



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Marques, Marcia; Chafim Aguiar, Christiane Rosas; Soares da Silva, Jonatas José Luiz
Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos
contaminados

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, núm. 1, enero-febrero, 2011, pp. 1-11

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180219142001>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

REVISÃO DE LITERATURA

DESAFIOS TÉCNICOS E BARREIRAS SOCIAIS, ECONÔMICAS E REGULATÓRIAS NA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS⁽¹⁾

**Marcia Marques⁽²⁾, Christiane Rosas Chafim Aguiar⁽³⁾ & Jonatas
José Luiz Soares da Silva⁽⁴⁾**

RESUMO

A fitorremediação – uso de plantas e comunidades microbianas associadas à rizosfera para degradar, isolar ou imobilizar contaminantes do solo e água – é uma técnica de custo relativamente baixo, vantagens estéticas e que não gera impactos adicionais. A maioria dos estudos com plantas na recuperação de áreas contaminadas tem sido desenvolvida em países de clima temperado, onde o potencial da fitorremediação é limitado por fatores climáticos. No Brasil, o conhecimento acerca do potencial fitorremediador das várias espécies de plantas e comunidades microbianas em solos tropicais é ainda muito escasso, o que, associado à falta de instrumentos de aferição e de apoio à decisão, dificulta a recomendação por parte das agências ambientais e empresas. A presente revisão descreve brevemente os mecanismos de fitorremediação e discute aspectos sociais, econômicos e reguladores que representam entraves ao amplo desenvolvimento da técnica, em comparação com técnicas convencionais, mais conhecidas e aceitas pelas agências e empresas. Finalmente, o mercado brasileiro presente e futuro é discutido, sendo sugerida a criação de protocolos experimentais e instrumentos de apoio à decisão que estimulem a aplicação da fitorremediação nos casos em que ela se apresente como a opção mais adequada.

Termos de indexação: árvore de decisão, bioaumento, biorremediação, contaminantes orgânicos, metais tóxicos.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em fevereiro de 2010 e aprovado em outubro de 2010.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – DESMA, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Rua São Francisco Xavier 524, sl 5024 E, Maracanã, CEP 20550-900 Rio de Janeiro (RJ). E-mail: marciam@uerj.br

⁽³⁾ Doutoranda em Meio Ambiente - PPGMA, UERJ. E-mail: cchafim@yahoo.com.br

⁽⁴⁾ Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, DESMA-FEN-UERJ. E-mail: posseidonetuno@hotmail.com

SUMMARY: TECHNICAL CHALLENGES AND SOCIAL, ECONOMIC AND REGULATORY BARRIERS TO PHYTOREMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS

Phytoremediation – the use of plants and its associated microbial communities in the rhizosphere to degrade, isolate and immobilize contaminants in soil and water – is a relatively cheap technique with aesthetic advantages free of additional impacts. However, most studies with plants to recover contaminated sites have been carried out in countries with temperate climate, where the potential of phytoremediation is limited by climate factors. In Brazil, knowledge regarding the phytoremediation potential of different species for tropical soils is still undeveloped. Associated to the lack of assessment and decision-making tools, the environmental agencies face great difficulties in recommending phytoremediation strategies. This review briefly describes phytoremediation mechanisms and discusses social, economic and regulatory aspects which represent limitations to the full development of this technique, in comparison to conventional techniques that are better known and accepted by environmental agencies and companies. Finally, the current and future Brazilian market for phytoremediation is discussed with suggestions regarding experimental protocols and tools to support decision-making, with a view to promote the application of phytoremediation whenever it appears to be the most appropriate option.

Index terms: decision tree, bioaugmentation, bioremediation, organic contaminants, toxic metals.

INTRODUÇÃO

Um dos graves problemas resultantes da industrialização é a contaminação de solos e corpos hídricos com elementos e compostos químicos perigosos. Essa contaminação pode ocorrer por disposição e derrame proposital ou acidental de resíduos provenientes de atividades agrícolas, industriais, domésticas ou por deposição atmosférica, que modificam as características naturais do solo, produzindo impactos e limitando seus usos. Em 2004, o custo estimado para remediação de todos os sítios contaminados existentes nos EUA era de 1,7 trilhão de dólares, ou seja, 7.000 USD por pessoa (Kuiper et al., 2004). O mercado anual de fitorremediação nos EUA é da ordem de 10^7 dólares americanos, em comparação aos 10^9 dólares americanos para outras biotécnicas (ex.: produtos farmacêuticos), ou aos 10^{12} dólares americanos para o sucesso da eletrônica em estado sólido (telefones móveis e microprocessadores) (Marmiroli & McCutcheon, 2003). Em maio de 2002 a Companhia de Técnica de Saneamento Ambiental (CETESB) divulgou a lista de 255 áreas contaminadas no Estado de São Paulo que, após várias atualizações (CETESB, 2010), havia crescido em 2009 para mais de 2.904 áreas com contaminações confirmadas, das quais 78 % eram resultantes de vazamentos em postos de abastecimento de combustível.

Segundo Huang et al. (2005), técnicas de remediação podem promover a descontaminação, ainda que parcial, de uma área (técnicas de tratamento) ou isolar o material contaminado de forma a evitar a dispersão dos poluentes (técnicas de confinamento). Enquanto técnicas *in situ* tratam o

solo e, ou, a água subterrânea sem remoção destes, técnicas *ex situ* necessitam da remoção para que o tratamento ocorra. A abordagem *in situ* apresenta a vantagem de eliminar custos de remoção e reduzir riscos de impactos ambientais (Nascimento & Xing, 2006). A principal desvantagem dos processos *in situ* decorre da manipulação limitada do meio contaminado, ao passo que a abordagem *ex situ* permite maior controle dos processos, aumentando a eficácia (USEPA, 2001). As técnicas de remediação podem ainda ser classificadas como primordialmente físicas, químicas ou biológicas. A escolha final da técnica ou conjunto de técnicas de remediação para uma área depende da razão custo-benefício e, portanto: (a) do uso previsto para a área após a remediação; (b) da natureza da contaminação (tipo de contaminante); e (c) de características relacionadas aos riscos, como proximidade de grupos populacionais e de mananciais, migração potencial dos vapores, hidrogeologia, uso de água subterrânea e localização de poços (USEPA, 2001).

