



A fitorremediação como estratégia para mitigar os impactos da poluição dos recursos hídricos: uma revisão da literatura

Phytoremediation as a strategy to mitigate the impacts of water pollution: a literature review

Daniela de Carvalho Gualberto¹, Roberta Zani da Silva², Mateus Chagas dos Santos³

1. Universidade Estadual do Tocantins (UNITINS), E-mail: danielaeng59@gmail.com;
2. Universidade Estadual de Londrina (UEL), E-mail: roberta.zs@unitins.br;
3. Universidade Federal do Tocantins (UFT), E-mail: chagasmateus2000@gmail.com

RESUMO - A busca por alternativas sustentáveis para mitigar os efeitos da poluição dos recursos hídricos é uma demanda mundial urgente. A água é um recurso natural estratégico essencial para os organismos e para os sistemas produtivos, sendo fundamental a sua disponibilidade em quantidade e qualidade. Diante desse cenário, foi elaborada uma revisão de literatura, sendo o SciELO, o Portal de Periódicos da CAPES, o PubMed e o Google Scholar as plataformas e bases de dados científicos adotadas no estudo para a etapa do levantamento bibliográfico, com o uso de palavras-chave. Os resultados da pesquisa, evidenciam que a técnica de fitorremediação, apresenta-se como uma opção viável e ecológica no processo de remediação de poluentes de ambientes como a água. Além disso, o estudo viabilizar um suporte teórico sintetizado de natureza qualitativa que contribui para entendimento desse fenômeno, proporciona novas perspectivas e favorece o processo de identificação de lacunas em futuras investigações, relacionadas a temática da fitorremediação, como estratégia promissora quanto a preservação e conservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Fitorremediação. Poluição. Recursos hídricos.

ABSTRACT - The search for sustainable alternatives to mitigate the effects of water pollution is an urgent global demand. Water is a strategic natural resource that is essential for organisms and production systems, and its availability in terms of quantity and quality is fundamental. Given this scenario, a literature review was conducted, using SciELO, the CAPES Journal Portal, PubMed, and Google Scholar as the scientific platforms and databases adopted in the study for the bibliographic survey stage, with the use of keywords. The results of the research show that the phytoremediation technique is a viable and ecological option in the process of remediating pollutants from environments such as water. In addition, the study provides a synthesized theoretical support of a qualitative nature that contributes to the understanding of this phenomenon, provides new perspectives, and favors the process of identifying gaps in future investigations related to the theme of phytoremediation as a promising strategy for the preservation and conservation of water resources.

Keywords: Phytoremediation. Pollution. Water resources.



INTRODUÇÃO

O destaque para questões ambientais, manifestou-se principalmente com a expansão da industrialização no século XVIII e o consecutivo e intenso processo de urbanização. O acelerado aumento populacional, acompanhado da operação contínua das fábricas, são alguns dos fatores responsáveis pela severa poluição do solo, água e ar. Além disso, a exploração e o consumo excessivo de recursos naturais, sem considerar a capacidade de regeneração, desencadearam impactos prejudiciais em escala global (Cavalcanti et al., 2021).

A poluição dos recursos hídricos é caracterizada pela contaminação por substâncias químicas, elementos radioativos ou ainda organismo patogênicos, que podem modificar as propriedades físicas, químicas e biológicas da água. Esse fenômeno pode inviabilizar o seu uso, além de causar danos aos ecossistemas aquáticos e disseminar doenças à população (Hirata, 2009; Reis; Brandão, 2013).

A água é um recurso natural estratégico, sendo essencial para todos os organismos, manutenção da biodiversidade e para a maioria dos processos produtivos como geração de hidroeletricidade, produção de alimentos e desenvolvimento industrial, sendo fundamental a sua disponibilidade em quantidade e qualidade (Meybeck et al, 1996). O Brasil é uma nação privilegiada em recursos hídricos superficiais de água doce, embora o sistema apresente vulnerabilidade a poluição por diversos contaminantes como óleos, pesticidas e corantes (Braile et al., 1993).

Diante da viabilidade técnica e econômica a fitorremediação, revela-se como uma alternativa promissora no país (Andrade et al., 2007). O termo fitorremediação (fito = planta e remediação = corrigir), refere-se ao uso sistemas vegetais como árvores, arbustos, plantas rasteiras e aquáticas e de sua microbiota com o fim de remover, degradar ou isolar substâncias tóxicas como compostos inorgânicos, hidrocarbonetos derivados do petróleo, herbicidas e resíduos orgânicos industriais do ambiente como água e solo (Pletsch; Charlwood; Araújo, 1999).

