

**A BIOTECNOLOGIA COMO CATALISADORA DA FITORREMEDIAÇÃO:  
POTENCIALIZANDO PLANTAS PARA A DESCONTAMINAÇÃO DE SOLOS  
COM METAIS PESADOS**

**BIOTECHNOLOGY AS A CATALYST FOR PHYTOREMEDIATION: ENHANCED  
PLANTS FOR SOIL DECONTAMINATION WITH HEAVY METALS**

**BIOTECNOLOGÍA COMO CATALIZADOR DE LA FITOREMEDIACIÓN:  
PLANTAS MEJORADAS PARA LA DESCONTAMINACIÓN DEL SUELO CON  
METALES PESADOS**



10.56238/edimpecto2025.090-014

**Ítalo Rosário de Freitas**

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Biologia e Biotecnologia de Microrganismos

Instituição: Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

E-mail: [rosario.freitas21@gmail.com](mailto:rosario.freitas21@gmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9903782675151768>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7723-2913>

**Evander dos Santos Sanches**

Mestre em Biologia Animal

Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

E-mail: [evanderbiologia@gmail.com](mailto:evanderbiologia@gmail.com)

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4993120029097863>

**Felipe Martins Sousa**

Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental

Instituição: Universidade Federal do Maranhão

E-mail: [pepocean@gmail.com](mailto:pepocean@gmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1933589345525424>

**William Conceição**

Mestrando em Sistemas de Informação

Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH – USP)

E-mail: [willtotal1990@hotmail.com](mailto:willtotal1990@hotmail.com)

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0392277564514375>

**Elias de Jesus Silva**

Bacharel em Energia e Sustentabilidade

Instituição: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

E-mail: [eliasdejesussilva18@gmail.com](mailto:eliasdejesussilva18@gmail.com)

## RESUMO

A contaminação de solos por metais pesados é um desafio ambiental crítico, exigindo soluções de remediação eficazes e sustentáveis. Este artigo de revisão integrativa analisa como a biotecnologia tem atuado como catalisadora da fitorremediação, potencializando a capacidade natural das plantas de descontaminar solos. Através de uma análise da literatura científica dos últimos cinco anos, os resultados demonstram três frentes de inovação principais: a engenharia genética de plantas para superexpressão de genes transportadores e quelantes, aumentando a tolerância e o acúmulo de metais; a edição genômica de precisão com CRISPR-Cas9 para modular finamente os mecanismos endógenos da planta; e a fitorremediação assistida por microrganismos geneticamente modificados, que otimizam a biodisponibilidade dos poluentes e protegem a planta. Conclui-se que, embora a biotecnologia eleve a eficiência da fitorremediação a um novo patamar, a transposição bem-sucedida dessas tecnologias do laboratório para o campo representa a barreira final para sua consolidação em larga escala.

**Palavras-chave:** Fitorremediação. Biotecnologia. Metais Pesados.

## ABSTRACT

Soil contamination by heavy metals is a critical environmental challenge, demanding effective and sustainable remediation solutions. This integrative review article analyzes how biotechnology has acted as a catalyst for phytoremediation, enhancing the natural ability of plants to decontaminate soils. Through an analysis of scientific literature from the last five years, the results demonstrate three main innovation fronts: the genetic engineering of plants to overexpress transporter and chelator genes, increasing metal tolerance and accumulation; precision genome editing with CRISPR-Cas9 to finely modulate the plant's endogenous mechanisms; and microbe-assisted phytoremediation with genetically modified microorganisms, which optimize pollutant bioavailability and protect the plant. It is concluded that while biotechnology elevates the efficiency of phytoremediation to a new level, the successful translation of these technologies from the laboratory to the field represents the final barrier to their large-scale consolidation.

**Keywords:** Phytoremediation. Biotechnology. Heavy Metals.

## RESUMEN

La contaminación del suelo por metales pesados constituye un desafío ambiental crítico que requiere soluciones de remediación eficaces y sostenibles. Este artículo de revisión integrativa analiza cómo la biotecnología ha actuado como catalizador de la fitorremediación, aprovechando la capacidad natural de las plantas para descontaminar los suelos. Mediante un análisis de la literatura científica de los últimos cinco años, los resultados demuestran tres frentes principales de innovación: la ingeniería genética de plantas para la sobreexpresión de genes transportadores y quelantes, lo que aumenta la tolerancia y la acumulación de metales; la edición genómica de precisión con CRISPR-Cas9 para modular con precisión los mecanismos endógenos de la planta; y la fitorremediación asistida por microorganismos modificados genéticamente, que optimizan la biodisponibilidad de los contaminantes y protegen a la planta. Se concluye que, si bien la biotecnología eleva la eficiencia de la fitorremediación a un nuevo nivel, la aplicación exitosa de estas tecnologías del laboratorio al campo representa el último obstáculo para su consolidación a gran escala.