Uma das primeiras abordagens utilizadas em grande escala para conter a contaminação de aquíferos foi o sistema de bombeamento e tratamento *ex situ* (*pump and treat*), também conhecido como “ contenção hidráulica e tratamento”. Com o tempo, ficou evidente que o *pump and treat* não era suficiente para a reabilitação dos sítios de forma rápida e a custos aceitáveis (Nobre & Nobre, 2003). Verificou-se que a eficiência poderia ser incrementada utilizando-se o ar como meio de extração no lugar da água, o que levou ao desenvolvimento de técnicas de extração do gás de solo (*soil vapor extraction - SVE*) e aeração de solo *in situ* (*air sparging*). Além da redução dos custos

operacionais, observou-se que esse procedimento propiciava remediação mais rápida, com níveis de concentração final mais adequados aos critérios legais (Nobre & Nobre, 2003). Os resultados satisfatórios mobilizaram a indústria de remediação, sobretudo em países de clima temperado, a investir em novas técnicas menos impactantes, de custo mais baixo e que promovessem a aceleração da degradação dos contaminantes. Aos poucos, técnicas *ex situ* foram sendo substituídas ou complementadas por técnicas *in situ*, como a destruição de massa *in situ* e as barreiras reativas permeáveis (BRPs), incluindo os sistemas *funnel-and-gate* utilizados com frequência nos países industrializados (Nobre & Nobre, 2003). A atenuação natural (monitoramento *in situ* dos processos naturais), principalmente pelo seu baixo custo e baixa intervenção, ganhou grande aceitação, particularmente para compostos biodegradáveis.

A biorremediação é a aplicação de processos biológicos *in situ* ou *ex situ* para remover compostos químicos perigosos do meio ambiente (Gianfreda & Rao, 2004). Segundo uma definição mais atual, biorremediação é a utilização de organismos vivos ou seus derivativos (ex.: enzimas) para degradar compostos poluentes (van Dillewijn et al., 2009). As variantes técnicas incluem biorremediação *in situ*, biopilhas estáticas, reatores (*ex situ*) e várias inovações biotecnológicas (van Dillewijn et al., 2009). A outra técnica *in situ* que faz uso de organismos vivos é a fitorremediação, que utiliza plantas e comunidades microbianas associadas à rizosfera para degradar, isolar ou imobilizar poluentes no solo e nas águas subterrâneas – técnica atraente pelo baixo custo, natureza não destrutiva e estética agradável (Marques, 2005).

A fitorremediação tem por base a fisiologia vegetal, a bioquímica do solo e a química dos contaminantes, promovendo a reabilitação da estrutura e da ecologia do solo (Merkl et al., 2006), aumentando a quantidade de C orgânico, a porosidade e a infiltração da água no solo e reduzindo a erosão. As plantas também mantêm a estrutura do solo, garantindo trocas gasosas e o desenvolvimento dos microrganismos, inclusive os biorremediadores. O Brasil apresenta grande potencial de uso tanto para biorremediação quanto para fitorremediação na recuperação de áreas contaminadas, devido à grande biodiversidade e ao clima, que favorecem os processos biológicos no tratamento da poluição. Paradoxalmente, a experiência acumulada até o presente origina-se principalmente de países de clima temperado. Essa situação dificulta o amplo entendimento acerca da eficácia e do potencial de aplicação dessas técnicas por parte das empresas de remediação e de agências ambientais no Brasil.

Esta revisão objetivou discutir com base em uma revisão bibliográfica: (a) aspectos de eficácia e limitações técnicas dos processos de fitorremediação,

comparando-as àquelas esperadas das técnicas convencionais; (b) as barreiras econômicas e sociais existentes no Brasil e no mundo que impedem a expansão da fitorremediação; e (c) a importância da regulamentação e uso de instrumentos de apoio à decisão na escolha da melhor técnica ou conjunto de técnicas para cada área contaminada, de acordo com as especificidades e o desenvolvimento de protocolos.

POTENCIAL DE APLICAÇÃO E LIMITAÇÕES DE NATUREZA TÉCNICA

A fitorremediação tem sido aplicada na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, como: metais tóxicos (Hall, 2002; Wong, 2003; Morikawa & Erkin, 2003; Kautsky & Greger, 2003), solventes clorados (Kulakow & Pidlisnyuk, 2010), (Santos & Rodella, 2007; Kadian et al., 2008; Carmo et al., 2008); hidrocarbonetos de petróleo (Siciliano et al., 2003; Kaimi, 2006; Aguiar et al., 2007) bifenilas policloradas (van Aken et al., 2010); TNT (Rylott & Bruce, 2009) e radionucléidos (Cerne et al., 2010). No Brasil, as pesquisas sobre fitorremediação têm focalizado principalmente em solos contaminados por metais (Melo et al., 2006; Almeida et al., 2007; Romeiro et al., 2007; Alves et al., 2008; Wolff et al., 2009) e por herbicidas (Pires et al., 2003, 2005; Santos et al., 2004; Procópio et al., 2005, 2007, 2008; Belo et al., 2007; Carmo et al., 2008). Tendo em vista que nem todas as espécies vegetais desenvolvem-se em ambientes contaminados, o primeiro passo é a identificação das espécies que, além de apropriadas às condições locais, sejam tolerantes ao contaminante. Essa varredura (*screening*) pode ser feita por meio da avaliação da taxa de germinação e da produção de biomassa na presença de concentrações crescentes do contaminante no solo, e, para isso, protocolos experimentais têm sido propostos (Marques et al., 2006, 2010; Rosa, 2006). A tolerância da planta à presença do contaminante é resultante de diversos mecanismos complexos, nem todos completamente elucidados. Estudos mencionam micorrizas como uma das estratégias extracelulares para reduzir a toxicidade de metais em plantas e, mais recentemente, para remoção de compostos orgânicos (Joner & Levval, 2009). Rotas metabólicas e enzimas envolvidas na homeostase de metais em plantas foram identificadas, sendo a enzima fitoquelatina sintetase uma das descobertas mais proeminentes (Kraemer, 2003). Proteínas de choque térmico (HSPs) são conhecidas por se expressarem em resposta a uma variedade de condições de estresse, incluindo presença de metais tóxicos. Em discussões acerca dos mecanismos de tolerância envolvendo uma membrana plasmática mais resistente ou mecanismos de reparo, as HSPs teriam importante função (Coutinho & Barbosa, 2007).

O passo seguinte é avaliar a capacidade da planta tolerante em promover a descontaminação do solo (Marques, 2005). A eficiência do processo é medida pela redução do contaminante no solo a concentrações abaixo dos valores de referência e tempo requerido (Hernández-Vaencia & Mager, 2003). Diversas espécies têm sido identificadas como promissoras para fitorremediação (Merkl et al., 2004, 2006; Hynes et al., 2004; Huang et al., 2005; Parrish et al., 2006; White Jr. et al., 2006; Aguiar et al., 2007). As plantas atuam direta ou indiretamente na remediação ambiental por meio de diferentes mecanismos básicos (McCutcheon & Schonoor, 2003), que conferem capacidade de: (a) “sequestro” e acúmulo de contaminantes inorgânicos tóxicos (ex.: metais) nos tecidos vegetais, particularmente em vacúolos, seguido de colheita e disposição final ou extração dos metais (o termo “biomineração” é usado quando níveis comerciais de fitoacumulação são alcançados); (b) absorção e, às vezes, precipitação de contaminantes encontrados em águas poluídas (rizofiltração); (c) redução da biodisponibilidade por meio da estabilização (fitoestabilização); (d) degradação de contaminantes orgânicos, com transformação dependente das enzimas nos tecidos vegetais ou na superfície das raízes (fitodegradação); (e) volatilização de contaminantes extraídos do solo e do lençol freático (fitovolatilização); e (f) estabelecimento de condições favoráveis à atividade microbiana da rizosfera no solo, promovendo a biodegradação dos contaminantes pelos microrganismos (rizodegradação).

