

FITORREMEDIAÇÃO DE MODO FÁCIL: UM SIMPLES ENTENDIMENTO SOBRE O ASSUNTO

GILBERTO DIAS DE ALKIMIN^{1,2*}, ABESSA, DENIS MOLEDO DE SOUZA ABESSA¹, BRUNO NUNES²

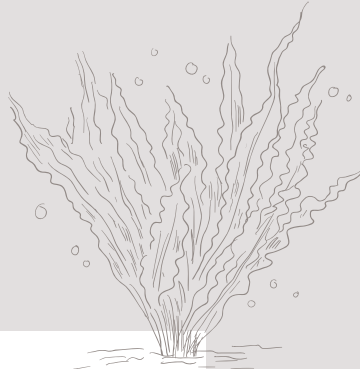
alkimingd@ua.pt

¹ Departamento de Ciências Biológicas e Ambientais, Instituto de Biociências/UNESP, 11.330-900, São Vicente, São Paulo, Brasil

² Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Campus de Santiago, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

RESUMO

A crescente degradação ambiental provocada, em especial, por atividades antrópicas e o uso indiscriminado dos recursos naturais torna necessária a aplicação de técnicas para tratamento tanto dos solos, quanto do ambiente aquático. Estas técnicas devem aliar tanto o custo da sua utilização, quanto o benefício da sua aplicação, em termos de eficiência e diminuição da toxicidade dos resíduos que são posteriormente lançados no meio ambiente, contaminando-o. Entre as técnicas estudadas e utilizadas atualmente, podemos citar



a fitorremediação, processo que utiliza plantas para o tratamento de resíduos, e a sua posterior remoção dos ambientes em que são usadas (solo e/ou água). A revisão que apresentamos pretende apresentar ao leitor, a definição, utilização e vantagens da fitorremediação, os tipos existentes, de acordo com o mecanismo vegetal, assim como exemplos práticos da sua utilização.

PALAVRAS-CHAVE

Contaminação ambiental, risco ambiental, tecnologias verdes, fitorremediação.

CITAÇÃO RECOMENDADA Alkimin GD, Abessa DSM & Nunes B (2021). Fitorremediação de modo fácil: um simples entendimento sobre o assunto. *Lucanus* – Revista de Ambiente e Sociedade, Volume V, Páginas 146-165.

ABSTRACT

The growing environmental degradation caused by anthropic activities and the indiscriminate use of natural resources demands the use of techniques for the treatment of both soil and aquatic environments. These techniques must combine both the cost of their use and the benefits of their application, in terms of efficiency and reduction of the toxicity of the residues that are later thrown into the environment, contaminating it. Among the techniques studied and used today, we emphasize the phytoremediation, a process that uses plants for the treatment of waste, and its subsequent removal from the environments in which they

are employed (soil and/or water). In this review, we present the definition, use and advantages of phytoremediation, the existing techniques, according to the plant mechanism, as well as practical examples of its application.

KEYWORDS

Environmental contamination, environmental risk, green technologies, phytoremediation.

1 INTRODUÇÃO

A crescente degradação ambiental, causada, em especial, por atividades antrópicas, decorrentes em grande parte da utilização indiscriminada e não sustentável dos recursos naturais, e pela geração e descarte inadequado dos resíduos, torna necessário o desenvolvimento e aplicação de técnicas e estratégias de recuperação ambiental (Vasconcellos *et al.* 2012). Tanto a técnica, quanto a estratégia utilizada para o tratamento dos resíduos, devem ter em consideração o objetivo principal, que é assegurar que a área retorne o mais próximo possível à condição pré-contaminação e/ou a níveis mais seguros para a saúde humana e ambiental (Andrade *et al.* 2007). Essas tecnologias são muito variáveis, conforme a matriz contaminada, a natureza do contaminante, o nível de contaminação e a disponibilidade de recursos (Demarco, 2016).

Estas soluções procuram também englobar aspectos como a eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, tempo de processamento, preferencialmente reduzido, e menor custo (Salt *et al.* 1998). Deste modo, a biorremediação tem ganho particular destaque entre as técnicas a serem aplicadas. Esta técnica é definida como uma descontaminação do solo, da água e até mesmo do ar através do uso de organismos, em especial, microorganismos e plantas (Pires *et al.* 2003).

É dentro da biorremediação que se insere a fitorremediação, caracterizada pelo uso de plantas como principais agentes de descontaminação, embora o termo fitorremediação seja mais recente. Essa técnica já era utilizada na antiguidade, por exemplo, pelos egípcios para auxiliar na despoluição de esgotos urbanos que desembocavam nas águas do Rio Nilo (Embrapa, 2010). A palavra “fitorremediação” deriva do grego «phyton», que significa “planta”, e do latim «remedium», que significa “remediar” ou “corrigir”. Geralmente, a fitorremediação utiliza plantas como agente remediador uma vez que as mesmas podem participar diretamente dos processos de destoxificação, por meio da incorporação de contaminantes e posterior metabolização, ou imobilização dentro da planta. Podem também atuar indiretamente, através da promoção ou suporte de microrganismos rizosféricos que efetivamente realizam o processo de destoxificação (Ibañez *et al.* 2018).

Como mencionado anteriormente, este processo pode ser utilizado em solos e águas contaminados com diferentes substâncias, sejam elas de origem e natureza orgânica ou inorgânica, como metais pesados, hidrocarbonetos, agroquímicos, fármacos, subprodutos tóxicos da indústria e outros elementos contaminantes. Entretanto, Miranda-Júnior *et al.* (2016) ressalta que é mais difícil trabalhar com contaminantes orgânicos uma vez que a sua degradação pode gerar subprodutos tóxicos, o que limita a aplicabilidade desta solução para tratar contaminações provocadas por estas substâncias. Assim, as abordagens com compostos orgânicos contaminantes de solo e matrizes aquosas exigem técnicas mais especializadas, tendo essas um custo elevado e o uso de equipamentos analíticos de alta performance. Entretanto, como qualquer outra técnica, a fitorremediação apresenta vantagens e desvantagens (tabela 1). Tendo em consideração as vantagens, vamos explorar um pouco mais os diferentes mecanismos de remoção das plantas que podem interferir no processo como um todo.