A fitorremediação é uma estratégia de descontaminação que remove poluentes do ambiente ou converter em formas menos prejudiciais aos seres vivos (Pilon-Smits, 2005). A recuperação do Rio Sena na França a partir de jardins filtrantes compostos por macrófitas, construindo em um local que anteriormente tratava-se de um antigo lixão e transformou-se em um parque - *Parc Du Chemin de l'Île* – representa um exemplo mundial de comprovação dos benefícios do uso dessa técnica (Pinheiro, 2017).

O desenvolvimento sustentável, conforme a Organização das Nações Unidas (ONU), apresenta 17 objetivos que visam à melhoria da qualidade de vida no planeta. Dentre eles, cabe destacar o objetivo 6 que busca: “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” (Brasil, 2017), contribuindo para amparar a importância do presente estudo. Desse modo, o trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica para examinar como a fitorremediação, revela-se como uma alternativa sustentável para mitigar os impactos da poluição dos recursos hídricos.



MATERIAIS E MÉTODOS

Seguindo o entendimento de Gil (2008), a pesquisa foi conduzida com base em um levantamento bibliográfico, aplicando o uso de materiais já publicados por outros autores tais como livros, artigos científicos, dissertações e teses que serviram de base teórica para a elaboração do estudo.

O SciELO, o Portal de Periódicos da CAPES, o PubMed e o Google Scholar foram as plataformas e bases de dados científicas utilizadas no processo de investigação bibliográfica. Para a busca, empregaram-se as palavras-chave fitorremediação, poluição e recursos hídricos. Esse critério de seleção visou fazer uma filtragem direcionada e estratégica, com o intuito de sintetizar as principais contribuições teóricas referentes à temática central do estudo, excluindo-se as publicações que não apresentavam ao menos um dos termos selecionados. Adicionalmente, foram excluídos artigos duplicados, incompletos e resumos de trabalhos.

Realizada a etapa de seleção, procedeu-se à leitura e sistematização do material da pesquisa que adota uma natureza de abordagem qualitativa. Conforme aponta Calil e Arruda (2004), quanto a funcionalidade a pesquisa qualitativa se propõe a investigar dados descritivos de uma situação ou fenômeno. Nesse sentido, o presente estudo, visou colocar em evidência o fenômeno da fitorremediação e sua aplicação para minimizar os efeitos da poluição dos recursos hídricos. Os resultados do procedimento metodológico adotado, viabilizou a análise de seis tópicos gerais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A poluição dos recursos hídricos

A poluição hídrica é um dos principais desafios ambientais e de saúde pública, sendo sobretudo consequência de ações humanas, como o descarte de efluentes domésticos e industriais com tratamento insatisfatório ou sem tratamento em corpos hídricos. Essa situação se agrava quando a água superficial contaminada é usada para o abastecimento (Meller et al., 2017). O crescimento populacional, a destruição de aquíferos por atividades de mineração, o consumo excedente e o elevado desperdício são desafios frente a busca da sociedade para assegurar a disponibilidade de água doce (Brasil, 2009; Mekonnen; Hoekstra, 2016).

A contaminação dos cursos de água, solos e lençol freático por metais pesados, retrata umas das consequências da intensa degradação ambiental em massa vivenciada pela sociedade atual, sendo o uso incorreto e excessivo de agroquímicos, principalmente pesticidas e fertilizantes um dos fatores responsáveis por esse cenário. Além disso, o intenso desenvolvimento de atividades industriais e de mineração também se configuram como agentes responsáveis por essa deterioração do meio ambiente em larga escala (Romeiro et al., 2007).

A deposição final de efluentes urbanos diretamente em corpos hídricos, diante da deficiência de tratamentos de esgotos domésticos, gera sérios problemas ambientais nas cidades como a poluição da água (Almeida et al., 2014). Conforme Martínez et al. (2017), o chorume é um líquido gerado pela decomposição anaeróbia das substâncias contidas nos resíduos, sendo considerado uma grave ameaça as águas subterrâneas, visto que esse efluente pode atingir as



camadas mais profundas dos aterros, resultando em um grande desafio de ordem ambiental e de saúde pública.