Exsudatos liberados pelas plantas através das raízes, incluindo íons (ex.: H^+), ácidos inorgânicos, oxigênio, água, compostos de carbono de baixo peso molecular (aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares, compostos fenólicos e metabólitos secundários) e de alto peso molecular (mucilagem, proteínas), medeiam interações, como associações simbióticas com micorriza, rizóbio e rizobactérias promotores do crescimento vegetal (*plant growth promoting rhizosphere-PGPR*) (Bais et al., 2006; Badri & Vivanco, 2009). Recentemente, rizobactérias que colonizam as raízes e promovem o crescimento vegetal por meio do aumento da absorção de nutrientes pela planta e da maior resistência a doenças têm sido associadas à biorremediação de solos (Huang et al., 2005; Zhuang et al., 2007). Espécies como *Azospirillum lipoferum* e *Azospirillum brasiliense* (Muratova et al., 2005), *Enterobacter cloacae* (Huang et al., 2005) e diferentes espécies de *Pseudomonas* (Narasimhan et al., 2003; Gentry et al., 2004; Braud et al., 2009) têm sido investigadas quanto à capacidade biorremediadora.

A despeito das diversas vantagens, a fitorremediação como opção para restaurar áreas contaminadas é limitada por alguns fatores de natureza técnica ainda não resolvidos, como (van Aken et al., 2010): (a) a ação tóxica dos contaminantes sobre várias espécies de plantas, quando em concentrações altas; (b) o processo de descontaminação relativamente lento e incompleto: como um corolário do metabolismo

autotrófico, plantas geralmente não possuem as rotas bioquímicas necessárias para alcançar total mineralização de poluentes recalcitrantes, como HPAs e PCBs; (c) a dependência do tipo de solo, das condições edafoclimáticas e do ciclo de vida da espécie vegetal, que pode ser longo; (e) a biomassa que acumula metabólitos tóxicos deve receber tratamento/disposição final adequado, ou haverá riscos de liberação para o solo, a cadeia alimentar ou volatilização para a atmosfera; (f) o uso de plantas transgênicas na fitorremediação introduz um risco adicional de transferência horizontal de genes para espécies próximas selvagens ou cultivadas; e (g) a ação geralmente limitada à profundidade da zona das raízes (Glass, 2000).

Fases “pré-colheita” e “pós-colheita” da fitorremediação

A expansão da fitorremediação depende em grande parte, portanto, de pesquisas e desenvolvimento tecnológico, que devem aprimorar tanto a fase pré-colheita (etapas que antecedem a remoção da biomassa vegetal da área remediada) quanto a fase pós-colheita (destino dado à biomassa depois de sua retirada da área). A figura 1 mostra estratégias de pesquisa e desenvolvimento da fitorremediação nas fases que antecedem a colheita da biomassa gerada na área contaminada; são elas: (a) selecionar e testar diferentes espécies para diferentes contaminantes; (b) otimizar o uso de fertilizantes (bioestimulação), irrigação e controle de pragas; (c) otimizar os processos da rizosfera, por meio da inoculação de sementes ou sistemas radiculares com bactérias ou fungos biorremediadores (bioaumento); (d) ampliar o conhecimento sobre processos de sucessão do ecossistema e das comunidades vegetais que favoreçam a fitorremediação; (e) fazer uso do metabolismo vegetal e da engenharia genética; (f) utilizar balanço de massas; e (g) desvendar a rota e a transformação dos contaminantes no corpo vegetal, o que auxilia no estabelecimento das estratégias pós-colheita, a fim de que os riscos associados aos metabólitos gerados permaneçam em níveis aceitáveis, visto que a gestão dos resíduos continua a ser um fator limitante ao desenvolvimento da fitorremediação (Ghosh & Singh, 2005; Ginneken et al., 2007). Testes prévios de toxidez e bioacumulação acompanhados de monitoramento (Mariano et al., 2007) devem ser realizados até que o percurso seja totalmente mapeado e as relações dose-resposta definidas para cada subproduto de importância, para uma ampla gama de condições ambientais.

As opções pós-colheita – também ilustradas na figura 1, por ordem de preferência – para dar destino seguro à biomassa gerada a partir de solos contaminados são: (a) disposição dos resíduos vegetais contaminados em aterros sanitários; (b) compostagem, para degradar resíduos xenobióticos e reduzir o volume final a ser disposto; (c) incineração da biomassa, para destruir compostos orgânicos e reduzir o volume a ser

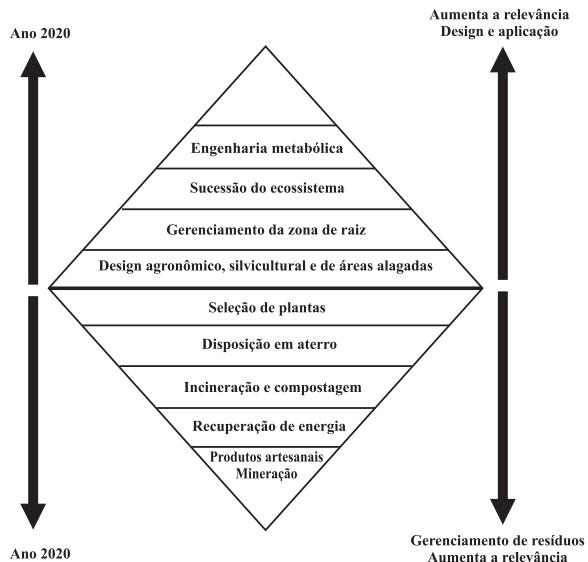


Figura 1. Evolução da fitorremediação: estratégias em busca de melhoria nas fases pré-colheita (setas para o alto) e pós-colheita (setas para baixo) (adaptado de McCutcheon & Schnoor, 2003).

disposto (no caso de metais que não são liberados para a atmosfera em quantidades significativas); (d) uso energético, no caso de plantas lenhosas de crescimento rápido; (e) produção de fibra, papel, produtos de madeira, madeira, matérias-primas industriais (por exemplo, resinas), matérias-primas para fabricar diversos produtos; e (f) fundição, para recuperação econômica de metais, quando economicamente viável.