Vantagens

- > Custo relativamente baixo
- > Facilidade de implementação e manutenção
- > Diferentes mecanismos de remoção
- > Ambientalmente favorecido
- > Estética suave e agradável
- > Redução de rejeitos gerados
- > Material vegetal pode ser recolhido

Desvantagens

- > Longos prazos de remediação
- > Depende de efeitos na cadeia alimentar (nem sempre conhecidos)
- > Depende do clima
- > Destino final do contaminante pode ser desconhecido
- > Variação nos resultados
- > Não remove o contaminante na totalidade
- > Dificuldade no controle posterior da planta fitorremediadora

TABELA 1 Principais vantagens e desvantagens da fitorremediação. Fonte: Instituto Ekos Brasil, 2005

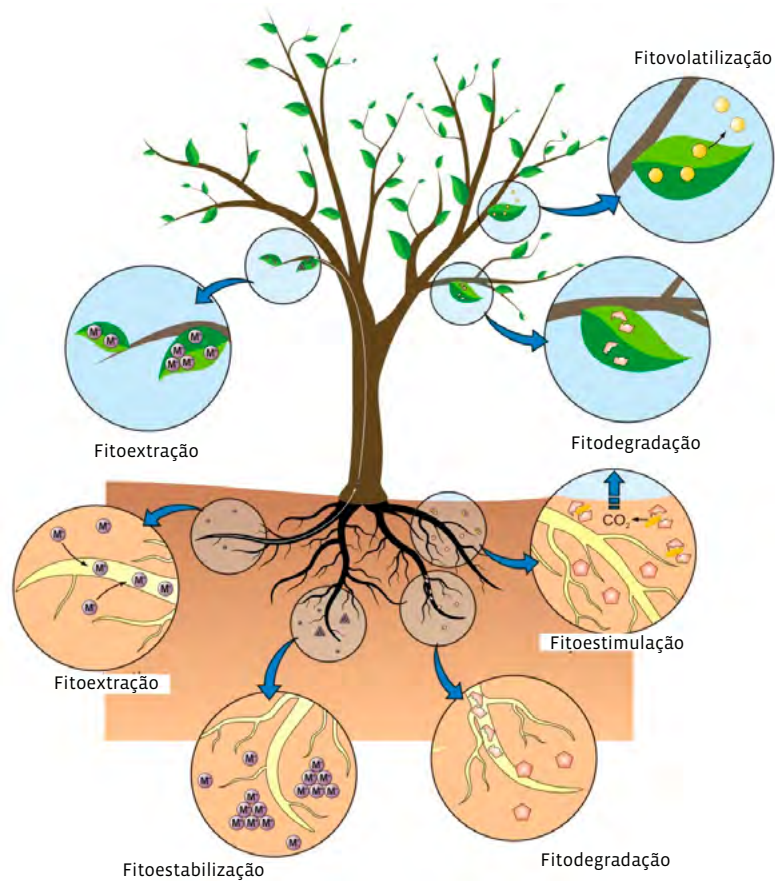


FIGURA 1 Mecanismos de fitorremediação. Adaptado de Favas *et al.* 2014.

De acordo com diferentes investigadores da área, os processos que constituem a fitorremediação são divididos em: fitoextração, fitoestabilização, fitoestimulação, fitovolatilização, fitodegradação e rizofiltração (figura 1). Para informação mais detalhada, recomenda-se a leitura de uma grande referência da área, o livro de Andrade e colaboradores (2007).



É mais difícil trabalhar com contaminantes orgânicos uma vez que a sua degradação pode gerar subprodutos tóxicos, o que limita a aplicabilidade desta solução para tratar contaminações provocadas por estas substâncias.”

2 FITOEXTRAÇÃO

Este é um processo que engloba a absorção dos contaminantes pelas raízes. Estes contaminantes, sem modificação, são nelas armazenados ou são transportados e acumulados nas partes aéreas. Esta técnica é aplicada principalmente em ambientes contaminados por metais, porém também pode ser utilizada para tratar contaminações por compostos orgânicos (Lima *et al.* 2010). Para uma boa eficácia da técnica é necessário que os compostos estejam biodisponíveis, ou seja, prontos para serem absorvidos pelas raízes (Lasat 2000). Utilizam, em especial, plantas chamadas hiperacumuladoras, que têm a capacidade de armazenar altas concentrações de metais específicos, variando de 0,1% a 1% do peso seco, dependendo do metal armazenado (Dinardi *et al.* 2003). Após a aplicação da técnica, fica clara a necessidade da colheita das plantas utilizadas, que podem ter sua biomassa aproveitada para fins não alimentares (Lima *et al.* 2010), como por exemplo, a produção de energia. Entretanto, essa colheita deve ser feita antes da queda das folhas e/ou morte da planta, que conduziria o contaminante ao ambiente de origem.

3 FITOESTABILIZAÇÃO

Processo pelo qual os contaminantes, sejam ino- e/ou orgânicos são incorporados na lignina presente na parede vegetal, ou no húmus do solo, no caso desta aplicação, precipitando os metais sob formas insolúveis, sendo posteriormente aprisionados na matriz (figura 2). Este processo visa evitar/diminuir a mobilização do contaminante, assim como limitar a sua difusão no solo, através de uma cobertura vegetal (Dinardi *et al.* 2003).

Para Andrade *et al.* (2007), de modo geral, a fitoestabilização pode ser entendida como uma técnica que faz uso de um conjunto de mecanismos físicos, químicos e físico-químicos. Os autores referem ainda que, em solos, por exemplo, a fitoestabilização física, ocorre porque a presença das plantas evita tanto a erosão superficial quanto a lixiviação do contaminante. Assim, este processo protege o solo do vento e da chuva, reduzindo a degradação do mesmo e consequentemente diminuindo o transporte do contaminante através do solo. Além disso, de forma direta e/ou indireta, as plantas ali presentes podem ainda provocar a imobilização, lignificação ou humificação do contaminante.

