2017) e é membro eleito do Conselho de Ensino e Pesquisa (CEPES) como representante do Centro de Ciências da Educação e Comunicação (2014-2017).

PALAVRAS CHAVES

Descontaminação ambiental, Poluição, Hidrocarbonetos.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a ação dos seres humanos tem provocado mais alterações na Terra e nos seus ecossistemas do que em qualquer outro período comparável da história. A contaminação do ambiente, em uma escala mundial, agravou-se a partir da Segunda Guerra Mundial, devido à **acelerada** expansão industrial (PEREIRA et al., 2012).

A poluição ambiental pode ser definida como a ação de contaminar solos, águas e o ar. Essa contaminação pode ocorrer quando são lançados no ambiente, sem os devidos cuidados, lixo orgânico, industrial, gases poluentes, objetos materiais, elementos químicos, entre outros, em concentrações superiores à capacidade regeneradora natural dos ecossistemas. A situação de poluição ambiental foi agravada pela introdução no ambiente de substâncias recalcitrantes, ou seja, resistentes à degradação natural (ALEXANDER, 1999; SINHA et al., 2009).

São exemplos de poluentes recalcitrantes diferentes classes de compostos químicos, como os plásticos, os metais inoxidáveis, certos pesticidas e inseticidas e os hidrocarbonetos derivados do petróleo. Devido ao fato dos compostos poluentes sintetizados pelo homem terem estruturas diferentes das substâncias naturais, eles recebem a denominação de compostos xenobióticos. Estas substâncias nem sempre são reconhecidas pelos sistemas enzimáticos microbianos envolvidos nos processos de degradação natural e, assim, podem constituir-se em moléculas persistentes no ambiente (ATLAS, 1981; ATLAS; BARTHA, 2005).

A qualidade dos recursos hídricos bem como das águas subterrâneas e do solo devem ser preservadas. O solo atua, frequentemente, como um filtro, imobilizando grande parte das impurezas nele depositadas. No entanto, essa capacidade é limitada, podendo ocorrer alteração da qualidade do solo devido ao efeito cumulativo da deposição de poluentes atmosféricos, aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes, disposição de resíduos sólidos industriais, urbanos, materiais tóxicos e radioativos, comuns nos setores da economia brasileira (Quadro 1).

A utilização do solo como receptor de poluentes pode ocorrer, localmente, por um depósito de resíduos, por uma área de estocagem ou processamento de produtos químicos, por disposição, vazamento ou derramamento de resíduos e efluentes. Regionalmente, a contaminação do solo pode se dar por deposição de poluentes veiculados pela atmosfera, por inundação ou mesmo por práticas agrícolas indiscriminadas. Migração descendente de poluentes do solo para a água subterrânea poderá ocorrer, resultando em um grande problema para as populações que fazem uso deste recurso hídrico (PEREIRA et al., 2012).

Setor	Poluentes
Agropecuária	Metano, Dióxido de Carbono, Compostos orgânicos voláteis, Metais pesados, Embalagens de Agrotóxicos, Fertilizantes não aproveitados, Materiais particulados.
Mineração	Monóxido de carbono, Dióxido de Carbono, Óxidos de Nitrogênio, Óxidos de Dióxido de Enxofre, Metais Pesados, Águas Residuais, Resíduos Sólidos, Ruídos e Vibrações.
Siderurgia	Dióxido de Enxofre, NO ₂ , Monóxido de carbono, Compostos orgânicos voláteis, DBO, Materiais Particulados, Escórias, Lodos de Tratamento de Efluentes, Ruídos.
Metais não Metálicos	Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono, DBO, Materiais Particulados, Lodos de Tratamento de Efluentes, Ruídos.
Usinas Termoeletricas	Monóxido de carbono, Dióxido de Carbono, Metano, Óxido de Nitrogênio, Dióxido de Enxofre, Materiais Particulados e Lodo.
Têxtil	Dióxido de Enxofre, Ácido Clorídrico, Materiais Particulados, DBO, Ruídos.
Refinarias de Petróleo	Dióxido de Enxofre, Compostos orgânicos voláteis, Monóxido de Carbono, DBO, DCO, Materiais Particulados, Derramamentos.
Transportes	Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Oxido de Nitrogênio e Dióxido de Enxofre, Hidrocarbonetos, Materiais Particulados, Derramamento de Óleo e Combustíveis, Ruídos.

Quadro 1
Exemplos de poluentes típicos dos setores da economia brasileira.

Fonte: Barbieri (2007).

A partir da década de 1970, a contaminação de solos e águas subterrâneas começou a ser tratada como um problema ambiental mundial, principalmente devido ao seu risco à saúde humana. Inúmeros desastres com produtos químicos, como em Seveso (Itália, 1976) e Bhopal (Índia, 1984), contribuíram para mobilizar setores importantes da sociedade mundial em relação aos impactos ambientais e sociais causados por determinadas atividades humanas, principalmente as atividades industriais. Nesse sentido, o acidente em Bhopal, na medida em que transcendeu as fronteiras nacionais, foi emblemático para a política internacional, marcando uma profunda mudança no enfrentamento dos desastres, com o estabelecimento de padrões de conduta pelo setor industrial químico (MACHADO, 2006; PANAGOS et al., 2013; PEREIRA et al., 2012).

Nessa ocasião, o Estado de São Paulo também já convivia com problemas ambientais decorrentes da expansão do seu parque industrial, principalmente no município de Cubatão. Podem ser citados os danos à saúde de trabalhadores da unidade de pentaclorofenol, da Rhodia, e de moradores da Vila Parisi e a explosão da Vila São José em 1984 (Vila Socó), provocada pelo vazamento de gasolina dos dutos da Petrobrás (FERREIRA, 2006).

O Estado de São Paulo, em função de sua intensa industrialização, apresenta uma situação mais crítica em relação aos demais estados brasileiros, no que tange à problemática da contaminação ambiental. Desde 2002, a CETESB divulga a relação das áreas contaminadas no estado. De acordo com os dados do último relatório, divulgado em dezembro de 2015, atualmente o número de áreas contaminadas é de 4.771. Desse total, 425 já foram reabilitadas e 1556 encontram-se em processo de remediação. Na TAB. 1 é possível verificar a distribuição das áreas contaminadas pelas regiões do Estado de São Paulo segundo a atividade

desenvolvida. Destaca-se a cidade de São Paulo e o interior, com os maiores números de áreas contaminadas, principalmente por postos de gasolina (CETESB, 2015).

