**OPEN JOURNAL SYSTEMS**
ISSN: 2595-4431

**R**evista **B**rasileira de **M**eio **A**mbiente, v.14, n.3. 220-240 (2026)

Revista Brasileira de Meio Ambiente

*Santos et al*

# Espécies lenhosas promissoras para a fitorremediação de metais pesados em solos impactados pela mineração: uma revisão sistemática da literatura

Douglas Silva dos Santos[1]*, Paula Godinho Ribeiro[2], Wendel Valter da Silveira Pereira[3], Gabriel Caixeta Martins[4], Werner Damião Morhy Terrazas[5], Edmir dos Santos Jesus[6], Lucas Botelho Jerônimo[7]; Manoel Tavares de Paula[8]

[1]*Doutorando em Ciência Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil. (*Autor correspondente*:* eng.douglassantos60@hotmail.com)
[2]*Doutora em Ciência do solo, Museu Paraense Emílio Goeldi, Brasil.*
[3]*Doutor em Agronomia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Amazonas, Brasil.*
[4]*Doutor em Ciência do solo, Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Pará, Brasil.*
[5]*Doutor em Alimentos e Nutrição, Universidade do Estado do Pará, Brasil.*
[6]*Doutor em Ciências Climáticas, Instituto Tecnológico Vale, Pará, Brasil.*
[7]*Doutorando em Ciência Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil.*
[8]*Doutor em Ciência Agrárias, Universidade do Estado do Pará, Brasil.*

*Histórico do Artigo*: Submetido em: 25/06/2026 – Revisado em: 14/07/2026 – Aceito em: 30/10/2026

## R E S U M O

A fitorremediação é uma biotecnologia promissora para a recuperação de áreas contaminadas por metais pesados, principalmente pelo seu caráter ambientalmente amigável e de baixo custo. O presente estudo visa realizar uma revisão sistemática da literatura (2019–2024) para identificar as principais famílias botânicas e analisar as espécies arbóreas e arbustivas utilizadas na fitorremediação de solos contaminados por EPTs no contexto da mineração, bem como os principais mecanismos relacionados, buscando sistematizar seu uso e desempenho na remediação ambiental. No total, 1.492 trabalhos foram obtidos nas plataformas ScienceDirect, Pubmed e Scielo, os quais foram tratados por meio do software RAYYAN®. Desses trabalhos, 184 foram pré-selecionados e foi evidenciado que 54,9% abordaram as famílias Fabaceae, Salicaceae e Euphorbiaceae, com destaque para as espécies *Robinia pseudoacacia* L., *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall. e *Ricinus communis* L. As técnicas que podem ser utilizadas juntamente com essas espécies em pesquisas e programas de fitorremediação incluem a adição de materiais orgânicos (ácidos orgânicos de baixo peso molecular e biocarvão), aditivos inorgânicos (fosfato, adubo nitrogenado, Na2S) e a inoculação de microrganismos (fungos micorrízicos arbusculares e bactérias endofíticas). Esta revisão trouxe informações de três espécies rústicas, com boa produção de biomassa (raízes e parte aérea) e capazes de remediar solos contaminados com EPT. Tais informações poderão orientar futuros estudos visando a prospecção de novas espécies fitorremediadoras e pesquisas objetivando potencializar a capacidade de plantas em absorver e estabilizar EPT em solos impactados pela mineração.

**Palavras-Chaves**: Solos minerados, Biorremediação, Plantas fitorremediadoras, Elementos potencialmente tóxicos.

# Promising woody species for the phytoremediation of heavy metals in mining-impacted soils: a systematic literature review

## A B S T R A C T

Phytoremediation is a promising biotechnology for the recovery of areas contaminated by heavy metals, primarily due to its environmentally friendly nature and low cost. This study aims to conduct a systematic literature review (2019–2024) to identify key botanical families and analyze the tree and shrub species used in the phytoremediation of PTE-contaminated soils within the mining context, as well as the associated mechanisms, seeking to systematize their use and performance in environmental remediation. A total of 1,492 studies were retrieved from the ScienceDirect, PubMed, and SciELO platforms and processed using RAYYAN® software. Of these, 184 were pre-selected; the results showed that 54.9% focused on the Fabaceae, Salicaceae, and Euphorbiaceae families, with particular emphasis on the species *Robinia pseudoacacia* L, *Populus deltoids* W. Bartram ex Marshall. and *Ricinus communis* L. Techniques that can be employed alongside these species in phytoremediation research and programs include the addition of organic

Santos, D. S. dos, Ribeiro, P. G., Pereira, W. V. da S., Martins, G. C., Terrazas, W. D. M., Jesus, E. dos S., Jerônimo, L. B., & Paula, M. T. de. (2026). Espécies lenhosas promissoras para a fitorremediação de metais pesados em solos impactados pela mineração: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.14, n.3, p.220-240.

Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

materials (low-molecular-weight organic acids and biochar) and inorganic additives (phosphate, nitrogen fertilizer, Na2S), as well as the inoculation of microorganisms (arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria). This review provides information on three hardy species that exhibit high biomass production (roots and shoots) and the ability to remediate PTE-contaminated soils. Such information can guide future studies aimed at prospecting for new phytoremediating species and research focused on enhancing the capacity of plants to absorb and stabilize PTEs in soils impacted by mining activities.

**Keywords:** Mine soils, Bioremediation, Phytoremediating plants, Potentially toxic elements.

# Especies leñosas prometedoras para la fitorremediación de metales pesados en suelos afectados por la minería: una revisión sistemática de la literatura.

**R E S U M E N**

La fitorremediación es una biotecnología prometedora para la recuperación de áreas contaminadas por metales pesados, principalmente debido a su naturaleza ecológica y de bajo costo. Este estudio tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura (2019–2024) para identificar las principales familias botánicas y analizar las especies de árboles y arbustos utilizados en la fitorremediación de suelos contaminados por EPT en el contexto de la minería, así como los principales mecanismos relacionados, buscando sistematizar su uso y desempeño en la remediación ambiental. En total, se obtuvieron 1492 estudios de las plataformas ScienceDirect, PubMed y SciELO, que fueron procesados utilizando el software RAYYAN®. De estos estudios, se preseleccionaron 184, y se encontró que el 54,9% abordaba las familias Fabaceae, Salicaceae y Euphorbiaceae, con énfasis en las especies *Robinia pseudoacacia* L, *Populus deltoids* W. Bartram ex Marshall. y *Ricinus communis* L. Las técnicas que pueden utilizarse junto con estas especies en la investigación y los programas de fitorremediación incluyen la adición de materiales orgánicos (ácidos orgánicos de bajo peso molecular y biocarbón), aditivos inorgánicos (fosfato, fertilizante nitrogenado, $Na_2S$) y la inoculación de microorganismos (hongos micorrícicos arbusculares y bacterias endófitas). Esta revisión proporcionó información sobre tres especies resistentes con buena producción de biomasa (raíces y tallos) capaces de remediar suelos contaminados con EPT. Esta información puede orientar futuros estudios dirigidos a la prospección de nuevas especies fitorremediadoras y a la investigación destinada a mejorar la capacidad de las plantas para absorber y estabilizar EPT en suelos afectados por la minería.

**Palabras clave**: Suelos mineros, Biorremediación, Plantas de fitorremediación, Metales pesados.

## 1. Introdução

A mineração é uma atividade imprescindível para a sociedade e contribui significativamente para o crescimento econômico dos países (Hassan et al, 2024; Chen et al, 2026). No entanto, as atividades de lavra promovem profundas alterações no ambiente (Valerius; Carvalho, 2020; Mei et al, 2026) que, quando não são adequadamente geridas, favorecem processos erosivos e expõem o solo e os recursos hídricos à contaminação por metais pesados (Dagnoko et al, 2025; Ayadi et al, 2026). Nesse contexto, a remediação de áreas contaminadas torna-se necessária, pois esses elementos podem comprometer a qualidade da água (Piedra et al, 2026) e do solo, afetar o desenvolvimento das plantas e representar riscos à saúde humana em razão de sua elevada toxicidade (Wani; Naeem; Aftab, 2022; Singh et al, 2023).

Nesse sentido, a fitorremediação constitui uma alternativa sustentável, baseada no potencial de determinadas espécies vegetais capazes de absorver, acumular, estabilizar ou volatilizar contaminantes (Campos; Biudaro, 2025), por meio de processos de absorção radicular, translocação e compartimentalização de contaminantes nos vacúolos celulares, quelação por metalotioneínas e fitoquelatinas, ativação de enzimas antioxidantes e transformações metabólicas de compostos orgânicos na rizosfera (Brandão et al, 2023; Hassan et al, 2024; Islam; Saxena; Sharma, 2024; Zhang et al, 2024).

A fitorremediação é uma biotecnologia promissora e viável do ponto de vista econômico e ambiental, pois é baseada na natureza e tem baixo consumo de energia. Para além da mitigação da contaminação ambiental, a vegetação contribui para a redução da erosão e promove a melhoria estética da paisagem (Yan et al, 2020; Nedjimi, 2021; Erkencioglu et al, 2026). Além disso, é uma alternativa adequada para tratar grandes áreas e possui baixo custo de instalação e manutenção quando comparada aos métodos químicos e físicos de remediação convencionais, que são consideravelmente dispendiosos (Souri; Karimi; Sandalio, 2017; Hassan

et al, 2024; Chaverra; Cuervo; Gutiérrez, 2025; Jaitesh, 2026).