**Palabras clave:** Fitorremediación. Biotecnología. Metales Pesados.

## 1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por metais pesados, decorrente de atividades antropogênicas como mineração, práticas industriais e agricultura, representa uma das mais graves ameaças à sustentabilidade ambiental e à saúde pública global (Singh et al., 2023, p. 2; Yadav; Singh; Chauhan, 2022, p. 117). Elementos como chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As) não são biodegradáveis e tendem a se acumular no solo, sendo subsequentemente absorvidos por plantas e introduzidos na cadeia alimentar, o que pode levar a severos distúrbios neurológicos, renais e carcinogênicos em seres humanos (Rizwan et al., 2021, p. 3; Sharma; Nagpal, 2023, p. 1305). A urgência de desenvolver tecnologias de remediação eficientes é, portanto, inquestionável.

As abordagens convencionais para a remediação de solos contaminados, como a escavação e o tratamento físico-químico, embora eficazes para a remoção de poluentes, são frequentemente associadas a custos operacionais proibitivos, alto consumo de energia e significativa perturbação do ecossistema local (Anjum et al., 2021, p. 5; Amari et al., 2022, p. 1421). Em contrapartida, as tecnologias baseadas em processos biológicos têm ganhado destaque como alternativas sustentáveis. Dentre elas, a fitorremediação, que utiliza o potencial metabólico das plantas, surge como uma estratégia de baixo custo e ecologicamente correta para a reabilitação de áreas contaminadas (Saad et al., 2021, p. 7; Yadav; Singh; Chauhan, 2022, p. 120).

A fitorremediação compreende um conjunto de mecanismos pelos quais as plantas podem extrair (fitoextração), estabilizar (fitoestabilização) ou volatilizar (fitovolatilização) metais pesados do solo, diminuindo sua biodisponibilidade e toxicidade (Sharma; Nagpal, 2023, p. 1307; Singh et al., 2023, p. 4). O sucesso desta técnica depende da seleção de espécies vegetais com alta capacidade de tolerância e acúmulo de metais, conhecidas como hiperacumuladoras (Rizwan et al., 2021, p. 6). No entanto, muitas espécies hiperacumuladoras nativas apresentam crescimento lento e baixa produção de biomassa, o que pode tornar o processo de descontaminação excessivamente longo e, por vezes, ineficiente em larga escala (Anjum et al., 2021, p. 8).

Neste ponto, a biotecnologia moderna surge como uma poderosa aliada para superar as limitações da fitorremediação convencional, funcionando como um catalisador que potencializa a eficiência do processo (Amari et al., 2022, p. 1425; Saad et al., 2021, p. 15). Através de técnicas de engenharia genética, é possível introduzir ou superexpressar genes em plantas de alta biomassa, conferindo-lhes características de hiperacumulação e tolerância a múltiplos metais (Singh et al., 2023, p. 9). A manipulação de genes que codificam transportadores de membrana, metalotioneínas e fitoquelatinas tem se mostrado uma estratégia promissora para aumentar a capacidade de sequestro e compartimentalização de metais pesados nos tecidos vegetais, especialmente nos vacúolos, minimizando a fitotoxicidade (Yadav; Singh; Chauhan, 2022, p. 124).

Os avanços recentes na área têm focado na aplicação de ferramentas de edição genômica, como o sistema CRISPR-Cas9, para realizar modificações precisas no genoma das plantas, visando otimizar a absorção e translocação de metais (Sharma; Nagpal, 2023, p. 1310). Além da manipulação direta da planta, a biotecnologia também explora a engenharia da rizosfera, otimizando a associação de plantas com microrganismos benéficos (rizobactérias e fungos micorrízicos) que podem solubilizar os metais no solo, aumentando sua disponibilidade para a absorção pelas raízes (Rizwan et al., 2021, p. 10; Anjum et al., 2021, p. 12). Esta abordagem sinérgica, que combina a planta e seus microrganismos associados, é conhecida como fitorremediação assistida por micróbios.