Fatores de risco e seleção da opção técnica mais adequada

Em condições ideais, todas as decisões acerca da remediação e do uso posterior de áreas remediadas deveriam ser precedidas por uma análise de riscos. Entretanto, isso nem sempre ocorre, devido ao alto custo. A maioria dos países, inclusive o Brasil, prescreve valores orientadores da qualidade do ar, solo e água com base em normas genéricas de riscos determinados, usando exposições típicas de um indivíduo com 70 kg, além de estabelecer doses diárias aceitáveis no consumo de água e de alimentos. Estudos toxicológicos simples, do tipo dose-resposta, são geralmente usados como base rudimentar para avaliação de riscos. Dependendo da extensão e da qualidade dos dados disponíveis para avaliação de risco e do potencial de toxidez, fatores de segurança de 10 a 10^6 são aplicados (USEPA, 1989). Quando esses valores orientadores são desfavoráveis aos tratamentos com base em sistemas vivos, uma opção é solicitar uma avaliação de risco da área específica para selecionar, de acordo com o nível de contaminação, a abordagem adequada. Quando as concentrações máximas admissíveis de contaminantes em áreas remediadas são definidas com base nos padrões do *Best*

Demonstrated Available Technologies (BDAT) (Kaltsikes, 2000), a fitorremediação fica em desvantagem em relação às técnicas convencionais, pois, em comparação com estas, não alcança remoção próxima de 100 % em curto espaço de tempo. Entretanto, a adoção de uma estratégia mais realista com base em avaliação de riscos humanos e ecológicos e uso futuro da terra favorece a utilização da fitorremediação e de outros biotratamentos, particularmente quando a alternativa é nada fazer por inviabilidade econômica das demais técnicas. A avaliação de riscos da União Europeia (CEC, 2000) baseia-se em: (a) identificação dos agentes que podem provocar efeitos adversos e, portanto, apresentar riscos; (b) determinação quantitativa da severidade dos possíveis efeitos adversos; (c) estimativa da probabilidade da exposição ao contaminante do ambiente e da população; (d) caracterização das incertezas inerentes à abordagem de precaução e ao fato de se optar por um cenário mais conservador; e (e) comunicação sobre os riscos aos intervenientes. Nos países da União Europeia, a fitorremediação é, em muitos casos, escolhida com base na aplicação do princípio da precaução. Esse princípio altera a fitorremediação de forma positiva, já que esta é uma das poucas opções que não provoca dano adicional e restaura ecologicamente a área.

Árvores de decisão como instrumento de apoio

As árvores de decisão são ferramentas úteis de apoio na escolha da técnica adequada para um sítio contaminado específico (Figura 2).

Para certos contaminantes, o nível de contaminação residual aceito pode ser “tão baixo quanto possível”, segundo o princípio da precaução, quando não existem dados científicos sobre os efeitos adversos para a saúde humana e para o ambiente (Commission of the European Communities, 2000).

Informações importantes para decidir sobre o uso ou não da fitorremediação são: (a) a caracterização da área, que determina se o contaminante está restrito à profundidade alcançada pelo sistema radicular – em geral, essa área é definida como 0,5 m abaixo da superfície; (b) a estimativa do tempo requerido para fitorremediação com base nas características da área e da espécie vegetal escolhida; (c) averiguação da existência de *hot spots* com altas concentrações do contaminante – em caso positivo, se é viável a remoção com técnicas convencionais seguidas de fitorremediação para remover a contaminação restante; (d) o destino do contaminante e seus metabólitos no corpo da planta e na atmosfera e se estes representam um risco para a saúde humana e para o ambiente (ex.: fitotranspiração de metais como mercúrio ou orgânicos voláteis; entrada na cadeia alimentar, etc.). O fator de acumulação na raiz (RCF) descreve o potencial de um determinado xenobiótico acumular-se na raiz da planta e não diferenciar acúmulo na superfície de transporte para dentro do

