

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO HENRIQUE VALENÇA DE MELLO

**TOLERÂNCIA E RESPOSTA BIOQUÍMICA DE *Canavalia ensiformis* SOB
ESTRESSE POR CÁDMIO**

FRANCISCO BELTRÃO

2025

RICARDO HENRIQUE VALENÇA DE MELLO

**TOLERÂNCIA E RESPOSTA BIOQUÍMICA DE *Canavalia ensiformis* SOB
ESTRESSE POR CÁDMIO**

**Tolerance and Biochemical Response of *Canavalia ensiformis* under Cadmium
Stress**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Profa. Dra. Daiana Schmidt

FRANCISCO BELTRÃO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RICARDO HENRIQUE VALENÇA DE MELLO

**TOLERÂNCIA E RESPOSTA BIOQUÍMICA DE *Canavalia ensiformis* SOB
ESTRESSE POR CÁDMIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/dezembro/2025

Daiana Schmidt
Doutorado em Ciências
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria Helene Giovanetti Canteri
Doutorado em Tecnologia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Denise Andreia Szymczak
Doutorado em Silvicultura
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

FRANCISCO BELTRÃO

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Daiana Schmidt, pela dedicação, paciência e confiança depositadas ao longo de toda a realização deste trabalho. Sua orientação segura, rigor científico e apoio constante foram fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal, tornando possível a concretização desta pesquisa.

Estendo meus agradecimentos aos colegas que auxiliaram nos cuidados com as plantas, especialmente no acompanhamento diário, irrigação, manutenção das condições experimentais e apoio nas rotinas do laboratório. A colaboração de vocês foi essencial para o bom andamento do experimento e para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Agradeço também à banca examinadora, pela disponibilidade, pelas contribuições valiosas e pelas reflexões que enriqueceram este estudo. A experiência e o olhar crítico de cada integrante foram fundamentais para aprimorar a qualidade científica deste trabalho.

Registro meu sincero agradecimento ao Laboratório Multiusuário de Análises Biológicas e Biologia Molecular - Lab BioMol da UTFPR, sediado no Campus de Dois Vizinhos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo empréstimo do nitrogênio líquido necessário para as análises bioquímicas. A cooperação entre os campi foi determinante para viabilizar etapas cruciais da metodologia empregada.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto de apoio, incentivo e parceria foi essencial para que este projeto se tornasse realidade.

RESUMO

A contaminação do solo por cádmio (Cd) representa um importante desafio ambiental devido à sua elevada toxicidade, persistência e efeitos negativos sobre plantas, organismos e ecossistemas. Diante da necessidade de alternativas sustentáveis para a recuperação de áreas degradadas, este trabalho avaliou o potencial fitorremediador do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) por meio de análises morfofisiológicas e bioquímicas após exposição ao Cd. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando vasos com areia esterilizada e quatro tratamentos (0, 300, 600 e 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$), aplicados em dose única após 36 dias de cultivo das plântulas, garantindo completo estabelecimento radicular. As plantas permaneceram expostas ao metal durante 8 dias. Foram analisados o crescimento (altura da parte aérea, comprimento de raízes, massa seca da parte aérea e raízes), a concentração de Cd nos tecidos, o índice de translocação (IT), as concentrações de proteínas solúveis e a atividade das enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) nas folhas. Os resultados indicaram ausência de diferenças significativas nas características morfofisiológicas, sugerindo tolerância inicial ao estresse por Cd no período avaliado, embora sinais visuais de dano tenham sido observados nas maiores concentrações. A determinação das concentrações de Cd revelou acúmulo crescente e dependente da dose, com predominância nas raízes, padrão compatível com espécies que atuam principalmente por fitoestabilização. O IT apresentou aumento com as doses, mas manteve valores moderados, indicando transporte limitado do metal para a parte aérea. Do ponto de vista bioquímico, não houve diferenças estatísticas para a concentração de proteínas solúveis e atividade das enzimas SOD e CAT, sugerindo que o curto período de exposição não foi suficiente para desencadear respostas antioxidantes intensas nas folhas, embora tendências de variação reforcem a ativação inicial do sistema de defesa. Os resultados mostram que *C. ensiformis* combina rusticidade, capacidade de acúmulo radicular de Cd e manutenção do metabolismo em condições moderadas de estresse, evidenciando ser uma espécie promissora para a fitorremediação, especialmente em estratégias de fitoestabilização. Conclui-se que a espécie representa uma alternativa viável, de baixo custo e ambientalmente adequada para mitigação de áreas contaminadas por Cd, e recomenda-se que estudos futuros incluam períodos mais longos de exposição, diferentes tipos de solo, avaliar outras enzimas, ciclos repetidos de aplicação e interações com microrganismos rizosféricos para ampliar a compreensão da eficiência fitorremediadora da espécie.

Palavras-chave: fitorremediação; metais pesados; feijão-de-porco; estresse oxidativo.

ABSTRACT

Soil contamination by cadmium (Cd) represents an important environmental challenge due to its high toxicity, persistence, and negative effects on plants, organisms, and ecosystems. In light of the need for sustainable alternatives for the recovery of degraded areas, this study evaluated the phytoremediation potential of jack bean (*Canavalia ensiformis*) through morphophysiological and biochemical analyses following exposure to Cd. The experiment was conducted in a greenhouse using pots filled with sterilized sand and four treatments (0, 300, 600, and 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$), applied as a single dose after 36 days of seedling cultivation, ensuring complete root establishment. The plants remained exposed to the metal for 8 days. Growth parameters (shoot height, root length, shoot and root dry mass), Cd concentration in plant tissues, the translocation index (TI), soluble protein concentrations, and the activity of the antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in leaves were evaluated. The results indicated no significant differences in morphophysiological characteristics, suggesting initial tolerance to Cd stress during the assessed period, although visual signs of damage were observed at the highest concentrations. Determination of Cd concentrations revealed increasing, dose-dependent accumulation, with a predominance in roots, a pattern consistent with species that act mainly through phytoestabilization. The TI increased with the doses but remained at moderate levels, indicating limited transport of the metal to the shoot. From a biochemical perspective, no statistical differences were observed for soluble protein concentrations or for the activity of SOD and CAT, suggesting that the short exposure period was not sufficient to trigger strong antioxidant responses in the leaves, although variation trends reinforce the onset of defense system activation. The results show that *C. ensiformis* combines robustness, the ability to accumulate Cd in roots, and maintenance of metabolic functions under moderate stress conditions, demonstrating its potential for phytoremediation, especially in phytoestabilization strategies. It is concluded that the species represents a viable, low-cost, and environmentally appropriate alternative for mitigating Cd-contaminated areas, and future studies are recommended to include longer exposure periods, different soil types, evaluation of additional enzymes, repeated application cycles, and interactions with rhizospheric microorganisms to further improve the understanding of the species' phytoremediation efficiency.

Keywords: phytoremediation; heavy metals; jack bean; oxidative stress.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fontes de contaminação de metais pesados..... | 7 |
| Figura 2 - Diferentes mecanismos de fitorremediação..... | 11 |
| Figura 3 - Estresse oxidativo das plantas..... | 14 |
| Figura 4 - Via metabólica antioxidante em plantas..... | 15 |
| Figura 5 - Etapa de germinação das sementes de feijão-de-porco em substrato estéril..... | 17 |
| Figura 6 - Plântulas de feijão-de-porco transplantadas aos 18 dias após emergência para vasos de areia..... | 18 |
| Figura 7 - Plantas de feijão-de-porco no dia da coleta, sob exposição de cádmio..... | 18 |
| Figura 8 - Separação do sobrenadante, utilizado para análises bioquímicas, após centrifugação..... | 19 |
| Figura 9 - Ensaio enzimático da superóxido dismutase (SOD)..... | 20 |
| Figura 10 - Danos observados em folhas cotiledonares de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio ao oitavo dia de exposição ao metal (T0 = 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T1 = 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T2 = 600 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T3 = 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$)..... | 22 |
| Figura 11 - Concentração de cádmio (mg Kg^{-1}) na parte aérea de plantas de feijão-de-porco..... | 25 |
| Figura 12 - Concentração de cádmio (mg Kg^{-1}) na raiz de plantas de feijão-de-porco..... | 26 |
| Figura 13 - Índice de translocação de cádmio nas plantas de feijão-de-porco. | 28 |
| Figura 14 - Curva padrão de proteína pelo método de Bradford (1976). Padrão: albumina sérica bovino (BSA)..... | 29 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 - Comparação das médias pelo teste de Tukey das características morfofisiológicas de plantas de feijão-de-porco submetidas em função de doses de cádmio ao oitavo dia de exposição ao metal (T0 = 0 umol L⁻¹; T1 = 300 umol L⁻¹; T2 = 600 umol L⁻¹; T3 = 900 umol L⁻¹)..... | 22 |
| Tabela 2 - Comparação das médias pelo teste de Tukey nas concentrações de proteínas solúveis em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio (T0 = 0 umol L⁻¹; T1 = 300 umol L⁻¹; T2 = 600 umol L⁻¹; T3 = 900 umol L⁻¹)..... | 30 |
| Tabela 3 - Comparação das médias pelo teste de Tukey das atividades enzimáticas de superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) em folhas de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio (T0 = 0 umol L⁻¹; T1 = 300 umol L⁻¹; T2 = 600 umol L⁻¹; T3 = 900 umol L⁻¹)..... | 31 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Análise de variância para o comprimento da raiz de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio..... | 47 |
| Quadro 2 - Análise de variância da massa seca da raiz de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio..... | 47 |
| Quadro 3 - Análise de variância do comprimento da parte aérea de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio..... | 47 |
| Quadro 4 - Análise de variância da massa seca da parte aérea de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio..... | 47 |
| Quadro 5 - Análise de variância da concentração de cádmio na parte aérea de plantas de feijão-de-porco..... | 48 |
| Quadro 6 - Análise de variância da concentração de cádmio na raiz de plantas de feijão-de-porco..... | 48 |
| Quadro 7 - Análise de variância do índice de translocação de cádmio de plantas de feijão-de-porco..... | 48 |
| Quadro 8 - Análise de variância da concentrações de proteínas solúveis (mg Kg ⁻¹) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio..... | 48 |
| Quadro 9 - Análise de variância para atividade da enzima Superóxido dismutase (SOD) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio..... | 49 |
| Quadro 10 - Análise de variância da enzima Catalase (CAT) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio..... | 49 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 5 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 6 |
| 2.1 | Objetivo geral..... | 6 |
| 2.2 | Objetivos específicos..... | 6 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 3.1 | Metais pesados e contaminação..... | 7 |
| 3.2 | Cádmio..... | 8 |
| 3.3 | Fitorremediação..... | 10 |
| 3.4 | Potencial da <i>C. ensiformis</i> na fitorremediação de metais pesados... | 12 |
| 3.5 | Metabolismo do estresse..... | 13 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 17 |
| 4.1 | Material vegetal e condições de crescimento..... | 17 |
| 4.2 | Análise do desempenho das plântulas..... | 18 |
| 4.3 | Análise dos parâmetros bioquímicos..... | 19 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 21 |
| 5.1 | Características morfofisiológicas..... | 21 |
| 5.2 | Características bioquímicas..... | 29 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 34 |
| | REFERÊNCIAS..... | 35 |
| | APÊNDICE A - Quadros das análises de variância (ANOVA)..... | 47 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente industrialização e o uso indiscriminado de produtos químicos têm contribuído significativamente para a contaminação dos ecossistemas por metais pesados, elementos que, mesmo em baixas concentrações, podem causar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana (Jomova *et al.*, 2025). Entre esses contaminantes, o cádmio (Cd) destaca-se por sua alta toxicidade, mobilidade no solo e persistência ambiental. Quando presente no solo, especialmente em ambientes alagados, o Cd pode ser absorvido pelas plantas, aumentando sua biodisponibilidade e representando um risco biológico relevante (Tao *et al.*, 2025).

Sharma *et al.* (2023), afirmam que diante da dificuldade de remoção desses contaminantes por métodos convencionais, técnicas alternativas, mais sustentáveis e de menor custo, têm ganhado destaque. A fitorremediação, é uma dessas estratégias, trata-se de uma tecnologia baseada na utilização de plantas com capacidade de absorver, acumular ou transformar contaminantes, promovendo a descontaminação de solos. Essa abordagem é particularmente eficaz para metais pesados, especialmente quando são utilizadas espécies vegetais conhecidas como plantas acumuladoras (Wang *et al.*, 2019).