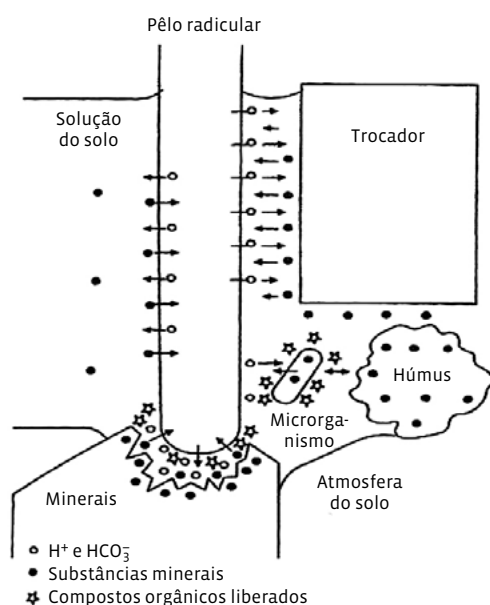


FIGURA 2 Mobilização dos nutrientes minerais do solo e absorção dos elementos minerais pelas raízes. Adaptado de Larcher (2000).

Já o mecanismo químico acontece através da mudança química /ou microbiológica, em especial, da área das raízes e ainda pela própria mudança química do contaminante em questão. Este método baseia-se na solubilidade e mobilidade de metais e dissolução de compostos orgânicos, quer seja na água ou no solo, principalmente relacionados ao pH, exsudação de substâncias pelas raízes ou a própria produção de CO₂.

4 FITOESTIMULAÇÃO

A fitoestimulação consiste no uso das raízes em crescimento (extremidades e ramificações laterais) que promovem a proliferação de microrganismos degradativos na rizosfera, usando os metabólitos exsudados da planta como fonte de carbono e energia (Dinardi *et al.* 2003). Além deste efeito, este processo retira também vantagem da própria capacidade de algumas plantas secretarem enzimas biodegradativas. Desse modo, essa técnica é mais utilizada para tratamento de ambientes contaminados por compostos orgânicos, embora metalóides e metais (como o selênio e o mercúrio) também podem sofrer certo grau de degradação por esta técnica. Entre estes compostos, os hidrocarbonetos merecem destaque uma vez que sua degradação gera subprodutos, geralmente menos tóxicos, como dióxido de carbono e água.

Quando este mecanismo se desenrola nas raízes, recebe o nome de rizodegradação. As raízes das plantas alteram as condições do ambiente envolvente; no caso dos solos, por exemplo, podem aumentar o arejamento, ajustando a humidade do solo e produzindo exsudados que favorecem o crescimento de microorganismos e conseqüentemente aumentam a degradação dos compostos contaminantes ali presentes (Andrade *et al.* 2007).

5 FITOVOLATILIZAÇÃO

Como o próprio nome sugere, este é um processo em que as plantas absorvem o contaminante e convertem-no numa forma volátil, libertando-o para a atmosfera. Geralmente, a fitovolatilização pode acontecer com a ajuda dos microorganismos associados à planta, ajudando-a na absorção e remoção dos contaminantes.

No solo, essa volatilização pode acontecer através da biodegradação dos compostos pela rizosfera ou através da passagem (translocação) do composto pela planta. Em relação à absorção do contaminante pela planta, este pode passar por diferentes processos metabólicos que favorecem a volatilização do mesmo, sendo posteriormente libertado, por exemplo, pela superfície das plantas. No processo de fitovolatilização, esta etapa assume-se como bastante importante, pois a atuação ou não dos processos metabólicos internos podem influenciar a forma em que o composto será libertado para a atmosfera, seja na sua forma original ou metabolizada (transformada em subprodutos; Andrade *et al.* 2007).

Entretanto, ressalta-se que este procedimento deve ser utilizado com cautela, uma vez que existe o risco de as plantas libertarem contaminantes potencialmente tóxicos em concentrações muito elevadas para a atmosfera (Watanabe 1997).



6 FITODEGRADAÇÃO

Tanto a absorção, quanto a bioconversão dos compostos em formas menos tóxicas ocorre nas raízes e/ou em outros tecidos vegetais através dos processos de catabolismo e anabolismo (Pletsh *et al.* 1999). Os contaminantes orgânicos podem ser degradados e/ou mineralizados no interior das células vegetais (processo *in situ*), por diferentes e específicas enzimas, sem a interferência de outros organismos (USEPA 2000).

Um grupo de enzimas que se destaca é o das nitroreduases, que atuam na degradação de diferentes compostos como os nitroaromáticos, pesticidas e solventes clorados, assim como anilinas (Dinardi *et al.* 2003). A fitodegradação ou fitotransformação limita-se à remoção de poluentes orgânicos, pois os metais não são biodegradáveis (Ali *et al.* 2013)

Este processo como um todo depende da absorção do composto pela planta, que por sua vez depende da hidrofobicidade, solubilidade e polaridade. De acordo com Andrade *et al.* (2007), os compostos com moderada hidrofobicidade são mais facilmente absorvidos e transportados pelas plantas; já os compostos com baixa sorção (muito solúveis) não são absorvidos pela planta (raízes). Compostos lipofílicos (alta hidrofobicidade) por outro lado, podem ser encontrados na superfície das raízes ou particionados no seu interior, mas não podem ser transportados através da raiz. Em relação à polaridade, moléculas apolares que apresentam uma massa molecular inferior a 500 podem ser absorvidas pela superfície das raízes e as polares entram nas raízes e podem ser transportadas pelas plantas.



A fitodegradação ou fitotransformação limita-se à remoção de poluentes orgânicos, pois os metais não são biodegradáveis.”

7 RIZOFILTRAÇÃO

A rizofiltração é um processo de fitofiltração em que ocorre a remoção dos contaminantes de águas superficiais ou residuais por plantas, mediante um processo que ocorre através das raízes, sendo os contaminantes filtrados (absorvidos ou adsorvidos; Mukhopadhyay & Maiti 2010).

Outra característica desta técnica é a utilização de plantas terrestres para realizar a absorção, concentração e/ou precipitação dos contaminantes de um meio aquoso, como anteriormente mencionado. Esta técnica é utilizada em ambientes contaminados com metais e elementos radioativos que podem ser absorvidos através do sistema radicular da planta. As plantas são mantidas num sistema de reator em hidroponia, através do qual os efluentes atravessam, são absorvidos pelas raízes e concentrados (Dinardi *et al.* 2007). Ainda de acordo com os autores, plantas com elevada biomassa radicular como o girassol (*Helianthus annuus*) e a mostarda indiana (*Brassica juncea*), bem como plantas hiperacumuladoras aquáticas, são as que apresentam resultados mais satisfatórios. São várias as espécies de macrófitas aquáticas que também podem ser utilizadas nesta técnica.