Áreas Contaminadas do Estado de São Paulo						
Região	ATIVIDADE					Total
	Comercial	Industrial	Resíduos	Postos Gasolina	Acidentes Agricultura	
São Paulo	76	248	38	1.294	9	1.665
Região Metropolitana	48	199	23	535	11	816
Interior	75	228	45	1.314	15	1.677
Litoral	29	42	28	247	2	348
Vale do Paraíba	4	51	2	207	1	265
Total	232	768	136	3.597	38	4.771

Tabela 1
Distribuição das áreas contaminadas no Estado de São Paulo.

Fonte: CETESB (2015).

O petróleo é um recurso não renovável resultante de processos físico-químicos e biológicos sofridos pela matéria orgânica depositada geologicamente, sendo que sua exploração comercial ocorre há mais de 140 anos. O petróleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos, cuja formação é influenciada pelas condições ambientais as quais foi submetido. Sua composição varia em função de sua localização geográfica e das condições físico-químicas e biológicas que o originaram. O petróleo é composto por milhares de compostos químicos diferentes. Os hidrocarbonetos constituem até 98% deles. Sua composição elementar, além de carbono e hidrogênio apresenta também quantidades variáveis de oxigênio, enxofre e traços de nitrogênio, metais e outros elementos (SEABRA, 2008; TAPA et al., 2012).

O petróleo é comumente dividido em fração alifática (cerca de 60%), fração aromática (20 a 45%), fração polar e asfaltenos (0 a 40%). A fração alifática contém uma série predominante de hidrocarbonetos saturados lineares, mas também contém hidrocarbonetos ramificados e vários hidrocarbonetos cíclicos e policíclicos (naftenos). Hidrocarbonetos saturados são geralmente os mais importantes dos grupos citados, por serem a maior parte da composição do óleo bruto. Os compostos aromáticos são o segundo grupo constituinte mais importante. A fração aromática contém hidrocarbonetos aromáticos alquilados desde um anel até os poliaromáticos (HPAs). A fração polar é complexa, contendo muitos aromáticos heterocíclicos que pode incluir derivados de porfirina e compostos alifáticos contendo nitrogênio e enxofre (ATLAS; BARTHA, 2005).

Dentre os hidrocarbonetos monoaromáticos destacam-se benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), que possuem como característica principal a presença do anel benzênico. São usados, principalmente, em solventes e em combustíveis e são os constituintes mais solúveis na fração da gasolina. Dentre os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno), o benzeno é considerado o mais tóxico, sendo reconhecido como um potente agente carcinogênico (SEABRA, 2008).

Os hidrocarbonetos que possuem dois ou mais anéis são denominados hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e são considerados os mais tóxicos componentes do petróleo.

Apresentam menor coeficiente de partição do que os hidrocarbonetos alifáticos (C_{15} a C_{30}). São mais agressivos ao meio ambiente por possuírem maior mobilidade em água e, por consequência, possuem maior amplitude de impacto. Muitos HPA possuem um potencial comprovadamente tóxico e alguns, carcinogênicos (TIBURTIUS *et al.*, 2004).

Durante a exploração, o refino, o transporte e as operações de armazenamento do petróleo, ou de seus derivados, podem vir a ocorrer derramamentos acidentais, ocasionando a contaminação de diferentes ambientes. Os derramamentos de petróleo e seus derivados constituem a principal e mais danosa causa de contaminação nos solos e águas. Alguns exemplos ilustram a magnitude desta contaminação. Em 1981, 3,2 milhões de toneladas de petróleo entraram no ambiente marinho mundial. Em 1990, essa quantidade caiu para 2,35 milhões de toneladas. De 1992 a 1996, 9 milhões de litros/ano de petróleo vazaram em ambiente aquático somente no EUA. Em termos mundiais, o montante de óleo vazado no ambiente marinho em 1997 foi da ordem de 210 milhões de litros, sendo 91 milhões de litros não provenientes de embarcações. Desse volume de petróleo derramado no ambiente marinho de todo o mundo, cerca de 2% tiveram origem na exploração e produção em plataformas marinhas, 33% em operações com navios, e 12% em acidentes com petroleiros (CRAPEZ *et al.*, 2002; SEABRA, 2008).

A disposição inadequada de resíduos oleosos da indústria de petróleo vem causando a contaminação de solos, de recursos hídricos superficiais e subterrâneos e, eventualmente, dependendo da volatilidade dos compostos orgânicos presentes nos resíduos, a contaminação do ar. Destacam-se os vazamentos provenientes de tanques de armazenamento subterrâneos, os quais estão sujeitos a fortes processos corrosivos. Quando ocorre o derramamento de gasolina em solos, por exemplo, uma das principais preocupações é a contaminação das águas subterrâneas, especialmente, os aquíferos usados como fontes de abastecimento de água para o consumo humano.

Vários podem ser os problemas gerados pela contaminação do solo e da água subterrânea por hidrocarbonetos, sendo aqueles relacionados com a saúde da população e dos ecossistemas os de maior importância. Além disto, a ocorrência de vazamentos de hidrocarbonetos configura perigo constante de incêndio ou explosão nos locais atingidos. Destaca-se ainda a restrição ao desenvolvimento urbano e imobiliário (DURMUSOGLU *et al.*, 2010; THAPA *et al.*, 2012).

Quando o petróleo e petroderivados são derramados no meio ambiente, ocorrem processos biológicos e físico-químicos de intemperização, os quais reduzem a concentração de diferentes grupos de hidrocarbonetos e alteram a composição química dos óleos derramados. Os processos de intemperização que ocorrem com o petróleo e seus derivados são espalhamento, evaporação, dissolução, dispersão, emulsificação (mais importantes no período inicial de um derrame), fotoxidação, sedimentação e biodegradação (ocorrem em longo prazo) (CRAPEZ *et al.*, 2002).

Diversas técnicas, físicas, químicas e biológicas, vêm sendo desenvolvidas e consolidadas, principalmente pelos países desenvolvidos, para a remoção ou a degradação de petróleo derramado e para a redução de seus efeitos tóxicos sobre os ecossistemas, cada uma delas apresentando suas vantagens e suas limitações. O Brasil, hoje mais preocupado com seus passivos ambientais, começa a desenvolver suas próprias tecnologias, assim como adaptar, às nossas condições ambientais, tecnologias já estabelecidas em outros países.

Dentre as tecnologias disponíveis para a descontaminação, a biorremediação tem recebido atenção uma vez que se apresenta como ambientalmente correta, pelo seu potencial de

destruição completa dos contaminantes orgânicos sem geração de resíduos tóxicos. A biorremediação é um conjunto de processos de tratamento que utiliza agentes biológicos para degradar, reduzir ou eliminar compostos orgânicos que oferecem risco ao meio ambiente (MATHEUS; MACHADO, 2002; PEREIRA et al., 2012; TAPA et al., 2012).