As plantas acumuladoras são caracterizadas por sua habilidade de tolerar altas concentrações de metais em seus tecidos sem sofrer danos fisiológicos severos. Essas espécies possuem mecanismos bioquímicos específicos que lhes permitem não apenas absorver o metal, mas também sequestrá-lo em compartimentos celulares, como vacúolos, reduzindo sua toxicidade (Tang *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2024). Além disso, muitas acumuladoras ativam respostas antioxidantes e mecanismos de defesa que as tornam resilientes ao estresse químico provocado pelos metais (Raj; Sonne e Kim, 2023).

O feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), uma leguminosa de rápido crescimento e ampla distribuição em regiões tropicais, tem sido estudado como uma possível espécie fitorremediadora (Rangel *et al.*, 2023). Essa espécie tem a capacidade de tolerar a presença de metais pesados no solo, como o Cd, acumulando-os tanto na parte aérea quanto nas raízes (Puga *et al.*, 2015), além da facilidade de cultivo e a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, características que o tornam uma candidata promissora para uso em áreas degradadas (Ngwenyan e Dakora, 2023).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho busca avaliar o potencial fitorremediador do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) na presença de cádmio (Cd), por meio de sua resposta bioquímica quando submetido ao estresse causado pelo metal.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a tolerância de plântulas de feijão-de-porco sob doses crescentes de Cd (0, 300, 600, 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$) cultivadas em vasos de areia contaminado;
- Avaliar os impactos do cádmio sobre o crescimento e o desenvolvimento de plântulas de feijão-de-porco, por meio de parâmetros como altura da parte aérea, comprimento da raiz e massa seca dessas estruturas;
- Analisar a capacidade de absorção e o acúmulo de cádmio nas raízes e na parte aérea das plântulas, determinando as respectivas concentrações do metal nesses tecidos e o índice de translocação do metal;
- Caracterizar a resposta da via antioxidativa de feijão-de-porco na presença de doses crescentes de Cd.

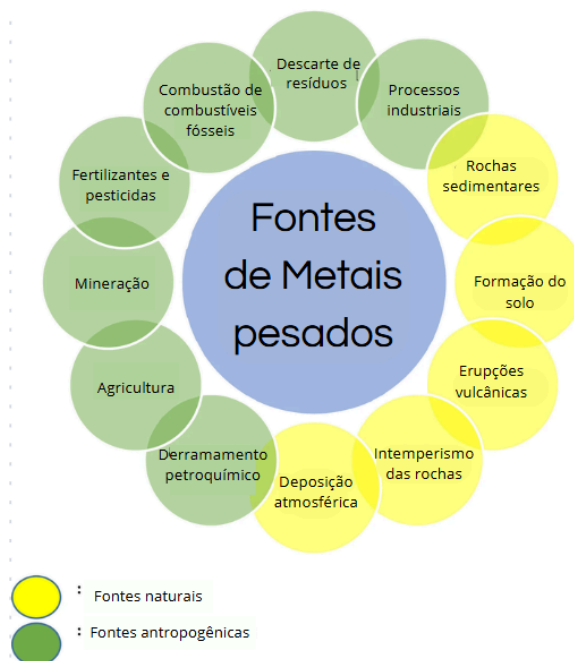
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metais pesados e contaminação

A presença de metais pesados no ambiente representa uma das mais graves ameaças à qualidade do solo, à biodiversidade e à saúde humana. Esses elementos são definidos como substâncias com densidade superior a $5,0 \text{ g/cm}^3$, sendo alguns deles altamente tóxicos, como chumbo (Pb), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg). Outros, como cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn), embora essenciais em pequenas quantidades para o metabolismo de plantas e animais, tornam-se perigosos quando acumulados em concentrações elevadas (Chu, 2018).

A contaminação ocorre quando os teores naturais desses elementos no solo são excedidos, geralmente em função de atividades humanas. Entre os principais fatores estão práticas agrícolas intensivas, despejo de resíduos industriais, expansão urbana desordenada (Nascimento; Nascimento e Cunha, 2020), e outros, indicados na Figura 1, que promovem a liberação de metais pesados no solo e na atmosfera.

Figura 1 - Fontes de contaminação de metais pesados



Fonte: Adaptado de Nnaji *et al.* (2023)

A industrialização, especialmente após a Revolução Industrial, impulsionou o uso desses metais em larga escala. O avanço tecnológico e a crescente demanda por recursos minerais contribuíram significativamente para o aumento da produção

global de metais pesados e, conseqüentemente, para sua disseminação no ambiente. Entre os contaminantes mais frequentemente encontrados nos solos estão níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu), cobalto (Co), zinco (Zn), manganês (Mn), alumínio (Al) e mercúrio (Hg) (Khalid *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2019).

Esses contaminantes comprometem a produtividade agrícola, representam riscos à saúde humana e causam perda de biodiversidade, afetando tanto a flora quanto a fauna e promovendo o desequilíbrio ecológico (Das *et al.*, 2021).

3.2 Cádmio

O cádmio (Cd) é um metal pesado que tem despertado crescente atenção nos campos da toxicologia, da ciência ambiental e da saúde pública (Ling *et al.*, 2021). Descoberto em 1817 pelo químico Friedrich Stromeyer, o elemento foi inicialmente isolado como um subproduto da purificação de minerais de zinco (Wang *et al.*, 2023). Esse elemento pode ser encontrado em diferentes aplicações como na galvanoplastia (Abdulkareem *et al.*, 2023), ligas metálicas (Zhang *et al.*, 2018), pigmentos (Liu *et al.*, 2020) e, sobretudo, na fabricação de baterias recarregáveis de níquel-cádmio (Sarmah *et al.*, 2022).

Apesar de suas aplicações industriais, o Cd é considerado como um dos contaminantes ambientais mais tóxicos, estando suas principais fontes de liberação no ambiente ligadas à mineração (Shi *et al.*, 2022), fundição (Liu; Qiao e Sun, 2023) e descarte inadequado de resíduos (Marques *et al.*, 2022). Complementarmente, Niño-Savala *et al.* (2019), citam também o uso de fertilizantes fosfatados, e afirmam que o Cd, uma vez presente no solo, pode persistir por longos períodos, acumulando-se em organismos vivos ao longo da cadeia alimentar.

A disponibilidade de Cd está fortemente relacionada às características físico-químicas do solo. Fatores como a textura do solo, o teor de matéria orgânica e o pH influenciam diretamente a mobilidade deste metal (Niño-Savala *et al.*, 2019). Solos argilosos e com pH neutro ou básico tendem a reter o metal; em contrapartida, solos mais arenosos e com pH ácido favorecem a liberação do Cd (Arfania, 2021), aumentando o risco de contaminação.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 460/2013 (Brasil, 2013), estabelece valores limites para metais pesados no solo e em água subterrânea. Para o Cd, o

valor de prevenção é de $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de massa seca de solo, e os valores de investigação, são divididos em três grupos: áreas agrícolas, áreas residenciais e áreas industriais, com valores de 3 mg kg^{-1} , 8 mg kg^{-1} e 20 mg kg^{-1} , respectivamente (Brasil, 2013).

Entre os metais pesados, o Cd se destaca por sua alta toxicidade e mobilidade no solo, sendo facilmente absorvido pelas raízes e translocado para os tecidos aéreos (Zulfiqar *et al.*, 2022). Nas folhas, interfere diretamente na fotossíntese, reduzindo a fixação de carbono e a síntese de clorofila, o que compromete a eficiência fotossintética e resulta em sintomas de clorose, necrose foliar, redução na formação de raízes laterais e menor teor relativo de água nas folhas, caracterizando um quadro de estresse osmótico (Guo *et al.*, 2023; Zulfiqar *et al.*, 2022).

O Cd também compete com nutrientes essenciais como cálcio, zinco e ferro, prejudicando seu transporte e causando deficiências nutricionais severas (Zulfiqar *et al.*, 2022). Bioquimicamente, esse metal induz a geração excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) em organelas como cloroplastos e mitocôndrias, provocando peroxidação lipídica e danos estruturais (Mansoor *et al.*, 2023; Zulfiqar *et al.*, 2022). Esses efeitos combinados (fotossíntese prejudicada, desbalanço hídrico e nutricional, e estresse oxidativo) levam à redução do crescimento e da produtividade vegetal. Adicionalmente, por sua semelhança química com o cálcio, o Cd pode interferir em sistemas de sinalização celular, como os que regulam a abertura estomática, agravando ainda mais os distúrbios fisiológicos (Guo *et al.*, 2023; Zulfiqar *et al.*, 2022).

Em síntese, o Cd representa um estressor altamente tóxico para as plantas, afetando processos fisiológicos vitais e intensificando o estresse oxidativo. Como resposta, os vegetais reforçam a produção de compostos sulfurados, como glutatona e fitoquelatinas, para quelar e compartimentalizar o metal, além de ativarem o sistema antioxidante como forma de limitar os danos celulares (Mansoor *et al.*, 2023; Zulfiqar *et al.*, 2022). A eficiência dessas estratégias define o grau de tolerância da espécie ao Cd, embora, em concentrações excessivas, esse metal ultrapasse a capacidade defensiva da planta, comprometendo sua viabilidade (Zulfiqar *et al.*, 2022). Desta forma, é possível afirmar que a presença de Cd pode afetar significativamente o metabolismo das plantas, provocar alterações

morfológicas, redução na taxa de crescimento e prejuízos à fotossíntese (Li *et al.*, 2023), prejudicando drasticamente o ecossistema.

3.3 Fitorremediação

A fitorremediação é uma abordagem inovadora e promissora para a remediação de áreas contaminadas, especialmente em contextos nos quais a presença de metais pesados em excesso compromete a qualidade do solo e da água (Zhang *et al.*, 2024). Trata-se de uma técnica que utiliza de plantas com a capacidade para extrair, estabilizar, transformar, ou degradar os contaminantes ambientais (Jia *et al.*, 2023), podendo restabelecer as condições ecológicas.

A técnica combina princípios da ecologia vegetal, da microbiologia do solo e da química ambiental para alcançar a recuperação ambiental de forma sustentável, com menor custo e menor geração de resíduos secundários em comparação com métodos físico-químicos convencionais (Sharma *et al.*, 2023).

Como principais fatores para possibilitar a fitorremediação, certas espécies vegetais têm a capacidade fisiológica e bioquímica para interagir diretamente com os contaminantes presentes no ambiente (Tang *et al.*, 2023). Essas interações ocorrem tanto no nível das raízes quanto nos tecidos internos da planta, por meio de rotas metabólicas complexas que incluem a bioacumulação, a quelação, a compartimentalização intracelular e transformação enzimática de compostos tóxicos (Yu *et al.*, 2024).

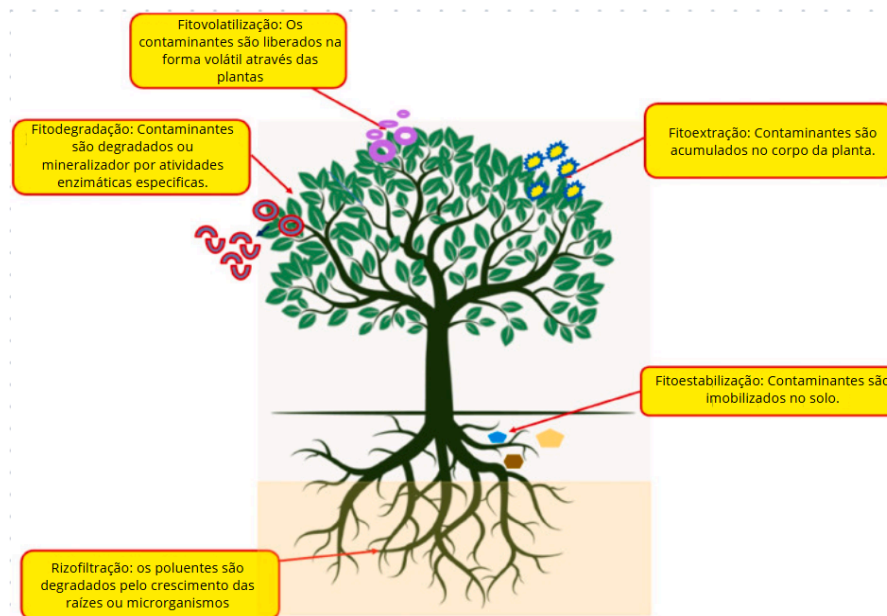
Em geral as plantas mais eficazes na fitorremediação são aquelas que apresentam crescimento rápido, elevada biomassa, sistema radicular profundo e extenso, além de resiliência a condições ambientais adversas (Guan *et al.*, 2022; Rangel *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2024). Em muitos casos, essas características são acompanhadas por uma associação simbiótica com microrganismos do solo, como bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPRs) (Guan *et al.*, 2023) e fungos micorrízicos (Rangel *et al.*, 2023), os quais desempenham um papel essencial na mobilização e degradação de contaminantes.