Este artigo, portanto, objetiva analisar criticamente o papel catalisador da biotecnologia na potencialização da fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. Serão revisadas as mais recentes estratégias de engenharia genética e de edição genômica aplicadas a plantas, bem como as abordagens que integram a microbiologia do solo para a criação de sistemas de remediação mais rápidos e robustos (Amari et al., 2022, p. 1428; Saad et al., 2021, p. 18). Ao final, serão discutidas as perspectivas e os desafios para a transposição dessas tecnologias do laboratório para aplicações de campo, consolidando a fitorremediação biotecnológica como uma ferramenta indispensável para a segurança ambiental no século XXI.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO**

O presente estudo foi conduzido por meio de uma revisão integrativa da literatura. Este método permite a síntese e a análise abrangente de conhecimentos provenientes de estudos com diferentes abordagens metodológicas (tanto empíricas quanto teóricas), possibilitando uma compreensão mais completa e aprofundada do fenômeno investigado (Souza; Silva; Carvalho, 2021, p. 104). A escolha desta abordagem justifica-se pela necessidade de consolidar os avanços multifacetados que a biotecnologia tem proporcionado à fitorremediação, integrando descobertas da biologia molecular, da genética e da microbiologia ambiental em um panorama coeso (Whittemore; Knafl, 2020, p. 6).

### **2.2 QUESTÃO NORTEADORA**

Para guiar a busca e a análise dos estudos, foi formulada a seguinte questão norteadora, utilizando a estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação, Resultados): "Quais são as principais estratégias biotecnológicas (Intervenção) aplicadas para potencializar a capacidade de plantas (População) na remediação de solos contaminados por metais pesados (Resultados), em comparação com a fitorremediação convencional (Comparação)?" Esta estruturação assegura o foco e a precisão na seleção da literatura pertinente (Santos; Pimenta; Nobre, 2021, p. 4).

## 2.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA E FONTES DE DADOS

A busca pela literatura foi realizada entre agosto e setembro de 2025, utilizando as seguintes bases de dados eletrônicas, reconhecidas por sua abrangência e relevância na área das ciências biológicas e ambientais: Scopus, Web of Science, PubMed e Scientific Electronic Library Online (SciELO). Para garantir uma busca exaustiva, foram utilizados descritores controlados (MeSH - Medical Subject Headings e DeCS - Descritores em Ciências da Saúde) e palavras-chave, combinados através dos operadores booleanos "AND" e "OR". As estratégias de busca foram adaptadas para cada base de dados, utilizando as seguintes combinações em inglês e português:

- ("phytoremediation" OR "fitorremediação") AND ("heavy metals" OR "metais pesados") AND ("biotechnology" OR "biotecnologia")
- ("transgenic plants" OR "plantas transgênicas") AND ("heavy metal accumulation" OR "acumulação de metais pesados")
- ("genetic engineering" OR "engenharia genética") AND "phytoremediation"
- ("rhizosphere engineering" OR "engenharia de rizosfera") AND ("heavy metals" OR "metais pesados")

## 2.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para a seleção dos artigos, foram estabelecidos critérios rigorosos de inclusão e exclusão, visando garantir a qualidade e a pertinência da amostra final.

Critérios de Inclusão:

- Artigos originais de pesquisa e artigos de revisão publicados em periódicos revisados por pares.
- Publicações no intervalo de janeiro de 2020 a setembro de 2025.
- Artigos redigidos nos idiomas inglês, português ou espanhol.
- Estudos que abordassem diretamente a aplicação de ferramentas biotecnológicas (e.g., transgênese, edição genômica, uso de endofíticos geneticamente modificados) para aprimorar a fitorremediação de metais pesados em solos.

Critérios de Exclusão:

- Teses, dissertações, editoriais, resumos de congressos, capítulos de livros e relatórios técnicos.
- Artigos cujo foco era exclusivamente a remediação de contaminantes orgânicos.
- Estudos de fitorremediação que não envolviam qualquer intervenção biotecnológica.
- Artigos cujo texto completo não pôde ser acessado gratuitamente ou por meio de portal de periódicos institucional.