Em programas de fitorremediação, recomenda-se a utilização de espécies vegetais adaptadas às condições climáticas locais para a reabilitação de antropossolos, priorizando aquelas que apresentam crescimento rápido, elevada produção de biomassa, sistema radicular abundante, tolerância a solos contaminados e capacidade de se desenvolver em solos degradados. (Tan et al, 2023; Donatien, et al, 2024). Nesse contexto, as espécies arbóreas e arbustivas estão entre as mais promissoras devido à sua alta capacidade de produção de biomassa e seu longo ciclo de vida, que potencializam a imobilização EPT no solo ou absorção para tecidos vegetais (Rahman et al, 2022; Donatien, et al, 2024; Zorluer et al, 2026). Essas capacidades podem ser utilizadas em estratégias remediação para reduzir os impactos desses elementos no meio ambiente.

Muitos levantamentos florísticos ou ecológicos exploratórios têm sido realizados em campo para selecionar grupos de plantas destinados a pesquisas em fitorremediação (Chaverra, Cuervo; Gutiérrez, 2025). Soares et al. (2025) realizaram levantamentos em quarenta pontos amostrais e selecionaram dezesseis espécies pioneiras com maior ocorrência nas áreas avaliadas, mas apenas sete delas apresentaram indícios de potencial fitorremediador. De forma semelhante, Freitas et al. (2024) selecionaram vinte e cinco espécies com base exclusivamente na ocorrência espontânea em áreas contaminadas, identificando sete espécies com potencial para fitorremediação, das quais apenas cinco apresentaram capacidade de translocação de metais para a parte aérea. Em outro estudo, Chaverra, Cuervo e Gutiérrez (2025) registraram 46 espécies em áreas mineradas, mas observaram translocação eficiente para os tecidos aéreos em somente treze espécies.

A ocorrência espontânea de uma espécie vegetal em áreas contaminadas não garante sua eficiência na fitorremediação, uma vez que sua presença pode estar relacionada apenas à resistência, à adaptação ou a estratégias reprodutivas que favorecem sua permanência em ambientes degradados, e não necessariamente à capacidade de absorver, transloucar ou estabilizar EPT. Nesse contexto, o conhecimento dos principais grupos de plantas mais recorrentes em estudos sobre fitorremediação poderia auxiliar nas escolhas de espécies em levantamentos de campo e experimentos. Isso, porque espécies pertencentes ao mesmo gênero ou família podem compartilhar características genéticas e evolutivas decorrentes de sua ancestralidade comum, o que pode resultar em similaridades fisiológicas e funcionais, incluindo mecanismos de adaptação a diferentes estresses ambientais (Xiao et al, 2024), entre eles a exposição a solos contaminados por metais pesados (Ernst et al, 2006; El-sappah et al, 2024; Manara et al, 2020).

A realização desta revisão sistemática justifica-se pela necessidade de reunir, sintetizar e sistematizar o conhecimento científico recente sobre as principais espécies e famílias de plantas arbóreas e arbustivas com potencial para a fitorremediação de solos impactados pela mineração, bem como os apresentar mecanismos envolvidos e as estratégias empregadas para potencializar sua eficiência. A sistematização dessas informações contribui para reduzir lacunas de conhecimento, orientar a escolha de espécies promissoras. Dessa forma, esta revisão busca fornecer uma base científica que auxilie no desenvolvimento de estratégias para fitorremediação mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

Considerando as vantagens da utilização de espécies lenhosas na remediação de solos contaminados e a carência de estudos voltados à identificação dos grupos de plantas para fitorremediação no contexto da mineração, o objetivo deste trabalho é: i) identificar as famílias botânicas mais comuns em pesquisas de fitorremediação; ii) analisar as espécies de plantas arbóreas ou arbustivas mais investigadas; e iii) apresentar mecanismos fisiológicos e estratégias que podem ser empregadas para potencializar a fitorremediação de solos contaminados por EPT.

## 2. Material e Métodos

### *2.1 Delineamento do estudo e estratégia de busca*

Este estudo foi conduzido como uma revisão sistemática da literatura, seguindo as diretrizes da Declaração PRISMA (Page et al., 2022). A questão norteadora da pesquisa foi: “Quais espécies arbóreas e

arbustivas com potencial fitorremediador têm sido mais investigadas em artigos sobre fitorremediação de solos contaminados por EPTs, e quais mecanismos fisiológicos e estratégias têm sido empregados para otimizar a remediação de solos impactados pela mineração?". O levantamento dos artigos ocorreu no mês de outubro de 2024, considerando três bases de dados: ScienceDirect, Pubmed e Scielo. Foram considerados artigos originais de pesquisa, publicados entre o período de 2019 a 2024, nos idiomas inglês e espanhol.

As estratégias de busca foram definidas utilizando combinações de descritores e operadores booleanos. Na base de dados ScienceDirect, foi aplicada a seguinte consulta: *mine* AND *contaminated soil* AND *heavy metals* AND *phytoremediation*. No PubMed, foram utilizadas duas estratégias de busca: *mine* OR mining AND *contaminated soil* AND *heavy metals* AND *phytoremediation* NOT *water*; *woody species* OR *tree* AND *mine* OR *mining* AND *phytoremediation* AND *heavy metal*. Na base de dados SciELO, foram utilizadas as seguintes combinações: *phytoremediation* AND *heavy metal* AND *mining* OR *mine*; e *phytoremediation* AND mining OR mine.

Nas bases de dados SciELO e PubMed, foram realizadas duas buscas com diferentes combinações de descritores, como estratégia para maximizar a abrangência dos resultados e o número de artigos encontrados. Por outro lado, na plataforma ScienceDirect, não foi necessário utilizar mais de uma combinação de descritores, uma vez que se trata de uma base com maior número de artigos indexados.

O percurso metodológico adotado para a seleção dos estudos seguiu quatro etapas principais, de acordo com o PRISMA: (i) Identificação: busca em bases de dados e importação de registros para o Rayyan®; (ii) Triagem: remoção de duplicatas e avaliação de títulos e resumos quanto à perguta norteadora, para posterior aplicação dos critérios de inclusão e exclusão; (iii) Elegibilidade: fase de pré-seleção, onde ocorreu a leitura dos textos para classificação e listar as famílias de plantas estudadas; (iv) Inclusão: etapa final da seleção, na qual foram incluídos os estudos que abordavam as espécies-alvo da revisão. Os artigos selecionados foram submetidos à leitura integral, permitindo a extração e a sistematização das informações necessárias para responder à questão norteadora e alcançar os objetivos propostos.

## *2.2 Processo de triagem de dados*

Após a realização da busca avançada nas três bases de dados acadêmicas, utilizando os descritores previamente definidos, todos os registros encontrados foram exportados para o software de gerenciamento de revisões sistemáticas Rayyan®.

Uma triagem preliminar foi realizada para identificar e excluir registros duplicados ou triplicados, mantendo-se apenas um registro de cada estudo identificado nas buscas. Posteriormente, foram aplicados os seguintes critérios de exclusão: estudos que não apresentavam alinhamento com a questão norteadora da pesquisa; estudos focados na remediação de água ou efluentes; estudos envolvendo exclusivamente plantas herbáceas, gramíneas, algas, microalgas, musgos ou plantas aquáticas; pesquisas envolvendo exclusivamente microrganismos; estudos focados em mecanismos de recuperação de metais da biomassa; estudos abordando a restauração florestal em área contaminada sem uma abordagem de fitorremediação, como estudos voltados para abordagens exclusivamente botânicas, ecológicas ou filogenéticas.

## *2.3 Elegibilidade e seleção das famílias botânicas*

Após a triagem, os artigos que atenderam à questão norteadora foram analisados com o objetivo de identificar e quantificar as famílias botânicas representadas nos estudos selecionados. As famílias de interesse para esta revisão foram definidas baseando-se na frequência de ocorrência nos artigos, priorizando aquelas com maior representatividade numérica no conjunto dos estudos analisados. A partir desse levantamento, os artigos que contemplavam pelo menos uma das famílias botânicas selecionadas foram pré-selecionados para a etapa seguintes, enquanto os demais foram excluídos.

A seleção das famílias botânicas mais recorrentes foi adotada como estratégia para identificar os grupos vegetais mais frequentemente investigados na literatura. Essa abordagem permitiu conhecer quais famílias de plantas lenhosas têm recebido maior atenção científica no contexto da fitorremediação, considerando que sua elevada frequência seja um indicador da sua ampla utilização e representatividade na literatura.

### *2.4 Seleção das espécies-alvo e inclusão dos artigos na revisão*

A espécie mais frequente em cada família botânica pré-selecionada foi definida como espécie de interesse. Assim, os estudos que abordaram pelo menos uma dessas espécies-alvo foram incluídos na amostra final desta revisão. A fase de inclusão correspondeu à etapa final do processo de seleção, na qual os estudos foram analisados integralmente por meio da leitura completa do texto. Esta etapa assegurou que todos os artigos incluídos abordassem efetivamente as espécies-alvo e contribuíssem com informações relevantes para alcançar os objetivos desta revisão.

Os dados extraídos dos estudos selecionados foram organizados em planilha eletrônica e, posteriormente, processados no software R, versão 4.5.1 (R Core Team, 2025). Foram calculadas as frequências de ocorrência das famílias botânicas e dos elementos químicos nos estudos analisados para a elaboração da nuvem de palavras utilizando o pacote *wordcloud*.

### *2.5 Declaração sobre o uso de inteligência artificial*

As ferramentas de inteligência artificial (IA) foram utilizadas como recurso auxiliar durante algumas etapas de elaboração deste manuscrito, como no aprimoramento da redação, por meio da correção gramatical e na melhoria da clareza textual. Além disso, a ferramenta foi utilizada no aprimoramento visual de figuras originalmente elaborada pelos autores em software de edição de texto.