Existem plantas classificadas como hiperacumuladoras, capazes de acumular concentrações que variam de mais de 100 até 10.000 mg g⁻¹ de massa seca, ou até mais, dependendo do elemento. Essa capacidade excepcional se destaca quando comparada a outras espécies que crescem no mesmo tipo de solo,

demonstrando uma diferença de várias ordens de magnitude na concentração de metais pesados acumulados (Van Der Ent e Rylott, 2024).

As plantas podem apresentar diferentes métodos de fitorremediação, sendo elas, a fitoextração, a fitodegradação, a rizofiltração, a fitoestabilização, e a fitovolatilização, como mostra a Figura 2 adaptada de Yadav *et al.* (2023).

Figura 2 - Diferentes mecanismos de fitorremediação



Fonte: Adaptado de Yadav *et al.* (2023)

A fitoextração é um mecanismo em que as raízes absorvem as substâncias contaminantes e as transferem para as partes aéreas da planta, como caules e folhas, onde se acumulam. Posteriormente a biomassa contaminada é colhida e pode ser tratada ou descartada de forma segura. Essa estratégia é considerada eficiente e viável economicamente, especialmente quando se utilizam espécies vegetais com alta capacidade de acúmulo de metais, crescimento rápido e tolerância a ambientes contaminados (Sharma *et al.*, 2023).

Na fitodegradação, as plantas absorvem, armazenam e degradam os contaminantes em seus próprios tecidos por meio de processos metabólicos. Esses compostos são inicialmente convertidos em formas mais simples, o que permite sua incorporação pelos vegetais e contribui para o aumento do seu desenvolvimento (Nnaji *et al.*, 2023).

A rizofiltração é uma técnica que utiliza as raízes das plantas para remover substâncias tóxicas presentes na água de rios, lagos ou lençóis freáticos. Esse

processo pode ocorrer devido a mecanismos como a formação de precipitados, a ligação dos metais com outras substâncias (complexação), a mudança do estado químico dos metais (valência) ou a fixação desses contaminantes nas raízes (sorção). Além disso, essa prática pode contribuir para a fitoestabilização, evitando que se espalhem (Bakshe e Jugade, 2023).

A fitoestabilização é uma técnica de fitorremediação que utiliza plantas para imobilizar contaminantes no solo, evitando que se disseminem para outras áreas, como águas subterrâneas ou ar (Xie e Van Zyl, 2023). Ela age principalmente através da fixação dos contaminantes nas raízes e nas mudanças químicas do solo, controlando a mobilidade dos elementos tóxicos sem removê-los (Visconti *et al.*, 2020). Essa técnica é particularmente indicada para a remediação de áreas degradadas, como rejeitos de mineração contaminados por metais pesados, sendo frequentemente considerada uma solução de baixo custo (Hammond *et al.*, 2020). Embora não elimine os poluentes, a fitoestabilização ajuda a prevenir a contaminação ambiental, mas requer monitoramento constante para garantir sua eficácia ao longo do tempo (Xie e Van Zyl, 2023).

Algumas plantas são capazes de absorver contaminantes presentes no solo, e transformá-los metabolicamente em substâncias voláteis menos tóxicas (fitovolatilização), posteriormente liberadas na forma de gases para a atmosfera (Yan *et al.*, 2020). Apenas algumas plantas possuem naturalmente essa capacidade, embora já existam pesquisas com plantas geneticamente modificadas para aprimorar essa habilidade (Lavanya; Viswanath e Sivapullaiah, 2024).

3.4 Potencial da *C. ensiformis* na fitorremediação de metais pesados

O feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) é uma leguminosa tropical que se destaca pelo rápido crescimento, rusticidade e ampla adaptação a diversas condições climáticas e de solo. Essas características tornam a espécie altamente promissora para aplicação em processos de fitorremediação de metais pesados (Rangel *et al.*, 2023).

Essa planta apresenta a capacidade de tolerar e acumular elementos tóxicos, como cádmio, chumbo e zinco, em seus tecidos, principalmente nas raízes e na parte aérea. Além disso, o desenvolvimento de alta biomassa favorece a extração eficiente desses contaminantes, aspecto essencial para a fitorremediação via fitoextração (Puga *et al.*, 2015).

O feijão-de-porco possui um sistema radicular profundo, que desempenha papel relevante na fitoestabilização. Ao acumular e imobilizar metais pesados, contribui para a estabilização do solo e para a redução da mobilidade desses contaminantes no ambiente (Silva *et al.*, 2018).

Outro diferencial da espécie é sua capacidade de realizar a fixação biológica de nitrogênio, o que melhora a fertilidade do solo e favorece o crescimento vegetal em ambientes degradados. Essa propriedade, associada à produção de cobertura vegetal que protege fisicamente o solo, contribui para a recuperação gradual da qualidade ambiental (Dantas *et al.*, 2019; Ngwenya e Dakora, 2023).

No estudo de López-Sánchez *et al.* (2025), foi demonstrado que *Canavalia ensiformis* manteve elevados níveis de biomassa aérea e radicular mesmo sob condições de alta salinidade, em torno de 10 dS/m, evidenciando uma notável plasticidade fenotípica. Nos indivíduos considerados tolerantes ao estresse salino, observou-se um maior acúmulo de nitrogênio nas folhas, além de um padrão seletivo na absorção de íons Na⁺. Esse comportamento sugere a atuação de mecanismos de exclusão iônica, que limitam a entrada desse cátion nos tecidos fotossintéticos, contribuindo para a tolerância à salinidade.

Lancheros; Brito e Guimarães (2023) identificaram que a *C. ensiformis* é uma alternativa viável para a fitorremediação de compostos orgânicos tóxicos, justamente por sua elevada capacidade de assimilação de nitrogênio, o que também contribui para a melhoria da qualidade do solo. Dessa forma, a espécie evidencia tolerância a estresses relacionados à salinidade e à contaminação orgânica por meio de ajustes no metabolismo nutricional e no desenvolvimento radicular (Lancheros; Brito e Guimarães, 2023; López-Sánchez *et al.*, 2025).

Dessa forma, o feijão-de-porco se destaca como uma planta estratégica para a fitorremediação, com potencial de aplicação em diferentes contextos de contaminação por metais pesados, além de ser uma alternativa viável para integração em sistemas agrícolas, inclusive em consórcios com outras espécies vegetais (Dantas *et al.*, 2019).

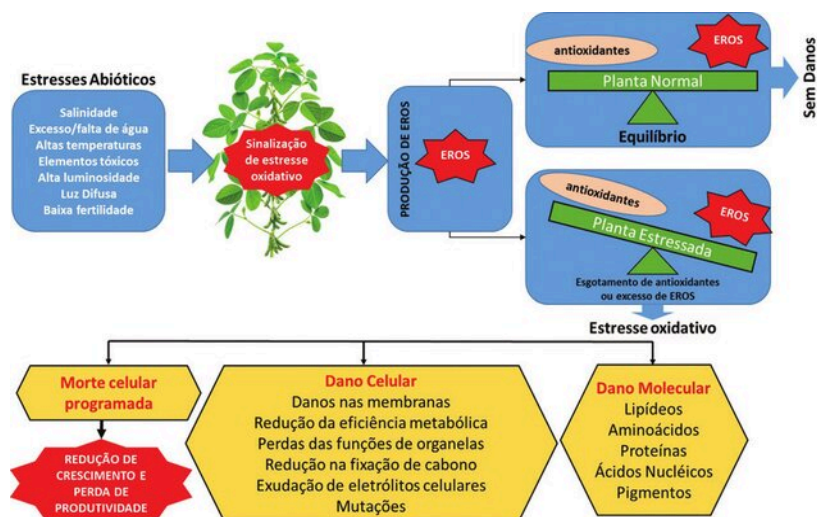
3.5 Metabolismo do estresse

As plantas estão constantemente sujeitas a diversos estresses abióticos, como seca, salinidade, temperaturas extremas e presença de metais pesados, os quais comprometem seu crescimento e produtividade (Mansoor *et al.*, 2023).

Entre esses, a presença de metais pesados no solo, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), arsênio (As), mercúrio (Hg) e níquel (Ni), representa um dos desafios ambientais mais severos (Emamverdian *et al.*, 2015; Mansoor *et al.*, 2023). Esses elementos formam complexos tóxicos com proteínas e ácidos nucleicos e induzem a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o radical superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($OH\cdot$) (Figura 3) (Salinitro *et al.*, 2020).

Isso resulta em clorose, degradação proteica, peroxidação lipídica, comprometimento da absorção de água e nutrientes, e inibição da fotossíntese e do metabolismo celular (Emamverdian *et al.*, 2015; Hansel *et al.*, 2021; Mansoor *et al.*, 2023).

Figura 3 - Estresse oxidativo das plantas



Fonte: Hansel *et al.* (2021)

Quando a planta detecta os contaminantes, desencadeiam-se complexas vias de sinalização que envolvem hormônios vegetais, mensageiros secundários e fatores de transcrição específicos (Mendes; Müller e Almeida, 2023).

O acúmulo excessivo de EROs é um dos principais sinais de estresse oxidativo, sendo o malondialdeído (MDA) um importante marcador desse processo por ser subproduto da peroxidação lipídica (Khan *et al.*, 2022). O H_2O_2 , embora atue como sinalizador em concentrações moderadas, em excesso pode oxidar proteínas e ácidos nucleicos (Hossain *et al.*, 2015).

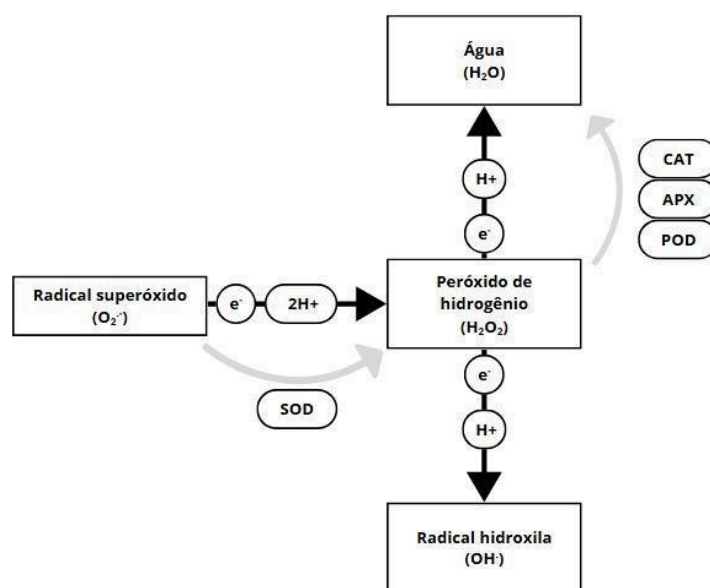
Para mitigar os danos, as plantas ativam mecanismos de defesa fisiológicos, bioquímicos e moleculares. No nível fisiológico, ocorre o fechamento dos estômatos,

reduzindo a perda de água e limitando as trocas gasosas e a fotossíntese (Guo *et al.*, 2022). No nível morfofisiológico, bioquímico e molecular, há alterações no crescimento, na morfologia e na composição bioquímica, como a produção de osmólitos e antioxidantes, além da regulação gênica e hormonal (Mendes; Müller e Almeida, 2023).

Bioquimicamente, destaca-se o acúmulo de osmoprotetores como prolina e glicina-betaína, e de pigmentos antioxidantes como os flavonoides. A prolina atua na osmorregulação, estabilização de estruturas celulares e eliminação de radicais livres (Seneviratne *et al.*, 2017). Paralelamente, as plantas ativam o sistema antioxidante enzimático e não enzimático. Entre os antioxidantes enzimáticos estão a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e peroxidase (POD), que atuam em conjunto na neutralização de EROs (Mansoor *et al.*, 2023; Mendes; Müller e Almeida, 2023).

A superóxido dismutase converte o radical superóxido em peróxido de hidrogênio, posteriormente é degradado pela catalase, predominante nos peroxissomos, promovendo a decomposição do H_2O_2 em água e oxigênio (Sharma e Ahmad, 2014), e pela ascorbato peroxidase, ativa em cloroplastos, mitocôndrias e citoplasma, utilizando o ascorbato como doador de elétrons (Figura 4) (Foyer e Kunert, 2024; Hansel *et al.*, 2021; Sharma e Ahmad, 2014).

Figura 4 - Via metabólica antioxidante em plantas



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2012)

Além disso, as plantas podem reduzir a absorção de metais por meio de barreiras na parede celular e menor permeabilidade radicular (Emamverdian *et al.*, 2015; Tiwari e Lata, 2018). Também produzem moléculas quelantes, como metalotioneínas e fitoquelatinas, que se ligam aos metais, formando complexos que são transportados para compartimentos celulares seguros, como os vacúolos (Emamverdian *et al.*, 2015; Mansoor *et al.*, 2023; Tiwari e Lata, 2018).