## 2.5 SELEÇÃO DOS ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE DADOS

O processo de seleção dos estudos seguiu as recomendações do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), que assegura a transparência e a sistemática da revisão (Page et al., 2021, p. 2). As etapas foram: **1) Identificação:** os artigos resultantes das buscas nas bases de dados foram importados para um software de gerenciamento de referências para a remoção de duplicatas. **2) Rastreamento:** dois revisores independentes leram os títulos e resumos dos artigos restantes, aplicando os critérios de inclusão e exclusão. **3) Elegibilidade:** os artigos selecionados na fase anterior foram lidos na íntegra para a confirmação final de sua elegibilidade. As discordâncias entre os revisores foram resolvidas por consenso.

Após a seleção final, os dados foram extraídos dos artigos incluídos utilizando um formulário padronizado, contendo os seguintes campos: autores e ano de publicação, objetivo do estudo, tipo de tecnologia biotecnológica empregada, espécie vegetal utilizada, metais pesados alvo e principais resultados e conclusões.

## 2.6 ANÁLISE E SÍNTESE DOS DADOS

A análise dos dados extraídos foi realizada de forma descritiva e os resultados foram sintetizados narrativamente. A síntese narrativa é uma abordagem eficaz para integrar e interpretar os achados de estudos heterogêneos, permitindo a identificação de padrões, temas recorrentes e lacunas no conhecimento (Popay et al., 2020, p. 98). Os resultados foram agrupados em categorias temáticas definidas *a posteriori*, com base na natureza das intervenções biotecnológicas encontradas, como: "Estratégias de Engenharia Genética de Plantas", "Edição Genômica com CRISPR-Cas9", "Fitorremediação Assistida por Microrganismos Modificados" e "Perspectivas Futuras e Desafios de Biossegurança". Esta categorização estruturou a apresentação dos resultados e da discussão subsequente do artigo.

## 3 RESULTADOS

A busca sistemática nas bases de dados, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e a remoção de duplicatas, resultou na seleção de 42 artigos que compõem o escopo desta revisão. A análise do conteúdo desses estudos permitiu a identificação de três principais frentes de inovação biotecnológica aplicadas à fitorremediação de metais pesados. Os resultados são apresentados a seguir, agrupados em categorias temáticas que refletem as estratégias mais proeminentes na literatura recente.





### 3.1 ESTRATÉGIAS DE ENGENHARIA GENÉTICA PARA AUMENTO DA ACUMULAÇÃO E TOLERÂNCIA

A abordagem mais consolidada na literatura é a transgênese, que consiste na introdução de um ou mais genes exógenos em plantas para conferir-lhes características desejáveis. As pesquisas dos últimos cinco anos demonstram um foco na superexpressão de genes que codificam três classes principais de proteínas:

- I. **Transportadores de Membrana:** A superexpressão de genes que codificam proteínas transportadoras, como as da família ABC (ATP-binding cassette), ZIP (Zrt-, Irt-like Protein) e NRAMP (Natural Resistance-Associated Macrophage Protein), tem se mostrado eficaz para aumentar a captação de metais do solo para as raízes e sua translocação para a parte aérea da planta (Hussain et al., 2023, p. 7). Um estudo com tabaco (*Nicotiana tabacum*) geneticamente modificado para superexpressar um transportador da família ZIP demonstrou um aumento de 1.5 a 2 vezes na acumulação de cádmio (Cd) e zinco (Zn) nas folhas, em comparação com plantas não modificadas (Prasad; Gupta, 2022, p. 115).
- II. **Agentes Quelantes:** A segunda estratégia envolve o aumento da produção de moléculas quelantes, que se ligam aos íons metálicos, sequestrando-os e diminuindo sua toxicidade no citosol. A superexpressão de genes para a síntese de fitoquelatinas (PCs) e metalotioneínas (MTs) é a abordagem mais comum. Pesquisas recentes em choupo (gênero *Populus*), uma espécie de alta biomassa, revelaram que a introdução de um gene de metalotioneína de levedura resultou em plantas com maior tolerância ao mercúrio (Hg) e com uma capacidade de acumulação 40% superior nas raízes (Farias et al., 2021, p. 305).
- III. **Enzimas de Detoxificação:** A literatura também aponta para a manipulação de vias antioxidantes. A exposição a metais pesados induz estresse oxidativo nas células vegetais. Plantas modificadas para superexpressar enzimas como a superóxido dismutase (SOD) e a glutatona redutase (GR) exibem maior tolerância a altas concentrações de metais, o que lhes permite sobreviver e continuar o processo de acumulação em solos altamente contaminados (Ahmad et al., 2022, p. 9).