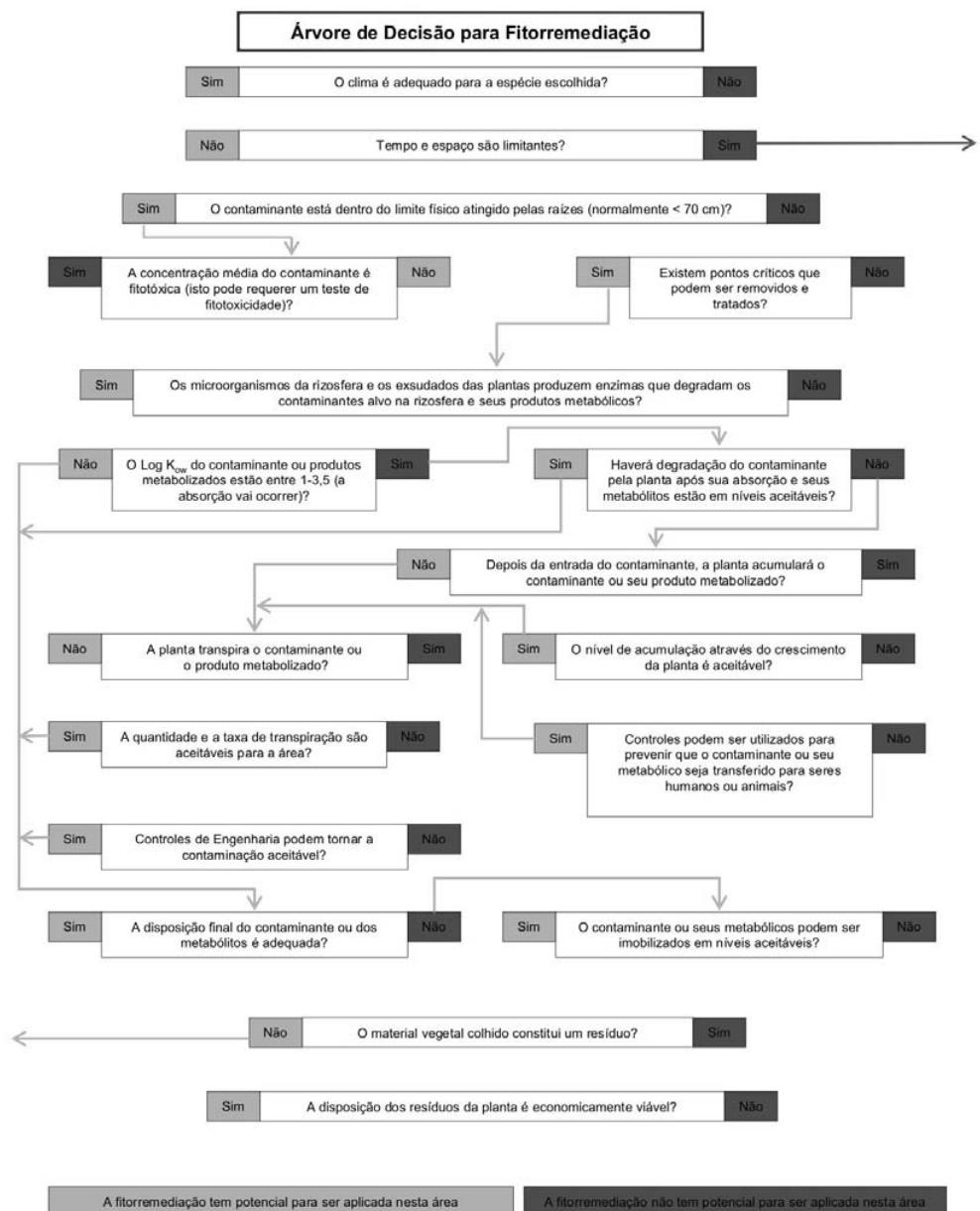


Figura 2. Fluxograma de árvore de decisão para verificação da fitorremediação de solos contaminados como opção técnica a ser escolhida (adaptado de USEPA, 2001).

tecido radicular (Willey, 2007). O RCF, por sua vez, depende do coeficiente de partição octanol-água ($\log K_{ow}$). Conhecer o $\log K_{ow}$ do contaminante é, portanto, essencial na escolha da técnica de remediação (Figura 2). Compostos com $\log K_{ow} < 1,0$ penetram na epiderme radicular de forma esparsa. Compostos com $\log K_{ow} > 3,0$ altamente hidrofóbicos ficam retidos pelo lipídeo da epiderme radicular e pela mucilagem que circunda as raízes, sendo, neste caso, a passagem para dentro das raízes mínima e não detectável. Compostos de solubilidade intermediária (ácidos

fracos, substâncias anfifílicas) são mais facilmente transportados. Compostos com $\log K_{ow} = 2$ são transportados através da transpiração pelo xilema, e aqueles com $\log K_{ow} = 1$ são transportados tanto através do xilema quanto do floema, embora o mais provável seja que apenas metabólitos entrem no floema. Compostos com $1,0 < \log K_{ow} < 3,0$ podem ser metabolizados nos tecidos da folha e caule e liberados para a atmosfera através das folhas, e um resíduo irreversivelmente ligado ao tecido vegetal pode ser formado (Willey, 2007).

LIMITAÇÕES DE NATUREZA SOCIOECONÔMICA

As barreiras de natureza socioeconômicas são: (a) falta de informação no meio técnico e na sociedade em geral; (b) ausência de instrumentos reguladores que promovam a fitorremediação; (c) competição com métodos mais conhecidos, dominados e aceitos por empresas de consultoria; e (d) investimentos limitados para o desenvolvimento de tratamentos inovadores. Além disso, a fitorremediação tem baixo apelo comercial, por limitar o direito de propriedade, enquanto técnicas com base em processos físicos e químicos são mais facilmente patenteáveis.

No tocante à aceitação pública, a fitorremediação pode ser favorecida pelo fato de que técnicas verdes são em geral mais atraentes do que soluções técnicas, que envolvem poluição visual, equipamentos pesados na área e incluem escavações, ruído, entre outros. Não obstante, essa aceitação também depende da percepção acerca dos riscos para saúde humana e o ambiente produzidos pela técnica, da disseminação de informação confiável e do nível educacional da comunidade. Uma iniciativa da USEPA no final dos anos 90 de âmbito educacional foi a publicação do Guia para Cidadãos (*Citizens' Guide*), descrevendo em linguagem acessível os tratamentos inovadores na época, as vantagens e os problemas deles advindos (USEPA, 1998). O nível de aceitação pública das biotécnicas ambientais é, via de regra, bom, em contraste com o consenso desfavorável sobre técnicas de transgenia na produção de alimentos. Além disso, a implementação de políticas de restrições está fazendo com que os geradores de resíduos e responsáveis pelos passivos ambientais paguem pelo dano ambiental. Em resposta, há um interesse crescente por técnicas de baixo custo (Glass, 1999; ITRC, 1999).

De acordo com o Conselho Interestadual de Técnica e Regulamentação dos Estados Unidos (USEPA, 2005), as principais preocupações dos americanos (organizações públicas, não governamentais e agências reguladoras) no tocante à fitorremediação são basicamente a falta de informação sobre: (a) o destino dos contaminantes no ciclo metabólico das plantas; (b) o grau de toxidez e biodisponibilidade de produtos formados da transformação dos contaminantes, sua mobilidade no ambiente e na cadeia alimentar; e (c) a liberação dos contaminantes por excretas de animais e madeira. Adicionam-se a eles: (d) a incerteza sobre a destinação do material vegetal colhido da área remediada; (e) a real profundidade da zona de tratamento alcançada pelas plantas; (f) a dependência das estações do ano e do clima.

LIMITAÇÕES DE NATUREZA REGULATÓRIA

No que se refere às agências reguladoras, somente após ter-se assegurado a saúde pública e a integridade dos ecossistemas em risco, a razão custo-benefício é

considerada. Por exemplo, a United States Environmental Protection Agency (USEPA) requer, em ordem de prioridade, que os seguintes critérios sejam considerados para escolha técnica (Flechas, 2002): (1) proteção total à saúde humana e ao meio ambiente; (2) cumprimento das exigências aplicáveis; (3) eficácia e durabilidade do tratamento a longo prazo; (4) redução da toxidez, mobilidade ou volume do contaminante; (5) eficácia do tratamento a curto prazo; (6) potencial de implementação; (7) custos; (8) aceitação por parte do Estado; e (9) aceitação por parte da comunidade.

Os sistemas reguladores mais avançados incorporam a participação da comunidade no processo de tomada de decisão, assim como nas decisões de uso posterior da área remediada. As barreiras e os preconceitos acerca das leis e regulamentos ambientais também favorecem as técnicas tradicionais em relação às inovações, como a fitorremediação por parte das agências reguladoras. Os reguladores, avaliadores de risco e engenheiros de projeto naturalmente desenvolvem mais confiança em práticas já conhecidas. Somente quando os envolvidos com as novas técnicas trabalham em parceria com os reguladores para expedir avaliações de tratamentos inovadores, o preconceito é superado. Em países onde a legislação para gestão de resíduos é prescritiva, legislativa ou judicial, a necessidade de reduzir custos pode ser um estímulo ao desenvolvimento de novas técnicas (Marmiroli & McCutcheon, 2003). Segundo esses autores, a remediação e o controle das áreas onde são implantadas técnicas inovadoras deveriam ser baseados em, pelo menos, três exigências pelas agências reguladoras: (a) avaliação de risco na área; (b) realização de remediação com base nos padrões de qualidade do ar, água e solo, que podem ou não ser baseados no risco à saúde humana e, ou, ecológico (ex.: valores orientadores); (c) demonstração das melhores técnicas disponíveis para a remediação (ex.: aplicação da BDAT).