Diversas empresas, principalmente aquelas relacionadas com consultorias e remediação ambiental, têm despertado grande interesse pela implantação da biorremediação como opção para a reabilitação de áreas contaminadas pela sua eficiência na degradação de diferentes classes de compostos tóxicos ao ser humano, como o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX). Ressalta-se que as técnicas de biorremediação não estão amplamente difundidas, embora haja um imenso campo para sua expansão, considerando as condições climáticas do Brasil e suas vantagens em comparação aos métodos convencionais de remediação.

Os principais agentes atuantes na degradação de contaminantes orgânicos são os micro-organismos presentes no solo e na água subterrânea, como bactérias e fungos. Sendo os principais agentes responsáveis pela ciclagem do carbono na natureza, os micro-organismos são capazes de atuar em poluentes tóxicos por meio de diferentes vias metabólicas, o que pode levar a produtos finais não nocivos, como dióxido de carbono, água e sais minerais (MATHEUS; MACHADO, 2002; PEREIRA et al., 2012).

Em muitos ecossistemas existe uma comunidade autóctone de micro-organismos capazes de degradar hidrocarbonetos, os micro-organismos hidrocarbonoclásticos. Em ecossistemas não impactados pela presença de hidrocarbonetos, os microrganismos hidrocarbonoclásticos constituem menos de 1% da comunidade microbiana; mas, em ecossistemas impactados, podem chegar a constituir 100% da comunidade, evidenciando que a proporção de micro-organismos que utilizam hidrocarbonetos como fonte de carbono depende da disponibilidade deste recurso no ambiente. De acordo com parâmetros como origem dos micro-organismos e adição ou não de nutrientes, as técnicas de biorremediação que empregam a capacidade de micro-organismos atuarem em compostos orgânicos podem ser realizadas através de diversos processos, descritos de forma breve a seguir. As técnicas de biorremediação serão tratadas de forma mais detalhada em capítulos específicos deste livro.

A biorremediação intrínseca ou atenuação natural monitorada tem atuação na diluição, dispersão, degradação química e biológica, sorção/precipitação, e/ou decomposição radioativa dos contaminantes do solo e água subterrânea. Esta técnica limita o deslocamento do contaminante e, conseqüentemente, minimiza a contaminação do meio ambiente. Após a contaminação do lençol freático, os contaminantes se dispersarão em forma de pluma, que tenderá a se deslocar. Este deslocamento pode ser atenuado por processos que envolvem reações químicas promovidas por microrganismos autóctones, sem necessidade de interferência de outras tecnologias. A utilização do processo de atenuação ocorre naturalmente no solo, mas com monitoramento e controle adequados, com o intuito de observar a redução nas concentrações dos contaminantes, toxicidade, massa e volume até níveis aceitáveis à proteção da saúde humana e ao meio ambiente (ANDRADE *et al.*, 2010; ANDREONE; GIANFREDA, 2007; PEREIRA et al., 2012).

O bioaumento é o processo de introdução de micro-organismos alóctones (não nativos) com capacidade comprovada de degradar os poluentes. Esse processo de biorremediação utiliza micro-organismos alóctones muitas vezes encontrados em produtos biotecnológicos comercializados. Esse processo pode ser realizado, com a aprovação do órgão ambiental responsável, quando um local contaminado não possui, ou possui em quantidades insatisfatórias, as exigências necessárias para que o processo de degradação ocorra (BENTO *et al.*, 2003; TAPA et al., 2012).

A bioestimulação da atividade metabólica de micro-organismos é uma técnica utilizada *in situ* quando existe no local uma população nativa capaz de degradar os poluentes e as condições ambientais estão limitando as taxas de biodegradação. Determinadas as necessidades nutricionais e os parâmetros físico-químicos para otimizar a atividade microbiana, procede-se a adição de agentes estimulantes, como nutrientes, biossurfactantes e oxigênio e na otimização das condições ambientais do solo como pH, temperatura e umidade para melhorar a eficiência da atividade microbiana autóctone. Para se utilizar o processo de bioestimulação, deve-se certificar que existe no local contaminado uma população natural de microrganismos capazes de biodegradar os contaminantes e que as condições ambientais são insuficientes para se obter altas taxas de atividade microbiológica da população nativa (ANDREONE; GIANFREDA, 2007; BENTO *et al.*, 2003; TAPA *et al.*, 2012).

A bioestimulação pela adição de oxigênio é uma técnica de remediação *in situ* de solo contaminado por compostos aerobicamente degradáveis. O processo é desenvolvido por meio da introdução de ar nas camadas afetadas pela presença de contaminantes orgânicos, permitindo que o oxigênio faça a ativação de processos catabólicos aeróbios de quase todos os compostos orgânicos. Esta técnica se mostra eficiente no tratamento de qualquer contaminante degradável em meio aeróbico, particularmente é muito efetiva na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo (SEABRA, 2008; PEREIRA *et al.*, 2012).

Podem-se enumerar como vantagens da Biorremediação: i) constitui um processo relativamente simples, ii) tem baixo custo em relação às técnicas convencionais, iii) pode conduzir à total mineralização, resultando na eliminação permanente dos contaminantes ao invés de meramente transferir o contaminante de um meio para outro, iv) pode ser realizada no local, evitando custos com transportes, v) baseia-se em mecanismo biológico, o que evita riscos associados com resíduos sintéticos perigosos; vi) é eficiente em meios homogêneos e de textura arenosa e, vii) pode ser associada com outros métodos de tratamento por causar poucas mudanças nas características químicas, físicas e biológicas do meio ambiente (ANDRADE *et al.*, 2010; MATHEUS; MACHADO, 2002; SEABRA, 2008).

Quanto às desvantagens da biorremediação, podem ser citadas: i) a existência de compostos recalcitrantes a biodegradação; ii) o tempo de operação pode ser mais longo, comparado aos métodos físico-químicos de tratamento; iii) a toxicidade do poluente pode inibir a atividade microbiana e iv) a bioconversão dos poluentes pode resultar em produtos mais tóxicos que o composto original. Destaca-se que, dependendo da complexidade do objeto contaminado, o sucesso da biorremediação depende de um enfoque multidisciplinar, envolvendo a integração de diversas áreas científicas, como engenharia, microbiologia, ecologia, geologia e química (ANDRADE *et al.*, 2010; MATHEUS; MACHADO, 2002).

OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral conhecer o uso da biorremediação no Estado de São Paulo, com destaque para sua aplicação na descontaminação de áreas impactadas pelo petróleo e seus derivados. Os objetivos específicos foram:

- Identificar as empresas que atuam com biorremediação no Estado de São Paulo;
- Identificar as estratégias de biorremediação aplicadas por estas empresas;
- Identificar os principais contaminantes dos ambientes terrestres e aquáticos tratados por biorremediação por estas empresas;
- Identificar os principais fatores que limitam a implementação da biorremediação por estas empresas.

- Apresentar um estudo comparativo entre o custo do tratamento de um posto de gasolina, visando a descontaminação do solo afetado por petróleo e seus derivados, empregando as estratégias de biorremediação *in situ* com adição de nutrientes e a extração multifásica (MPE).

METODOLOGIA

A identificação das empresas atuantes no mercado de remediação e biorremediação foi feita por meio do cadastro disponível *on line* da Associação Brasileira das Empresas de Consultoria e Engenharia Ambiental (<http://www.aesas.com.br/>), seguida de pesquisa no site das empresas, visando selecionar aquelas com atuação em remediação e biorremediação, de acordo com o portfólio de serviços. Este levantamento foi realizado no período de abril a julho de 2013.

A coleta das informações das empresas foi feita por meio de entrevistas usando questionário estruturado com 09 questões de múltipla escolha e um espaço livre para comentários. Previamente ao envio dos questionários, foi feito contato telefônico com o departamento de atendimento das empresas. A partir da identificação do nome do técnico responsável, o questionário foi encaminhado por mensagem eletrônica diretamente para o seu endereço eletrônico, e não pelo e-mail corporativo.

Para comparar os custos entre as técnicas de remediação e de biorremediação, foram obtidos orçamentos para um cenário hipotético envolvendo o serviço de descontaminação de um posto de gasolina contaminado com hidrocarbonetos. Uma das empresas entrevistadas forneceu seu orçamento para o serviço de remediação deste posto utilizando o sistema de Extração Multifásica (MPE). Outro orçamento foi obtido para o serviço de descontaminação do mesmo local pela aplicação da técnica de biorremediação otimizada *in situ*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificadas 32 empresas (QUADRO 2) que oferecem serviços de remediação e/ou biorremediação no Estado de São Paulo. Em um estado com uma área territorial extensa, onde há uma elevada quantidade de áreas contaminadas, seja em ambientes terrestres ou ambientes aquáticos, incluindo as águas subterrâneas, existe uma quantidade significativa de empresas cuja principal atividade é a remediação.

Empresa	Cidade
1. Angel Ambiental	São Paulo
2. Arcadis Logos	São Paulo
3. Ativa Ambiental	Santos
4. Basalto Consultoria e Remediação Ambiental	Praia Grande
5. BTX Geologia e Meio Ambiente	São Paulo
6. CagGeo - Meio Ambiente e Geologia	São Paulo
7. CPEA	Santos
8. Cetrellumina - Soluções Ambientais	São Paulo
9. D-Geo Geologia e Ambiental	São Paulo
10. Doxor - Soluções Ambientais	São Paulo
11. Ecel Ambiental	Santos
12. Ecogeo	São Paulo
13. Ecogreen Consultoria Ambiental	São Paulo
14. Essencis - Soluções Ambientais	São Paulo
15. Gb Eco Solutions	Cotia
16. Geobrasil - Soluções Ambientais	Ribeirão Preto

17. Geoklok Consultoria Ambiental	São Paulo
18. Hera - Consultoria e Treinamento Ltda	Campinas
19. Litoral Consultoria e Serviços Ambientais	Santos
20. Miller Consultoria Ambiental	São Paulo
21. Multigeo	São Paulo
22. Planterra - Ambiental	São Paulo
23. Regea - Geologia e Estudos Ambientais	São Paulo
24. Sanifox do Brasil – Serviços de Remediação Ltda	São Paulo
25. Servmar - Ambiental & Engenharia	São Paulo
26. Sgw Services	São Paulo
27. Tecnohidro - Engenharia Ambiental	São Paulo
28. TSL Engenharia Ambiental	São Paulo
29. Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda	São Paulo
30. Walter Lazzarini Consultoria Ambiental	São Paulo
31. Waterloo Brasil - Consultoria Ambiental	São Paulo
32. Weber Ambiental	São Paulo

Quadro 2

Empresas que oferecem serviços de remediação e/ou biorremediação no Estado de São Paulo

Do total de 32 empresas entrevistadas, foram recebidos 15 questionários, resultando em um índice de retorno de 47,0%, superior à média esperada de 25% de devolução de questionários enviados (MARCONI, LAKATOS, 2005). As informações fornecidas pelas principais empresas atuantes nesse segmento permitiram obter uma visão geral do uso da técnica de biorremediação no Estado de São Paulo.

Atividades de remediação são oferecidas por 11 empresas há mais de cinco anos e 4 empresas adicionaram este serviço nos últimos 5 anos (GRAF. 1). Já as atividades de biorremediação são oferecidas há mais de cinco anos por 8 empresas e 7 empresas adicionaram este serviço nos últimos 5 anos. Estes resultados podem evidenciar que as empresas, que inicialmente executavam serviços somente de remediação, estão agregando as técnicas de biorremediação às suas atividades. Isso parcialmente pode ser explicado em virtude da técnica de biorremediação ainda ser pouco difundida, contando com reduzidos casos de sucesso, além da escassez de trabalhos científicos que atestem seus benefícios.

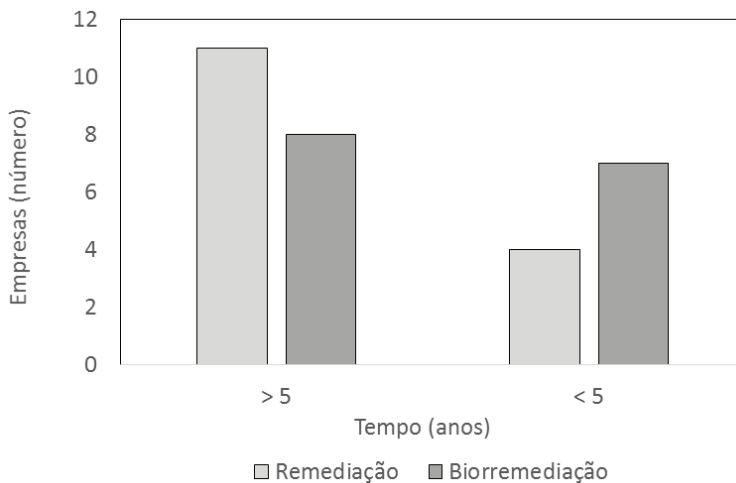


Gráfico 1

Número de empresas do Estado de São Paulo e o tempo (anos) que oferecem os serviços de Remediação e de Biorremediação.