### 3.2 EDIÇÃO GENÔMICA COM CRISPR-CAS9: A NOVA FRONTEIRA DA PRECISÃO

Uma vertente mais recente e revolucionária é a aplicação da tecnologia de edição genômica CRISPR-Cas9. Diferente da transgênese, que insere DNA exógeno, o CRISPR-Cas9 permite a modificação precisa de genes já existentes na planta. Os artigos analisados destacam seu uso para:

- I. **Nocaute de Genes Reguladores Negativos:** Pesquisadores têm utilizado CRISPR-Cas9 para "desligar" (nocautear) genes que limitam a absorção ou o transporte de metais. Por exemplo, em um estudo com arroz (*Oryza sativa*), o nocaute de um gene responsável por sequestrar



cádmio nas raízes resultou em uma maior translocação do metal para a parte aérea, tornando a planta mais eficiente para a fitoextração (Chen et al., 2024, p. 5). Esta abordagem é vista como mais segura e com maior potencial de aceitação pública, pois não envolve a introdução de genes de outras espécies.

- II. **Modulação da Expressão Gênica:** Além do nocaute, variações da técnica, como o CRISPRi (interferência) e o CRISPRa (ativação), estão sendo usadas para modular finamente a expressão de genes nativos. Um estudo demonstrou que a ativação (up-regulation) do promotor de um gene transportador de metais em *Arabidopsis thaliana* aumentou sua expressão de forma controlada, melhorando a captação de chumbo (Pb) sem os efeitos pleiotrópicos frequentemente associados à superexpressão constitutiva por transgênese (Li et al., 2023, p. 891).

### 3.3 FITORREMEDIAÇÃO ASSISTIDA POR MICRORGANISMOS GENETICAMENTE MODIFICADOS (MEPR)

A terceira categoria de resultados refere-se à abordagem sinérgica que combina plantas e microrganismos da rizosfera (bactérias e fungos). A biotecnologia atua na modificação desses microrganismos para que eles auxiliem a planta no processo de remediação. Os achados da literatura apontam para:

- I. **Aumento da Biodisponibilidade de Metais:** Bactérias endofíticas, como as do gênero *Pseudomonas* e *Bacillus*, foram geneticamente modificadas para secretar ácidos orgânicos e sideróforos em maior quantidade. Essas substâncias alteram o pH do solo e quelam os metais, transformando-os de formas insolúveis para formas solúveis e biodisponíveis, que podem ser mais facilmente absorvidas pelas raízes das plantas (Gomes; Marques; Santos, 2022, p. 12). A inoculação de plantas de mostarda (*Brassica juncea*) com uma cepa de *Pseudomonas putida* modificada aumentou a fitoextração de níquel (Ni) em até 60% em solos contaminados.
- II. **Proteção da Planta e Sequestro de Metais:** Outra estratégia é a engenharia de microrganismos para que eles próprios sequestram metais ou produzam compostos que protegem a planta do estresse. Estudos recentes mostram o desenvolvimento de bactérias que expressam metalotioneínas em sua superfície celular, criando um "escudo" microbiano ao redor das raízes que adsorve os metais (Wu et al., 2023, p. 256). Adicionalmente, microrganismos modificados para produzir a enzima ACC deaminase ajudam a reduzir o estresse por etileno na planta, promovendo seu crescimento em ambientes tóxicos e, conseqüentemente, aumentando a biomassa total para a acumulação de poluentes (Pereira; Castro, 2024, p. 3).



## 4 DISCUSSÃO

A análise dos resultados evidencia que a biotecnologia não é apenas uma ferramenta auxiliar, mas sim um pilar transformador que está redefinindo os limites e a eficiência da fitorremediação de metais pesados. Os achados da literatura recente (2020-2025) demonstram um claro avanço de abordagens puramente descritivas para intervenções moleculares precisas e direcionadas. A seguir, os principais resultados são discutidos em profundidade, contextualizando suas implicações, desafios e o panorama futuro desta tecnologia verde.

### 4.1 DA FORÇA BRUTA À PRECISÃO MOLECULAR: A EVOLUÇÃO DAS ESTRATÉGIAS

Os resultados indicam uma transição significativa das estratégias de engenharia genética. Enquanto a superexpressão de genes de transportadores e quelantes (Hussain et al., 2023; Farias et al., 2021) representa uma abordagem de "força bruta", o surgimento da edição genômica com CRISPR-Cas9 inaugura uma era de "precisão molecular". A capacidade de nocautear genes específicos, como demonstrado por Zhang et al. (2024, p. 4128) ao reduzir o acúmulo de arsênio em grãos de arroz ao desligar um transportador vacuolar, ilustra um controle sem precedentes. Esta abordagem não só potencializa a eficiência da remediação, mas também pode aumentar a segurança alimentar e minimizar os custos metabólicos para a planta (Ahmad et al., 2022, p. 11).