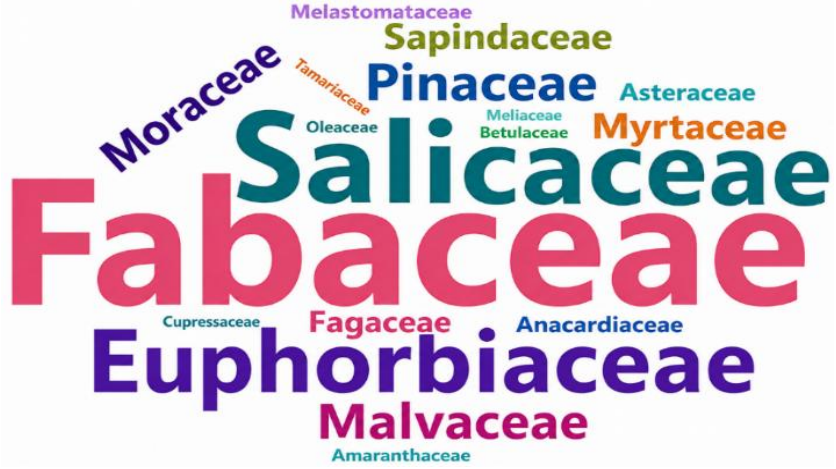
O uso da IA também foi uma estratégia usada para verificação e correção de contagens e cálculos de frequências de espécies e famílias botânicas, além de auxiliar no aprimoramento dos scripts que foram utilizados no software R. O uso dessas ferramentas limitou-se ao apoio e não substituiu a análise crítica, uma vez que o conteúdo textual, os cálculos e as imagens geradas foram submetidos à revisão dos autores, que assumem a responsabilidade pela precisão e integridade das informações apresentadas.

## 3. Resultados e Discussão

A pesquisa nas bases de dados resultou em um total de 1.492 artigos, com 1.096 na base ScienceDirect, 280 na PubMed e 116 na SciELO. Durante a triagem, foram excluídas 165 entradas duplicadas e 1.143 trabalhos por não atenderem aos critérios de inclusão. Ao final desta etapa, foram retidos 184 registros alinhados à pergunta norteadora, os quais foram avaliados na íntegra e utilizados nessa revisão.

Foram registradas 48 famílias botânicas no total. Entre elas, destacam-se as famílias Fabaceae, que apresentou o maior número de registros (48), seguida por Salicaceae (30) e Euphorbiaceae (23), as quais, juntas concentram mais da metade dos registros (54,9 %), reforçando expressiva representatividade desses grupos no conjunto analisado. Na sequência, observam-se famílias com frequências intermediárias, como Pinaceae (12), Malvaceae (12), Moraceae (11), Myrtaceae (9), Sapindaceae (8), Asteraceae (8), Fagaceae (7), Anacardiaceae (5), além de Melastomataceae, Amaranthaceae, Oleaceae, Betulaceae e Meliaceae, todas com 4 registros, e Tamaricaceae e Cupressaceae, com 3 registros cada. A distribuição das famílias botânicas também pode ser observada na nuvem de palavras (Figura 1).

**Figura 1** – Nuvem de palavras representando a frequência das famílias botânicas registradas no estudo
Figure 1 - Word cloud representing the frequency of botanical families recorded in the study




**Fonte**: Elaborado pelos autores.
Source: Prepared by the authors.

A partir da representação visual apresentada na figura 1, é possível observar um padrão na distribuição das famílias botânicas registradas. O destaque gráfico representado por palavras em maior tamanho é resultado da sua maior frequência registradas no conjunto de famílias botânicas registradas, evidenciando a predominância de Fabaceae, Salicaceae e Euphorbiaceae. Dessa forma, essas famílias se destacam como os grupos taxonômicos com maior representatividade, sendo eleitas como as famílias de interesse para esta revisão.

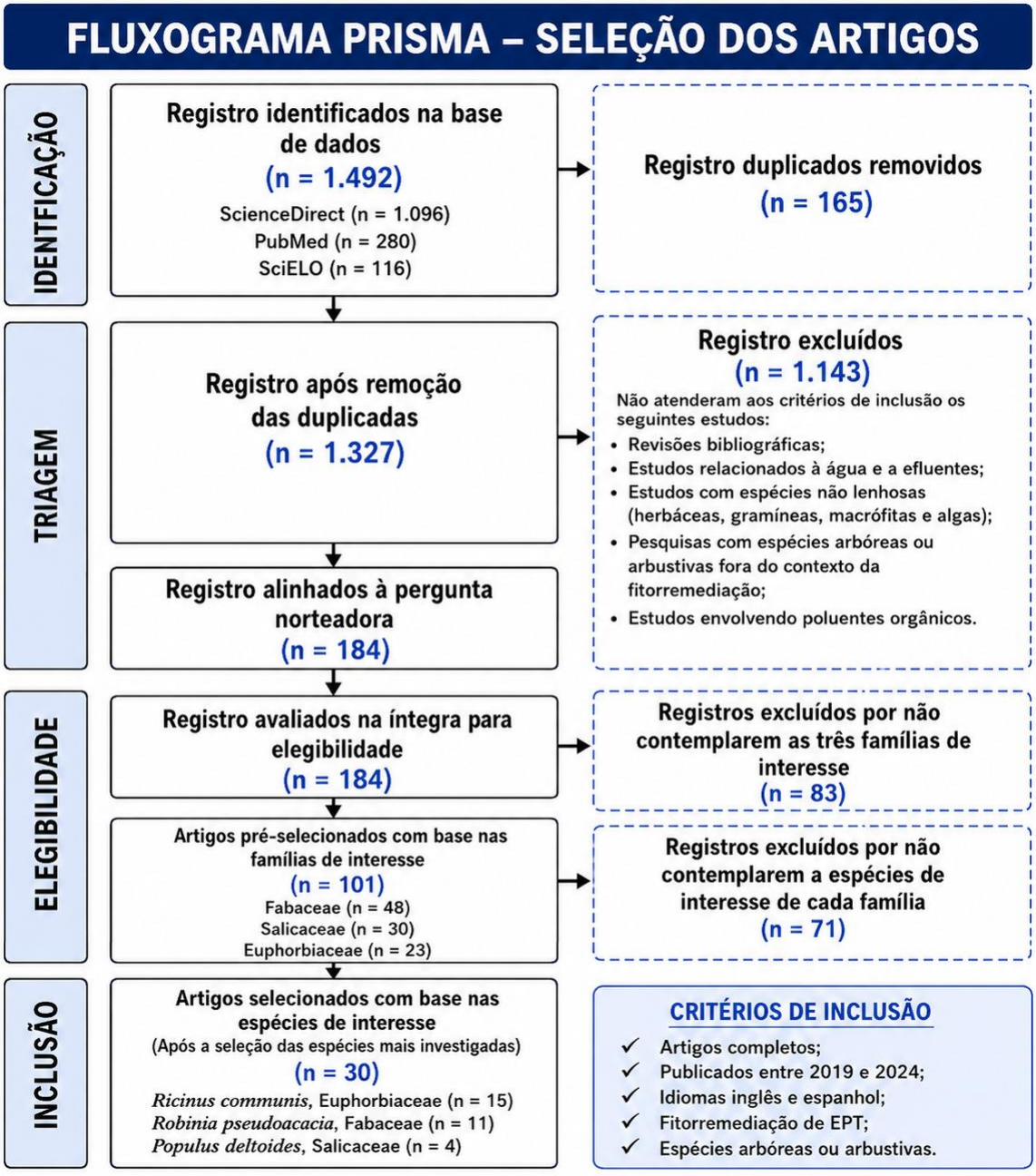
Por outro lado, algumas famílias apresentaram baixa frequência de ocorrência, sendo registradas apenas uma ou duas vezes ao longo do estudo. Elas correspondem as famílias Caryophyllaceae, Boraginaceae, Solanaceae, Cistaceae, Rosaceae, Zygophyllaceae, Apocynaceae, Simaroubaceae, Bignoniaceae, Ericaceae, Verbenaceae, Combretaceae, Acanthaceae, Proteaceae, Rutaceae, Adoxaceae, Bromeliaceae, Hypericaceae, Phytolaccaceae, Lecythidaceae, Sapotaceae, Caprifoliaceae, Ulmaceae, Taxaceae, Nyctaginaceae, Lamiaceae, Hydrangeaceae, Cornaceae, Asclepiadaceae e Moringaceae.

Após definição das famílias de maior interesse (Fabaceae, Salicaceae e Euphorbiacea), foram detalhadamente investigados 101 artigos pré-selecionados. A frequência de ocorrência dessas famílias nos trabalhos pode ser um indicativo de que elas são reconhecidas e utilizadas em estudos experimentais e de campo.

A partir dos artigos pré-selecionados, foram selecionadas as espécies de interesse para esta revisão, isto é, as espécies mais estudadas dentro de cada uma dessas três principais famílias. Assim, 73 registros foram excluídos por não abordarem as espécies de interesse dentro dessas famílias. Ao final, 30 artigos foram incluídos na revisão, abordando especialmente as espécies *Ricinus communis* L. (n = 15), pertencente à família Euphorbiaceae; *Robinia pseudoacacia* L. (n = 11), da família Fabaceae; e *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall. (n = 4), da família Salicaceae (Figura 2).

**Figura 2** – Fluxograma PRISMA do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos na revisão

Figure 2 - PRISMA flow diagram of the process of identification, screening, eligibility, and inclusion of articles in the review




**Fonte**: Elaborado pelos autores.

Source: Prepared by the authors.