ASPECTOS DE MERCADO PRESENTE E FUTURO

No mercado de controle e tratamento da poluição, a fitorremediação compete com técnicas conhecidas, as quais não sofrem as limitações dos tratamentos biológicos. As técnicas concorrentes não exigem investigações piloto de toxidez ou estudos de tratabilidade necessários na fitorremediação e em outros biotratamentos. Essas desvantagens deverão perdurar até que os investimentos na pesquisa de base e nos estudos piloto para estabelecer adequadamente os limites de aplicação e os custos associados sejam expandidos. Glass (2000) fornece um guia com uma extensa comparação dos custos da fitorremediação de solos contaminados com metais e outras técnicas concorrentes de remediação. Entretanto, mesmo no

cenário atual, em condições específicas a fitorremediação pode ser economicamente vantajosa. Fitotécnicas podem ser aplicadas de forma preventiva, por meio do *design* verde das instalações industriais, para evitar o acúmulo de contaminantes durante longos períodos, limitando assim o surgimento de futuras zonas industriais e urbanas contaminadas, os *brownfields* (USEPA, 2001). As empresas interessadas em oferecer a opção técnica da fitorremediação devem beneficiar-se de algumas estratégias, como: (a) focalizar mais em determinados nichos de mercado e só aplicar a fitorremediação em projetos com potencial para sucesso, como grandes áreas agrícolas contaminadas e, ou, áreas com níveis relativamente baixos de contaminação, os *brownfields*, resultantes de instalações industriais e comerciais abandonadas, contaminados por diversos produtos químicos com características de multicontaminação (USEPA, 2001); (b) buscar o aumento de parcerias com empresas de consultoria que reúnam profissionais não apenas de engenharia (geralmente mais familiarizados com as técnicas convencionais), mas também de microbiologia, fisiologia vegetal, agronomia e biotécnica; (c) diversificar as opções técnicas oferecidas com vistas à combinação da fitorremediação com outras técnicas, como biorremediação, tratamento químico, lavagem do solo, tratamento térmico, disposição em aterro, incineração e eletrocinética (USEPA, 2001), em uma abordagem multiprocesso.

No Brasil, algumas poucas empresas que exploram a fitorremediação comercialmente surgiram nos últimos anos, ao mesmo tempo em que várias instituições acadêmicas brasileiras também iniciaram pesquisas sobre o tema. Em 2004, por exemplo, a palavra-chave “fitorremediação” localizava 10 grupos de pesquisa no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq; já em abril de 2009, 38 grupos eram localizados a partir dessa palavra-chave. Nesse mesmo período, a palavra-chave “fitorremediação” aparecia associada a 225 doutores pesquisadores e a 259 “outros” (mestres, graduados, graduandos ou técnicos) integrantes da Plataforma Lattes do CNPq, ilustrando o interesse crescente sobre o tema e sugerindo que o conhecimento sobre o assunto deve se expandir consideravelmente nos próximos anos no País.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Com base nos conhecimentos atuais, a fitorremediação pode ser considerada uma técnica apropriada para remediar áreas medianamente contaminadas, tanto rurais quanto industriais urbanas (*brownfields*). No entanto, quando há urgência na obtenção de resultados, devido ao grande interesse econômico (ex.: especulação imobiliária), alto valor da área e, ou, altos riscos para a saúde humana e ambiental, a fitorremediação como solução isolada apresenta limitações.

2. Nas zonas com altas concentrações de contaminante (*hot spots*) da área contaminada, a fitorremediação pode ser precedida por tratamentos convencionais, como remoção e tratamento químico, entre outros.

3. Para que a fitorremediação seja amplamente aceita como um método confiável de recuperação de áreas contaminadas, informações de qualidade sobre aplicações, potencial, limitações, tempo requerido e custos devem ser amplamente disponibilizadas.

4. Para maior consistência da análise de risco que precede a intervenção, estudos para estabelecimento das rotas metabólicas de bioacumulação de contaminantes e seus metabólitos nos tecidos vegetais são necessários até que todas as rotas para os contaminantes mais importantes sejam conhecidas.

5. Do ponto de vista da iniciativa privada, o futuro de empresas pioneiras que empregam a técnica de fitorremediação não está totalmente claro. Esse futuro dependerá dos resultados das pesquisas desenvolvidas nas universidades e institutos com apoio governamental para os conhecimentos que exigem investimentos a médio e longo prazo, assim como apoio para a implementação em curto prazo. Uma melhor definição de questões relacionadas à propriedade intelectual – que ao mesmo tempo não impeça a pesquisa básica que sustenta a fitorremediação – poderá influenciar tal futuro positivamente.

6. Recentes avanços nas pesquisas com plantas modificadas geneticamente devem elevar o potencial de aplicação da fitorremediação. Entretanto, cabe lembrar que a reabilitação ambiental, embora tenha notoriedade no mercado, ainda apresenta retorno baixo dos investimentos, se comparada com outras biotécnicas.

7. Com o amadurecimento da fitorremediação, as empresas e organizações envolvidas devem estar prontas para o mercado reestruturado e as mudanças que se afiguram e que são inevitáveis na evolução das biotécnicas.

8. O Brasil, por ser um país de clima tropical com enorme biodiversidade, apresenta grande potencial para o uso da fitorremediação. Contudo, são necessários estudos detalhados nas condições brasileiras. O fato de o Brasil ocupar uma posição de destaque na área de pesquisas agronômicas confere uma vantagem estratégica para o desenvolvimento da fitorremediação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERJ e do CNPq, por meio de bolsas e de auxílio a projetos de pesquisa do Grupo BioProcess.