O descarte inadequado de resíduos que contêm metais pesados como pilhas, baterias e tintas, pode ocasionar a liberação de elementos químicos com alta taxa de poluição, sendo essas substâncias prejudiciais ao homem e ao meio ambiente, podendo ser lixiviadas e contaminar o solo, as águas superficiais e subterrâneas, além de afetar a fauna e a flora das regiões afetadas (Piaz; Ferreira, 2011; Laner et al., 2012; Felicori et al., 2016). O descarte de efluentes no solo, provenientes de ações antrópicas, provoca alterações e contaminação nas águas subterrâneas e lençóis freáticos (Luiz et al., 2017).

A aquicultura é um setor da produção de organismos aquáticos que promove benefícios econômicos e sociais, contudo levanta preocupações ambientais, principalmente devido aos efluentes produzidos e à forma como esses resíduos são dispostos nos ambientes aquáticos (Henry-Silva; Camargo, 2006). O efluente gerado por essa atividade em geral, apresenta elevada concentração de nutrientes como fósforo, nitrogênio, matéria orgânica e material particulado. Além disso, pode conter resíduos de produtos químicos usados no controle sanitário dos organismos cultivados (Lin et al., 2002; Anh et al., 2010; Sipaúba-Tavares, 2013).

O processo de fitorremediação

Em ambientes contaminados, as plantas podem reagir de duas maneiras: sendo sensíveis, apresentando sintomas de toxicidade, ou sendo tolerantes, criando mecanismos para se protegerem dos efeitos prejudiciais das substâncias químicas (Lasat, 2002). Segundo Raskin et al. (1994), a fitorremediação é uma técnica que se baseia em processos naturais onde as plantas, muitas vezes com o auxílio da microbiota presente na rizosfera, atuam na degradação, estabilização e/ou remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Em contato com o contaminante, as plantas reajustam seu metabolismo, o que pode incluir o acúmulo de compostos e a liberação de exsudatos e enzimas que promovem transformações bioquímicas, via estímulo microbiano (Sousa, 2018). De acordo com Carman, Crossman e Gatliff (1998), a planta pode agir sobre o poluente de forma direta, removendo ou capturando os contaminantes para posterior degradação interna, ou indiretamente, pela liberação de compostos pelas raízes que estimulam a atividade microbiana na rizosfera.

A estratégia de fitorremediação se baseia em uma relação sinérgica natural entre plantas, microrganismos e ambiente, não exigindo técnicas de engenharia ou escavação intensiva (Frick et al., 1999). As plantas possuem um mecanismo enzimático multifuncional que atuam na desintoxicação de contaminantes (Sandermann, 1994; Schaffner et al., 2002), sendo que algumas espécies apresentam aptidões específicas para realizar a fitodegradação de certos poluentes xenobióticos (Newman; Reynolds, 2004).

A fitorremediação tem como base a seletividade natural ou adquirida, que determinadas espécies manifestam em relação a certos tipos compostos ou mecanismos de ação. Essa característica é comum em espécies agrícolas e daninhas tolerantes a herbicidas. A seletividade se deve ao fato de que os compostos orgânicos podem ser translocados para outros tecidos da planta e, em seguida, volatilizados; podem passar por degradação parcial ou total; ou ser transformados em compostos menos tóxicos, sendo combinados e/ou ligados a tecidos vegetais (Accioly; Siqueira, 2000; Scramin et al., 2001).

Um sistema radicular profundo e denso, alta taxa de crescimento e geração de biomassa, tolerância ao contaminante e a facilidade no manejo/poda são algumas das características que determinadas espécies de plantas possuem, que favorecem um programa de fitorremediação (Cunningham et al., 1996; Pivetz, 2001; Singh; Jain, 2003). Segundo Coutinho e Barbosa



(2007), em alguns casos pode ocorrer do poluente ser altamente tóxico às plantas, especialmente em locais onde ocorrem misturas de poluentes, comprometendo o processo de seleção das plantas a serem empregadas.

As técnicas de fitorremediação

A fitorremediação pode ser classificada dependendo do método a ser aplicado, sendo os mais conhecidos: fitoextração, fitoestabilização, fitoestimulação, fitovolatilização e fitodegradação. Cada uma dessas estratégias, apresentam propriedades que suprimem ou otimizam o seu uso, dependendo das características da natureza do poluente e das particularidades do ambiente que se deseja descontaminar (Mepherston, 2007). Essas técnicas não se excluem mutualmente, podendo ocorrer de forma simultânea e, com isso, contribuir para aumentar a eficiência do processo de remediação da área (Odjegba; Fasidi, 2007).