O sistema antioxidante não enzimático, composto por glutatona reduzida, ácido ascórbico e compostos fenólicos, também atua na redução dos danos causados pelos radicais livres (Emamverdian *et al.*, 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação durante o período de agosto a outubro de 2025, na UTFPR Francisco Beltrão (latitude -26.0850 e longitude -53.0911), em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro concentrações de cádmio (0, 300, 600, 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$, T0, T1, T2 e T3, respectivamente) e cinco repetições por tratamento. Sementes de *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco) foram dispostas para germinar em bandejas contendo substrato estéril (Figura 5), onde permaneceram até o completo desenvolvimento das folhas cotiledonares.

Figura 5 - Etapa de germinação das sementes de feijão-de-porco em substrato estéril



Fonte: Autoria própria (2025)

Após 18 dias, três plântulas foram transplantadas para vasos com capacidade de 2,8 litros, preenchidos com areia média lavada e autoclavada (Figura 6). Durante os 36 dias seguintes, as plântulas foram mantidas sob cultivo de irrigação semanal com 100 mL de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1938), e 200 mL de água quando necessário. Nesse intervalo, foi monitorado o desenvolvimento das plântulas e a ocupação do vaso pelo sistema radicular, garantindo o estabelecimento adequado previamente à aplicação dos tratamentos.

Figura 6 - Plântulas de feijão-de-porco transplantadas aos 18 dias após emergência para vasos de areia



Fonte: Autoria própria (2025)

Transcorridos os 36 dias iniciais de cultivo, as plântulas foram submetidas a uma aplicação única de Cd, nas concentrações estabelecidas, utilizando solução de cloreto de cádmio (CdCl_2) aplicada juntamente com a solução nutritiva. Após a aplicação, as plântulas permaneceram expostas ao Cd por 8 dias.

4.2 Análise do desempenho das plântulas

No oitavo dia após a aplicação de Cd, as plantas foram coletadas para análises morfofisiológicas (Figura 7), que incluíram a determinação da altura da plântula, comprimento de raiz, massa seca da parte aérea e das raízes. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar forçada a 60 °C até a obtenção de massa constante.

Figura 7 - Plantas de feijão-de-porco no dia da coleta, sob exposição de cádmio



Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ao nível de significância de 5% para comparação das médias obtidas, por meio do software RStudio.

Para a quantificação do Cd acumulado nas partes aéreas e radiculares foi utilizado o método de EPA (1996) em laboratório credenciado e, a partir dos dados obtidos, foi possível determinar o índice de translocação (IT) do Cd, por meio da fórmula de Abichequer e Bohnen (1998):

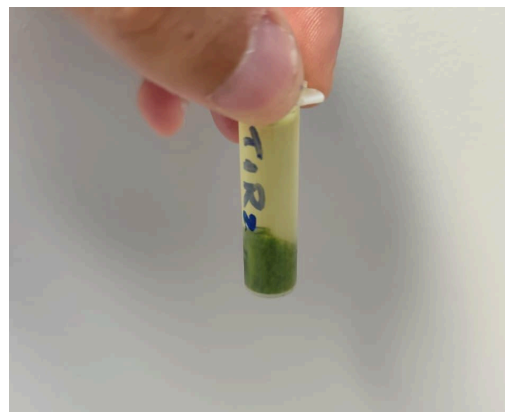
$$IT = \left(\frac{\text{quantidade de Cd acumulada na parte aérea}}{\text{quantidade total acumulada na plântula (parte aérea + raiz)}} \right) \times 100$$

4.3 Análise dos parâmetros bioquímicos

Para a avaliação do estresse oxidativo, as análises foram realizadas no laboratório da UTFPR Francisco Beltrão, e foi adotado o mesmo delineamento experimental (DIC), com três repetições por tratamento e três repetições técnicas. No oitavo dia de exposição ao Cd, foram coletadas as folhas trifoliadas completamente desenvolvidas em nitrogênio líquido e posteriormente armazenadas à -80 °C em ultrafreezer para as análises subsequentes das atividades das enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT).

A extração enzimática foi conduzida conforme o protocolo descrito por Azevedo *et al.* (1998). O material vegetal foi macerado em nitrogênio líquido, com adição de polivinilpolipirrolidona (PVPP) e tampão fosfato de potássio 0,1 mM, pH 7,5. Após a homogeneização, o material foi centrifugado, e o sobrenadante foi coletado, alocado em alíquotas e congelado. Esse extrato foi utilizado nas análises das atividades enzimáticas (Figura 8).

Figura 8 - Separação do sobrenadante, utilizado para análises bioquímicas, após centrifugação



Fonte: Aatoria própria (2025)

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada em espectrofotômetro, conforme os métodos descritos por Giannopolitis e Ries (1977) e Cembrowska-Lech *et al.* (2015). As reações ocorreram em câmara de reação iluminada por lâmpada fluorescente a 25 °C. A amostra foi adicionada a uma solução reacional contendo tampão fosfato de potássio 50 mM e pH 7,8, metionina, NBT, EDTA e riboflavina, totalizando 1,5 mL (Figura 9). Foram realizados brancos com e sem exposição à luz. A iluminação foi mantida por 5 minutos e, em seguida, a leitura foi realizada em espectrofotômetro com comprimento de onda de 560 nm. Os resultados foram expressos em unidades de SOD por miligrama de proteína (U SOD/mg).

Figura 9 - Ensaio enzimático da superóxido dismutase (SOD)



Fonte: Aatoria própria (2025)

A atividade da catalase (CAT) foi determinada em espectrofotômetro a 25 °C, utilizando cubetas de quartzo, segundo Kraus, McKersie e Fletcher (1995), com algumas modificações conforme Azevedo *et al.* (1998). A reação foi iniciada com a adição do extrato vegetal ao tampão fosfato de potássio 100 mM e pH 7,5. A degradação do peróxido de hidrogênio foi monitorada a 240 nm por 1 minuto. A atividade específica foi expressa em $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ de proteína, utilizando um coeficiente de extinção de $39,4 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ao nível de significância de 5% para comparação das médias obtidas por meio do software RStudio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características morfofisiológicas

A análise de variância para comprimento e massa seca de raiz e parte aérea mostrou que não houve efeito significativo das concentrações de Cd sobre as características morfofisiológicas avaliadas ($p > 0,05$) (Quadro 1, Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4). Os coeficientes de variação são menores que 15% (baixos), sendo eles de 2,9% para comprimento da parte aérea, 8,86% para massa da parte aérea, 10,05% para comprimento de raiz e 12,18% para massa de raiz, indicando boa precisão experimental.

A ausência de significância estatística para os parâmetros de crescimento (Tabela 1) indica que a *Canavalia ensiformis* foi capaz de manter seu desenvolvimento biométrico mesmo quando exposta à maior concentração de Cd ($900 \mu\text{mol.L}^{-1}$). Essa estabilidade na produção de biomassa, tanto aérea quanto radicular, é um indicador chave de tolerância, sugerindo que a espécie possui mecanismos fisiológicos eficientes para lidar com a toxicidade do metal sem comprometer seu crescimento vegetativo.

Contudo, a análise visual permitiu identificar sintomas qualitativos de fitotoxidez. Foram observadas clorose e necrose, principalmente nas folhas cotiledonares das plantas submetidas às maiores concentrações do metal, o que sugere que, embora o crescimento não tenha sido afetado estatisticamente, o Cd atingiu os tecidos foliares e provocou danos celulares localizados, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Danos observados em folhas cotiledonares de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio ao oitavo dia de exposição ao metal (T0 = 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T1 = 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T2 = 600 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T3 = 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$)



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 1 - Comparação das médias pelo teste de Tukey das características morfofisiológicas de plantas de feijão-de-porco submetidas em função de doses de cádmio ao oitavo dia de exposição ao metal (T0 = 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T1 = 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T2 = 600 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T3 = 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$)

| Tratamentos | Comp. Parte Aérea (cm) | Comp. Raiz (cm) | Massa Parte Aérea (g) | Massa Raiz (g) |
|-------------|------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| T0 | 41,90a | 34,91a | 12,67a | 4,04a |
| T1 | 41,96a | 35,41a | 13,27a | 3,83a |
| T2 | 42,55a | 34,21a | 13,64a | 3,83a |
| T3 | 41,52a | 30,98a | 12,21a | 3,49a |

Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

Diversos estudos descrevem o Cd como um dos metais mais fitotóxicos, capaz de provocar diminuição do crescimento, inibição da fotossíntese, desequilíbrios nutricionais e aumento do estresse oxidativo em várias espécies vegetais, afetando desde a fase inicial de germinação até a produção final (Zulfiqar *et al.*, 2022).

Em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*), por exemplo, a exposição ao Cd e ao cobalto (Co) resultou em reduções significativas no comprimento da parte aérea, na biomassa e no teor de pigmentos fotossintéticos, além de elevações nos níveis de malondialdeído (MDA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e na atividade de enzimas antioxidantes, o que caracteriza um processo de estresse oxidativo acentuado (Nessem *et al.*, 2023).

Quando esses resultados são comparados ao comportamento observado no feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), verifica-se que a manutenção das médias de comprimento e de massa seca entre os tratamentos (Tabela 1) indica que, nas condições experimentais adotadas, que incluem concentração de Cd (0 umol.L⁻¹; 300 umol.L⁻¹; 600 umol.L⁻¹; 900 umol.L⁻¹) aplicada e período de exposição (8 dias), a espécie apresentou tolerância suficiente para não sofrer reduções expressivas no crescimento inicial da planta. Essa característica está de acordo com a literatura, que reconhece *C. ensiformis* como uma leguminosa rústica, produtiva e amplamente utilizada como adubo verde e em processos de fitorremediação (Lancheros *et al.*, 2024).

Estudos recentes enfatizam esse potencial, Sousa *et al.* (2024) observaram que *C. ensiformis* cultivada em solo contaminado com doses crescentes de cobre (Cu) e zinco (Zn) apresentou elevada tolerância, com índice de tolerância superior a 70% para ambos os metais, além de expressiva capacidade de absorção e translocação de Zn. Mesmo quando exposta a doses mais elevadas, a espécie manteve desempenho satisfatório, indicando sua aplicabilidade em estratégias de fitorremediação de solos contaminados.

Resultados semelhantes foram obtidos para o níquel (Ni), Aguilar *et al.* (2025) verificaram que o aumento das concentrações de Ni não comprometeu de maneira significativa a produção de biomassa de *C. ensiformis*, sugerindo elevada tolerância e capacidade de acumulação do metal. Em estudo complementar, Raqueti *et al.* (2025) constataram que plântulas da espécie mantiveram a emergência e o

metabolismo do nitrogênio mesmo em solo contaminado com Ni, ressaltando a resiliência fisiológica da planta frente a metais potencialmente tóxicos.

Pesquisas envolvendo outros contaminantes reforçam ainda mais a robustez de *C. ensiformis*. Lancheros *et al.* (2024) registraram que a espécie foi capaz de crescer e produzir biomassa em solo artificialmente contaminado com biodiesel B10, contribuindo para a degradação de compostos aromáticos e auxiliando na manutenção da fertilidade do solo. Ogura *et al.* (2025) observaram comportamento semelhante ao avaliar a espécie em solos contaminados com os pesticidas 2,4-D e fipronil, verificando capacidade de absorção desses compostos e redução da toxicidade do solo.

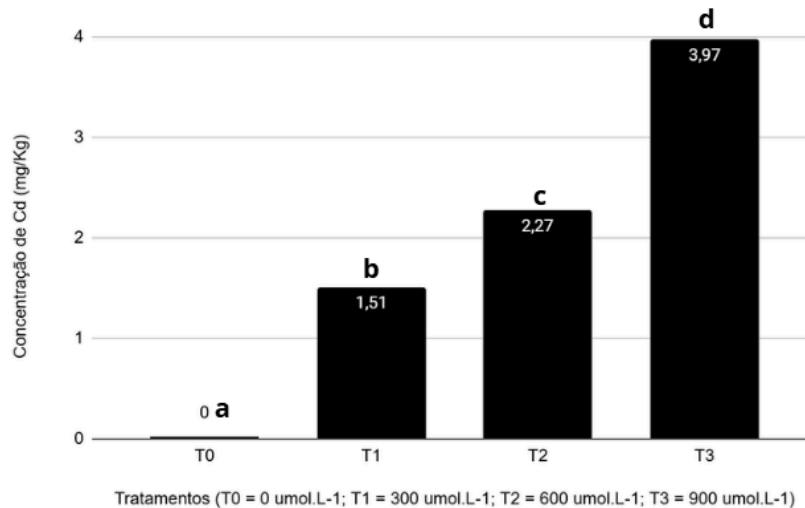
De forma geral, os resultados indicam que o feijão-de-porco manteve o desenvolvimento vegetativo mesmo sob exposição ao Cd, sugerindo tolerância do ponto de vista morfofisiológico nas condições testadas. Esse comportamento é coerente com a literatura recente que descreve *C. ensiformis* como espécie de alta produção de biomassa, resistente a diferentes contaminantes e com potencial para fitorremediação de metais e outros poluentes em solo (Aguilar *et al.*, 2025; Lancheros *et al.*, 2024; Ogura *et al.*, 2025).