Este processo é favorecido pela utilização de espécies vegetais que melhoram a qualidade físico-química do meio aquoso e é muito conhecido no tratamento de efluentes. Em água residuais, por exemplo, as plantas interagem naturalmente com os microorganismos, em especial bactérias, fazendo com que estas se desenvolvam, degradando, imobilizando e/ou acumulando os contaminantes. Nesta simbiose, as plantas são responsáveis por produzir, através da fotossíntese, a maior parte do oxigénio utilizado pelas bactérias na degradação da matéria orgânica, incluindo até mesmo alguns contaminantes. Em contrapartida, as bactérias através do processo de respiração libertam o dióxido de carbono que é usado na fotossíntese dos vegetais e que auxiliam diversos outros processos. Adicionalmente, a presença de micorrizas pode maximizar a eficiência do processo de rizofiltração uma vez que aumenta a absorção de água e elementos inorgânicos pelas plantas. Como foi possível observar ao longo da apresentação dos tipos de mecanismos usados na fitorremediação, os diferentes processos envolvidos na fitorremediação envolvem as características morfofisiológicas, fisiológicas e bioquímicas das espécies e diferem de espécie para espécie. Têm sido várias as tentativas para determinar alguns atributos funcionais destas plantas de modo a melhorar a sua eficiência e utilização em processos de fitorremediação. De um modo geral, as propriedades da planta que favorecem a fitorremediação são o rápido crescimento, rápida produção de biomassa,

alta competitividade, tolerância à poluição, alta capacidade de absorção de nutrientes, alta taxa de translocação e grande acumulação de substâncias de reserva (Singh & Jain, 2003), sendo que um meio eficiente de identificar potenciais espécies fitorremediadoras é a observação das plantas que colonizam áreas contaminadas (Sessitsch *et al.* 2013). Por fim, a tabela 2 apresenta de forma simples e resumida o princípio de cada mecanismo de fitorremediação apresentado até ao momento.

| Mecanismo | Descrição do processo |
|---------------------|---|
| > Mecanismo | > Absorção do contaminante presente no ambiente pela espécie vegetal |
| > Fitoextração | > Armazenamento do contaminante nas raízes ou em outros órgãos, sem modificação nas moléculas do contaminante (aprisionamento) |
| > Fitoestabilização | > Estimulação à concentração/ativação da comunidade microbiana apta a biodegradar o contaminante, resultado da produção e libertação de exsudatos radiculares pela espécie vegetal |
| > Fitoestimulação | > Estimulação de um contaminante fitotransformado numa forma volátil, a qual é libertada na atmosfera |
| > Fitovolatilização | > Bioconversão do contaminante em formas menos tóxicas ou não-tóxicas nas raízes ou em outros órgãos dos vegetais; em alguns casos a transformação ocorre de forma intensa, resultando na mineralização do contaminante |
| > Fitodegradação | Remoção do contaminante de ambientes aquáticos através das raízes e de microorganismos associados a rizosfera vegetal |
| > Rizofiltração | |

TABELA 2 Mecanismos biológicos de fitorremediação. Adaptado de Procópio *et al.* (2009).

8 ÍNDICES DE FITORREMEDIAÇÃO

De modo a validar a eficácia das técnicas de fitorremediação, alguns índices foram desenvolvidos para fundamentar e estudar as diferentes formas em que as plantas participam na remediação do ambiente em que se encontram. Além disso, é uma maneira de qualificar e quantificar os dados obtidos por estudos e a sua real aplicação em técnicas de fitorremediação.

O principal índice utilizado é o fator de translocação (FT), que representa a capacidade das plantas em translocar o composto das raízes para a parte aérea da planta, que por sua vez é a área coletável da planta (Zu *et al.* 2005).

No geral, um alto fator de translocação é considerado um bom índice de fitorremediação.

O índice de tolerância (IT) está relacionado com o ganho de biomassa por parte da planta aquando da presença do contaminante (Baker *et al.* 1994). Valores de IT maiores que 1 refletem um aumento líquido da biomassa e sugerem que as plantas desenvolveram tolerância, enquanto os valores de TI inferiores a 1 indicam uma diminuição líquida da biomassa, o que corresponde a uma característica das plantas quando sob stress. Valores de TI iguais a 1 indicam que não há diferença em relação ao tratamento controle, sem a presença do respectivo contaminante (Wilkins 1957).

O fator de bioconcentração (FBC) é definido como a razão da concentração do composto na planta, pela concentração de composto no local estudado (Zayed *et al.* 1998). É o parâmetro de definição em fitorremediação que fornece informações sobre a absorção do referido composto, a sua mobilização para os tecidos vegetais e o seu armazenamento nas partes aéreas das plantas (Newman & Unger 2003).

Além do já mencionado, estes índices suportam a seleção da espécie a ser utilizada numa respectiva técnica de fitorremediação. Por exemplo, espécies de plantas com valores de FBC superiores a 1 e valores de TI inferiores a 1, apresentam potencial para o uso em técnicas de fitoestabilização (Yoon *et al.* 2006), visto que apresentam, dessa forma, capacidade de acumular contaminantes e mantê-los imobilizados, principalmente nas raízes.

Para a recomendação de uma espécie potencial na técnica de fitoextração, por exemplo, é necessário que ambos os fatores, FBC e IT, sejam superiores a 1 (Fitz & Wenzel 2002), considerando que é necessário a planta acumular contaminantes do meio e ter a capacidade de os translocar para a parte aérea, visando a sua posterior remoção.

Importa salientar que a indicação de espécies para determinada técnica necessita, além de índices de fitorremediação, de uma caracterização mais profunda acerca de parâmetros como o crescimento e a interferência do contaminante na espécie em questão (Demarco 2016).



O principal índice utilizado é o fator de translocação (FT), que representa a capacidade das plantas em translocar o composto das raízes para a parte aérea da planta, que por sua vez é a área coletável da planta.”