A fitoextração é um processo de remediação em que plantas específicas são usadas para absorver e acumular contaminantes do solo, água e ar em seus tecidos, sem degradá-los. Após o cultivo em áreas contaminadas, as plantas são colhidas e descartadas adequadamente, resultando na remoção dos poluentes do ambiente (Andrade; Tavares; Mahler, 2007). A fitostabilização é uma técnica que emprega determinadas espécies de plantas para imobilizar contaminantes no solo e em águas subterrâneas, por meio do processo de absorção nas raízes de contaminantes presentes na solução ao redor da zona radicular (Vesely; Tlustoš; Száková, 2012; Rajkumar; Ma; Freitas, 2013).

A fitoestimulação refere-se ao processo de introdução de certas espécies de plantas em área poluída favorecendo, o estímulo da biodegradação microbiana, por meio da liberação de exsudatos radiculares e/ou fornecimento de tecidos vegetais, que servem como fontes de nutrientes para os microrganismos. Esses exsudados promovem o crescimento e a atividade metabólica dos microrganismos, impulsionando a biodegradação de poluentes orgânicos e inorgânicos (Andrade; Tavares; Mahler, 2017).

A fitovolatilização é uma estratégia de remediação que consiste na capacidade que certas plantas possuem de absorve ou incorporar contaminantes em seus tecidos, seguida por sua conversão biológica para forma volátil e posterior liberação na atmosfera. Nesse processo, a planta pode volatilizar e liberar por meio da transpiração tanto o poluente original quanto o produto resultante da metabolização, ou seja, o composto já degradado. Essa técnica é especialmente aplicável em poluentes inorgânicos como o arsênio (As) e selênio (Se) (Hansen et al., 1998; Rugh et al, 1996).

A fitodegradação é uma técnica onde os contaminantes são absorvidos pelas plantas, principalmente pelas raízes e metabolizados por processos de catabolismo ou anabolismo em formas menos tóxicas ou em subprodutos menos nocivos. Durante o processo, as plantas usam suas enzimas para degradar, estabilizar ou volatilizar os poluentes, contribuindo para descontaminação do ambiente desejado. Essa estratégia é especialmente aplicada na remediação de compostos orgânicos (Andrade; Tavares; Mahler, 2007).



Flora aplicada à Fitorremediação

Diversas espécies de plantas como gramíneas, leguminosas, hortaliças, árvores e várias outras monocotiledôneas e dicotiledôneas, apresentam potencial para aplicação em programas fitorremediação (Schnoor, et al., 1995; Cunningham et al., 1996; Merkl; Schultze-Kraft; Infante, 2004). Esteves (1998), aponta que macrófitas aquáticas, quando manejadas de forma adequada e efetiva, removem metais tóxicos que são danosos aos corpos hídricos.

Plantas que conseguem acumular e tolerar grandes concentrações de metais pesados em suas raízes são denominadas como hiperacumuladoras. Essas plantas apresentam aptidão para armazenar nos tecidos concentrações de cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), chumbo (Pb) ou níquel (Ni) por até 0,1% de massa seca (Baker; Brooks, 1989). O aguapé (*Eichhornia crassipes*), capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), taboa (*Typha domingensis*) e alface-d'água (*Pistia stratiotes*) são macrófitas aquáticas que apresentam características favoráveis para a implantação em programas de fitorremediação (Mufarrege et al., 2014; Rezanía et al., 2015; Strungaru et al., 2015).

O aguapé é observado como uma planta purificadora, visto que o seu sistema radicular atua como um filtro mecânico com capacidade de absorver material particulado (orgânico e mineral) presente em corpos d'água (Tavares, 2009; Pompêo, 1996). O capim vetiver apresenta eficiência na extração de uma ampla gama de contaminantes que engloba, metais pesados como níquel (Ni), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e selênio (Se), além do seu potencial para remover elementos como nitrogênio, fósforo e sulfato, tanto do solo quanto da água (Teixeira, 2019; Girardello, 2015).

A alface-d'água vem sendo investigada como agente fitorremediador de substâncias xenobióticas como os pesticidas. Em cultivo hidropônico, essa planta apresenta resultados promissores quanto à redução das concentrações de pesticidas (Rosa, 2013). Segundo Sousa (2018) a conhecida acácia-branca (*Moringa oleífera*), conquistou destaque global principalmente pela sua aplicação em processos de purificação de águas contaminadas. As sementes dessa planta são utilizadas como coagulante natural em diversos países do continente africano e asiático.

Ambientes a serem descontaminados por fitorremediação, podem em alguns casos apresentarem misturas de poluentes (Coutinho; Barbosa, 2007). Áreas com esse contexto de fusão de contaminantes manifestam uma complexidade química elevada, o que dificulta mais ainda o processo de seleção de plantas. Cada planta apresenta características fisiológicas e morfológicas, na qual a correta seleção a torna mais estrategicamente competitiva e favorável a depender das condições do ambiente em que será implantado um programa de fitorremediação.