Dentre os artigos selecionados para compor esta revisão (n = 30), observou-se, a partir da representação visual da nuvem de palavras (Figura 3), que os metais pesados mais investigados nas pesquisas foram, respectivamente, chumbo (Pb), cobre (Cu), cádmio (Cd) e zinco (Zn).

**Figura 3** – Nuvem de palavras referente aos elementos químicos analisados nos estudos selecionados
Figure 3 - Word cloud regarding the chemical elements analyzed in the selected studies.




**Fonte**: Elaborado pelos autores.
Source: Prepared by the authors.

Os elementos Pb, Cu, Cd e Zn destacam-se entre os mais investigados em estudos de fitorremediação porque fequentemente estão entre os elementos potencialmente tóxicos de maior ocorrência em áreas contaminadas (Hesami; Salimi; Ghaderian, 2018; Zhang et al, 2024; Xing et al, 2020; Wang et al, 2026), sendo amplamente associados a atividades antrópicas, como mineração, metalurgia, agricultura, disposição inadequada de resíduos e emissões industriais (Hesami; Salimi; Ghaderian, 2018, Luo et al, 2020).

Hassan et al. (2024) corroboram que o acúmulo de resíduos advindos da indústria da mineração tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, em decorrência da extração, do refino e da utilização anual de recursos minerais em todo o mundo. A produção anual de rejeitos de mineração é de cerca de 10 bilhões de toneladas, os quais comumente são descartados em barragens a céu aberto, onde permanecem sem tratamento por longos períodos, constituindo uma importante fonte de contaminação para os ecossistemas (Lin et al, 2022; Hassan et al, 2024).

## *3.1 R. communis,* família Euphorbiaceae

A espécie *R. communis*, popularmente conhecida como “mamona”, foi a mais recorrente entre os estudos que mencionaram plantas da família Euphorbiaceae. Ao todo, foram analisados 23 artigos envolvendo essa família, nos quais foram identificadas 6 espécies diferentes. R. communis esteve presente em 60% dos trabalhos, representando a espécie mais estudada entre todos os 30 artigos selecionados. Para esta espécie, elementos químicos comumente relatados incluíram chumbo, cobre, zinco e cádmio, frequentemente associados à contaminação de solos, especialmente em áreas impactadas pela mineração (Quadro 1).

**Quadro 1** – Principais interações de *R. communis* com metais pesados e os principais achados reportados na literatura

Table 1 - Principais interações de *R. communis* com metais pesados e os principais achados reportados na literatura

| ELEMENTOS | INTERAÇÃO | RESPOSTAS | REFERÊNCIA |
|---|---|---|---|
| Pb | Efeitos da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na fitorremediação. | - A inoculação com FMA aumentou em 100% a sobrevivência das plantas (plantas sem inoculação apenas 57% sobreviveram).<br>- Fungo *Acaulospora* sp. diminuiu cerca de 3,5 vezes a concentração de Pb nas folhas.<br>- O fungo *Funneliformis mosseae* BEG25 reduziu aproximadamente 3 vezes a disponibilidade de Pb no solo, potencializando a fitoestabilização e diminuindo o risco ecológico. | González-Chávez et al. (2019) |
| Cu, Cr, Ni, Pb e Zn | Capacidade de diferentes cultivares de mamona em extrair metais do solo. | - Considerável redução de metais no solo após o experimento de 100 dias.<br>-Ambas cultivares (Local e DS-30) foram eficientes na fitorremediação. | Khan et al. (2019) |
| Cu | polissacarídeos da parede celular envolvidos na fitorremediação de Cu. | - O cobre acumulou-se principalmente nas raízes, com baixa translocação para a parte aérea.<br>- Grande parte do Cu foi imobilizada na parede celular das raízes, especialmente nas frações de hemicelulose.<br>- Redução da mobilidade da toxicidade do metal, impedindo sua entrada nas células e seu transporte para os tecidos aéreos. | Ren et al. (2020) |
| Cu | Efeito do fósforo na extração de Cu pela planta e mecanismos fisiológicos de tolerância ao metal. | - Aumento expressivo no crescimento e na concentração de Cu nos tecidos da planta, aumentando a eficiência da fitoextração (Até 121,3 μg de Cu planta$^{-1}$).<br>- A formação de precipitados insolúveis de Cu/Fe-fosfato tornou o Cu menos disponível.<br>- Fortalecimento do sistema antioxidante através do aumento de pigmentos fotossintéticos, glutationa, ácido ascórbico e enzimas antioxidantes. | Zhou et al. (2020) |
| Cu | Adição de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácido cítrico, ácido tartárico e ácido oxálico) na fitorremediação | - Favoreceu aumento no crescimento da planta.<br>- Acúmulo de Cu em raízes e parte aérea (até ~189%).<br>- Aumento nos fatores de translocação e bioacumulação.<br>- Melhoria nas condições microbiológicas e bioquímicas, evidenciada pelo aumento da atividade enzimática (urease, catalase, fosfatase).<br>- pH do solo pouco afetado.<br>- Melhora da absorção e transporte de Cu. | Huang et al. (2020) |
| Cd, Pb, Zn e Mn | Germinação de sementes e fitoextração de metais em rejeito | - Elevada taxa de germinação das sementes de mamona, mesmo em solo altamente contaminado.<br>- Potencial de fitoextração, mesmo em plantas com curto período de crescimento (56 dias). | Narayanan et al. (2021) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | de mineração. | | |
| Cd | Expressão de genes e alelos associados à tolerância ao Cd | - Identificação de Oito genes envolvidos na resposta ao estresse por Cd.<br>-Identificação de genes e alelos que podem ser utilizados para desenvolver cultivares de *R. communis* mais tolerantes e eficientes na fitorremediação de áreas contaminadas por Cd. | WEI et al. (2022) |
| Cu | Interação da comunidade bacteriana com as raízes em contexto de fitorremediação | - Maior diversidade microbiana na rizosfera do que na endosfera. – As populações de microrganismos como *Sphingomonas* e *Psathyrella* aumentaram sob estresse por metais e contribuíram para adaptação da planta.<br>– Endófitos ajudam no crescimento e tolerância a altas concentrações de Cu. | Chen et al. (2022) |
| Cd, Pb, Zn, Cr, Mn e Al | Sistema bactéria (*Leptospirillum ferrooxidans)* e mamona | - Potencial combinado de bactéria (*L. ferrooxidans*) e planta na remediação em solo contaminado por mineração.<br>- A bactéria aumentou a tolerância e a fitoextração de metais pela mamona em experimento. | Thanh et al. (2023) |
| Cd, Pb e Zn | Comunidade fúngica endofítica das raízes sob estresse por metais. | - O gênero Fusarium dominou a comunidade fúngica nas raízes sob estresse metálico.<br>- As cepas F2, F8 e F14 apresentaram alta resistência a múltiplos metais.<br>- Inoculação proporcionou aumento da biomassa e extração de Cd, Pb e Zn. | Yao et al. (2023) |
| Pb | Sistema para fitorremediação com a mamona e outras duas espécies herbáceas (azevém e alfafa) em conjunto com a técnica de eletrocinética. | - Fitorremediação isolada tem limitações em solos altamente contaminados por Pb.<br>- Eletrocinética em conjunto com fitorremediação aumentou a mobilidade e remoção de metais.<br>- Ordem da eficiência de remoção: mamona > azevém > alfafa.<br>- A mamona mostrou potencial como fitoestabilizadora de Pb, e a técnica de eletrocinética auxiliou na fitoextratora do metal. | Chen et al. (2023) |
| Fe, Pb, Cu e Ni | Efeitos da adição de solo de jardim na fitorremediação e recuperação de área contaminada por metais. | - Fitoestabilização pelo acúmulo de Fe e Pb nas raízes.<br>- A mistura de solo de mina com solo de jardim (50–75%) aumentou crescimento, extração de metais e melhorou a qualidade do solo.<br>- Melhoria das propriedades do solo (C, N, microbiota, matéria orgânica). | Saha; Bauddh, (2023) |
| Fe, Pb, Cu e Ni | Adição de fertilizante químico (NPK) e esterco na fitorremediação e recuperação de área contaminada | - A adição de esterco foi mais eficiente que fertilizante NPK para melhorar o crescimento e potencial remediador.<br>- A planta apresentou biomassa até 6,5 vezes maior em comparação ao solo da mina sem tratamento.<br>- Aumento do conteúdo de clorofila, indicando melhora da atividade fotossintética e adaptação ao estresse por metais. | Saha; Bauddh, (2024) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | por metais. | - O Fe foi o elemento mais absorvido pela planta nos tratamentos. | |
| As | Efeito de doses de As na planta (0, 25, 50, e 100 mg $kg^{-1}$). | - Espécie se mostrou tolera ante altas concentrações de As (até 100 mg $kg^{-1}$).<br>- Acúmulo de As nos tecidos;<br>- Potencial moderado de fitoextração e fitoestabilização de As; | Maciel-Torres et al. (2024) |
| Cd | Atributos genéticos responsáveis pela tolerância ao estresse por Cd. | - Alternativa de melhoramento genético para o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes ao Cd e com maior potencial de fitorremediação.<br>- Identificação de alelos úteis para seleção assistida e engenharia genética.<br>- Foram identificados 29 alelos associados à tolerância e 181 alelos associados à sensibilidade. | Yeboah et al. (2021) |

**Fonte**: Elaborado pelos autores.
Source: Prepared by the authors.

A espécie R. communis é uma planta semilenhosa comumente cultivada em regiões tropicais e subtropicais para fins medicinais, produção de cosméticos e principalmente para fins energéticos, usada para a produção de biodiesel devido ao seu alto teor de óleo em sementes (Ren et al., 2020; Yeboah et al., 2021). Essa espécie é capaz de produzir matéria-prima segura para extração de óleo, sem risco de contaminação mesmo quando estabelecida em ambientes contaminados (González-Chávez et al., 2019). A mamona tem sido considerada uma espécie ideal para fitorremediação por apresentar crescimento rápido, raízes bem desenvolvidas, boa produção de biomassa, tolerância à EPT e resistência à seca em ambientes degradados (González-Chávez, et al., 2019; Ren et al., 2020; Wei et al., 2022).

A ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares e bactérias na rizosfera de mamona é outro um fator que melhora os resultados da fitorremediação, pois esses microrganismos criam uma conexão física direta entre o solo e as raízes das plantas, aumentando a área de superfície das raízes e maximizando a absorção de contaminantes (Chen et al., 2022). Neste sentido, muitos trabalhos têm avaliado as comunidades microbianas associadas ao R. communis na sua rizosfera e no compartimento endofítico (González-Chávez et al., 2019; CHEN et al., 2022; YAO et al., 2023). A utilização de microrganismos em consórcio com plantas fitorremediadoras tem se mostrado uma abordagem eficaz para a remediação de metais no solo. A interação desses organismos com íons metálicos solúveis na solução do solo desempenha um papel importante na tolerância a EPT por meio de mecanismos de imobilização, transformação e transporte de metais e metaloides no solo contaminado (THANH et al., 2023).

A utilização de fertilizantes e condicionadores para acelerar o processo de fitorremediação também tem ganhado atenção e estão sendo continuamente investigados em pesquisas com mamona. Saha e Bauddh (2024) investigaram os efeitos da aplicação de adubos orgânicos (esterco de curral) e sintéticos (NPK) em experimento para avaliar o potencial de fitorremediação de Fe, Ni, Pb, e Cu por plantas de mamona, e encontraram que a aplicação de esterco resultou no aumento de 441,32% no crescimento da planta, enquanto as plantas adubadas com NPK obtiveram aumento de 179,86%. Esse estudo evidenciou como a adubação das plantas fitorremediadoras é necessária, principalmente a adubação orgânica, que favorece o aumento no conteúdo de carbono no solo, na capacidade de troca de cátions, melhoria dos atributos físicos e na atividade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e bactérias na rizosfera.

Vários estudos têm evidenciado que R. communis possui potencial fitorremediador de Cu (Ren et al., 2020; Zhou et al., 2020; Huang et al., 2020; Saha; Bauddh, 2023). Embora este elemento seja um micronutriente para as plantas, é tóxico em elevadas concentrações, causando superprodução de espécies

reativas de oxigênio (ROS), peroxidação lipídica e danos ao DNA dos vegetais (Ren et al., 2020). As principais fontes de contaminação do solo por Cu, além da mineração, incluem a siderurgia e o uso de pesticidas (Ren et al., 2020).

O estudo de Zhou et al. (2020) se propôs a investigar os efeitos da fertilização com fósforo (P) na fitorremediação utilizando a espécie R. communis. Esses autores constataram aumento na produção de biomassa da planta e nas concentrações de Cu nos tecidos vegetais (até 121,3 μg). Os autores verificaram ainda que a adubação fosfatada levou a formação de precipitados insolúveis de Cu/Fe-fosfato capazes de imobilizar metais, o que tornou o Cu menos disponível na solução do solo. Além disso, a aplicação de P contribuiu para a redução dos níveis de biomarcadores de estresse oxidativo, como o malonaldeído, sugerindo uma redução no dano celular causado pelo estresse resultante da contaminação por Cu.

A utilização de agentes quelantes orgânicos e biodegradáveis, como ácidos orgânicos naturais de baixo peso molecular, é outra estratégia usada para aumentar o potencial de fitorremediação da mamona. Quando adicionados no sistema, esses compostos formam complexos solúveis com metais no solo, aumentando sua mobilidade e disponibilidade para serem absorvidos pelas plantas no sistema de fitorremediação (Huang et al., 2020).

Huang et al. (2020) investigaram os efeitos da adição de ácido cítrico, tartárico e oxálico na eficiência da fitorremediação de Cu utilizando R. communis. Os autores concluíram que a adição desses ácidos promoveu aumento no acúmulo de Cu nas raízes e brotos das plantas e aumentou a atividade de enzimas no solo (urease, catalase e fosfatase alcalina). Desta forma, eles concluíram que esses agentes quelantes aumentam a eficiência da fitoextração de Cu e ainda melhoram a qualidade do solo a partir de mudanças na atividade enzimática e microbiológica.

Chumbo e Cd são também abordados em estudos sobre fitorremediação utilizando R. communis. Por exemplo, Wei et al. (2022) estudaram mecanismos de fitorremediação em solução hidropônica e constataram que R. communis não acumulou Cd na raiz, mas transloucou o metal para as folhas. Esses autores observaram que altas concentrações de Cd inibiram o desenvolvimento das folhas, demonstrando o efeito tóxico causado pelo estresse químico. Por outro lado, sob baixas doses de Cd, as plantas acumularam gradativamente o contaminante nas folhas sem grandes prejuízos ao vegetal. O estudo sugere que a espécie pode remediar com eficácia solos contaminados com Cd, desde que não estejam em concentração elevada.

Em relação aos avanços, é possível mencionar pesquisas genéticas para desenvolvimento de cultivares de R. communis mais tolerantes a metais (Yeboah et al., 2021). Além disso, novas técnicas têm potencializado a capacidade das plantas de estabilizar ou transloucar contaminantes do solo, como a uso de aditivos químicos orgânicos, como ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Huang et al., 2020); aditivos químicos inorgânicos, como fósforo (Zhou et al., 2020), bem como a aplicação de bactérias (Thanh et al., 2023) e fungos micorrízicos (González-Chávez et al.,2019; Yao et al., 2023).

### *3.2 R. pseudoacacia,* família Fabaceae

A família Fabaceae foi a mais estudada entre os artigos analisados e também apresentou a maior diversidade de espécies, totalizando 33 espécies catalogadas nos 48 estudos. Essa predominância sugere um possível interesse científico por essa família. A espécie mais recorrente foi *R. pseudoacacia*, que foi evidenciada em 22,9% dos artigos (11 estudos) (Quadro 2). Os metais mais comuns nos estudos com essa espécie foram Pb, Cu, Zn e Cd.

**Quadro 2** – Principais interações de *R. pseudoacacia* com metais pesados e os principais achados reportados na literatura.

Table 2 - Key interactions of *R. pseudoacacia* with heavy metals and main findings

| ELEMENTOS | INTERAÇÃO | RESPOSTAS | REFERÊNCIA |
|---|---|---|---|
| Cu, Pb, Zn e Cd | Metais nas frações da matéria orgânica particulada. | - Maior imobilização de metais nas frações menores (0,05–0,25 mm).<br>- Redução da mobilidade e disponibilidade dos metais (Fitoestabilização). | Luo *et al.* (2019) |
| Cu, Pb, Zn e Cd | Rizosfera, agregados da escória e metais. | - Raízes estabilizam metais.<br>- Menor mobilidade e risco ambiental.<br>- Aumento de partículas < 1 mm na rizosfera. | Luo *et al.* (2020) |
| Pb e Zn | Crescimento vegetal e atividade biológica em solo tratado com $Na_2S$. | - Aumento do crescimento vegetal em solo contaminado.<br>- Estímulo aos fungos micorrízicos arbusculares.<br>- Maior fósforo disponível e atividade enzimática do solo. | Zhang et al. (2020) |
| Pb e Zn | Resposta vegetal a adição de nitrato ($NO_3^-$) e amônio ($NH_4^+$). | - $NH_4^+$ ou $NO_3^-$ + $NH_4^+$ aumentaram biomassa total, radicular e foliar.<br>- Maior atividade de enzimas antioxidantes.<br>- Redução do estresse fisiológico por poluição.<br>- $NO_3^-$ + $NH_4^+$ aumentou a translocação de Pb e Zn. | Bai et al. (2020) |
| Fe e Cu | Respostas fisiológicas. | - Tolerância a solo contaminado.<br>- Redução de clorofila (dano fotossintético).<br>- Aumento de prolina como mecanismo de defesa. | Ahmad; khan; page, (2021) |
| Cd | Biocarvão de lodo enriquecido com P e bactéria endofítica | - Aumento no crescimento vegetal.<br>- Quelação de Cd por sideróforos e ácidos orgânicos.<br>- Acúmulo de Cd nas raízes (fitoestabilização).<br>- Redução do Cd solúvel na rizosfera (até 69%). | Zhang et al. (2021) |
| Pb e Zn | Bactérias endofíticas. | - Bactérias tolerantes identificadas: *Priestia endophytica*, *Bacillus pumilus* e *Bacillus halotolerans*.<br>- Inoculação de rizobactérias (linhagem 84MBT) aumentou peso seco das plantas. | Bennis *et al.* (2022) |
| Cu, Pb, Zn e Cd | Estrutura e função de bactérias endolíticas. | - Microbiota endofítica aumentou tolerância a metais e a fitorremediação.<br>-Filos dominantes: Actinobacteria, Proteobacteria, Firmicutes.<br>- Identificação de 27 táxons-chave; 16 correlacionados com bioacumulação de Cd, Cu, Pb e Zn.<br>- Identificação de genes ligados ao controle de estresse e resistência à poluição por metais. | Yao et al. (2022) |
| As | Inoculaçõa da bactéria *Enterobacter* sp. YG-14. | - Aumento do acúmulo de As nas raízes via enterobactina.<br>- Dissolução de complexos Fe–As aumentou a biodisponibilidade na rizosfera.<br>- Inoculação da YG-14 favoreceu o crescimento da biomassa aérea, raízes e fotossíntese.<br>- Aumento de enzimas que ajudaram na tolerância ao As. | Chen *et al.* (2024) |
| Cd | Simbiose planta e | - Inoculação com rizóbio aumentou a produção de biomassa | Yang et al. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | bactéria (*Mesorhizobium loti*). | e acúmulo de Cd após 60 dias.<br>- Simbiose planta–rizóbio favoreceu a fertilidade do solo e o ciclo de nutrientes (N, C e P). | (2024) |
| Pb e Cu | Acúmulo radicular e foliar. | - Alto acúmulo de Pb nas raízes (cerca de 904 mg $kg^{-1}$) e baixa translocação do mettal para a parte aérea.<br>- Capacidade de absorção e translocação de Cu (Fatores de translocação e de bioacumulação > 1)<br>- Potencial para fitoextração de Cu e fitoestabilização de Pb. | Băbău et al. (2024) |