9 FITORREMEDIAÇÃO DA ÁGUA

Em sistemas aquáticos as plantas mais utilizadas nas diferentes técnicas de fitorremediação são as macrófitas aquáticas. São vegetais que habitam desde áreas pantanosas até ambientes totalmente submersos.

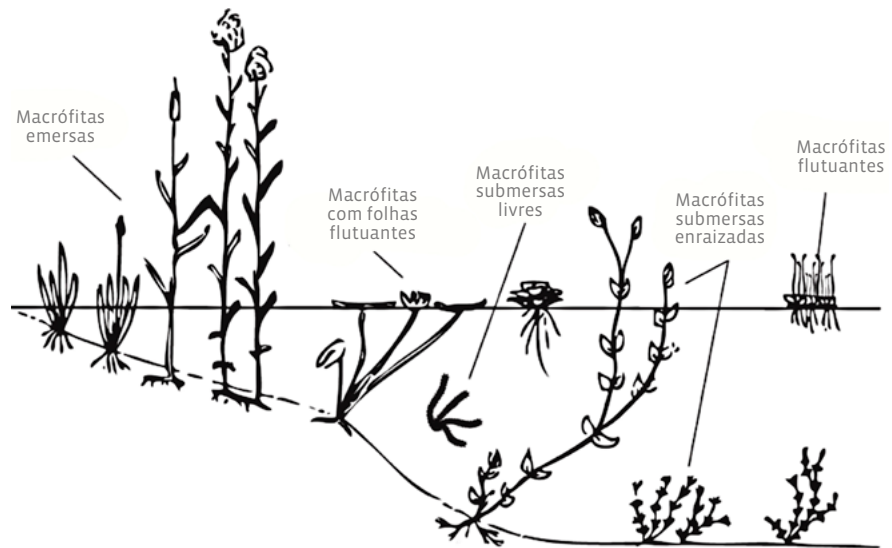


FIGURA 4 Grupos de macrófitas aquáticas. (Fonte: Esteves 1998).

Estas plantas, são, na sua grande maioria, vegetais terrestres que, ao longo de seu processo evolutivo, se adaptaram ao ambiente aquático, por isso conciliam características terrestres com uma grande capacidade de adaptação a diferentes tipos de ambientes, o que torna a sua ocorrência muito ampla (Esteves 1998). A figura 4 representa a divisão das macrófitas aquáticas em diferentes grupos de acordo com o seu biótipo), sendo eles:

- emersas: plantas enraizadas no sedimento com folhas acima da lâmina de água, como as espécies dos gêneros *Echinochloa*, *Typha*, etc.;
- flutuantes: plantas que se desenvolvem livremente enquanto flutuam no espelho de água, como as espécies dos gêneros *Limnobium*, *Lemna*, etc;
- submersas enraizadas: plantas enraizadas que se desenvolvem submersas, como as espécies dos gêneros *Vallisneria*, *Nitella*, etc;
- submersas livre: plantas com raízes pouco desenvolvidas, que se mantêm submersas em águas calmas, como as espécies do gênero *Utricularia*;

- com folhas flutuantes: plantas enraizadas com folhas que flutuam na lâmina d'água, como as espécies do género *Nymphoides*, etc.

Do ponto de vista taxonómico, as plantas aquáticas incluem 42 famílias de dicotiledóneas, 30 de monocotiledóneas, 17 de briófitas e 6 de pteridófitas. Após alguns estudos, este grupo das macrófitas aquáticas ganhou destaque mundial por apresentar alta eficiência na remoção, mesmo que variando de espécie para espécie, de uma diversidade de contaminantes, entre eles metais, radionuclídeos, e diversos contaminantes orgânicos e inorgânicos, a partir de águas contaminadas (Dhir *et al.* 2009).

Além disso, a fitorremediação de ambientes aquáticos é uma das técnicas que maior potencial apresenta de entre as técnicas gerais de fitorremediação (Paulo & Pratas 2008). A importância crescente da fitorremediação na gestão dos recursos hídricos tem aguçado o interesse científico nas macrófitas aquáticas. No entanto, a desvantagem do uso de macrófitas aquáticas deriva do fato de geralmente apresentarem baixa produção de biomassa e possuírem um sistema radicular pouco extenso (Yang *et al.* 2005). Neste sentido, a prospeção de biodiversidade é uma ferramenta importante para encontrarmos espécies com as características ideais que ocorrem numa determinada região e que poderiam ser utilizadas em sistemas de controle de poluição (Barreto 2011).

10 FITORREMEDIAÇÃO DO SOLO

Em termos de fitorremediação do solo, o principal fator que pode influenciar o resultado obtido pelo processo é a seleção da espécie vegetal. Esta seleção constitui um dos primeiros passos na implementação do processo. Para que esta seleção seja realizada convenientemente é necessário conhecer profundamente as diferentes características do(s) contaminante(s) presente(s) no local, assim como as características físico-químicas do solo a ser remediado, a topografia da área e as condições climáticas locais, todos estes fatores relevantes para o processo.

De acordo com Procópio e colaboradores (2009), diferentes características devem ser levadas em consideração nessa etapa:

1. Sistema radicular profundo e denso;
2. Alta taxa de crescimento e produção de biomassa;

3. Capacidade transpiratória elevada, especialmente em árvores e plantas perenes;
4. Elevada taxa de exsudação radicular;
5. Resistência a pragas e doenças;
6. Adaptabilidade ao local a ser remediado (clima e solo);
7. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico;
8. Alta associação com fungos micorrízicos;
9. Fácil controle ou erradicação posterior;
10. Quando necessária, facilidade de remoção das plantas da área contaminada;
11. Fácil aquisição ou multiplicação de propágulos;
12. Ocorrência natural em áreas contaminadas.

Os autores sugerem que o ideal seria reunir todas essas características (ou a maior parte delas) na espécie vegetal selecionada, porém, esta é uma tarefa difícil. Sendo assim, para a fitorremediação de solos, embora seja aplicada uma única espécie para tratamento por área, várias espécies podem ser usadas num mesmo local, simultaneamente ou de forma subsequente para garantir a promoção de uma maior descontaminação (Miller 1996).