Pode-se observar ainda que a biorremediação é oferecida há tempo igual ou inferior às demais técnicas de remediação. Esse fator denota que as empresas entrevistadas foram constituídas para realizar as duas técnicas ou agregaram a biorremediação em seu portfólio de serviços posteriormente. Os resultados não permitem evidenciar se alguma empresa foi constituída com a intenção de fazer da biorremediação sua principal atividade.

Não foi encontrada, entre as empresas, aquela que faça apenas uma das duas atividades, remediação ou biorremediação. Como a entrevista foi feita por mensagem eletrônica, o entrevistado teve a oportunidade de analisar as perguntas previamente. Como o questionário incluía um grande número de questões sobre a área da biorremediação, provavelmente foi um forte estímulo para a participação apenas das empresas que trabalham com as duas tecnologias (remediação e biorremediação) para a descontaminação de ambientes terrestres ou aquáticos.

Foi possível observar que os ambientes terrestres são mais frequentemente submetidos à processos de remediação ou biorremediação (67%), em relação aos aquáticos (6%) (GRAF. 2). No entanto, 27% das empresas aplicam processos de remediação ou biorremediação em ambos os ambientes. Este número é bastante significativo uma vez que a biorremediação se mostra uma técnica promissora na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos. Esses hidrocarbonetos estão presentes na composição de combustíveis fósseis que são comercializados principalmente via postos de gasolina, cuja atividade, até 2015, já contaminou 3.597 áreas no Estado de São Paulo (CETESB, 2015).

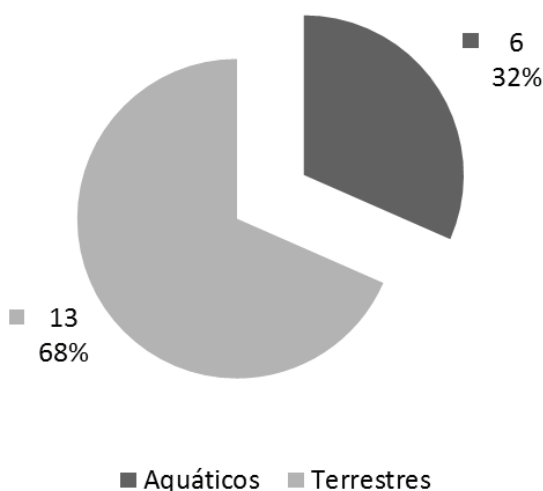


Gráfico 2

Ambientes tratados por técnicas de remediação ou de biorremediação por empresas do Estado de São Paulo.

Os resultados permitiram identificar os poluentes mais frequentemente tratados, possibilitando verificar as exigências atuais em termos de abrangência e tecnologias. Os hidrocarbonetos BTEXs (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) foram os poluentes mais frequentemente tratados pelas 15 empresas paulistas (GRAF. 3). Os BTEXs foram seguidos pelos Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HPAs), evidenciando a precariedade em que postos de gasolina mantêm suas atividades. Considerando a existência no solo e águas subterrâneas de micro-organismos com capacidade de usar fontes de energia e carbono disponíveis, quer sejam açúcares facilmente metabolizáveis ou compostos orgânicos complexos como os encontrados na amostra, estes resultados reforçam o potencial que técnicas de biorremedia-

ção possuem para dar respostas, com menor nível de agressão ao meio ambiente, aos poluentes frequentemente tratados no estado de São Paulo.

Um número reduzido de empresas está aplicando processos de remediação ou biorremediação para organoclorados, metais pesados e bifenilas policloradas. Nenhuma empresa entrevistada está envolvida com o tratamento de compostos organofosforados. Esses últimos compostos são amplamente utilizados na agropecuária como inseticidas, herbicidas e reguladores do crescimento das plantas. Este resultado evidencia que a contaminação de terras agrícolas ainda não tem a atenção necessária para a manutenção da qualidade do solo de extensas áreas no interior do estado. Isto, provavelmente, decorre de ser mais viável economicamente o arrendamento de novas áreas do que a descontaminação do sítio afetado.

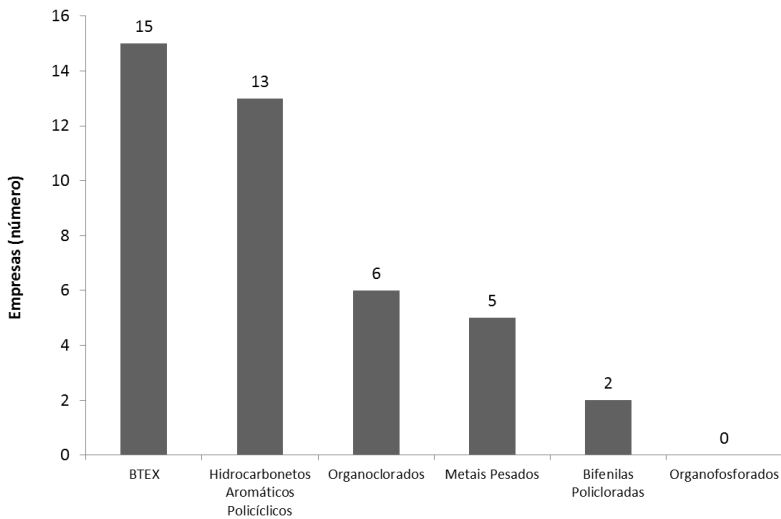


Gráfico 3

Poluentes frequentemente tratados por empresas do Estado de São Paulo aplicando técnicas de remediação e/ou de biorremediação. (BTEXs: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos).

As empresas, de uma maneira geral, executam várias técnicas de remediação (GRAF. 4). Todas as empresas oferecem a extração multifásica e as técnicas de oxidação química (93%) e de extração de vapores (67%) foram citadas pela maioria das empresas, o que as coloca, ao menos nesse estudo, como as técnicas mais utilizadas atualmente no Estado de São Paulo. As empresas citaram outras técnicas de remediação oferecidas aos clientes, como a remoção de solo e o bombeamento seguido de tratamento. Esta última foi referida por elas pela sua denominação na língua inglesa *Pump and Treat*.

Uma prática comumente empregada pelas empresas que oferecem estratégias de remediação é a elaboração de uma proposta de serviço apresentando a técnica sugerida para as condições do ambiente contaminado. Assim, as empresas que contam com um número reduzido de soluções tecnológicas tenderão provavelmente a limitar as opções ofertadas àquelas tecnologias de tratamento que possuem o pleno domínio.