O experimento resultou em efeitos altamente significativos sobre a concentração de Cd na parte aérea e nas raízes. As análises de variância apresentaram valores de F elevados e $p < 0,001$ para ambas as variáveis, e os coeficientes de variação baixos de 11,44% (parte aérea) (Quadro 5) e 14,65% (raízes) (Quadro 6) indicam boa precisão experimental para ensaios desenvolvidos em casa de vegetação. Esse desempenho estatístico é coerente com trabalhos recentes que utilizaram ANOVA seguida de testes de comparação múltipla em estudos de acúmulo de Cd em plantas submetidas a doses crescentes do metal, como descrito por Ai *et al.* (2022) e Yu *et al.* (2024).

O teste de Tukey aplicado à parte aérea mostrou diferenças estatísticas entre todos os tratamentos, com T3 (3,97 mg kg⁻¹) > T2 (2,27 mg kg⁻¹) > T1 (1,51 mg kg⁻¹) > T0 (0 mg kg⁻¹) (Figura 11). Esse padrão indica um comportamento nitidamente dependente da dose para o acúmulo de Cd nos tecidos aéreos. Estudos recentes descrevem que o Cd apresenta alta mobilidade no sistema planta e tende a se acumular em órgãos fotossintéticos conforme sua disponibilidade aumenta, afetando crescimento, estabilidade de membranas, atividade antioxidante e

eficiência fotossintética, como discutido por Zhang *et al.* (2025), Ai *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2023).

Figura 11 - Concentração de cádmio (mg Kg^{-1}) na parte aérea de plantas de feijão-de-porco



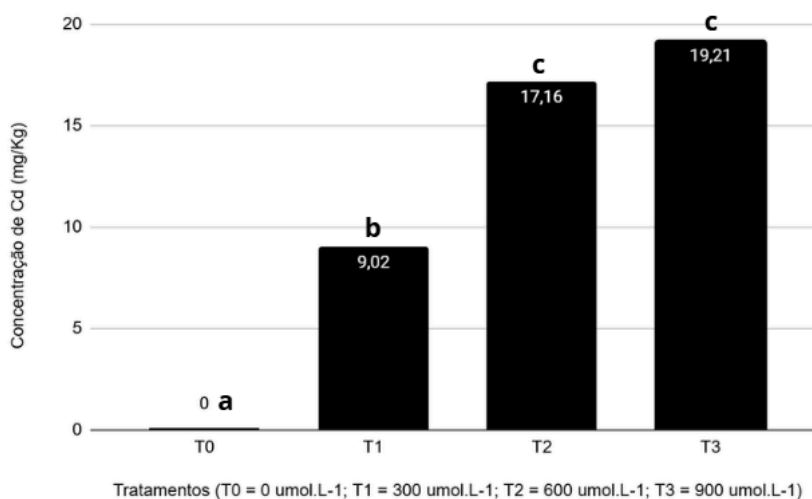
Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados referentes às raízes mostraram concentrações ainda mais elevadas de Cd em comparação à parte aérea. Esse comportamento está amplamente documentado em diferentes espécies e reflete o papel das raízes como principal compartimento de retenção do metal. Estudos indicam que o Cd tende a ser imobilizado na raiz por mecanismos como deposição em paredes celulares, complexação em vacúolos e limitação do transporte via xilema (Ai *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2022; Cruzado-Tafur *et al.*, 2023). Luo *et al.* (2022) verificaram que híbridos de arroz cultivados em solos contaminados apresentam concentrações de Cd tipicamente na ordem raiz, nó, caule e folha, reforçando o papel da barreira radicular. Shaari *et al.* (2022) acrescentam que sintomas fisiológicos de toxicidade em folhas, como clorose e necrose, estão diretamente relacionados à capacidade da planta de restringir ou permitir o transporte de Cd da raiz para os tecidos superiores.

Na análise estatística das raízes, o teste de Tukey também evidenciou diferenças entre os tratamentos, demonstrando que T3 (19,21 mg kg⁻¹) e T2 (17,16 mg kg⁻¹) apresentaram valores elevados e similares, superiores ao T1 (9,02 mg kg⁻¹) e ao controle. Esses resultados reforçam o padrão de acúmulo radicular intensificado, descrito em diversas espécies expostas ao Cd. A literatura mostra que o sequestro vacuolar, a deposição em paredes celulares e a complexação por fitoquelatinas e metalotioneínas são mecanismos centrais para a retenção do Cd na raiz, limitando sua translocação para a parte aérea.

Figura 12 - Concentração de cádmio (mg Kg⁻¹) na raiz de plantas de feijão-de-porco



Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

Um aspecto importante observado nas análises estatísticas é a falta de homogeneidade das variâncias entre os tratamentos. Essa condição foi causada pela limitação do equipamento utilizado, incapaz de quantificar concentrações inferiores a 0,02 mg kg⁻¹. Como consequência, as amostras do tratamento controle, nas quais os valores estavam abaixo desse limite, foram registradas como zero. Essa forma de registro resulta em dados censurados à esquerda e reduz artificialmente a variância do tratamento T0, enquanto os grupos com Cd (T1, T2 e T3) apresentam variabilidade real. Estudos recentes mostram que o tratamento inadequado de dados abaixo do limite de detecção ou quantificação pode distorcer médias, desvios e testes de hipóteses, como demonstrado por Santos, Bacellar e Catapreta (2023) e Carli *et al.* (2022). Esses autores ressaltam que dados censurados à esquerda podem comprometer a homogeneidade de variâncias, mas,

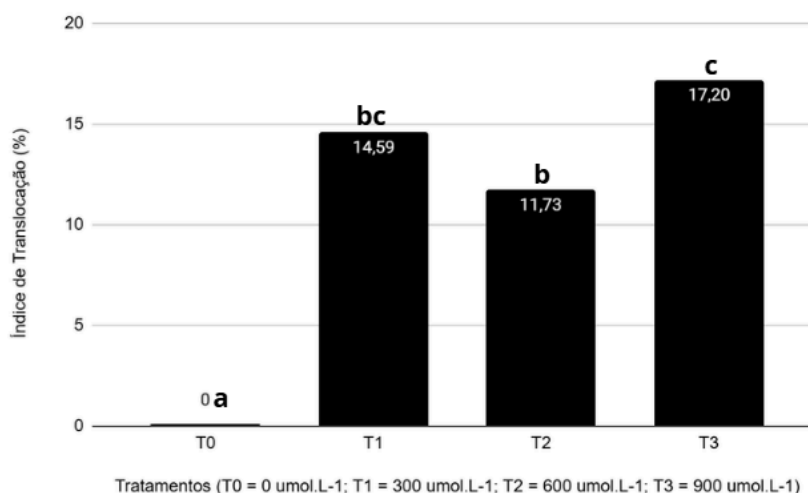
quando o delineamento é equilibrado e o padrão biológico é claro, a interpretação estatística permanece válida, desde que a limitação analítica seja explicitada.

Os resultados obtidos neste estudo também são coerentes com o que é descrito para plantas expostas a Cd em termos fisiológicos. O metal é absorvido principalmente pelas raízes e, em menor extensão, translocado para a parte aérea por meio de transportadores de membrana que atuam no sistema vascular do xilema. Os mecanismos de transporte do Cd envolvem proteínas das famílias ZIP, HMA e NRAMP, que também participam da absorção de outros cátions essenciais, como Zn e Fe. Assim, em doses mais elevadas, observa-se maior translocação para a parte aérea, ainda que a maior parte do Cd permaneça retida nas raízes, como relatado por Ai *et al.* (2022), Yu *et al.* (2024) e Zhang *et al.* (2025).

Do ponto de vista ambiental e aplicado, o padrão de acúmulo observado, caracterizado por elevados valores radiculares e translocação moderada para a parte aérea, é típico de plantas consideradas tolerantes ao Cd e potencialmente úteis em estratégias de fitoestabilização. Segundo Zhang *et al.* (2025) e Yu *et al.* (2024), a retenção do metal nas raízes reduz sua mobilidade no ambiente e diminui a transferência para organismos superiores na cadeia trófica. Por esse motivo, espécies que acumulam grandes quantidades de Cd nas raízes podem ser indicadas para recuperação de áreas contaminadas, desde que apresentem tolerância fisiológica às concentrações presentes.

Em síntese, os resultados estatísticos e fisiológicos indicam que as doses aplicadas promoveram diferenças claras nas concentrações de Cd nos tecidos vegetais. A variância não homogênea foi causada pela limitação analítica do equipamento, sem comprometer a interpretação dos resultados. O padrão de acúmulo e translocação encontra amplo suporte na literatura recente, o que reforça a robustez das conclusões deste estudo.

A análise do índice de translocação (IT) evidenciou efeito altamente significativo dos tratamentos ($p = 1,39 \times 10^{-5}$), com CV de 16,79% (médio) (Quadro 7), provavelmente pelos valores de T0, indicando uma precisão moderada do experimento. O teste de Tukey mostrou um padrão claro e coerente com os resultados de concentração de Cd na parte aérea e raízes: T3 apresentou o maior IT (17,20), seguido por T1 (14,59), T2 (11,73) e T0 (0) (Figura 13).

Figura 13 - Índice de translocação de cádmio nas plantas de feijão-de-porco

Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

O comportamento do índice de translocação complementa essas interpretações. Os valores do IT apresentaram aumento significativo com as doses aplicadas, com maior intensidade no tratamento T3 e menores valores em T1 e T2, enquanto T0 permaneceu com o valor zero devido à ausência de Cd quantificável. Embora o IT seja expresso em porcentagem neste estudo, o conceito é análogo ao fator de translocação amplamente utilizado na literatura que expressa a relação entre as concentrações de Cd na parte aérea e na raiz. Estudos recentes mostram que plantas hiperacumuladoras apresentam valores elevados de translocação, enquanto plantas não hiperacumuladoras tendem a apresentar valores reduzidos, com predominância de retenção radicular (Huang *et al.*, 2025).

Hamoud *et al.* (2024) observaram que culturas alimentares expostas a elevadas doses de Cd e Pb podem apresentar aumento expressivo da translocação, que depende da espécie, do genótipo e da dose aplicada. Os resultados do presente estudo indicam que, embora a maior parte do Cd permaneça nas raízes, o transporte para a parte aérea se intensifica conforme a dose aplicada aumenta, comportamento coerente com espécies tolerantes porém não hiperacumuladoras.

No contexto da fitorremediação, o conjunto dos resultados aponta para um padrão compatível principalmente com fitoestabilização, uma vez que o maior acúmulo ocorreu nas raízes, acompanhado de translocação moderada para a parte aérea. Revisões recentes indicam que diversas espécies utilizadas em áreas contaminadas por Cd apresentam esse mesmo padrão fisiológico, caracterizado por

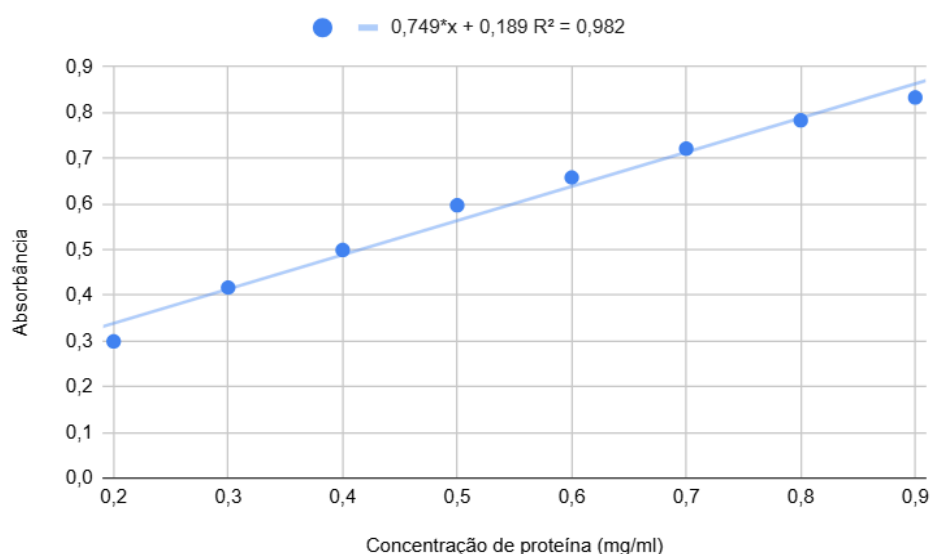
altos fatores de bioacumulação na raiz e valores moderados de translocação, o que reduz a mobilidade do metal e limita riscos ambientais (Subašić *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2020). Portanto, o comportamento observado é consistente com respostas fisiológicas descritas para plantas submetidas a estresse crescente por Cd.