Entre as espécies testadas acerca do seu potencial fitorremediador e da sua aplicabilidade nos diferentes tipos de contaminantes, podemos citar as leguminosas herbáceas: crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.), feijão de porco/feijão cutelo/fava-rica (*Canavalia ensiformis* L.), mucuna preta/feijão-da-florida (*Stilozobium aterrimum* Piper E Tracy); forrageiras herbáceas: estilosante (*Stylosanthes humilis* HBK), amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* Krapov E Gregory), azevém (*Lolium multiflorum* L.), aveia preta (*Avena sativa* L.); leguminosas arbustivas: feijão gandu (*Cajanus cajan* L.), sisbania (*Sisbania virgata* Cav.), leucena (*Leucaena leucocphala* L.), árvores de grande porte, como espécies de eucaliptos *Eucaliptus grandis* Hill, *E. claeziana* (F. MUELL), *E. urophylla* (S. T. BLACK), *Corymbia citriadora* (*Eucalyptus critiadora* Hook), além de espécies como a mamona (*Ricinus communis* L.), o girassol (*Helianthus annus* L.) e o milho (*Zea mays*).



Em termos de fitorremediação do solo, o principal fator que pode influenciar o resultado obtido pelo processo é a seleção da espécie vegetal. Para que esta seleção seja realizada convenientemente é necessário conhecer profundamente as diferentes características do(s) contaminante(s) presente(s) no local, assim como as características físico-químicas do solo a ser remediado, a topografia da área e as condições climáticas locais.”

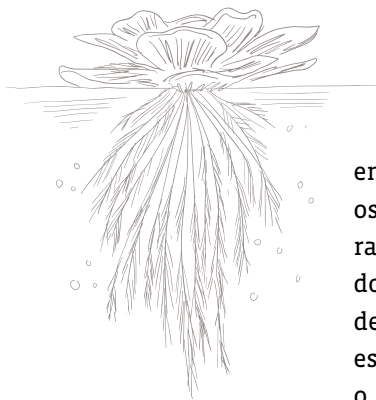
11

APLICAÇÃO DA FITORREMEDIAÇÃO EM ÁREAS CONTAMINADAS (SOLO E ÁGUA): CASOS DE ESTUDO

Com vista à exemplificação do que foi discutido até ao momento, apresentaremos nesta secção alguns estudos de fitorremediação e os respetivos resultados obtidos. Esta secção tem como objetivo elucidar o leitor, na prática, daquilo que até aqui foi discutido na teoria, tanto para solos, quanto para ambientes aquáticos.

Lima e colaboradores (2019) realizaram um estudo onde avaliaram o potencial da biomassa do sorgo (*Sorghum bicolor L.*) como fitoextrator de cobre, bem como a estabilidade fisiológica sob essa condição de stress. Durante a experiência, as plantas de sorgo foram submetidas a uma gama de concentrações de Cu^{2+} : 2,3, 10,9, 19,6, 30,5, 37,6 e 55,6 mg dm^{-3} . Os autores constataram que o crescimento da planta não foi afetado pelo aumento das concentrações de Cu^{2+} , sugerindo que esta espécie é tolerante ao cobre. Entretanto, registou-se uma diminuição da taxa fotossintética de acordo com o aumento da concentração de Cu^{2+} , mas não a um nível que pudesse perturbar o metabolismo da planta e provocar a sua eventual morte. Os valores obtidos para o índice de transferência variaram de 0,62 a 0,11, o que evidenciou a restrição do transporte de Cu^{2+} para as partes aéreas. Constataram ainda que quanto maior a quantidade de Cu^{2+} disponível no solo, menor é a quantidade de Cu^{2+} transportada para a parte aérea do sorgo. Portanto, os resultados sugerem que a biomassa do sorgo tem potencial para ser usada para fitoextração de Cu^{2+} em concentrações de até 20 mg dm^{-3} . Além disso, em locais altamente poluídos por Cu^{2+} , este pode ser usado para produzir biomassa com fins de bioenergia.

Já em relação a compostos orgânicos, uma das maiores preocupações são aqueles que são utilizados agricultura, como, por exemplo, a atrazina. Desse modo, Sánchez e colaboradores (2017) trataram solos contaminados com 3 diferentes concentrações de atrazina (2, 5 e 10 mg/kg), utilizando quatro espécies vegetais: *Festuca arundinacea*, *Lolium perene*, *Hordeum vulgare* e *Zea mays*. Em relação aos aspectos morfológicos, a atrazina afetou o crescimento das plantas de maneira diferenciada. Assim, as doses de 5 e 10 mg/Kg causaram a diminuição da biomassa da raiz entre 50 e 80%, da parte aérea



entre 22 e 60% para o total das espécies utilizadas quando comparadas com os tratamentos controle. Para além disso, após sete dias de tratamento, foram observadas alterações pigmentares (cloroses) resultantes da toxicidade do agroquímico, estando esta toxicidade associada à absorção e acumulação de atrazina pela planta – este efeito foi observado em todas as plantas. Das espécies testadas, as gramíneas mostraram maior capacidade de absorver o composto. O milho demonstrou capacidade para acumular atrazina em todos os seus tecidos, em especial nas raízes. Após 16 dias, a quantidade de atrazina no solo foi reduzida em 88,6%, o que deixa claro a contribuição das plantas para esta remoção. Para a fitorremediação de solos contaminados com compostos orgânicos sugerimos consultar uma ampla e detalhada revisão escrita e apresentada por Schwitzguébel (2017).

A associação de microorganismos com plantas para melhoria dos resultados da fitorremediação também tem sido explorada e estudada. No trabalho de Xu e colaboradores (2020) foram desenvolvidos diferentes tratamentos em solos contaminados com hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPAs, derivados de petróleo), utilizando alfafa (*Medicago sativa L.*) e azevém (*Lolium multiflorum Lam.*), inoculados ou não com bactérias do género *Ochrobactrum*. Os parâmetros biomassa vegetal, atividade de peroxidase (POD), teor de malondialdeído (MDA), atividade de enzima do solo (polifenol oxidase e atividade de desidrogenase) e concentração residual de HPAs em solos foram determinados para ilustrar a capacidade de *Ochrobactrum* para aumentar a degradação de HPAs pelas plantas. Os resultados demonstraram que o peso fresco do azevém e da alfafa inoculados com *Ochrobactrum* aumentou significativamente, enquanto a atividade dos conteúdos de POD e MDA foram notavelmente reduzidos relativamente às plantas que não foram inoculadas. Além disso, o *Ochrobactrum* aumentou significativamente a atividade da polifenol oxidase e da desidrogenase no solo, e aumentou ainda mais a degradabilidade do sistema aos HPAs. Diferentes métodos de tratamento puderam ser classificados pela seguinte ordem de acordo com a degradabilidade: alfafa + *Ochrobactrum* > azevém + *Ochrobactrum* > *Ochrobactrum* > alfafa > azevém. A ação combinada de PW e alfafa/azevém pode acelerar a degradação dos HPAs em solo contaminado por plantas de coque. Assim, foi possível concluir que as espécies de bactérias do género *Ochrobactrum* podem ser usadas para promover a fitorremediação do solo contaminado por PAHs.