Cenários de aplicações da fitorremediação

Em seu estudo Borges e Sipaúba-Tavares (2017) utilizaram três macrófitas, sendo uma flutuante (*Eichhornia crassipes*) e duas emergentes (*Typha domingensis* e *Cyperus giganteus*) em um sistema de *wetland* visando a remediação de efluente de ricultura, com a remoção de 90% dos coliformes termotolerantes, 50% de nitrato, 40% de nitrito e 15% de fósforo.

O estudo de Chandanshive et al. (2017), avaliou o potencial das macrófitas *Typha angustifolia* (taboa) e *Paspalum crobiculatum* (macrófita aquática encontrada na Índia), usadas de forma combinada (consórcio-TP), na remoção de corantes de efluentes de uma indústria têxtil. Essa estratégia de consórcio revelou-se altamente promissora na redução de importantes



indicadores de poluição em 48 horas, como a Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO e Demanda Química de Oxigênio-DQO (75% cada), Total de Sólidos Dissolvidos-TDS (65%) e Turbidez (76%), evidenciando o seu valor como uma alternativa promissora em programas de tratamento de águas residuais.

Almeida (2011), destaca que o capim vetiver, revela-se como uma planta promissora no tratamento de áreas contaminadas por pilhas de rejeitos de mineração, visto que se trata de uma planta hiperacumuladora com capacidade de reter as partículas dos poluentes em seu sistema radicular.

Visando mitigar os efeitos danosos do uso indiscriminado de herbicidas, surgem as pesquisas com a fitorremediação nesse segmento. Oliveira, Branco e Lino (2017), descreveram em seus estudos o potencial do conhecido feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), para a remediação de herbicidas como o *imazetapir* e *imazapique* e Santos et al. (2006), para o herbicida *trifloxysulfuron-sodium*.

O processo de fitorremediação, apresenta-se como uma alternativa sustentável para o tratamento da parte líquida do chorume com o uso do aguapé (Haag; Minami, 1988). Conforme o estudo de Abrantes (2009), a taboa, revela-se como uma opção promissora para ser aplicada como filtro biológico no tratamento de esgotos, podendo atuar na remoção de determinados metais pesados.

Segundo Timm (2015), o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de águas residuárias, propicia a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, metais pesados e outras substâncias, apresentando ainda resultados significativos na redução dos níveis de DBO e DQO.

Em uma pesquisa conduzida em ambiente controlado, Martins (2005), observou que a utilização do *Polygonum hydropiperoides* e *Thypha dominguensis* no tratamento de efluentes de tanques de piscicultura por meio da técnica de fitorremediação na região da bacia do Iraí no estado do Paraná, revelou resultados satisfatórios na remoção de fósforo e nitrogênio.

Fitorremediação - potencialidades e limitações

Os programas de fitorremediação apresentam um alto potencial de uso, em função das vantagens identificadas frente as outras técnicas de remediação de contaminantes existentes no mercado. Dentre esses benefícios Procópio et al. (2009), destaca o uso de energia solar, o custo mais baixo, a possibilidade de implementação com um menor desequilíbrio ecológico, o fato de ser ambientalmente e esteticamente mais promissor e o elevado índice de aceitação pública de aplicação pela sociedade.

Em sua pesquisa Procópio et al. (2009), ainda aborda que apesar do potencial comprovado, a implantação da técnica de fitorremediação apresenta limitações como o a complexidade no processo de seleção de plantas, a necessidade do contaminante está dentro da área de abrangência do sistema radicular, o risco de contaminação da cadeia alimentar, as restrições climáticas e edáficas que podem comprometer o desenvolvimento das plantas e o tempo de tratamento, visto que os resultados dessa estratégia não são imediatos, podendo levar semanas, meses e até anos.

Uma estratégia alternativa, visando aumentar a absorção de contaminantes pelas plantas é o investimento em programas de melhoramento genético de plantas com potencial fitorremediador (Gardea-Torresdey et al., 2005). Em seu estudo Greco (2010), observou que além do acúmulo de metais tóxicos, a aguapé apresenta uma eficiência de remoção de 87,98% de nitrogênio amoniacal (N-NH₃) e teor de celulose de 20,2%. Além disso, a autora ainda evidencia que espécies utilizadas em tratamento de efluentes, por meio do método de



fitorremediação, apresentam uma elevada aptidão, para serem reaproveitadas como futuros combustíveis e geradores de energia, devido a seus elevados teores de celulose.