LITERATURA CITADA

- AGUIAR, C.R.C.; MARQUES, M. & BALIEIRO, F.C. Desempenho de soja e braquiária na fitorremediação de solos contaminados com petróleo In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., Belo Horizonte, 2007. Anais... Belo Horizonte, CBESA/ABES, 2007. 8p. CD-ROM.
- ALMEIDA, A.A.F.; VALLE, R.A.L.R.; MIELKE, M.S. & GOMES, F.P. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Braz. J. Plant Physiol.*, v.19, p.83-98, 2007.
- ALVES, J.C.; SOUZA, A.P.; PORTO, M.L.; ARRUDA, J.A.; TOMPSOM JUNIOR, U.A.; SILVA, G.B.; ARAUJO, R.C. & SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1329-1336, 2008.
- BADRI, D.V. & VIVANCO, J.M. Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell Environ.*, 32:666-681, 2009.
- BAIS, H.P.; WEIR, T.L.; PERRY, L.G.; GILROY, S. & VIVANCO, J.M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Ann. Rev. Plant Biol.*, 57:233-266, 2006.
- BELO, A.F.; SANTOS, E.A.; SANTOS, J.B.; FERREIRA, L.R.; SILVA, A.A.; CECON, P.R. & SILVA, L.L. Fitorremediação de solo adubado com composto orgânico e contaminado com trifloxsulfuron-sodium. *Planta Daninha*, 25:251-258, 2007.
- BRAUD, A.; JÉZÉQUEL, K.; BAZOT, S. & LEBEAU, T. Enhanced phytoextraction of an agricultural Cr- and Pb-contaminated soil by bioaugmentation with siderophore-producing bacteria. *Chemosphere*, 74:280-286, 2009.
- CARMO, M.L.; PROCOPIO, S.O.; PIRES, F.R.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BARROSO, A.L.L.; SILVA, G.P.; CARMO, E.L.; BRAZ, G.B.P.; SILVA, W.F.P.; BRAZ, A.J.B.P. & PACHECO, L.P. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. *Planta Daninha*, 26:301-313, 2008.
- CERNE, M.; SMODIS, B. & STOK, M. Uptake of radionuclides by a common reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) grown in the vicinity of the former uranium mine at Širovski vrh. *Nucl. Eng. Des. In press*, Available online 10 May 2010. (corrected proof), 2010.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES – CEC. Communication from the Commission on the precautionary principle. Brussels, COM, 2000. 29p. 2000.
- COMPANHIA DE TÉCNICA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Áreas contaminadas. Site da Companhia de Técnica de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relação_areas.asp). Acesso em 05 maio de 2010.
- COUTINHO, H.D. & BARBOSA, A.R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. *Silva Lusitana*, 15:103-117, 2007.
- FLECHAS, F.W. Case study: Union Pacific Railroad - regulatory considerations for implementation of phytoremediation. In: EPA PHYTOREMEDIATION STATE OF THE SCIENCE CONFERENCE, 2002, Boston. Proceedings... Boston, USEPA, 2002. 31p. (Report EPA 625R-01/011a and b)
- GENTRY, T.J.; RENSING, C. & PEPPER, I.L. New approaches for bioaugmentation as a remediation technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 34:447-494, 2004.
- GHOSH, M. & SINGH, S.P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 3:1-18, 2005.
- GIANFREDA, L. & RAO, M.A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review. *Enzyme Microbiol. Technol.*, 35:339-354, 2004.
- GINNEKEN, L.V.; MEERS, E.; GUISSON, R.; RUTTENS, A.; ELST, K.; TACK, F.M.G.; VANGRONSVELD, J.; DIELS, L. & DEJONGHE, W. Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production. *J. Environ. Eng. Landscape Manag.*, 15:227-236, 2007.
- GLASS, D.J. Economic potential of phytoremediation. In: RASKIN, I. & ENSLY, B.D., eds. *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. New York, John Wiley, 2000. p.15-31.
- GLASS, D.J. USA and international markets for phytoremediation, 1999-2000. D. Needham, Glass Associates, 2009. Disponível em: <www.channell.com/dglassassoc/> Acesso em: 30 jan. 2009.
- HALL, J.L. Cellular mechanism for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exper. Bot.*, 53:1-11, 2002.
- HERNANDEZ-VAENCIA, I. & MAGER, D. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. *Biagro*, 15:149-155, 2003.
- HUANG, X-D.; EL-ALAWI, Y.; GURSKA, J.; GLICK, B.R. & GREENBERG, B.M. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (HTPs) from soils. *Microchem. J.*, 81:139-147, 2005.
- HYNES, R.K.; FARREL, R.E. & GERMINDA, J. Plant-assisted degradation of phenanthrene as assessed by solid-phase microextraction (SPME). *Inter. J. Phytoremediation*, 6:253-268, 2004.
- INTER-COST. WORKSHOP ON BIOREMEDIATION. Sorrento, 2007. p.15-18. Disponível em: <http://www.epfl.ch/COST837/intercost_report.htm> Acesso em 10 nov. 2007.
- INTERSTATE TECHNOLOGY AND REGULATORY COUNCIL - ITRC. Phytoremediation decision tree. Washington, 1999. Disponível em: <<http://www.itrcweb.org>> Acesso em dez. 2007.