**Fonte**: Elaborado pelos autores.
Source: Prepared by the authors.

A espécie *R. pseudoacacia*, conhecida popularmente como "falsa-acácia", é uma leguminosa lenhosa pioneira, de crescimento rápido, com elevada capacidade de produção de biomassa, sistema radicular robusto e capacidade de fixar de nitrogênio no solo (Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2021), além de se estabelecer bem em habitats degradados e ser resistente a geadas e secas (Băbău et al., 2024).

A espécie se mostra como uma excelente opção para a revegetação em áreas de mineração devido a sua tolerância a EPT e sua capacidade de translocar e acumular metais no tecido foliar, como Pb, Zn e Cu (Tzvetkova; Petkova, 2015; Băbău et al., 2024). Além do potencial para fitoextração, a espécie também se mostra como uma importante estabilizadora de contaminantes na interface raiz-solo, principalmente quando utilizada em conjunto com biocarvão e inoculação de microrganismos (bactérias/fungos micorrízicos arbusculares) (Zhang et al., 2021). Na pesquisa de Chen et al. (2024), os autores concluíram que o endófito Enterobacter sp. YG-14 na raiz da planta auxiliou na fitoestabilização do As.

Os microrganismos do solo desempenham um papel crucial na manutenção da qualidade do solo e em processos relacionados à remediação de elementos tóxicos, principalmente os fungos micorrízicos arbusculares, bactérias endofíticas e bactérias rizosféricas (Zhang et al., 2021; Chen et al., 2024). As bactérias rizosféricas associadas a plantas da família Fabaceae representam um diferencial no processo de fitorremediação. Elas favorecerem mecanismos bioquímicos, como a produção de fitormônios, que aumentam a tolerância das plantas aos efeitos tóxicos de metais e metaloides. Além disso, realizam a fixação biológica de nitrogênio. Esses processos contribuem para a melhoria da fertilidade do solo e para o crescimento e desenvolvimento vegetal em áreas vegetadas com *R. pseudoacacia* (Yang et al., 2024).

Chen et al. (2024) corroboram que na rizosfera de *R. pseudoacacia* ocorrem processos fundamentais que regem a dinâmica de absorção de nutrientes e poluentes, como a liberação de exsudatos radiculares, excreções microbianas associadas e subprodutos da decomposição da matéria orgânica (Zhang et al., 2021). Essas substâncias desempenham papel crucial em várias interações biológicas e químicas no solo e na rizosfera, contribuindo para a formação de complexos solúveis que favorecem a absorção de EPT pelas raízes das plantas. Além disso, os ácidos orgânicos rizosféricos também influenciam na estabilidade geoquímica dos metais, reduzindo os riscos de entrada desses elementos na cadeia alimentar (Zhang et al., 2021; Chen et al., 2024).

Luo et al. (2019) estudaram fitoestabilização assistida em área afetada por escória de fundição de zinco no sul da China. Esses autores constataram que a adubação orgânica associada ao reflorestamento constituiu uma técnica eficaz para a remediação de solos contaminados por Cd, Pb, Cu e Zn, em virtude da redução da biodisponibilidade desses elementos, o controle da erosão e o aumento da biodiversidade local. A matéria orgânica oriunda de resíduos vegetais e de exsudatos radiculares, aliada à ação de microrganismos associados à rizosfera de *R. pseudoacacia*, contribuiu para a formação de complexos organometálicos, favorecendo a imobilização e a consequente redução da biodisponibilidade dos EPT (Luo et al., 2019).

Zhang et al. (2021) estudaram como o uso de inoculante microbiano (Enterobacter sp. YG-14) e

biocarvão enriquecido com P pode atuar na melhoria da fitorremediação de Cd em área de rejeito de mina. Os autores testaram esses tratamentos porque o acúmulo de Cd na *R. pseudoacacia* é comprovadamente baixo em relação aos outros metais como Pb, Zn e Cu. Eles verificaram que a inoculação na *R. pseudoacacia* melhorou a absorção de Cd, o que foi atribuído à capacidade de quelação de Cd pela bactéria, que possivelmente facilitou a absorção pelas raízes. Isso ocorre através da secreção de sideróforos e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que se ligam ao Cd, formando complexos solúveis que podem ser facilmente absorvidos pelas plantas. Além disso, a formação de um sistema biocarvão-endófito-planta promoveu a retenção dos metais, possibilitou o crescimento expressivo do vegetal, melhorou atributos de qualidade do solo e estabilizou Cd no solo através da formação de minerais de Cd. Esses benefícios demostraram que esta técnica favorece a fitoestabilização e pode reduzir a entrada do contaminante na cadeia alimentar por meio da herbivoria.

Pesquisas usando Enterobacter sp. YG-14, uma bactéria endofítica tolerante a elementos tóxicos, foram desenvolvidas e atestaram que a estratégia contribui para aumentar a resistência de *R. pseudoacacia* ao Cd em área de deposição de rejeito (Zhang et al., 2021). Porém, Chen et al. (2024) analisaram a capacidade da bactéria em consórcio com *R. pseudoacacia* em remediar solo contaminado por As. Os autores concluíram que a colonização das raízes pela cepa YG-14 contribuiu com o acúmulo de As nas raízes. Além disso, a presença do endófito auxiliou na proteção da planta, que apresentou crescimento aparentemente normal mesmo sob altos níveis de As. Nesse estudo, as colônias de bactérias nas raízes provavelmente secretaram a enterobactina, que converte o As ligado a óxido de ferro para um estado prontamente assimilável pela planta, o que pode melhorar consideravelmente a absorção pelas raízes, e por consequência, melhorar o potencial de fitoestabilização de As pela *R. pseudoacacia*.

Outra estratégia usada para melhorar o potencial fitorremediador da *R. pseudoacacia* em locais que apresentem contaminação severa é o uso de aditivos químicos. A aditivo sulfeto de sódio (Na2S) vem ganhando popularidade, principalmente porque a adição desse composto atua diminuindo a lixiviação. Por exemplo, Zhang et al. (2020) demostraram que a aplicação de Na2S favorece o crescimento de *R. pseudoacacia* em sistemas contaminados por Pb e Zn. Segundo os autores, essa técnica melhorou a disponibilidade e absorção de P e favoreceu o desenvolvimento de fungos micorrízicos arbusculares. Além disso, adição de Na2S proporcionou a formação de compostos insolúveis que imobilizaram os metais no solo, diminuindo a sua toxicidade para as plantas.

Yang et al. (2024) avaliaram a resposta de *R. pseudoacacia* em solos contaminados com Cd inoculados com a bactéria Mesorhizobium loti. Os autores constataram que a inoculação favoreceu o acúmulo de Cd, com as plantas inoculadas acumulando o dobro de Cd em relação às que não receberam o inoculante. Além disso, a inoculação favoreceu o aumento da biomassa, o que sugere que a utilização de rizóbios se mostra como uma alternativa para potencializar a remediação de solos contaminados por Cd.

### *3.3 P. deltoides,* família Salicaceae

Entre os 30 artigos que abordaram a família Salicaceae, apenas os gêneros Populus e Salix foram registrados, reunindo uma ampla diversidade de espécies, subespécies e híbridos, evidenciando que esses dois gêneros concentram a maior parte das pesquisas sobre fitorremediação desenvolvidas com plantas da família Salicaceae.

O gênero Populus destacou-se pela elevada diversidade taxonômica registrada nos estudos analisados, abrangendo espécies, híbridos interespecíficos e registros em nível de gênero. Entre as espécies identificadas destacam-se *P. deltoides* (álamo-do-leste), *P. trichocarpa* (álamo-negro-do-oeste), *P. yunnanensis*, *P. alba* (álamo-branco) e *P. nigra* (álamo-negro). Também foram registrados os híbridos *P. deltoides* × *P. nigra*, *P. alba* × *Populus*, *Populus* × *canescens* (álamo-cinzento) e *Populus* × *euramericana* (álamo-euro-americano), além de estudos que identificaram os indivíduos apenas em nível de gênero (Populus e Populus spp.). Essa ampla diversidade de táxons reflete o interesse pelo gênero, especialmente em razão de seu rápido crescimento,

elevada produção de biomassa e reconhecida capacidade de tolerar, absorver e acumular elementos potencialmente tóxicos, características que favorecem seu potencial fitorremediador.

O táxon *P. deltoides*, representado por indivíduos de linhagens puras (não híbridos), destacou-se por estar presente em 13,3% dos artigos relacionados à família Salicaceae (n = 4). Entre os elementos potencialmente tóxicos mais investigados nos estudos com essa espécie, predominaram o Cd e o Pb, conforme apresentado no Quadro 3.