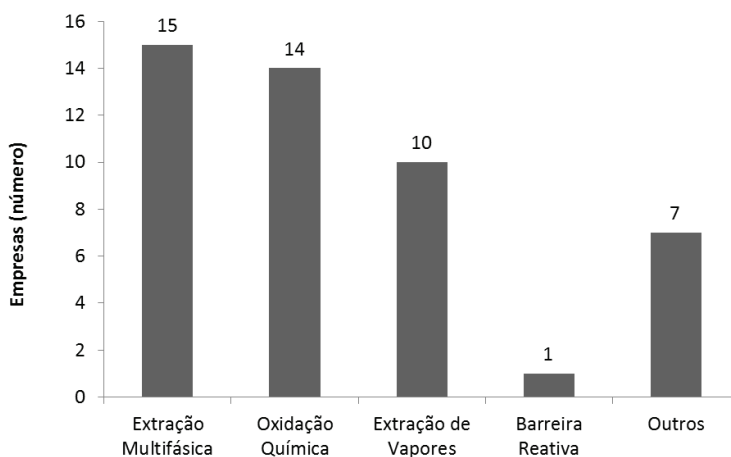


Gráfico 4

Técnicas de remediação utilizadas por empresas do Estado de São Paulo.

Considerando as técnicas de biorremediação, as empresas aplicam principalmente a atenuação natural e a biorremediação otimizada com adição de nutrientes ou de aeração (GRAF. 5). Dentre as diversas técnicas de biorremediação, a atenuação natural apresenta os menores custos, envolvendo gastos apenas com o monitoramento do sítio contaminado. A biorremediação otimizada com adição de aeração também é uma estratégia de baixo custo quando comparada à adição de nutrientes ou à adição de micro-organismos. Nestas, outras etapas precisam ser agregadas para a operação do processo de remediação, como a aquisição de nutrientes e de micro-organismos, bem como uma série de estudos prévios para definir as proporções ideais para cada situação de contaminação, encarecendo o custo final.

Apenas uma empresa indicou a utilização da biorremediação com adição de micro-organismos. Provavelmente, esse resultado está relacionado às especificidades desta técnica de biorremediação. Muito embora proporcione bons resultados, a técnica de biorremediação com adição de micro-organismos é considerada complexa em virtude de todos os fatores envolvidos para sua aplicação, como a exigência de mão de obra especializada e o custo com os estudos prévios para identificação de espécies microbianas capazes de degradar os contaminantes ou a produção de microrganismos previamente selecionados.

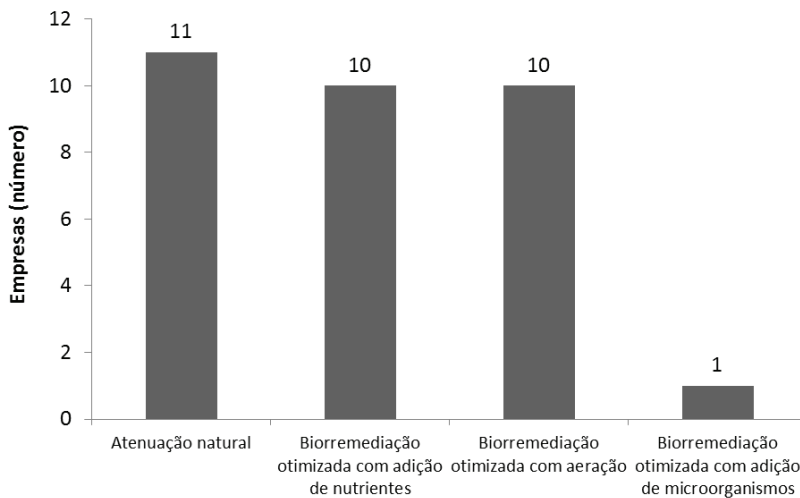


Gráfico 5

Técnicas de biorremediação utilizadas por empresas do Estado de São Paulo.

As empresas demonstraram satisfação com os resultados alcançados pelo uso das técnicas de biorremediação (GRAF. 6). Nenhuma empresa assinalou o termo “insatisfatório”. Este otimismo demonstrado pelas empresas quanto aos resultados obtidos usando técnicas de biorremediação reforça o grande potencial delas para a resolução de problemas de contaminação ambiental do estado de São Paulo.

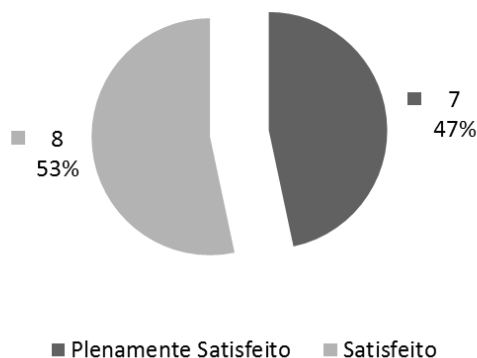


Gráfico 6

Nível de Satisfação das empresas de São Paulo com os seus resultados obtidos pelo uso de técnicas de Biorremediação.

Foram identificadas as principais dificuldades encontradas pelas empresas para oferecer e executar os processos de biorremediação (GRAF. 7). As empresas enumeraram as dificuldades por ordem de importância do maior para o menor grau. A principal dificuldade apontada foi o maior tempo de operação das técnicas de biorremediação em relação às tecnologias tradicionais. Esta dificuldade foi escolhida como as 1ª e 2ª opções por 33% das empresas. Este resultado era esperado uma vez que um maior tempo de operação produz um efeito em cascata nas demais atividades que envolvem o processo de descontaminação de um ambiente, como por exemplo, na disponibilidade da mão de obra, reduzindo o retorno financeiro para

essas empresas que travam entre si uma disputa acirrada para fidelizar e conquistar novos clientes.

O custo operacional foi citado apenas por 20% das empresas, na 1ª escolha, sendo que 47% das empresas considerou este fator como sua 5ª opção, evidenciando que o custo das operações não parece afetar a escolha do método de descontaminação. Este resultado demonstra que vários fatores podem desestimular o uso da biorremediação, mas certamente o custo não exerce a maior influência entre eles.

Nesse cenário, podem ser consideradas duas alternativas para explicar os resultados. As empresas contratantes buscam um resultado imediato não se importando com o maior custo das operações. Muitas vezes, há como pano de fundo para esses casos uma pressão exercida por órgãos ambientais por uma resposta rápida que satisfaça acionistas, comunidades, imprensa e poder público. Ou então, as empresas ambientais tratam a remediação convencional como prioridade, uma vez que geram maior retorno financeiro, e o dispêndio de tempo e mão de obra é menor. Essa relação de maior lucro e menor tempo de operação faz com que a biorremediação seja colocada em segundo plano em detrimento às demais tecnologias de remediação.