Miller (1996), destaca que é desafiador encontrar uma única planta que detenha todas as características desejáveis, mas a espécie selecionada deve concentrar o maior número possível delas. Além disso, embora a maioria dos estudos avalie plantas individualmente, é possível aplicar várias espécies no mesmo local, simultaneamente ou em etapas, a fim de remover múltiplos contaminantes.

A implantação de um sistema de fitorremediação em uma área que demanda resultados rápidos quanto ao processo de descontaminação, pode não ser a recomendação mais viável, visto que apesar dos múltiplos prós dessa técnica, um fator limitante é o tempo de tratamento para o alcance dos efeitos desejados. O investimento em programas de seleção artificial de plantas com potencial fitorremediador, revela-se como caminho promissor na busca para superar as limitações desse método. A aplicação na agroenergia, mostra-se como alternativa sustentável para os resíduos das plantas que são usadas em um programa de fitorremediação.

CONCLUSÕES

A poluição dos recursos hídricos é um dos grandes desafios ambientais da sociedade frente a busca pelo desenvolvimento sustentável. A água é um recurso natural estratégico, primordial para os organismos e para a realização dos processos produtivos, sendo fundamental a sua disponibilidade em quantidade e qualidade.

A análise da literatura evidencia que a fitorremediação, revela-se como uma alternativa sustentável e promissora no processo de remediação de contaminantes, de forma que venha remover ou degradar poluentes do ambiente como a água ou converter em formas menos prejudiciais aos seres vivos, contribuindo para mitigar os impactos da poluição dos recursos hídricos.

O estudo, evidenciou que a aplicação da técnica fitorremediação apresenta vantagens e limitações a serem superadas. Essa análise contribui para compreensão desse fenômeno global e possibilita o desenvolvimento de novas visões e na identificação de lacunas para futuras pesquisas relacionadas à busca por estratégias sustentáveis para a preservação e conservação dos recursos hídricos.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram que o trabalho não possui conflito de interesses.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, L. L. M. **Tratamento de esgotos sanitários em sistema alagados construídos utilizando *Typha Angustifolia* e *Phragmites australis***. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do meio ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 299-352, 2000.



- ALMEIDA, E. A. P. **Avaliação do potencial da espécie *Vetiveria zizanioides* na fitorremediação de metais-traço presentes em ambientes aquáticos.** 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- ALMEIDA, R. A.; OLIVEIRA, L. F. C.; KLIEMANN, H. J. Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 1, p. 2974-2981, 2014.
- ANDRADE, D. C.; TAVARES, M. E.; MAHLER, C. F. Fitoestimulação na remediação de áreas contaminadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 213-219, 2017.
- ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 176 p.
- ANH, P. T. et al. Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 872-882, 2010.
- BAKER, A. J.; BROOKS, R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, v. 1, n. 2, p. 81-126, 1989.
- BORGES, F. F.; SIPAÚBA-TAVARES, L. H. Treatment of Bullfrog Farming Wastewater in a Constructed Wetland. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 9, p.578-589, 2017.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias.** São Paulo: CETESB, 1993.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional de Águas Subterrâneas.** 2009. Disponível em:<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/programa-nacional-de-aguas-subterraneas>. Acesso em 11 dez. 2025.
- BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Brasília, DF: Presidência da República, Secretaria de Governo, 2017. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- CALIL, R. C. C.; ARRUDA, S. L. S. Discussão da pesquisa qualitativa com ênfase no método clínico. In: GRUBTS, S.; NORIEGA, J. A. V. (Orgs.). **Método qualitativo: epistemologia, complementaridades e campos de aplicação.** São Paulo: Vetor, 2004.
- CARMAN, E. P.; CROSSMAN, T. L.; GATLIFF, E. G. Phytoremediation of No. 2 fuel oil contaminated soil. **Journal of Soil Contamination**, v. 7, n. 4, p. 455-466, 1998.
- CAVALCANTI, R. C. M. et al. Variação da aplicabilidade da fitorremediação e seus benefícios em ambientes contaminados. **Revista Interdisciplinar e do Meio Ambiente (RIMA)**, v. 3, n. 1, e133, 2021.