Como mencionado anteriormente, na fitorremediação de ambientes aquáticos as espécies mais utilizadas são as macrófitas aquáticas, uma vez que possuem a capacidade de remoção de compostos orgânicos e inorgânicos. A revisão conduzida por Ansari e colaboradores (2020) concluiu que as espécies de plantas aquáticas, *Azolla*, *Eichhornia*, *Lemna*, *Potamogeton*, *Spirodela*, *Wolfia* e *Wolffia*, são importantes fitorremediadores, sendo também apontadas como altamente eficientes na redução da contaminação aquática

por meio da bioacumulação de contaminantes nos seus tecidos. De entre as várias espécies aquáticas, o aguapé/jacinto-de-égua (*Eichhornia*) é altamente resistente e pode tolerar a toxicidade de metais pesados, fenóis, formaldeídos, ácidos fórmicos, ácidos acéticos e ácidos oxálicos, mesmo em elevadas concentrações. Da mesma forma, algumas outras espécies da família Lemnaceae são muito eficientes para reduzir a percentagem de carência bioquímica de oxigénio (CBO), carência química de oxigénio (CQO), bem como o impacto de metais e várias formas iónicas de nitrogénio e fósforo.

A capacidade de fitorremediação de duas das plantas de flutuação livre, *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes*, foi utilizada num procedimento experimental para a remoção de metais pesados de efluente de aço (Aurangzeb *et al.* 2014). O estudo concluiu que *P. stratiotes* foi capaz de remover alguns dos metais pesados presente no efluente, apresentando a maior afinidade para Pb e Cu com 70,7% e 66,5% de eficiência, respetivamente, enquanto *E. crassipes* provou ser o mais eficaz quando usado em água contaminada, pois a sua eficiência foi bastante considerável para Cd (eficácia de remoção de 82,8%), Cu (78,6%), As (74%), Al (73%), e Pb (73%), respetivamente. Dessa forma, estas espécies de plantas aquáticas demonstraram ser boas candidatas para a fitoextração de efluentes industriais, devido à relação custo-benefício e aos resultados obtidos.

Ahila e colaboradores (2021) submeteram efluentes de indústria têxtil ao tratamento com *Pistia stratiotes* L, *Salvinia adnata* Desv e *Hydrilla verticillata* (L.f), separadamente. Após o tratamento, os resultados da concentração de metais como Pb e Cr foram registados abaixo do limite de deteção da técnica analítica utilizada e os mesmos resultados foram obtidos para as três plantas aquáticas testadas. Entre as três plantas, *P. stratiotes* removeu com eficiência 86% de cor, 66% de sólidos totais dissolvidos, 77% da carência química de oxigénio, e 61,33% dos cloretos. A variação de fitoquímicos das macrofitas também foi estudada antes e após o tratamento, e revelou a redução de ácido ascórbico nas amostras das plantas. Além disso, o efeito tóxico do efluente tratado foi investigado por irrigação de uma planta ornamental, *Impatiens balsamina* que apresentou parâmetros morfométricos normais, mesmo após a irrigação com o efluente tratando, confirmando a redução da toxicidade do referido efluente e o potencial fitorremediador de plantas aquáticas. Além disso, a biomassa vegetal de *P. stratiotes*, obtida após o processo de tratamento, foi submetida à produção de estrume e aplicada em solo, com comprovada qualidade nutricional, podendo ser aplicada como um condicionador de solo. A diminuição da toxicidade de efluente têxtil também foi reportada por Alkimin e colaboradores (2020); neste estudo a espécie vegetal utilizada foi a *Lemna minor* e a toxicidade testada em parâmetros de mortalidade, comportamentais e reprodutivos de *Daphnia magna*, um invertebrado aquático, apresentando redução da toxicidade nos parâmetros avaliados. Em relação às plantas utilizadas no processo de fitorremediação,

as mesmas apresentaram alterações fisiológicas e bioquímicas, porém, as espécies foram capazes de sobreviver ao ambiente contaminado e de remediar o mesmo.

Em relação a compostos orgânicos, em especial fármacos, foi descrita a fitorremediação de diclofenaco, ibuprofeno e paracetamol através da aplicação de culturas de células de *Armoracia rusticana* e *Linum usitatissimum*, e através de plantas das espécies *Lupinus albus*, *Hordeum vulgare* e *Phragmites australis* cultivadas hidroponicamente em condições de laboratório (Kotyza *et al.* 2010). Durante as experiências *in vitro*, os melhores resultados para a remediação do paracetamol foram alcançados usando culturas de raízes peludas (em cabeleira) de *Armoracia rusticana*, onde 100% da quantidade inicial foi removida do meio após oito dias. A remoção total de ibuprofeno e diclofenaco foi obtida usando uma cultura em suspensão de *Linum usitatissimum* após um e seis dias, respetivamente. Em hidroponia, os melhores resultados foram alcançados para o paracetamol, onde foi totalmente removido do meio durante dois ou quatro dias de acordo com as concentrações estudadas. A melhor eficácia da remoção do ibuprofeno (50% da quantidade inicial) foi encontrada no caso de *Phragmites*. Por outro lado, a eficácia de todas as plantas testadas para a remoção de diclofenaco foi reduzida. Entretanto, as espécies testadas, mostraram potencial fitremediador para os diferentes fármacos utilizados.