Em síntese, as doses de Cd aplicadas influenciaram significativamente as concentrações do metal nos diferentes tecidos vegetais e o índice de translocação. A heterogeneidade de variâncias observada resulta da limitação do método analítico e não compromete a interpretação dos resultados. Os padrões encontrados são coerentes com a literatura recente e confirmam que a espécie apresenta capacidade de retenção radicular e translocação moderada sob condições de estresse por Cd.

5.2 Características bioquímicas

Para determinar a atividade das enzimas SOD e CAT, foi necessário determinar a concentração de proteína das amostras. Para isso foi realizada uma curva padrão de concentração de proteína, utilizando-se a albumina sérica bovina como padrão, pelo método de Bradford (1976) (Figura 14). As concentrações de proteínas solúveis nas amostras de folhas de feijão-de-porco estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 14 - Curva padrão de proteína pelo método de Bradford (1976). Padrão: albumina sérica bovino (BSA)



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância indicou ausência de efeito significativo das doses de Cd sobre a concentração de proteínas solúveis em folhas de feijão-de-porco ($F_c = 1,4061$; $p = 0,31028$), e o coeficiente de variação foi elevado ($CV = 36,78\%$) (Quadro 8). Embora haja tendência de redução das médias nos tratamentos T1 e T2 em relação ao controle, a variabilidade experimental não permitiu detectar diferenças estatísticas.

A literatura mostra que o Cd pode reduzir proteínas solúveis em diversas espécies, principalmente sob estresse intenso ou prolongado. Em lentilha, Bansal *et al.* (2021) observaram queda no metabolismo proteico sob Cd. Em girassol, Saidi *et al.* (2021) relataram redução de proteínas associada à ativação do sistema antioxidante. Em oliveira, Saleem *et al.* (2024) também verificaram diminuição de proteínas foliares na presença do metal.

Entretanto, alguns trabalhos mostram estabilidade do teor de proteínas sob estresse moderado. Zhao *et al.* (2021) registraram que baixas doses de Cd podem não reduzir o conteúdo total de proteínas, pois há síntese de proteínas de defesa. Rombel-Bryzek *et al.* (2024), trabalhando com pepino, também observaram que a ativação antioxidante pode ocorrer sem grandes alterações no teor proteico.

O comportamento observado é compatível com a tolerância metabólica já descrita para *Canavalia ensiformis*. Bomfim *et al.* (2025) mostraram que a espécie mantém processos fisiológicos mesmo sob excesso de Fe e Cu. Raqueti *et al.* (2025) também verificaram que o feijão-de-porco ajusta seu metabolismo nitrogenado em solo contaminado com Ni, sem perdas acentuadas de proteínas no início do estresse.

Estudos recentes demonstram que o Cd altera o perfil qualitativo de proteínas (chaperonas, antioxidantes, transportadores), sem necessariamente provocar mudanças quantitativas detectáveis no total (Zhang e Lu, 2024). Isso ajuda a explicar a ausência de diferenças estatísticas no presente estudo.

Tabela 2 - Comparação das médias pelo teste de Tukey nas concentrações de proteínas solúveis em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio (T0 = 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T1 = 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T2 = 600 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T3 = 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$)

| Tratamentos | Proteínas (mg/ml) |
|-------------|-------------------|
| T0 | 4,25a |

| | |
|----|-------|
| T1 | 2,60a |
| T2 | 2,55a |
| T3 | 3,16a |

Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

A partir do teste estatístico, nota-se que a atividade das enzimas antioxidantes não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), e apresentaram coeficientes variação de 30,6% para SOD e 38,3% para CAT (Quadro 9 e Quadro 10).

Ainda assim, o comportamento das médias revela um padrão fisiológico consistente, para SOD, observa-se aumento em T1 e T2 em relação ao controle (T0), seguido de redução em T3. Para CAT, há um incremento expressivo principalmente em T2, com posterior queda em T3 (Tabela 3). Esse conjunto de resultados sugere que *Canavalia ensiformis* ativou o sistema antioxidante frente ao estresse, mas com uma resposta de baixa magnitude e alta variabilidade entre plantas de um mesmo tratamento.

Tabela 3 - Comparação das médias pelo teste de Tukey das atividades enzimáticas de superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) em folhas de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio (T0 = 0 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T1 = 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T2 = 600 $\mu\text{mol L}^{-1}$; T3 = 900 $\mu\text{mol L}^{-1}$)

| Tratamentos | SOD (U SOD/mg) | CAT ($\mu\text{mol/min/mg}$) |
|-------------|-------------------|-----------------------------------|
| T0 | 27,18a | 63,94a |
| T1 | 38,38a | 88,60a |
| T2 | 39,70a | 134,87a |
| T3 | 31,67a | 72,68a |

Letras iguais indicam médias estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Fonte: Autoria própria (2025)

Padrões de resposta semelhantes têm sido descritos em outras leguminosas submetidas ao Cd. Em *Phaseolus vulgaris*, Gutiérrez-Martínez *et al.* (2020) observaram que concentrações crescentes de Cd promovem aumento das atividades de SOD, CAT, APX e GPX em níveis moderados de estresse, seguido de estabilização ou redução em doses mais elevadas, caracterizando uma resposta não

linear, dependente da dose. No presente estudo, a tendência de incremento de SOD em T1 e T2 e posterior redução em T3, associada ao pico de CAT em T2, é compatível com esse modelo de resposta moderada ao estresse. Revisões recentes indicam que, sob estresse por metais pesados, as plantas aumentam a atividade de enzimas como SOD e CAT para converter O_2^- e H_2O_2 em espécies menos tóxicas, contribuindo para a manutenção da homeostase redox (Mansoor *et al.*, 2023; Mishra *et al.*, 2023).

Luo *et al.* (2024) destacam que, sob níveis moderados de Cd, a ativação do sistema antioxidante é suficiente para conter o excesso de EROs, porém, em estresses mais severos, o sistema pode ser saturado, levando à queda de atividade enzimática e danos celulares mais intensos. Assim, o padrão encontrado para SOD e CAT no feijão-de-porco sugere que as concentrações testadas não foram suficientes para colapsar o sistema antioxidante, mas induziram ajustes finos na atividade dessas enzimas.

Quando se considera especificamente o contexto da fitorremediação e da tolerância de leguminosas a metais, os resultados são coerentes com a literatura recente para *Canavalia ensiformis*. Mendes *et al.* (2024), ao avaliarem o excesso de manganês em *C. ensiformis* e *Cajanus cajan*, mostraram que a primeira espécie mantém relativa estabilidade do metabolismo de compostos nitrogenados e da produção de biomassa mesmo em altas doses de Mn, indicando mecanismos de tolerância associados à manutenção do metabolismo primário.

Em espécies arbóreas tolerantes ao Cd, resultados semelhantes têm sido descritos. Wertonge *et al.* (2024), ao estudar *Mimosa scabrella* sob concentrações crescentes de Cd, observaram que o estresse ativou enzimas antioxidantes, principalmente nas raízes, permitindo a manutenção da biomassa de parte aérea e raízes mesmo em doses elevadas do metal. Esse comportamento, caracterizado pela ativação do sistema antioxidante ao mesmo tempo em que o crescimento é mantido, se aproxima do observado no presente experimento. A ausência de diferenças significativas na atividade de SOD e CAT, associada à estabilidade dos parâmetros morfológicos, indica que a espécie provavelmente regulou suas defesas antioxidantes de maneira suficiente para lidar com o estresse gerado, sem apresentar aumentos expressivos entre os tratamentos.

Por fim, revisões recentes sobre estresse por Cd destacam que a tolerância não depende apenas de SOD e CAT, mas de um conjunto integrado de mecanismos, que incluem antioxidantes não enzimáticos, complexação do metal por compostos orgânicos, compartimentalização vacuolar e regulação fina da absorção e translocação de Cd (Al-Khayri *et al.*, 2023; Luo *et al.*, 2024). Dessa forma, a ausência de diferenças significativas na atividade de SOD e CAT não implica ausência de resposta ao Cd, mas pode indicar que *C. ensiformis* utilizou uma combinação de mecanismos de tolerância capazes de manter o equilíbrio redox com variações enzimáticas relativamente discretas.

Outras enzimas do sistema antioxidante, bem como componentes não enzimáticos, poderiam ser avaliados para ampliar a compreensão dos mecanismos fisiológicos envolvidos. Ainda assim, ao comparar os resultados obtidos com a literatura recente, observa-se que a espécie apresenta um potencial fisiológico consistente com processos de fitorremediação, atuando principalmente pela capacidade de tolerar o estresse e manter o crescimento, e não necessariamente por uma hiperativação marcante das enzimas antioxidantes analisadas.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que *Canavalia ensiformis* apresenta características fisiológicas e bioquímicas que sustentam seu potencial para aplicação em estratégias de fitorremediação de áreas contaminadas por cádmio. Do ponto de vista morfofisiológico, a espécie manteve crescimento estável mesmo após a aplicação única de Cd realizada 36 dias após o transplante, período que garantiu pleno estabelecimento das plântulas, e ao longo dos 8 dias subsequentes de exposição ao metal. Nesse intervalo, não foram observadas reduções significativas no comprimento da parte aérea, no comprimento de raízes ou na produção de biomassa. Ainda que sinais visuais de estresse tenham surgido em concentrações mais elevadas, o desenvolvimento vegetativo não foi comprometido, indicando tolerância inicial ao estresse.

A análise das concentrações de Cd nos tecidos evidenciou um padrão dose-dependente, com acúmulo significativamente maior nas raízes do que na parte aérea. Esse comportamento, reforçado pelo índice de translocação, confirma que *C. ensiformis* atua predominantemente como espécie fitoestabilizadora, retendo o metal no sistema radicular e limitando sua mobilidade no ambiente. O fato de a maior parte do acúmulo ter ocorrido em apenas 8 dias de exposição demonstra que o transporte e a retenção radicular do metal são processos rápidos e fisiologicamente ativos na espécie.

No âmbito bioquímico, a ausência de diferenças estatísticas nas atividades das enzimas antioxidantes SOD e CAT nas folhas, bem como nos teores de proteínas solúveis, sugere que o período relativamente curto de exposição não foi suficiente para desencadear respostas antioxidativas intensas, embora tendências de variação sejam perceptíveis. A estabilidade metabólica observada em curto prazo corrobora a literatura, que descreve *C. ensiformis* como uma espécie rústica, capaz de manter processos fisiológicos mesmo sob condições iniciais de estresse por metais pesados.

Assim, considerando o momento da aplicação, o tempo limitado de exposição e os resultados morfofisiológicos e bioquímicos, conclui-se que *Canavalia ensiformis* possui tolerância ao Cd e capacidade de acumular o metal sobretudo nas raízes, comportamento característico de espécies indicadas para fitoestabilização. Dessa forma, a espécie se apresenta como alternativa viável, sustentável e de baixo

custo para mitigação de impactos em áreas contaminadas por Cd. Pesquisas futuras podem explorar períodos mais longos de exposição, ciclos repetidos de aplicação, interações com microrganismos do solo e condições ambientais variáveis, ampliando o entendimento sobre o potencial de fitorremediação da espécie em cenários reais.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, A. S. *et al.* Isotherm, kinetics, thermodynamics and mechanism of metal ions adsorption from electroplating wastewater using treated and functionalized carbon nanotubes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 109180, 2023. ISSN 2213-3437. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372202053X>. Acesso em: 20 maio 2025.
- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de P por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 22, p. 21-26, 1998.
- AGUILAR, J. V. *et al.* Biomass and Nickel Tolerance: *Canavalia ensiformis* (L.) DC. as a Candidate Plant for Phytoremediation Applications. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 21, p. 2200, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/21/2200>. Acesso em: 9 nov. 2025.
- Al, H. *et al.* Advances in molecular mechanisms underlying cadmium uptake and translocation in rice. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 1003953, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1003953/full>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- ALAMRI, S. *et al.* Dose dependent differential effects of toxic metal cadmium in tomato roots: role of endogenous hydrogen sulfide. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 203, 110978, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651320308174>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- ALEXIEVA, V. *et al.* The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.
- AL-KHAYRI, J. M. *et al.* Cadmium toxicity in medicinal plants: an overview of the tolerance strategies, biotechnological and omics approaches to alleviate metal stress. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, e1047410, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.1047410/full>.
- ARFANIA, H. Leachability of metal (Cd, Ni, Zn, Cu, and Pb)-spiked sediments using sequential extractions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 8, p. 1089-1102, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1869722>. Acesso em: 22 maio 2025.
- AZEVEDO, Ricardo Antunes *et al.* Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280-292, 1998.