- CHANDANSHIVE, V. V. et al. Co-plantation of aquatic macrophytes *Typha angustifolia* and *Paspalum scrobiculatum* for effective treatment of textile industry effluent, in India. *J. Hazard. Mater.*, v. 338, p. 1-34, 2017.
- COUTINHO, H. D; BARBOSA, A. R. **Fitorremediação**: considerações gerais e características de utilização. *Silva Lusitana*, Lisboa, v. 15, n. 1, p. 103-117, 2007.
- CUNNINGHAM, S. D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Advances in Agronomy*, v. 56, p. 55-114, 1996.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia** 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, FINEP, 1998. 575 p.
- FELICORI, T. C. et al. Identificação de áreas adequadas para a construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem na mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 547-560, 2016.
- FRICK, C. M.; FARRELL, R. E.; GERMIDA, J. J. **Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites**. Saskatoon, SK: University of Saskatchewan, 1999. 88 p. Relatório Técnico submetido à Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC), Calgary, AB, 1999.
- GARDEA-TORRESDEY, J. L. et al. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, v. 249, p.1797- 1810, 2005.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo, SP: Atlas, p.75-88, 2008.
- GIRARDELLO, T. **Avaliação da eficiência do capim vetiver na remoção de nutrientes em lagoas de tratamento de efluente industrial**. 2015. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) –Universidade Federal da Fronteira Sul, Riqueza, 2015.
- GRECO, M. F. P. S. **Estudo exploratório de macrófitas aquáticas: potencial de fitorremediação (N-NH₃) e de aproveitamento de biomassa**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Ambiental) - Universidade de Santa Cruz do Sul- UNISC, Santa Cruz do Sul, 2010.
- HAAG, H. P.; MINAMI, K. **Nutrição mineral de hortaliças**: requerimento de nutrientes pela cultura da beterraba. 2 ed. Campinas, SP: Fundação Cargill, p. 52-70, 1988.
- HANSEN, D. et al. Selenium removal by constructed wetlands: Role of biological volatilization. *Environmental Science and Technology*, v. 32, p.591-597,1988.
- HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Eficiência de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes de viveiro de tilápia do Nilo. *Scientia Agricola*, v. 63, n. 5, p.433-438, 2006.



HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a terra**. São Paulo: Cia. Ed. Nacional, 2009.

LANER, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v. 32, p. 498- 512, 2012.

LASAT, M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. **Journal of Environmental Quality**, v. 31, p. 109–120, 2002.

LIN, Y. F. et al. Nutrient Removal from Aquaculture Wastewater Using a Constructed Wetlands System. **Aquaculture**, v. 209, ed 1-4, p.169-184, 2002.

LUIZ, M. B. et al. Fitorremediação de aquíferos contaminados por nitrato. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2016, São Paulo. **Anais ...**, São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, p. 1 – 16, 2017.

MARTÍNEZ, J.; ORTIZ, A.; ORTIZ, I. State-of-the-art and perspectives of the catalytic and electrocatalytic reduction of aqueous nitrates. **Applied Catalysis B Environmental**, v. 207, p. 42–59, 2017.

MARTINS, A. P. L. **Capacidade do *Polygonum hydropiperoides* e *Thypha domingensis* na Fitorremediação de Efluentes de Tanques de Piscicultura na Região da Bacia do Iraí**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MCPHERSON, A. **Monitoring phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils in a closed and controlled environment**. 2007. 206 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2007.

MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A.Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, v. 2, ed. 2, 2016.

MELLER, G. S. et al. **Controle da poluição**. Porto Alegre: Editora Sagah, 2017.

MERKL, N.; SCHULTZE-KRAFT, R.; INFANTE, C. Phytoremediation in the tropics – The effect of Crude Oil on the Growth of Tropical Plants. **Bioremediation Journal**, v. 8, n. 3-4, p. 177-184, 2004.

MEYBECK, M. et al. **Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes**. UNEP/WHO, 1996, 383p.

MILLER, R. R. **Phytoremediation**, 1996. Disponível em:<<http://www.gwrtac.org>>. Acesso em: 11 dez. 2025.

MUFARREGE, M. M. et al. Metal dynamics and tolerance of *Typha domingensis* exposed to high concentrations of Cr, Ni and Zn. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 105, p. 90–96, 2014.



NEWMAN, L. A.; REYNOLDS, C. M. Phytodegradation of organic compounds. **Curr. Opin. Biotechnol**, v. 15, p.225-30, 2004.

OBJEGBA, V. J.; FASIDI, I. O. Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia carassipes*. **The Environmentalist**, v. 27, p. 349-355, 2007.

OLIVEIRA, L. H. S.; BRANCO, E. P.; LINO, J. S. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas imazetapir e imazapique. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 4, n. 4, p. 78-111, 2017.