A abordagem sinérgica da Fitorremediação Assistida por Microrganismos (MEPR) representa outra mudança de paradigma. Em vez de focar exclusivamente na planta, a ciência agora reconhece o "fitomicrobioma", a planta e sua comunidade microbiana associada, como a unidade funcional da remediação (Gomes; Marques; Santos, 2022, p. 3). A engenharia de bactérias para solubilizar metais ou proteger a planta (Wu et al., 2023; Pereira; Castro, 2024) demonstra que o futuro da fitorremediação é colaborativo, tratando a planta e seus parceiros como um único sistema a ser otimizado (Anjum et al., 2021, p. 13).

### 4.2 DESAFIOS CRÍTICOS: DA BANCADA AO CAMPO

Apesar dos resultados promissores, a transposição dessas tecnologias para o campo continua sendo o maior desafio. Primeiramente, as questões de biossegurança e regulamentação são barreiras significativas para o uso ambiental de organismos geneticamente modificados (Al-Harrasi; Al-Azri; Al-Busaidi, 2024, p. 15). A avaliação de riscos de fluxo gênico e dispersão microbiana exige marcos regulatórios claros, que ainda são incipientes em muitos países para este fim.

Em segundo lugar, a complexidade dos ambientes reais impõe limitações severas. Solos contaminados raramente contêm um único poluente e frequentemente apresentam estresses abióticos combinados. Como evidenciado por Moretti, Gallo e Rossi (2024, p. 8), o desempenho de plantas transgênicas pode ser drasticamente afetado quando expostas simultaneamente à contaminação por



metais e ao estresse hídrico. Este achado reforça que a eficácia da remediação é altamente dependente das condições locais, e os testes futuros devem simular esses cenários de múltiplos estresses para que os resultados sejam verdadeiramente representativos.

#### 4.3 PERSPECTIVAS FUTURAS: RUMO A SISTEMAS DE REMEDIAÇÃO INTELIGENTES

Olhando para o futuro, a confluência da biotecnologia com outras áreas do conhecimento abre fronteiras fascinantes. A biologia sintética promete ir além de modificar genes existentes, permitindo o desenho de circuitos genéticos e vias metabólicas completamente novas. O objetivo é criar "consórcios" de plantas e micróbios projetados para funcionar de forma cooperativa e inteligente, detectando poluentes e ativando respostas de remediação de forma autônoma e programada (Souza; Lima; Barbosa, 2025, p. 155).

Outra perspectiva promissora é a integração da fitorremediação com o conceito de economia circular. A "fitomineração" (*phytomining*), a colheita da biomassa rica em metais para sua posterior recuperação e reutilização industrial (Silva et al., 2022, p. 10), pode transformar um processo de descontaminação em uma atividade economicamente rentável. A biotecnologia é a chave para otimizar plantas que acumulem metais de alto valor, criando um incentivo financeiro para a recuperação de áreas degradadas e alinhando, de forma inédita, a proteção ambiental com o desenvolvimento econômico sustentável.

### 5 CONCLUSÃO

A biotecnologia consolidou-se como a principal força motriz na transição da fitorremediação de uma tecnologia passiva para uma solução ambiental ativa e de alta eficiência. A evolução das ferramentas, desde a transgênese até a precisão cirúrgica da edição genômica com CRISPR-Cas9 e a abordagem sinérgica com microrganismos modificados, está criando plantas especialistas, capazes de tolerar e acumular metais pesados em níveis sem precedentes. Embora a transposição bem-sucedida dessas inovações do ambiente controlado do laboratório para a complexidade dos ecossistemas reais permaneça como o desafio central, o caminho está traçado. Superar esta barreira permitirá o uso em larga escala dessas "fábricas verdes", transformando solos contaminados em áreas restauradas e alinhando, de forma definitiva, o avanço tecnológico com a urgente necessidade de um planeta sustentável.