**Quadro 3** – Principais interações de *P. deltoides* com metais pesados e os principais achados reportados na literatura

Table 3 - Key interactions of *P. deltoides* with heavy metals and main findings

| ELEMENTOS | INTERAÇÃO | RESPOSTAS | REFERÊNCIA |
|---|---|---|---|
| Cd | Adubação nitrogenada no desenvolvimento da planta e absorção de Cd. | - O Cd reduziu crescimento radicular, fotossíntese e a biomassa.<br>- Adubação nitrogenada (60–90 kg $ha^{-1}$ $ano^{-1}$) foi capaz de aumentar a fotossíntese, produção de biomassa, atividade de enzimas antioxidantes.<br>- Acúmulo de Cd em raízes e caules, mas baixa translocação para folhas. | Yi et al. (2022) |
| Cu, Pb, Zn e Cd | Clima e absorção de metais | - Maior acúmulo de metais no verão que no inverno.<br>- Fatores climáticos influenciaram a deposição atmosférica e o acúmulo de metais.<br>- Maior acúmulo na casca que nas folhas: Zn > Pb > Cu > Cd. | Rahman et al. (2022) |
| Pb e Cd | Comunidades bacterianas na rizosfera e endosfera. | - O Cd e Pb moldaram a distribuição bacteriana no solo.<br>- Na endosfera, a estrutura e composição da microbiota foi pouco afetada pelos metais.<br>- A rizosfera apresentou maior riqueza e diversidade microbiana em relação a região fora da influência das raízes.<br>- Bactérias endofíticas aumentam tolerância a metais e auxiliaram mecanismos de resistência da planta. | Zhang et al. (2022) |
| Cd e Ni | Respostas fisiológicas e absorção de metais pesados | -Tolerância e resistência ao Cd e Ni.<br>-Identificação de enzimas que reduzem o estresse oxidativo e ativação de defesas celulares: Superóxido, Peroxidase, Glutationa.<br>- Aumento de hormônios vegetais (ácido abscísico e auxina). | Kebert et al. (2022) |

**Fonte**: Elaborado pelos autores.

Source: Prepared by the authors.

A espécie *P. deltoides*, conhecida popularmente como álamo-do-leste, é uma planta lenhosa de porte alto com elevado potencial para fitorremediação, mais especificamente para fitoextração. Apresenta grande produção de biomassa, crescimento rápido, altos índices de transpiração, fácil propagação, um sistema de raízes profundas, tolerância a EPT e alta capacidade de acumular e translocar elementos para as partes aéreas (Rahman et al.,2022; Kebert et al., 2022).

As árvores de álamo estão entre as melhores escolhas para programas de recuperação de áreas de mineração contaminadas, atuando na biorremediação de solos contaminados por EPT pela sua capacidade de acumular metais e produção de biomassa, que também favorece o controle da erosão (Zhang et al., 2022). De acordo com Rahman et al. (2022), a espécie possui capacidade de acumular maiores teores de metais durante o verão em comparação com o inverno, por conta da maior atividade metabólica da planta e maior absorção de água que facilita a absorção de metais do solo durante a estação mais quente do ano.

Os quatro artigos que abordaram o uso de P. *deltoides* apontaram considerável tolerância e capacidade de remediar solos contaminados por Cd. Em estudo avaliando consórcios microbiológicos na fitorremediação, principalmente na região da rizosfera, Zhang et al. (2022) compararam a composição e a estrutura de bactérias em clones de P. *deltoides* plantados em área contendo rejeito de mineração, analisando a região interna da raiz (endosfera), ao redor das raízes (rizosfera) e solo fora da influência da planta. Os autores constaram que a parte sob a influência da rizosfera apresentou maior diversidade e riqueza em relação às amostras não-rizosféricas. Na endosfera, a estrutura e composição da microbiota endofítica não foram afetadas pelos EPT no rejeito.

Zhang et al. (2022) observaram que vias metabólicas associadas à sinalização de plantas e ao metabolismo de nucleotídeos ricos em energia estavam mais enriquecidas, sugerindo que bactérias endofíticas ajudam a planta a lidar com o estresse dos metais Pb e Zn, promovendo crescimento e resistência. Desta forma, esses estudos sugerem que P. *deltoides* favorece o habitat para as bactérias do solo, ao mesmo tempo em que as bactérias podem ajudar as plantas a serem mais tolerantes ao estresse por EPT.

## 4. Conclusão

Foram identificadas 32 famílias botânicas de plantas arbóreas e arbustivas em 184 estudos voltados à fitorremediação de solos contaminados por EPT, dos quais as famílias Fabaceae, Salicaceae e Euphorbiaceae apresentaram maior frequência de ocorrência (54,9%), indicando que esses grupos botânicos foram mais frequentemente investigados, sinalizando sua relevância e representatividade na literatura. A família Fabaceae apresentou a maior diversidade de espécies (33 no total), destacando-se *R. pseudoacacia* como a mais recorrente. Na família Euphorbiaceae, a espécie mais investigada foi *R. communis*, enquanto os estudos da família Salicaceae restringiram-se aos gêneros Populus e Salix, com ênfase em *P. deltoides*. Os metais mais comuns nos estudos com essas espécies foram Pb, Cu, Zn e Cd.

Essas espécies apresentam crescimento rápido e alta produção de biomassa. Além disso, *R. pseudoacacia* (Fabaceae) apresenta associação com bactérias fixadoras de nitrogênio, que favorecem a fertilidade do solo e a fitoestabilização. A espécie *P. deltoides* (Salicaceae) possui elevada capacidade de absorção e translocação de metais, além de um sistema antioxidante eficiente, demonstrando ser adequada para a fitoextração e a fitoestabilização. Já *R. communis* (Euphorbiaceae) demonstra alta tolerância a metais pesados e solos degradados, destacando-se pela capacidade de acumulação de contaminantes e apresentando potencial para a fitoextração.

Os resultados podem orientar estudos voltados à fitorremediação de solos em áreas de mineração, especialmente aqueles direcionados à prospecção de novas espécies e ao desenvolvimento de estratégias que tornem o processo de remediação mais eficiente. Além disso, indicam que a eficiência da fitorremediação pode ser ampliada por abordagens que contribuem para melhorar o desenvolvimento das plantas e influenciam diretamente a dinâmica dos contaminantes no solo; são elas: o uso de aditivos orgânicos (ácidos orgânicos de baixo peso molecular e biochar), aditivos inorgânicos (fosfato, adubo nitrogenado e $Na_2S$) e a inoculação de microrganismos associados às raízes das plantas (fungos micorrízicos arbusculares, bactérias endofíticas e rizosféricas).

Essas alternativas mostraram-se eficazes para potencializar a fitorremediação em ambientes contaminados por EPTs, contribuindo para orientar futuras pesquisas voltadas à prospecção de novas espécies e ao aprimoramento de técnicas aplicadas à recuperação de solos degradados, bem como pesquisas que busquem ampliar a capacidade das plantas lenhosas e semi lenhosas em absorver e estabilizar EPT em solos impactados pela mineração.

## 5. Referências

AHMAD, Z.; KHAN, S. M.; PAGE, S. Politics of the natural vegetation to balance the hazardous level of elements in marble polluted ecosystem through phytoremediation and physiological responses. **Journal of Hazardous Materials**, v. 414, p. 125451, 2021.

AYADI, O.; TLILI, K.; BOURGERIE, S.; BEJAOUI, Z. Assessment of soil contamination by trace elements and environmental risks in soils from iron mining areas. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 23, p. 367, 2026.

BĂBĂU, A. M. C.; MICLE, V.; DAMIAN, G. E. et al. Lead and copper removal from sterile dumps by phytoremediation with *Robinia pseudoacacia*. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 9842, 2024.

BAI, T.; LIU, Y. Y.; MUHAMMAD, I.; YANG, X.; YIN, X. J.; BAI, L.; WANG, Y. J. Mixed nitrogen form addition facilitates the growth adaptation of legume plant to heavy metal contamination in degraded mining areas. **Global Ecology and Conservation**, v. 24, p. e01387, 2020.

BENNIS, M.; PEREZ-TAPIA, V.; ALAMI, S.; BOUHNIK, O.; LAMIN, H.; ABDELMOUMEN, H.; BEDMAR, E. J.; EL IDRISSI, M. M. Characterization of plant growth-promoting bacteria isolated from the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* growing in metal-contaminated mine tailings in eastern Morocco. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114321, 2022.

BRANDÃO, M. C. S.; MARTINS, F. M.; ACCIOLY, A. M. A.; SANTOS, N. M.; ROMÃO, M. V. V.; AZEVEDO, A. D. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals through the selection of native plants near mining areas in Inner Mongolia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 94501–94514, 2023.

CAMPOS, R. F. F. de; BIUDARO, R. E. Análise da tolerância e fitorremediação de mudas de Pinus taeda sob diferentes concentrações de resíduo de lodo de curtume. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 78–93, 2025.

CHAVERRA, L. M.; CUERVO, D. P.; GUTIÉRREZ, A. L. Mercury-accumulated plants with phytoremediation potential in a northwestern region of Colombia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 25353–25371, 2025.

CHEN, J.; ZHANG, X.; KUANG, M.; CUI, K.; XU, T.; LIU, X.; ZHUO, R.; QIN, Z.; BU, Z.; HUANG, Z.; LI, H.; HUANG, J.; LIU, T.; ZHU, Y. Endophytic Enterobacter sp. YG-14 mediated arsenic mobilization through siderophore and its role in enhancing phytostabilization. **Journal of Hazardous Materials**, v. 465, p. 133206, 2024.