PIAZ, J. F. D.; FERREIRA, G. M. V. Gestão de resíduos sólidos domiciliares urbanos: o caso do município de Marau, RS. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, p. 33-47, 2011.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, p.15-39, 2005.

PINHEIRO, M. B. **Plantas para infraestrutura verde e o papel da vegetação no tratamento das águas urbanas de São Paulo**. 2017. 367 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade De São Paulo, São Paulo, 2017.

PIVETZ, P. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. EPA/540/S-01/ 500, **United States Environmental Protection Agency (EPA)**, Washington DC, 2001, 36 p.

PLETSCH, M.; CHARLWOOD, B. V.; ARAÚJO, B. S. Fitorremediação das águas e solos poluídos. **Biociência & Desenvolvimento**, v.11, n. 26, 1999.

POMPÊO, M. L. M. Culturas hidropônicas, uma alternativa não uma solução. **Sem. Reg. Ecol.**, São Carlos, v. 8, p. 73-80, 1996.

PROCÓPIO, S. O. et al. **Fitorremediação de Solos com Resíduos de Herbicidas**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32 p. (Documentos, 156). Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2009/doc_156>. Acesso em: 11 dez. 2025.

RAJKUMAR, M.; MA, Y.; FREITAS, H. Improvement of Ni phytostabilization by inoculation of Ni resistant *Bacillus megaterium* SR28C. **Journal of environmental management**, v. 128, p. 973-980, 2013.

RASKIM, I. et al. Bioconcentration of heavy metals by plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 5, n. 3, p. 285-290, 1994.

REIS, L. F. R.; BRANDÃO, J. L. B. Impactos ambientais sobre rios e reservatórios. In: CALIJURI; CUNHA. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.



REZANIA, S. et al. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 163, p. 125–133, 2015.

ROMEIRO, S. et al. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p.327-334, 2007.

ROSA, A. S. **Fitorremediação de pesticidas utilizados em lavouras de arroz através do cultivo hidropônico de alface (*Lactuca sativa* L.)**. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Pampa, Uruguai, 2013.

RUGH, C. L. et al. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene. **Proceeding National Academic Science – USA**, v. 93, p.3182-3187, 1996.

SANDERMANN, H. Higher plant metabolism of xenobiotics: the green liver concept. **Pharmacogenetics**, v. 4, p.225-41, 1994.

SANTOS, J. B. et al. Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L). DC.). **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p.444-449, 2006.

SCHAFFNER A. et al. Genes and enzymes for in-planta phytoremediation of air, water and soil. **Acta Biotechnol**, v. 22, p.141-51, 2002.

SCHNOOR, J. L. et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. **Environmental Science & Technology**, v. 29, n. 7, p. 318-323, 1995.

SCRAMIN, S.; SKORUPA, L. A.; MELO, I. S. Utilização de plantas na remediação de solos contaminados por herbicidas – levantamento da flora existente em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. In: MELO, I. S. et al. **Biodegradação**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, p. 369-371, 2001.

SINGH, O. V.; JAIN, R. K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. **Appl. Microbiol. Biotechnol**, v. 63, p.128-135, 2003.

SIPAÚBA-TAVARES, L. H. **Uso racional da água em aquicultura**. Jaboticabal: UNESP, 2013. 190p.

SOUSA, H. A. **Potencial de *Moringa oleifera* L. na fitorremediação de águas contaminadas pelo herbicida atrazina**. 2018. 69 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

STRUNGARU, S. A. et al. Influence of urban activity in modifying water parameters, concentration and uptake of heavy metals in *Typha latifolia* L. into a river that crosses an industrial city. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 13, p. 1–11, 2015.



TAVARES, S. R. L. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos.** 2009. 415 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

TEIXEIRA, D. L. S. et al. Fitorremediação de águas contaminadas: Uma revisão bibliográfica. In: III ENCONTRO ACADÊMICO DA ENGENHARIA AMBIENTAL DA EEL-USP, 2019, Lorena. **Anais...** Lorena: v. 3, p. 1–9, 2019.

TIMM, J. M. **Estudo de casos de wetlands construídos descentralizados na região do Vale do Sinos e Serra Gaúcha.** 2015. 188 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2015.

VESELÝ, T.; TLUSTOŠ, P.; SZÁKOVÁ, J. Organic acid enhanced soil risk element (Cd, Pb and Zn) leaching and secondary bioconcentration in water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) in the rhizofiltration process. **International journal of phytoremediation**, v. 14, n. 4, p. 335-349, 2012.