- JONER, E.J. & LEVVAL, C. Phytoremediation of organic pollutants using mycorrhizal plants: A new aspect of rhizosphere interactions. *Sustain. Agr.*, Part 7:885-894, 2009.
- KADIAN, N.; GUPTA, A.; SATYA, S.; MEHTA, R.K. & MALIK, A. Biodegradation of herbicide (atrazine) in contaminated soil using various bioprocessed materials. *Biores. Technol.*, 99:4642-4647, 2008.
- KAIMI, E. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil. *Environ. Exper. Bot.*, 55:110-119, 2006.
- KALTSIKES, P.J. Phytoremediation. State of the art in Europe (an intercontinental comparison). Proceedings of the First Scientific Workshop COST Action 837. 179p. Crete, Greece, 2000.
- KAUTSKY, L & GREGER, M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants. *Environ. Pollut.*, 133:265-274, 2003.
- KRAEMER, U. Phytoremediation to phytochelatin-plant trace metal homeostasis. *New Phytol.*, 158:1-9, 2003.
- KUIPER, I.; LAGENDIJK, E.L.; BLOEMBERG, G.V. & LUGTENBERG, B.J.J. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction. *Molec. Plant Microbe Interact.*, 17:6-15, 2004.
- KULAKOW, P. & PIDLISNYUK, V.V., eds. Application of Phytotechnologies for cleanup of industrial, agricultural and wastewater contamination. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 198p. 2010.
- MARIANO, A.P.; ANGELIS, D.F. & BONOTTO, D.M. Monitoramento de indicadores geoquímicos e avaliação de biodegradação em área contaminada com óleo diesel. *Eng. Sanit. Amb.*, 12(3):296-304, 2007.
- MARMIROLI, N. & McCUTCHEON, S.C. Making phytoremediation a successful technology. In: MCCUTCHEON, S.C. & SCHONOR, J.L. *Phytoremediation: Transformation and control of contaminants*. New York, John Wiley & Sons, 2003. 987p.
- MARQUES, M. Phytoremediation. In: KALMAR ECO-TECH'05: Waste to energy, bioremediation and leachate treatment, Kalmar, 2005. Proceedings... LOCAL, 2005. p.19-26.
- MARQUES, M.; ROSA, G.S. & AGUIAR, C.C.R. Plants with potential for phytoremediation of oil-contaminated soil based on germination and biomass growth. In: NATO/CCMS WORKSHOP ON MANAGEMENT OF INDUSTRIAL TOXIC WASTE, 4., Local, 2006. Proceedings...LOCAL, 2006. 8p. CD-ROM.
- MARQUES, M.; ROSA, G.S.; AGUIAR, C.R.C.; CORRÊA, S.M. & CARVALHO, E.M. Seedling emergence and biomass growth of oleaginous and other tropical species in oil contaminated soil. *Open Waste Manag. J.*, 3:26-32, 2010.
- McCUTCHEON, S.C. & SCHONOR, J.L. *Phytoremediation: Transformation and control of contaminants*. New York, John Wiley & Sons, 2003. 987p.
- MELO, E.E.C.; NASCIMENTO, C.W.A. & SANTOS, A.C.Q. Solubilidade, fracionamento e fitoextração de metais pesados após aplicação de agentes quelantes. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:1051-1060, 2006.
- MERKL, N.; SCHULTZE-KRAFT, R. & ARIAS, M. Effect of the tropical grass *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Staf on microbial population an activity in petroleum-contaminated soil. *Microbiol. Res.*, 161:80-91, 2006.
- MERKL, N.; SCULTZE-KRAFT, R. & INFANTE, C. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum-contaminated soils. *Water Air Soil Pollut.*, 165:24-28, 2004.
- MORIKAWA, H. & ERKIN, Ö.C. Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. *Chemosphere*, 52:1553-1558, 2003.
- MURATOVA A.Y.; TURKOVSAYA, O.V.; ANTONYUK, L.P.; MAKAROV, O.E.; POZDNYAKOVA, L.I. & IGNATOV, V.V. Oil-oxidizing potential of associative rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *Microbiology*, 74:210-215, 2005.
- NARASIMHAN, K.; BASHEER, C.; BAJIC, V.B. & SWARUP, S. Enhancement of plant-microbe interactions using a rhizosphere metabolomics-driven approach and its application in the removal of polychlorinated biphenyls. *Plant Physiol.*, 132:146-153, 2003.
- NASCIMENTO, C.W.A. & XING, B. Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci. Agric.*, 63:299-311, 2006.
- NOBRE, M.M. & NOBRE, R.C.M. Remediação de solos. R. Química Derivados, 417:1-5, 2003.
- PARRISH, Z.D.; WHITE, J.C.; ISLEYEN, M.; GENT, P.N.M.; IANNUCCI-BERGER, W.; EITZER, B.D.; KELSEY, J.W. & MATTINA, M.I. Accumulation of weathered polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by plant and earthworm species. *Chemosphere*, 64:609-618, 2006.
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; CECON, P.R.; SANTOS, J.B.; TÓTOLA, M.R.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; SILVA, C.S.W. & PIRES, F.R. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:627-634, 2005.
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O. & FERREIRA, L.R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta Daninha*, 21:335-341, 2003.
- PROCÓPIO, S.O.; CARMO, M.L.; PIRES, F.R.; FILHO, A.C.; BRAZ, G.B.P.; SILVA, W.F.P.; BARROSO, A.L.L.; SILVA, G.P.; CARMO, E.L. & BRAZ, A.J.B.P. Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (*Eleusine coracana*). *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2517-2524, 2008.

- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; PIRES, F.R.; SILVA, A.A.; SANTOS, E.A. & CARGNELUTTI-FILHO, A. Development of bean plants in soil contaminated with trifloxsulfuron-sodium after *Stizolobium aterrimum* and *Canavalia ensiformis* cultivation. *Planta Daninha*, 25:87-96, 2007.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JÚNIOR, J.I. & SANTOS, E.A. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxsulfuron-sodium. *Planta Daninha*, v.23, n.1, p.9-16, 2005.
- ROMEIRO, S.; LAGOA, A.M.M.A.; FURLANI, P.R.; ABREU, C.A. & PEREIRA, B.F.F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. *Bragantia*, 66:327-334, 2007.
- ROSA, G.S. Avaliação do potencial de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por petróleo. Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006, 144p. (Tese de Mestrado)
- RYLOTT, E.L. & BRUCE, N.C. Plants disarm soil: Engineering plants for the phytoremediation of explosives. *Trends Biotechnol.*, 27:73-81, 2009.
- SANTOS, G.C.G. & RODELLA, A.A. Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn E Pb no cultivo de *Brassica juncea*. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:793-804, 2007.
- SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JÚNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. & FERREIRA, L.R. Fitorremediação do herbicida trifloxsulfuron sodium. *Planta Daninha*, 22:323-330, 2004.
- SICILIANO, S.D.; GERMIDA, J.J.; BANKS, K. & GREEN, C.W. Changes in microbial community composition and during a polycyclic aromatic hydrocarbon phytoremediation field trial. *Appl. Environ. Microbiol.*, 69:483-489, 2003.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. A citizen's guide to phytoremediation. Washington, 1998. 30p. (EPA/542-F-98-011)
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Evaluation of phytoremediation for management of chlorinated solvents in soil and groundwater. Washington, 2005. 42p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Risk assessment guidance for superfund. human health evaluation manual. Part A. Washington, DC, 1989. v.1. 68p. (EPA/540/1-89/002)
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Technology Innovation Office. Treatment technologies screening matrix and reference guide: Version 4.0. Washington, 2001. <<http://www.frtr.gov/matrix2/section2/2-7-1.html>>. Acesso em 25 mar. 2008.
- van AKEN, B.; CORREA, P.A. & SCHNOOR, J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: New trends and promises. *Environ. Sci. Technol.*, 44:2767-2776, 2010.
- van DILLEWIJN, P.; NOJIRI, H.; van der MEER, J.R. & WOOD, T.K. Bioremediation, a broad perspective. *Microbial Biotechnol.*, 2:125-127, 2009.
- WHITE JR., P.; WOLF, D.C.; THOMA, G.J. & REYNOLDS, C.M. Phytoremediation of alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons in a crude oil-contaminated soil. *Water Air Soil Pollut.*, 169:207-220, 2006.
- WILLEY, N., ed. Phytoremediation: Methods and reviews. New York, Humana Press, 2007. 467p. (Series Methods in Biotechnology, 23)
- WOLFF, G.; ASSIS, L.R.; PEREIRA, G.C.; CARVALHO, J.G. & CASTRO, E.M. Efeitos da Toxicidade do zinco em folhas de *Salvinia auriculata* cultivadas em solução nutritiva. *Planta Daninha*, 27:133-137, 2009.
- WONG, M.H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50:775-780, 2003.
- ZHUANG, X.; CHEN, J., SHIM, H. & BAI, Z. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environ. Intern.*, 33:406-413, 2007.