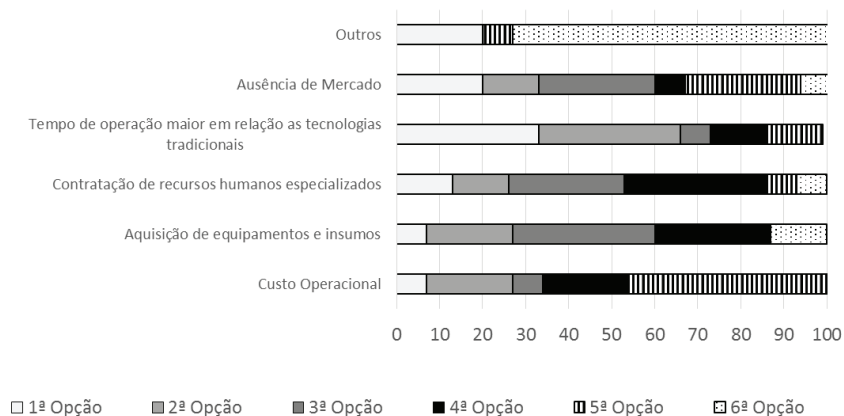


Gráfico 7

Dificuldades enumeradas pelas empresas do estado de São Paulo para oferecer e executar processos de biorremediação

O percentual de 73% para a resposta “outros” na 6ª opção de escolha feita pelas empresas pode ser apenas fruto da sequência da numeração empregada no momento de responder ao questionário. As empresas ao numerarem suas prioridades colocaram no campo “outros” a numeração final da pesquisa elevando esse percentual. Algumas empresas enumeraram outros fatores como limitadores da utilização da biorremediação, sendo citados os seguintes: “Incertezas advindas dos métodos e técnicas utilizadas na avaliação ambiental da área contaminada”; “Alta demanda espacial e cenário de contaminação muito específico” e “Falta de laboratório para análises microbiológicas para os tipos de bactérias”.

Essas observações são extremamente pertinentes, uma vez que refletem a vivência de profissionais que estão diretamente ligados as atividades práticas. Além disto, elas evidenciam a necessidade de estudos mais específicos visando um maior aprofundamento em diferentes dimensões que envolvem as novas tecnologias, como a biorremediação.

As empresas sediadas no estado de São Paulo atuam também em outros estados do país (GRÁF. 8). Duas empresas informaram atuação em todo o território nacional. Isto não significa necessariamente que estas empresas possuem trabalhos atuais nos demais estados, mas indica uma possibilidade de atuação por toda a federação. Isto pode ser um indício de que essa atividade econômica está em franco crescimento, constituindo-se em uma promissora fonte de interesse para os novos profissionais ingressantes no mercado de trabalho da área ambiental.

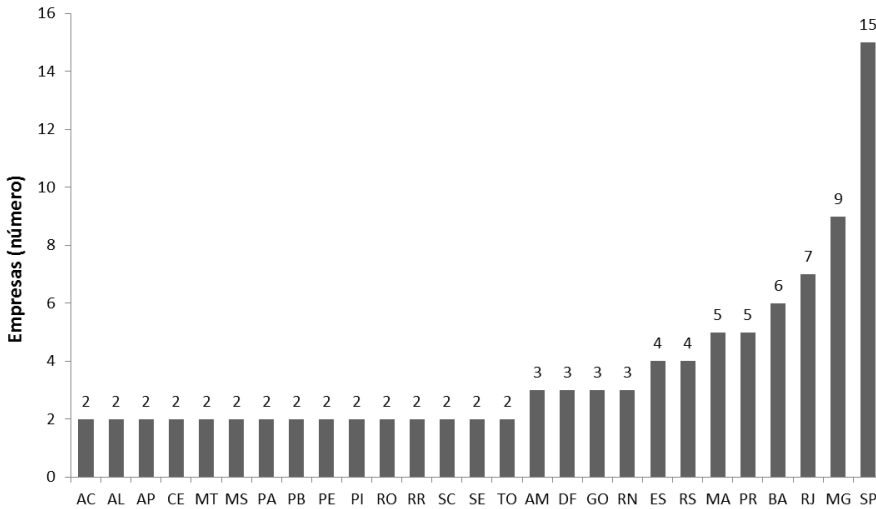


Gráfico 8

Atuação em outros Estados da Federação das empresas do estado de São Paulo que atuam com técnicas de remediação e/ou de biorremediação.

Os orçamentos para a descontaminação de um posto de gasolina utilizando o sistema de extração multifásica (MPE) e a biorremediação *in situ* possibilitaram verificar os detalhes que envolvem as diferentes etapas do processo. Foi confirmado o menor custo para a aplicação da técnica de biorremediação em relação ao sistema de extração multifásica (TAB. 2).

Muito embora o tempo gasto para o tratamento seja um limitador para sua aplicação, são imbatíveis os benefícios da biorremediação nos itens que envolvem os custos e o impacto ao meio ambiente. A biorremediação possui o potencial de devolver ao meio ambiente, caso seja obtida total mineralização do poluente, apenas substâncias inofensivas (água, gás carbônico e sais inorgânicos). Já os tratamentos convencionais podem resultar na descontaminação da área, porem deixando vestígios de outras substâncias não menos nocivas. Considerando a relação entre o número de empresas instaladas no mercado e o número de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, revela-se que existe um campo promissor para criação de novas empresas de biorremediação, bem como para a pesquisa visando o melhor desenvolvimento dessa tecnologia.

Descrição do serviço	Quantidade	Unidade	MPE (R\$)	Biorremediação <i>in situ</i> (R\$)
Sondagens				
Perfuração em 4", até 50m	120	m	23.484,00	21.840,12
Instalação de Poços				
Em tubo geomecânico 2"	120	m	27.898,80	25.945,88
Coleta de Amostras				
Coleta de amostras simples (<i>baller</i>)	96	unidade	10.302,72	9.581,53
Análises Químicas de Água				
BTEX	96	unidade	7.632,00	7.097,76
PAH	96	unidade	10.080,00	9.374,40
Etanol	48	unidade	4.680,00	4.352,40
TPH	48	unidade	5.760,00	5.356,80
Análises Químicas de Solo				
BTEX	8	unidade	780,00	725,40
PAH	8	unidade	780,00	725,40
Levantamento Topográfico				
Com teodolito ou estação total	1	unidade	2.500,00	0,00
Sistema de Remediação por MPE				
Fornecimento, instalação e operação	350	dia	130.539,50	30.000,00
Equipamentos e Acessórios				
Sistema de separação água-óleo	350	dia	815,50	0,00
Sistema de carvão ativado	350	dia	1.554,00	0,00

Tabela 2

Comparação entre os custos de um serviço de descontaminação de um posto de gasolina empregando-se o sistema de extração multifásica (MPE) e a biorremediação *in situ*

BTEX: hidrocarbonetos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos.