CHEN, X. F.; WANG, G.; MEI, Y. X.; ZHAO, H. J.; MA, Y. Y. Mineral resources of Asia continent: Resource endowment, mining industry pattern, and contributions to the world economy. **China Geology**, v. 9, p. 1–24, 2026.

CHEN, Y. et al. Analysis of metal(loid) pollution and possibilities of electrokinetic phytoremediation of abandoned coking plant soil. **Science of the Total Environment**, v. 870, p. 161982, 2023.

DONATIEN, Y. K. G.; JEMO, M.; SOULAIMANI, A.; HAFIDI, M.; GHAROUS, M.; MEJAHED, K. Sustainable strategy for rehabilitating phosphate mining sites and valorisation of phosphate industry by-products and sludge using pistachio tree (Pistacia atlantica), false pepper (Schinus molle), and eucalyptus (Eucalyptus globulus) trees. **Science of The Total Environment**, v. 937, p. 173485, 2024.

EL-SAPPAH, A. H. et al. Plants' molecular behavior to heavy metals: from criticality to toxicity. Frontiers

in Plant Science, v. 15, 2024.

ERNST, W. H. O. Evolution of metal tolerance in higher plants. **Forest Snow and Landscape Research**, v. 80, n. 3, p. 251–274, 2006.

FREITAS, F. et al. Native accumulator plants with a differential mercury phytoremediation potential in a region in Southern Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 54, p. 63120–63135, 2024.

GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. del C. A.; CARRILLO-GONZÁLEZ, R.; CUELLAR-SÁNCHEZ, A.; DELGADO-ALVARADO, A.; SUÁREZ-ESPINOSA, J.; RÍOS-LEAL, E.; SOLÍS-DOMÍNGUEZ, F. A.; MALDONADO-MENDOZA, I. E. Phytoremediation assisted by mycorrhizal fungi of a Mexican defunct lead-acid battery recycling site. **Science of the Total Environment**, v. 650, pt. 2, p. 3134–3144, 2019.

HASSAN, S. et al. Revitalizing contaminated lands: A state-of-the-art review on the remediation of mine-tailings using phytoremediation and genomic approaches. **Chemosphere**, v. 356, p. 141889–141889, 2024

HESAMI, R.; SALIMI, A.; GHADERIAN, S. M. Lead, zinc, and cadmium uptake, accumulation, and phytoremediation by plants growing around Tang-e Douzan lead–zinc mine, Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 9, p. 8701–8714, jan. 2018.

ISLAM, M. M.; SAXENA, N.; SHARMA, D. Phytoremediation as a Green and Sustainable Prospective Method for Heavy Metal Contamination: A Review. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1269–1288, 2024.

MANARA, A. et al. Evolution of the metal hyperaccumulation and hypertolerance traits. **Plant, Cell & Environment**, v. 43, n. 12, p. 2969–2986, 2020.

MEI, Zhenran; ZHAO, Zhongqiu; HE, Ying; BAI, Hang; SHI, Mengchao; LI, Ruofei; JIANG, Shun. Solid-waste-derived reconstructed soil drives synergistic restoration of abandoned polymetallic mining sites: Evidence from soil properties and microbial network. **Journal of Environmental Sciences**, 2026.

PIEDRA, J. L. L.; JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ, S. M.; VELÁSQUEZ-QUESQUÉN, J. D.; HOYOS ALAYO, W. M.; MONTEZA ARBULU, C. A. Bioremediation of arsenic in groundwater using residues of the fungus *Suillus luteus*. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, 2026.

REN, C.; QI, Y.; HUANG, G.; YAO, S.; YOU, J.; HU, H. Contributions of root cell wall polysaccharides to Cu sequestration in castor (*Ricinus communis* L.) exposed to different Cu stresses. **Journal of Environmental Sciences**, v. 88, p. 209–216, 2020.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Version 4.5.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

SINGH, V. et al. Heavy Metal Contamination in the Aquatic Ecosystem: Toxicity and Its Remediation Using Eco-Friendly Approaches. **Toxics**, v. 11, n. 2, p. 147, 2023.

TAN, H. W.; PANG, Y. L.; LIM, S.; CHONG, W. C. A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, p. 103043, 2023.

THANH, N. C. et al. Bio/phytoremediation potential of Leptospirillum ferrooxidans and *Ricinus communis* on metal contaminated mine sludge. **Chemosphere**, v. 339, p. 139739, 2023.

TZVETKOVA, N.; PETKOVA, K. Bioaccumulation of heavy metals by the leaves of *Robinia pseudoacacia* as a bioindicator tree in industrial zones. **Journal of Environmental Biology**, v. 36, p. 59–63, 2015. VALERIUS, M. B.; CARVALHO, E. H. de. Proposta metodológica para a análise do risco socioambiental de

barragens de rejeito de mineração do estado de Goiás (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 4, p. 116–128, 2020.

WANG, C. et al. Rhizosphere dynamics of heavy metals during phytoremediation of multi-metal contaminated soil by Celosia argentea. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 231, p. 111037, 2026.

WANI, K. I.; NAEEM, M.; AFTAB, T. Chromium in plant-soil nexus: Speciation, uptake, transport and sustainable remediation techniques. **Environmental Pollution**, v. 315, p. 120350, 2022.

WEI, R. et al. Characteristics of cadmium translocation and isotope fractionati on in *Ricinus communis* seedlings: Effects from split/cut-root and limited nutrients. **Science of The Total Environment**, v. 819, p. 152493, 2022.

XIAO, M. et al. Comprehensive Analysis of Mitochondrial Genomic Characteristics and Phylogenetic Analysis of the Plant Genus Ipomoea (Convolvulaceae) Species. **Biology**, v. 14, n. 12, p. 1696, 2025.

XING, W. et al. Cadmium, copper, lead and zinc accumulation in wild plant species near a lead smelter. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 198, p. 110683, jul. 2020.

YAN, X.; WANG, J.; SONG, H.; PENG, Y.; ZUO, S.; GAO, T.; DUAN, X.; QIN, D.; DONG, J. Evaluation of the phytoremediation potential of dominant plant species growing in a chromium salt–producing factory wasteland, **China. Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 7657–7671, 2020.

YAN, X.; WANG, J.; SONG, H.; PENG, Y.; ZUO, S.; GAO, T.; DUAN, X.; QIN, D.; DONG, J. Evaluation of the phytoremediation potential of dominant plant species growing in a chromium salt-producing factory wasteland, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 7657–7671, 2020.

YANG, L.; MA, X.; WANG, J.; ZHANG, K.; YANG, Z.; LI, J.; LIU, X.; WU, P.; LIN, Y.; SHANGGUAN, Z.; FAN, M. Temporal dynamics of rhizosphere bacterial community in the *Robinia pseudoacacia*–Mesorhizobium loti symbiotic system for remediation of cadmium-contaminated soils. **Applied Soil Ecology**, v. 198, p. 105375, 2024.

YAO, H. et al. The root-associated Fusarium isolated based on fungal community analysis improves phytoremediation efficiency of *Ricinus communis* L. in multi metal-contaminated soils. **Chemosphere**, v. 324, p. 138377, 2023.

YAO, Y.; ZHANG, X.; HUANG, Z.; LI, H.; HUANG, J.; CORTI, G.; WU, Z.; QIN, X.; ZHANG, Y.; YE, X.; FAN, H.; JIANG, L. A field study on the composition, structure, and function of endophytic bacterial community of *Robinia pseudoacacia* at a composite heavy metals tailing. **Science of the Total Environment**, v. 850, p. 157874, 2022.

YEBOAH, A. et al. Genome-wide association study identifies loci, beneficial alleles, and candidate genes for cadmium tolerance in castor (*Ricinus communis* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 171, p. 113842, 2021.

YI, L.; WU, M.; YU, F.; SONG, Q.; ZHAO, Z.; LIAO, L.; TONG, J. Enhanced cadmium phytoremediation capacity of poplar is associated with increased biomass and Cd accumulation under nitrogen deposition conditions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 246, p. 114154, 2022.

ZHANG, L. et al. A review of phytoremediation of environmental lead (Pb) contamination. **Chemosphere**, v. 362, p. 142691–142691, 2024

ZHANG, X. et al. Soil heavy metals and phytoremediation by *Populus deltoides* alter the structure and

function of bacterial community in mine ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104359, 2022.

ZHANG, X.; LOU, X.; ZHANG, H.; REN, W.; TANG, M. Effects of sodium sulfide application on the growth of *Robinia pseudoacacia*, heavy metal immobilization, and soil microbial activity in Pb–Zn polluted soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 197, p. 110563, 2020.

ZHANG, X.; YU, J.; HUANG, Z.; LI, H.; LIU, X.; HUANG, J.; ZHUO, R.; WU, Z.; QIN, X.; GAO, Y.; WANG, M.; ZHU, Y. Enhanced Cd phytostabilization and rhizosphere bacterial diversity of *Robinia pseudoacacia* L. by endophyte Enterobacter sp. YG-14 combined with sludge biochar. **Science of the Total Environment**, v. 787, p. 147660, 2021.

ZHOU, X. et al. Coupling phytoremediation efficiency and detoxification to assess the role of P in the Cu tolerant *Ricinus communis* L. **Chemosphere**, v. 247, p. 125965, 2020.

ZORLUER, O.; YALCIN, I. E.; NALLBANI, B. G.; OZYIGIT, I. I. Integrated tree and soil-based monitoring of vehicular pollution in a megacity. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 23, p. 422, 2026.