BAKSHE, P.; JUGADE, R. Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 10, p. 100293, 2023. ISSN 2772-4166. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416623000645>. Acesso em: 07 jun. 2025.

BANSAL, R. *et al.* Growth and antioxidant responses in iron-biofortified lentil under cadmium stress. **Toxics**, v. 9, n. 8, art. 182, 2021. DOI: [10.3390/toxics9080182](https://doi.org/10.3390/toxics9080182).

BOMFIM, N. C. P. *et al.* From micronutrients to potentially toxic elements: physiological responses of *Canavalia ensiformis* to copper and iron. **Metabolites**, v. 15, n. 11, art. 706, 2025. DOI: [10.3390/metabo15110706](https://doi.org/10.3390/metabo15110706).

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72:248-254, 1976.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 460, de 30 de dezembro de 2013**. Dispõe sobre a alteração da Resolução CONAMA nº 420/2009, que estabelece critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601. Acesso em: 21 maio 2025.

CARLI, M. *et al.* Imputation of below detection limit missing data in chemical mixture analysis with Bayesian group index regression. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 3, 1369, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/3/1369>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CEMBROWSKA-LECH, D.; KOPROWSKI, M; KEPCZYNSKI, J. Germination induction of dormant *Avena fatua* caryopses by KAR1 and GA3 involving the control of reactive oxygen species (H₂O₂ and O₂^{•-}) and enzymatic antioxidants (superoxide dismutase and catalase) both in the embryo and the aleurone layers. **Journal of Plant Physiology**, v. 176, p. 169-179, 2015.

CHU, D. Effects of heavy metals on soil microbial community. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 113, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012009>.

CRUZADO-TAFUR, E. *et al.* Metal tolerance and Cd phytoextraction ability in *Pisum sativum* grown in spiked nutrient solution. **Journal of Plant Research**, v. 136, p. 1–16, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10265-023-01493-1>. Acesso em: 25 nov. 2025.

DANTAS, E. F. *et al.* Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) orchard intercropped with different green manure crops. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 3, p. 465-471, 2019.

DAS, S. *et al.* Heavy Metal Pollution in the Environment and Its Impact on Health: Exploring Green Technology for Remediation. **Environmental Health Insights**, v. 17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/11786302231201259>.

EMAMVERDIAN, A. *et al.* Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 756120, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2015/756120>. Acesso em: 1 jun. 2025.

EPA (United States Environmental Protection Agency). SW-846: Test Method 3050B – Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Washington, D.C., 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>.

FOYER, Christine H.; KUNERT, Karl. The ascorbate–glutathione cycle coming of age. **Journal of Experimental Botany**, v. 75, n. 9, p. 2682-2699, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erae023>. Acesso em: 2 jun. 2025.

GE, Q. *et al.* Bioaccumulation of the heavy metal cadmium and its tolerance mechanisms in experimental plant *Suaeda salsa*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 14, art. 6988, 2025. DOI: [10.3390/ijms26146988](https://doi.org/10.3390/ijms26146988).

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, STANLEY, K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GOŁĘBIEWSKI, A. *et al.* Role of silicon in counteracting cadmium stress in pea plants (*Pisum sativum* L.): insights into cadmium binding mechanisms and pectin methylesterase activity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, p. 5613-5625, 2024. DOI: [10.1007/s42729-024-01929-0](https://doi.org/10.1007/s42729-024-01929-0).

GUAN, C. *et al.* Enhanced phytoremediation efficiency of PHE-contaminated soil by rape (*Brassica napus* L.) assisted with PHE-degradable PGPR through modulating rhizobacterial communities. **Industrial Crops and Products**, v. 202, p. 117057, 2023. ISSN 0926-6690. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669023008221>. Acesso em: 22 maio 2025.

GUO, M. *et al.* Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.949541>. Acesso em: 2 jun. 2025.

GUO, Z. *et al.* Effects of Heavy Metals on Stomata in Plants: A Review. **International journal of molecular sciences**, v. 24, n. 11, p. 9302, 26 maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms24119302>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GUTIÉRREZ-MARTÍNEZ, P. B. *et al.* Assessment of antioxidant enzymes in leaves and roots of *Phaseolus vulgaris* plants under cadmium stress. **Biotecnia**, Hermosillo, v. 22, n. 2, p. 110-118, 2020. DOI: [10.18633/biotecnia.v22i2.1252](https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i2.1252).

HAMMOND, C. M. *et al.* Arsenic and iron speciation and mobilization during phytostabilization of pyritic mine tailings. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 286, p. 306-323, 1 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.07.001>. Acesso em: 25 maio 2025.

HAMOUD, Y. A. *et al.* Cadmium and lead accumulation in important food crops due to wastewater irrigation: Pollution index and health risks assessment. **Heliyon**, v. 10, n. 4, e eXXXXX, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024007436>. Acesso em: 25 nov. 2025.

HANSEL, F. B. *et al.* 2021. Nutrição mineral como aliada das plantas na tolerância a estresses ambientais. **Informações Agronômicas NPCT**, n. 09, p. 10-24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15306.08643>. Acesso em: 1 jun. 2025.

HEATH, L.R.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189-198, 1968.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method growing plants without soil. **Berkeley**: University of California, 1938. (College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, Circular, n. 347).

HOSSAIN, M. A. *et al.* Hydrogen peroxide priming modulates abiotic oxidative stress tolerance: insights from ROS detoxification and scavenging. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2015. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00420>. Acesso em: 2 jun. 2025.

HUANG, W. *et al.* Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: a global synthesis of bioaccumulation and translocation factors. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1602951, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1602951/full>. Acesso em: 25 nov. 2025.

JIA, F. *et al.* Factors impacting the behavior of phytoremediation in pesticide-contaminated environment: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 892, p. 164418, 2023. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723030395>. Acesso em: 22 maio 2025.

JOMOVA, K. *et al.* Heavy metals: toxicity and human health effects. **Archives of Toxicology**, v. 99, p. 153–209, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>. Acesso em: 22 jun. 2025.

KHALID, S. *et al.* A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 182, p. 247–268, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>. Acesso em: 22 jun. 2025.

KHAN, A. A. *et al.* Insights into Cadmium-Induced Morphophysiological Disorders in *Althea rosea* Cavan and Its Phytoremediation through the Exogenous Citric Acid. **Agronomy**, v. 12, n. 11, e2776, 2022. ISSN 2073-4395. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/11/2776>. Acesso em: 02 jun. 2025.

KRAUS, T. E. *et al.* Paclobutrazol-induced tolerance of wheat leaves to paraquat may involve increased antioxidant enzyme activity. **Journal of Plant Physiology**, 145, 570-576, 1995.

LANCHEROS, A.; BRITO, O.; GUIMARÃES, M. de F.. Exploring the effects of B10 biodiesel contamination on *Canavalia ensiformis* growth and nutrition in artificially contaminated soil. **Remediation Journal**, v. 34, n. 1, p. e21769, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374765600>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LANCHEROS, A. *et al.* Exploring the potential of *Canavalia ensiformis* for phytoremediation of B10 biodiesel-contaminated soil: insights on aromatic compound degradation and soil fertility. **International Journal of Phytoremediation**, v. 26, n. 11, p. 1854-1862, 2024. Disponível em: [10.1080/15226514.2024.2357646](https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2357646).

LAVANYA, M. B.; VISWANATH, D. S.; SIVAPULLAIAH, P. V. Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils-A comprehensive review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 22, p. 100975, 2024. ISSN 2215-1532. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153224000631>. Acesso em: 25 maio 2025.

LI, Y. *et al.* Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 325, n. 0269-7491, p. 121433–121433, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121433>. Acesso em: 22 jun. 2025.

LING, S. *et al.* Development of immunoassay methods based on monoclonal antibody and its application in the determination of cadmium ion. **Journal of Hazardous Materials**, v. 411, p. 124992, 2021. ISSN 0304-3894. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420329836>. Acesso em: 20 maio 2025.

LIU, H. *et al.* Sunlight mediated cadmium release from colored microplastics containing cadmium pigment in aqueous phase. **Environmental Pollution**, v. 263, parte A, p. 114484, 2020. ISSN 0269-7491. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120301639>. Acesso em: 20 maio 2025.

LIU, Y.; QIAO, J.; SUN, Y. Enhanced immobilization of lead, cadmium, and arsenic in smelter-contaminated soil by sulfidated zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials**, v. 447, p. 130783, 2023. ISSN 0304-3894. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389423000651>. Acesso em: 21 maio 2025.

LÓPEZ-SÁNCHEZ, R. C. *et al.* Phenotypic Plasticity Under Salt Stress in Legume Grasses. **Revista Terra Latinoamericana**, v. 43, fev. 2025. Disponível em: <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1946>. Acesso em: 1 jun. 2025.

LUO, P. *et al.* An overview of the mechanisms through which plants regulate ROS homeostasis under cadmium stress. **Antioxidants**, Basel, v. 13, n. 10, art. 1174, 2024. DOI: [10.3390/antiox13101174](https://doi.org/10.3390/antiox13101174).

LUO, Q. *et al.* Effects of Cd uptake, translocation and redistribution in different hybrid rice varieties on grain Cd concentration. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 240, 113683, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651322005231>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MANSOOR, S. *et al.* Heavy Metal Induced Oxidative Stress Mitigation and ROS Scavenging in Plants. **Plants**, Basel, v. 12, n. 16, p. 3003, 20 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12163003>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MARQUES, J. P. *et al.* Soils of the Ribeira Valley (Brazil) as Environmental Protection Barriers: Characterization and Adsorption of Lead and Cadmium. **Sustainability**, v. 14, n. 9, e5135, 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5135>. Acesso em: 21 maio 2025.

MENDES, G.C.; MÜLLER, C.; ALMEIDA, A. M. Editorial: Physiological, biochemical and molecular approaches in response to abiotic stresses in plants. **Frontiers in plant science**, v. 14, p. 1194937, 21 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1194937>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MENDES, T. F. S. *et al.* Metabolic responses to excess manganese in legumes: variations in nitrogen compounds in *Canavalia ensiformis* (L.) DC and *Cajanus cajan* (L.) Millsp. **Legume Science**, Hoboken, v. 6, n. 3, e70003, 2024. DOI: [10.1002/leg3.70003](https://doi.org/10.1002/leg3.70003).

MISHRA, N. *et al.* Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, art. 1110622, 2023. DOI: [10.3389/fpls.2023.1110622](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622).

MOLDES, C. A. *et al.* Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 30, p. 469-479, 2008.

NASCIMENTO, A. R. V. J. do; NASCIMENTO, C. W. A. do; CUNHA, K. P. V. da. Solos de minas de scheelita como fontes de contaminação por metais pesados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 555-556, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020179736>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NESSEM, A. A. *et al.* Morpho-physiological and biochemical effects of palm pollen extract in alleviation of cadmium and cobalt toxicity in beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S.l.], v. 23, p. 5279-5299, 2023. DOI: [10.1007/s42729-023-01401-5](https://doi.org/10.1007/s42729-023-01401-5).

NIÑO-SAVALA, A. G. *et al.* Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 419-429, 2019. Disponível em: https://journal.hep.com.cn/fase/EN/abstract/article_25123.shtml. Acesso em: 21 maio 2025.

NGWENYA, Z. D.; DAKORA, F. D. Symbiotic Functioning and Photosynthetic Rates Induced by Rhizobia Associated with Jack Bean (*Canavalia ensiformis* L.) Nodulation in Eswatini. **Microorganisms**, v. 11, n. 11, p. 2786–2786, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112786>. Acesso em: 22 jun. 2025.

NNAJI, N. D. *et al.* Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. **SN Applied Sciences**, v. 5, n. 5, e125, 2023. ISSN 2523-3971. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>. Acesso em: 25 maio 2025.

NOVENTA, S. *et al.* Handling concentration data below the analytical limit in environmental studies: implications for statistical analysis. **Science of the Total Environment**, v. 917, 170312, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723062976>. Acesso em: 25 nov. 2025.