A introdução e explicação teórico-prática do processo de fitorremediação demonstraram que se trata de uma técnica de simples implementação e que, geralmente, apresenta resultados satisfatórios e um elevado custo-benefício. Porém, mesmo com as diversas vantagens e resultados comprovados, a fitorremediação ainda é uma técnica pouco utilizada e que merece uma maior atenção científica e aplicada.

Agradecimentos

GDA agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pós-doutoramento (Processo: 150254/2020-2). Bruno Nunes foi contratado por intermédio do projeto “ECO-R-pharmplast – Ecotoxicity of realistic combinations of pharmaceutical drugs and microplastics in marine ecosystems”, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, FCT (referência POCI-01-0145-FEDER-029203). Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CESAM (UIDB/50017/2020+UIDP/50017/2020), pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC), e cofinanciamento pelo FEDER, por intermédio do Acordo de Parceria PT2020 e Compete 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahila KG *et al.* (2021). Phytoremediation potential of freshwater macrophytes for treating dye-containing wastewater. *Sustainability* 13, 329.
- Ali H (2013). Phytoremediation of heavy metals - concepts and applications. *Chemosphere*, 91, (7), 869-881.
- Alkimin GD *et al.* (2020). Phytoremediation processes of domestic and textile effluents: evaluation of the efficacy and toxicological effects in *Lemna minor* and *Daphnia magna*. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 4423-4441.
- Andrade, JCM *et al.* (2007). Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental, São Paulo, Oficina de Textos.
- Ansari AA *et al.* (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*.
- Aurangzeb N *et al.* (2014). Phytoremediation potential of aquatic herbs from steel foundry effluent. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(4), 881-886.
- Baker AJM *et al.* (1994). The possibility of in-situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation & Recycling*, 11, 41-49.
- Barreto AB (2011). A seleção de macrófitas aquáticas com potencial para remoção de metais-traço em fitorremediação. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- Demarco CF (2016). Seleção de macrófitas aquáticas com potencial de fitorremediação no arroio Santa Bárbara, município de Pelotas/ RS. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia da UFRS, Pelotas, Brasil.
- Dhir B *et al.* (2009). Potential of aquatic macrophytes for removing contaminants from the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39, 754-781.
- Dinardi AL *et al.* (2003). Fitorremediação. Em: III Fórum de estudos contábeis, Rio Claro, Fitorremediação. Rio Claro, Faculdades Integradas Claretianas, 1, 1-15.
- Embrapa (2010). Prosa Rural - Fitorremediação: o uso de plantas para descontaminação Ambiental. Disponível: em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2419877/prosa-rural---fitorremediacao-o-uso-de-plantas-para-descontaminacao-ambiental>.
- Esteves FA (1998). Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro, Interciência.
- Fitz WJ & Wenzel WW (2002). Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: Fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology*, 99, 3, 259-278.
- Ibañez SG *et al.* (2018) The challenges of remediating metals using phytotechnologies. Em: Donati, E.R. (eds.), *Heavy metals in the environment: microorganisms and bioremediation*. CRC Press, Taylor & Francis, 173-191.
- Instituto Ekos Brasil (2005). Áreas Contaminadas: Remediação e Redesenolvimento. São Paulo.
- Kotyza J *et al.* (2010). Phytoremediation of pharmaceuticals — preliminary study. *International Journal of Phytoremediation*, 12(3), 306-316.
- Larcher W (2000). *Ecofisiologia Vegetal*. Editora Rima Artes e Textos, São Carlos.
- Lima AM (2010). Avaliação do potencial fitorremediador da mamona (*Ricinus communis*) e girasol (*Helianthus annuus*) quanto a remoção do chumbo e toluene em efluentes sintéticos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química da UFRN, Natal, Brasil.
- Lima LR *et al.* (2019). Characterization of biomass sorghum for copper phytoremediation: photosynthetic response and possibility as a bioenergy feedstock from contaminated land. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25, 433-441
- Miller RR (1996). Phytoremediation. 1996. Disponível em: <http://www.gwrtac.org>
- Miranda-Júnior *et al.* (2016). Fitorremediação de águas contaminadas com agroquímicos. Trabalho final de curso técnico em química. Departamento de Química do Instituto Federal Catarinense, Araguari, Brasil.

- Mukhopadhyay S & Maiti SK (2010). Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 9, 560-575.
- Newman MC & Unger MA (2003). *Fundamentals of Ecotoxicology*. Lewis Publishers, 2nd Ed., Boca Raton, FL.
- Paulo C & Pratas J (2008). Environment contamination control of water drainage from uranium mines by aquatic plants. Em: Prasad, MNV (ed.) Trace elements as contaminants and nutrients. New Jersey, John Wiley & Sons, 623-654.
- Favas PJC *et al.* (2014). Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, IntechOpen.
- Pires FR *et al.* (2003). Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta Daninha, Viçosa-MG*, 21, 2, 335-341.
- Procópio SO *et al.* (2009). Fitorremediação de Solos com Resíduos de Herbicidas. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2009/doc_156.pdf
- Salt DE *et al.* (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 49, 643-668.
- Sánchez V *et al.* (2017). Assessing the phytoremediation potential of crop and grass plants for atrazine-spiked soils. *Chemosphere*, 185, 119-126.
- Schwitzguébel JP (2017). Phytoremediation of soils contaminated by organic compounds: hype, hope and facts. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 1492-1502.
- Sessitsch A *et al.* (2013). The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 182-194.
- Singh OV & Jain RK (2003). Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63, 128-135.
- USEPA (2000). Environmental Protection Agency. Introduction to Phytoremediation. Cincinnati.
- Vasconcellos MC *et al.* (2012) Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. *Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade*, 34, 261-267.
- Watanabe ME (1997). Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environmental Science & Technology*, 31(4), 182-186.
- Wilkins DA (1957). A technique for the measurement of lead tolerance in plants. *Nature*, 180, 37-38.
- Xu C *et al.* (2020). Enhanced phytoremediation of PAHs-contaminated soil from an industrial relocation site by *Ochrobactrum* sp. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8991-8999.
- Yang X *et al.* (2005). Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18, 339-353.
- Yoon J (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 368, 456-464.
- Zayed A *et al.* (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, 27, 715-721.
- Zu YQ *et al.* (2005). Hyperaccumulation of Pb, Zn, and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China. *Environment International*, 31, 755-762.