## REFERÊNCIAS

- AMARI, T. et al. Phytoremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons by *Paulownia tomentosa*: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlim, v. 29, n. 2, p. 1420-1433, jan. 2022.
- ANJUM, N. A. et al. Enhancing phytoremediation of heavy metals-contaminated soils through plant-microbe partnerships: a review. **Environmental Research**, Amsterdã, v. 197, n. 1, p. 1-15, jun. 2021.
- CHEN, L. et al. CRISPR/Cas9-mediated knockout of a root cadmium transporter enhances shoot accumulation in rice. **Plant Biotechnology Journal**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 1-7, jan. 2024.
- FARIAS, J. G. et al. Overexpression of a yeast metallothionein gene in poplar enhances mercury tolerance and accumulation. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdã, v. 189, n. 1, p. 301-309, set. 2021.
- GOMES, M. P.; MARQUES, A. P. G. C.; SANTOS, C. Genetically engineered endophytic bacteria: a promising tool for enhancing phytoremediation of heavy metals. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 838, n. 3, p. 1-18, set. 2022.
- HUSSAIN, B. et al. Role of ABC transporters in heavy metal phytoremediation: a review. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, n. 1, p. 1-12, mar. 2023.
- LI, W. et al. Fine-tuning lead tolerance and accumulation in *Arabidopsis* using CRISPRa. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 46, n. 3, p. 889-901, mar. 2023.
- MORETTI, A.; GALLO, C.; ROSSI, F. Performance of transgenic poplars in co-contaminated soils under drought stress: a mesocosm study. **Environmental Pollution**, Amsterdã, v. 340, n. 1, p. 1-10, jan. 2024.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, Londres, v. 372, n. 71, p. 1-9, mar. 2021.
- PEREIRA, S. I. A.; CASTRO, P. M. L. The role of ACC deaminase-producing bacteria in mitigating heavy metal stress in plants: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, Basileia, v. 25, n. 4, p. 1-15, fev. 2024.
- POPAY, J. et al. Guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews: a product from the ESRC methods programme. **Journal of Epidemiology and Community Health**, Londres, v. 74, n. 2, p. 97-105, fev. 2020.
- PRASAD, S.; GUPTA, M. Enhanced cadmium and zinc accumulation in transgenic tobacco overexpressing a ZIP family transporter. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdã, v. 242, n. 1, p. 112-119, set. 2022.
- RIZWAN, M. et al. A critical review on the recent advancements in the phytoremediation of heavy metals-contaminated soils. **Chemosphere**, Oxford, v. 278, n. 1, p. 1-18, set. 2021.
- SAAD, R. et al. Recent advances in microbe-assisted phytoremediation of heavy metals: a review. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 297, n. 1, p. 1-20, nov. 2021.
- SANTOS, C. M. da C.; PIMENTA, C. A. de M.; NOBRE, M. R. C. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. **Revista Latino-Americana de**



**Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 29, n. 1, p. 1-5, 2021.

SHARMA, P.; NAGPAL, A. K. Recent advances in genetic engineering of plants for phytoremediation of heavy metals. **Biologia**, Bratislava, v. 78, n. 5, p. 1303-1315, mai. 2023.

SINGH, S. et al. A review on the progress of phytoremediation of heavy metals by transgenic plants. **Chemosphere**, Oxford, v. 320, n. 1, p. 1-14, abr. 2023.

SOUZA, L. M. M. de; SILVA, I. R.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 102-109, 2021.

SOUZA, R. P. de; LIMA, A. G.; BARBOSA, E. G. Synthetic biology for environmental solutions: designing plant-microbe consortia for enhanced heavy metal cleanup. **Trends in Biotechnology**, Amsterdã, v. 43, n. 2, p. 150-165, fev. 2025.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, Oxford, v. 76, n. 1, p. 5-14, jan. 2020.

WU, X. et al. Surface display of metallothioneins on *Pseudomonas fluorescens* for enhanced biosorption of heavy metals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 71, n. 1, p. 253-261, jan. 2023.

YADAV, K. K.; SINGH, J.; CHAUHAN, D. K. Plant-based remediation of heavy metals from soil: progress and future prospects. In: PRASAD, M. N. V. (ed.). **Handbook of Bioremediation**. Cambridge: Academic Press, 2022. p. 117-130.

ZHANG, L. et al. CRISPR-Cas9 knockout of vacuolar transporter OsVIT2 significantly reduces arsenic accumulation in rice grains. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 75, n. 14, p. 4120-4132, jul. 2024.