PAH: Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

TPH: Hidrocarbonetos totais

CONCLUSÃO

Foi possível identificar 32 empresas com atuação no mercado da biorremediação no Estado de São Paulo, bem como constatar que 15 delas estão aplicando as mais variadas técnicas disponíveis na literatura, com ênfase para atenuação natural, e a biorremediação otimizada com oxigenação e/ou adição de nutrientes.

Os BTEX e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos estão entre os contaminantes mais tratados pela técnica da biorremediação. Fatores como o tempo de operação do sistema e a dificuldade de adquirir equipamentos e insumos se mostram como limitadores da técnica.

O estudo comparativo do custo para um sistema de remediação de um posto de gasolina por meio da extração multifásica (MPE) e da biorremediação *in situ*, com adição de nutrientes, evidenciou a grande vantagem da biorremediação em relação ao custo operacional, uma vez que seu custo total ficou 53% abaixo do modelo proposto para remediação.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S.; Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*, v. 35, n. 3, p. 1743. 2010.
- ANDREONE, V.; GIANFREDA, L. Bioremediation and monitoring of aromatic-polluted habitats. *Applied Microbiology Biotechnology*, v. 76, p. 287-308, 2007.
- ALEXANDER, M. *Biodegradation and bioremediation*. 2.ed. New York: Academic Press, 1999. 453p.
- ATLAS, R.M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. *Microbiol. Rev.*, v. 45, p 180-209, 1981.
- ATLAS, R. M.; BARTHA, R. *Ecologia microbiana y microbiologia ambiental*. 4 ed. Pearson Educacion, 2005. 667p.
- BARBIERI, J. C. *Gestão Ambiental Empresarial, Conceitos, Modelos e Instrumentos*. Saraiva, 2007. 21 p.
- BENTO, F.M.; CAMARGO, F.A.O.; OKEKE, B. Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Brazilian Journal of Microbiology*, v.34, n.1, p. 65-68. 2003.
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Áreas Contaminadas*, Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 10 out. 2015.
- CRAPEZ, M. A. C.; BORGES, A. L. N.; BISPO, M. G. S.; PEREIRA, D. C. *Ciência Hoje*, v. 30, n. 179, p. 32-37, 2002.
- DURMUSOGLU, E.; TASPINAR, F.; KARADEMIR, A. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1-3, p. 870-877, 2010.
- FERREIRA, L. C. Os fantasmas do Vale: conflitos em torno do desastre ambiental de Cubatão, SP. *Revista de Ciências Sociais*. n 25, p. 165-188, 2006.
- MACHADO, A. A. O local e o global na estrutura da Política Ambiental Internacional: a construção social do acidente químico ampliado de Bhopal e da convenção da OIT. *Contexto Internacional*, v. 28, n. 1, p. 8-51, 2006.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- MATHEUS, D. R.; MACHADO, K. M. G.; Biorremediação: potencial de aplicação para POPs. In: Fernicola, N. A. G; Oliveira, S. S. (Orgs.). Poluentes orgânicos Persistentes: POPs. CRA (Intertox): *Cadernos de referência ambiental*, v. 13. Salvador: CRA, 2002. 500p.
- PANAGOS, P.; Van LIEDEKERKE, M.; YIGINI, Y.; MONTANARELLA, L. Contaminated sites in Europe: review of the current situation base don data collected through a european network. *Jornal of*

Environmental and Public Health. Article ID 158764, 11 p. <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/158764>>. 2013.

SEABRA, P. N. Uso da biorremediação em áreas impactadas pela indústria do petróleo. In: Melo, I. S.; Azevedo, J. L. *Microbiologia Ambiental*. 2.ed. Embrapa Meio Ambiente, 2008. 647p.

SINHA, S; CHATTOPADHYAY, P.; PAN, L.; CHATTERJEE, S. CHANDA, P.; BANDYOPADHYAY, D.; DAS, K.; SEM, S.K. Microbial transformation of xenobiotics for environmental bioremediation. *African Journal of Biotechnology*, v. 8, n. 22, p. 6016-6027. 2009.

THAPA, B.; KUMAR, K. C.; GHIMIRE, A. A review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*. v. 8, n. 1, 164-170, 2012.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P. Contaminação de águas por BTXS e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. *Química Nova*, v. 27, n 3, 441-446, 2004.

ABSTRACT

The waste of industrial activity directly affects the natural ecosystems, polluting water resources and degrading the land with toxic substances. In this context, bioremediation is being evaluated as a new strategy to reduce or eliminate inorganic and organic compounds, harmful to the environment and to human health. In Brazil, the bioremediation has not been applied, although there is real potential for applying this technology to the decontamination of areas with different toxic compounds and recalcitrant, such as organic chlorinated and petroleum derivatives. This study presents the current situation of the use of bioremediation for companies in the State of São Paulo, with special attention to its application in the recovery of areas contaminated with petroleum and its derivatives. The companies that operate with bioremediation in the State of São Paulo were identified through the internet. Structured interviews with representatives of the companies were applied for the collection of information in order to identify the strategies of bioremediation that are being applied, major contaminants, and the factors limiting the implementation of bioremediation in the state. It was done a comparison of the cost of the remediation of soil from a gasoline station contaminated with petroleum derivatives employing a conventional strategy (extraction multi-phasic), and the bioremediation optimized in situ. Thirty two companies were identified as working in the market of bioremediation in the State of São Paulo, and 15 of them contributed with the information requested. It was possible to see that the companies are applying different techniques of bioremediation, with emphasis to the mitigation of natural and bioremediation optimized with oxygenation and the addition of nutrients. The BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylene) and polycyclic aromatic hydrocarbons are among the contaminants that are further treated by the processes of bioremediation in the state. The time of operation of the system and the difficulty of purchasing equipment and inputs were identified as the main limiting factors for the use of bioremediation in the state of São Paulo. Regarding to the operational cost, the comparative study evidenced the great advantage of bioremediation, with a cost 53% less than the extraction multiphase.

KEYWORDS

environmental remediation, pollution, technologies of bioremediation.