OGURA, A. P. *et al.* Uptake of 2,4-D and fipronil by green manure species: an ecotoxicological assessment of soil phytoremediation. **International Journal of Phytoremediation**, [S.l.], p. 1–10, 2025. DOI: [10.1080/15226514.2025.2529965](https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2529965).

PUGA, A. P. *et al.* Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. **Journal of Environmental Management**, v. 159, n. 0301-4797, p. 86–93, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.036>. Acesso em: 22 jun. 2025.

RAI, P. K.; SONNE, C.; KIM, K. Heavy metals and arsenic stress in food crops: Elucidating antioxidative defense mechanisms in hyperaccumulators for food security, agricultural sustainability, and human health. **Science of The Total Environment**, v. 874, n. 0048-9697, p. 162327–162327, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162327>. Acesso em: 22 jun. 2025.

RANGEL, T. *et al.* Organic fertilization and mycorrhization increase copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis* in a sandy soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 1-19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27126-7>. Acesso em: 22 maio 2025.

RAQUETI, G. S. *et al.* Emergence and N metabolism of *Canavalia ensiformis* (L.) DC. seedlings in soil contaminated by nickel. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, Cluj-Napoca, v. 53, n. 1, p. 14214-14214, 2025. Disponível em: <https://www.notulaeobotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/14214>. Acesso em: 14 nov. 2025.

ROMBEL-BRYZEK, A. *et al.* The effects of cadmium on selected oxidative stress parameters and the content of photosynthetic pigments in cucumber *Cucumis sativus* L. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 84, art. 127463, 2024. DOI: [10.1016/j.jtemb.2024.127463](https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2024.127463).

SAIDI, I. *et al.* Gallic acid improves the antioxidant ability against cadmium toxicity: impact on leaf lipid composition of sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 210, art. 111906, 2021. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2021.111906](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111906).

SALEEM, M. H. *et al.* Modulatory effects of glutamic acid on growth, photosynthetic pigments, and stress responses in olive plants subjected to cadmium stress. **Journal of King Saud University**, v. 36, n. 11, p. 103540, 2024..

SALINITRO, M. *et al.* Production of Antioxidant Molecules in *Polygonum aviculare* (L.) and *Senecio vulgaris* (L.) under Metal Stress: A Possible Tool in the Evaluation of Plant Metal Tolerance. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 19, p. 7317, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/19/7317>. Acesso em: 8 jun. 2025.

SANTOS, V. R.; BACELLAR, L. A. P.; CATAPRETA, C. A. A. Comparação de métodos para avaliar a acurácia da incorporação de dados químicos censurados na análise estatística descritiva de águas subterrâneas contaminadas. **Águas Subterrâneas**, v. 37, n. 1, e30104, 2023. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/30104/19470/112359>. Acesso em: 25 nov. 2025.

SARMAH, S. *et al.* Recent advancement in rechargeable battery technologies. **Wiley Online Library 2016 Full Collection**, v. 12, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wene.461>. Acesso em: 20 maio 2025.

SENEVIRATNE, M. *et al.* Correction to: Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: a critical review. **Environ Geochem Health**, v. 41, 2017. Disponível em: https://digitalcommons.calpoly.edu/bio_fac/487/. Acesso em: 2 jun. 2025.

SHAARI, N. E. M. *et al.* Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e245607, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/Jz3BCcHF7fXNfzg5Prdt4SH/?lang=en>. Acesso em: 25 nov. 2025.

SHARMA, I.; AHMAD, P. Catalase: A Versatile Antioxidant in Plants. In: AHMAD, Parvaiz (ed.). **Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling**. [S.l.]: Academic Press, 2014. p. 131-148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00004-6>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SHARMA, J. *et al.* Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1076876, 2023. ISSN 1664-462X. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1076876>. Acesso em: 22 maio 2025.

SHARMA, P. *et al.* Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, p.1-26, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2012/217037>. Acesso em: 21 maio 2025.

SHI, J. *et al.* Soil contamination with cadmium and potential risk around various mines in China during 2000–2020. **Journal of Environmental Management**, v. 310, p. 114509, 2022. ISSN 0301-4797. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722000822>. Acesso em: 21 maio 2025.

SOUSA, R. R. *et al.* Phytoremediation potential of *Canavalia ensiformis* in copper- and zinc contaminated soil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente (Rev Agro Amb)**, Maringá, v. 17, n. 2, e11022, 2024 DOI: [10.17765/2176-9168.2024v17n2e11022](https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n2e11022).

SUBAŠIĆ, M. *et al.* Phytoremediation of cadmium polluted soils: current status and approaches for enhancing. **Soils**, v. 6, n. 1, p. 3, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8789/6/1/3>. Acesso em: 25 nov. 2025.

TANG, Z. *et al.* Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 65, n. 2, p. 570-593, 2023. ISSN 1672-9072. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jipb.13440>. Acesso em: 22 maio 2025.

TAO, M. *et al.* Dissolved organic matter (DOM)–driven variations of cadmium mobility and bioavailability in waterlogged paddy soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 492, n. 138065, p. 1–10, 15 jul. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138065>.

TIWARI, S.; LATA, C. Heavy Metal Stress, Signaling, and Tolerance Due to Plant-Associated Microbes: An Overview. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.00452>. Acesso em: 1 jun. 2025.

VAN DER ENT, A.; RYLOTT, E. L. Inventing hyperaccumulator plants: improving practice in phytoextraction research and terminology. **International Journal of Phytoremediation**, v. 26, n. 9, p. 1379-1382, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2322631>. Acesso em: 31 maio 2025.

VISCONTI, D. *et al.* Use of *Brassica juncea* and *Dactylis glomerata* for the phytostabilization of mine soils amended with compost or biochar. **Chemosphere**, ISSN 0045-6535, v. 260, e127661, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520318567>. Acesso em: 25 maio 2025.

WANG, L. *et al.* Field trials of phytomining and phytoremediation: A critical review of influencing factors and effects of additives. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 24, p. 2724–2774, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1705724>.

WANG, R. *et al.* Cadmium in food: Source, distribution and removal. **Food Chemistry**, v. 405, parte A, 2023, 134666. ISSN 0308-8146. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134666>. Acesso em: 20 maio 2025.

WERTONGE, G. S. *et al.* Ativação de enzimas antioxidantes como mecanismo contra estresse por cádmio em *Mimosa scabrella*. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 17, n. 4, e11973, 2024. DOI: [10.17765/2176-9168.2024v17n4e11973](https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n4e11973).

XIE, L.; ZYL, D. The geochemical processes affecting the mobility of Cu, Pb, Zn during phytostabilization on sulfidic mine tailings revealed by a greenhouse study. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, art. 138119, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138119>. Acesso em: 25 maio 2025.

YADAV, R. *et al.* Omics approaches in effective selection and generation of potential plants for phytoremediation of heavy metal from contaminated resources. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 117730, 2023. ISSN 0301-4797. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723005182>. Acesso em: 24 maio 2025.

YAN, A. *et al.* Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 30 abr. 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00359>. Acesso em: 25 maio 2025.

YI, Y. *et al.* Cadmium accumulation in plants: insights from phylogenetic variation into the evolution and functions of membrane transporters. **Sustainability**, v. 15, n. 16, 12158, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12158>. Acesso em: 25 nov. 2025.

YU, H. *et al.* Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 8–21, 15 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117>. Acesso em: 22 jun. 2025.

YU, Y. *et al.* Multiomics and biotechnologies for understanding and influencing cadmium accumulation and stress response in plants. **Plant Biotechnology Journal**, v. 22, n. 10, p. 2641-2659, 2024. ISSN 1467-7644. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pbi.14379>. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pbi.14379>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ZHANG, H. *et al.* Immobilizing Metal-Resistant Sulfate-Reducing Bacteria for Cadmium Removal from Aqueous Solutions. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 6, p. 2851-2859, 2018. ISSN 1230-1485. Disponível em: <https://doi.org/10.15244/pjoes/83666>. Acesso em: 20 maio 2025.

ZHANG, H.; LU, L. Transcription factors involved in plant responses to cadmium-induced oxidative stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, art. 1397289, 2024. DOI: [10.3389/fpls.2024.1397289](https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397289).

ZHANG, K. *et al.* Trends in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils: A Web of science and CiteSpace bibliometric analysis. **Chemosphere**, v. 352, p. 141293, 2024. ISSN 0045-6535. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524001863>. Acesso em: 22 maio 2025.

ZHANG, R. *et al.* Recent advances in understanding the mechanisms of plant cadmium accumulation as affected by grafting in vegetable production. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1526041, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2025.1526041/full>. Acesso em: 26 nov. 2025.

ZHANG, X. *et al.* The uptake, transfer, and detoxification of cadmium in plants and its exogenous effects. **Cells**, v. 13, n. 11, 907, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11172145/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

ZHAO, H. *et al.* Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings. **Scientific Reports**, v. 11, art. 9913, 2021. DOI: [10.1038/s41598-021-89322-0](https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0).

ZULFIQAR, U. *et al.* Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.773815>. Acesso em: 1 jun. 2025.

APÊNDICE A - Quadros das análises de variância (ANOVA)

Quadro 1 - Análise de variância para o comprimento da raiz de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|--------|-------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 59,65 | 19,88 | 1,71 | 0,20 |
| Resíduo | 16 | 185,35 | 11,58 | | |
| Total | 19 | 245,01 | | | |
| CV (%) = 10,05 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 2 - Análise de variância da massa seca da raiz de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|------|------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 0,76 | 0,25 | 1,18 | 0,34 |
| Resíduo | 16 | 3,43 | 0,21 | | |
| Total | 19 | 4,19 | | | |
| CV (%) = 12,18 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 3 - Análise de variância do comprimento da parte aérea de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|-------|------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 2,69 | 0,89 | 0,60 | 0,62 |
| Resíduo | 16 | 23,69 | 1,48 | | |
| Total | 19 | 26,38 | | | |
| CV (%) = 2,9 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 4 - Análise de variância da massa seca da parte aérea de plantas de feijão-de-porco em função da aplicação de doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|-------|------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 6,03 | 2,01 | 1,52 | 0,24 |
| Resíduo | 16 | 21,05 | 1,31 | | |
| Total | 19 | 27,09 | | | |
| CV (%) = 8,86 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 5 - Análise de variância da concentração de cádmio na parte aérea de plantas de feijão-de-porco

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|-------|-------|-------------|-----------------------|
| Tratamentos | 3 | 24,59 | 8,19 | 166,69 | $1,50 \times 10^{-7}$ |
| Resíduo | 8 | 0,39 | 0,049 | | |
| Total | 11 | 24,98 | | | |
| CV (%) = 11,44 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 6 - Análise de variância da concentração de cádmio na raiz de plantas de feijão-de-porco

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|--------|--------|-------------|-----------------------|
| Tratamentos | 3 | 689,52 | 229,84 | 83,12 | $2,27 \times 10^{-6}$ |
| Resíduo | 8 | 22,12 | 2,765 | | |
| Total | 11 | 711,65 | | | |
| CV (%) = 14,65 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 7 - Análise de variância do índice de translocação de cádmio de plantas de feijão-de-porco

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|--------|--------|-------------|-----------------------|
| Tratamentos | 3 | 518,45 | 172,82 | 51,76 | $1,39 \times 10^{-5}$ |
| Resíduo | 8 | 26,71 | 3,34 | | |
| Total | 11 | 545,15 | | | |
| CV (%) = 16,79 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 8 - Análise de variância da concentrações de proteínas solúveis (mg Kg^{-1}) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F | p-valor |
|-------------------|----|-------|------|------|---------|
| Tratamentos | 3 | 5,64 | 1,88 | 1,41 | 0,31 |
| Resíduo | 8 | 10,69 | 1,34 | | |
| Total | 11 | 16,33 | | | |
| CV (%) = 36,78 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 9 - Análise de variância para atividade da enzima Superóxido dismutase (SOD) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|---------|--------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 310,34 | 103,45 | 0,94 | 0,46 |
| Resíduo | 8 | 878,09 | 109,76 | | |
| Total | 11 | 1188,43 | | | |
| CV (%) = 30,6 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 10 - Análise de variância da enzima Catalase (CAT) em folhas verdadeiras de feijão-de-porco submetidas a doses de cádmio

| Fonte de Variação | GL | SQ | QM | F calculado | p-valor |
|-------------------|----|---------|------|-------------|---------|
| Tratamentos | 3 | 8985,1 | 2995 | 2,52 | 0,13 |
| Resíduo | 8 | 9512,4 | 1189 | | |
| Total | 11 | 18497,5 | | | |
| CV (%) = 38,3 | | | | | |

Fonte: Autoria própria (2025)