



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**  
**GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**Luís Miguel Alves dos Santos**

**CO-INOCULAÇÃO DE *BACILLUS ARYABHATAI* E *TRICHODERMA*  
*HARZIANUM* NA ATENUAÇÃO DA TOXICIDADE DO CÁDMIO EM *MIMOSA*  
*CAESALPINIIFOLIA* E NA MODULAÇÃO DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO  
SOLO**

**FORTALEZA-CE**

**2025**

Luís Miguel Alves dos Santos

CO-INOCULAÇÃO DE BACILLUS ARYABHATAI E TRICHODERMA  
HARZIANUM NA ATENUAÇÃO DA TOXICIDADE DO CÁDMIO EM *MIMOSA*  
*CAESALPINIIFOLIA* E NA MODULAÇÃO DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO  
SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Prudêncio de A. Pereira.

Co-orientador: Kaio Gráculo Vieira Garcia

FORTALEZA-CE

2025

Luís Miguel Alves dos Santos

Co-inoculação de *Bacillus aryabhatai* e *Trichoderma harzianum* na atenuação da toxicidade do cádmio em *Mimosa caesalpinifolia* e na modulação da atividade enzimática do solo

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Aprovado em 19/12/2025

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia (Co-orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Msc. Francisco Luan Almeida Barbosa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Msc. Elane Bezerra da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais,  
minha família e amigos

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, autor da minha vida e fonte de toda a minha força. Sua presença constante me sustentou nos momentos de dificuldade e a Sua sabedoria guiou os meus passos até a conclusão desta importante etapa. A Ele, toda a honra e toda a glória.

À minha mãe, Francisca Mirândia, por sempre me apoiar e sempre ter sido uma base sólida e incondicional de apoio, por me incentivar a ir em busca dos meus sonhos e objetivos, por todo amor e orações, espero que continuar lhe dando orgulho cada vez mais.

Ao meu pai, Daniel Santos, por todo e incentivo durante toda minha vida e jornada acadêmica, por sempre ter me possibilitado focar nos meus estudos, por seu amor e por todos os ensinamentos de vida. Espero te honra sempre

A minha Tia, Diala Santos, por todo apoio durante o ensino médio e pelos conselhos na vida, espero que minhas conquistas sejam motivo de orgulho para a senhora sempre.

À toda minha família que acreditou e viveu esse sonho de ser um aluno da UFC, por toda torcida e apoio nesses anos, por acreditarem no meu potencial e principalmente por acreditarem no meu sonho junto comigo mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Arthur Prudêncio de Araujo Pereira, pela orientação nesse trabalho. Por ser, além de um excelente professor, um orientador que me possibilitou crescer nessas de solos e microbiologia do solo e ter certeza de que essa é a área que quero continuar na minha vida. Agradecer pela oportunidade e confiança em todos esses anos como bolsista do Grupo de Estudos de Microbiologia e Biotecnologia do Solos (GEMBioS) durante praticamente toda a minha graduação e a oportunidade de apresentar esse trabalho.

Ao Dr. Kaio Gráculo Vieira Garcia, por toda orientação, paciência, conselhos, incentivo e disposição. A sua contribuição foi fundamental para o meu desenvolvimento em diversos aspectos durante a minha jornada acadêmica, além de contribuir para um ambiente leve e descontraído, mas ao mesmo tempo profissional, e principalmente por contribuir muito para a conclusão desse trabalho.

Ao todos os docentes do Departamento de Ciências do Solo que possibilitaram durante todos os meus anos de bolsista ter um excelente convívio e contribuição em todos os momentos em que precisei de auxílio, agradeço em especial ao Professor Jaedson por me permitir ingressar no setor de física do solo como voluntário.

Aos membros do grupo GEMBioS, MSc. Luan, MSc. Elane, Alberto, Elizeth, Jhonantan, Ryan e também aos membros antigos como Matheus e Jarlane. Em especial ao Matheus e Murilo por toda paciência no convívio e principalmente toda a ajuda e

colaboração nas análises no laboratório e nessa monografia, sem dúvidas, sem o auxílio de vocês essa reta final de curso teria sido bem mais complexa.

Aos meus amigos de graduação, Thiago Lima, Eleyse Abreu, Miriane Nobre, Paulo Victor, Jhonas, Ana Raquel, Tiago Araújo, Amanda Kaylane, Maria Andressa. A presença de vocês foi essencial para me ajudarem a crescer e amadurecer em muitos momentos da minha graduação e ajudar a levar uma rotina muito exigente de forma mais leve.

## RESUMO

A contaminação do solo por cádmio (Cd) representa um grave risco ambiental e à saúde pública, demandando estratégias eficientes de remediação. Este trabalho avaliou o potencial da *coinoculação* da bactéria *Bacillus aryabhatae* do fungo *Trichoderma harzianum* na promoção do crescimento e na fitorremediação de *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) em solo contaminado. O experimento foi conduzido em casa de vegetação sob delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, combinando a presença ou ausência de Cd com quatro tratamentos biológicos: controle, inoculação isolada de *B. aryabhatae*, *T. harzianum* e *coinoculação* (consórcio), possuindo 4 repetições em cada tratamento e estatisticamente submetidos à ANOVA pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ). Após 90 dias, foram avaliados parâmetros biométricos, atividade enzimática do solo ( $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatases), carbono da biomassa microbiana (CBM) e o teor de Cd no solo e na planta. Os resultados demonstraram que a presença de Cd inibiu severamente o crescimento das plantas não inoculadas. Entretanto, a *coinoculação* mitigou a toxicidade do metal, promovendo um aumento na massa seca da parte aérea em comparação ao controle contaminado. Além disso, os tratamentos inoculados mantiveram a qualidade biológica do solo, elevando o CBM e a atividade enzimática. Quanto à dinâmica do poluente, a *coinoculação* reduziu a concentração de Cd nas raízes e aumentou significativamente o Fator de Translocação, favorecendo a transferência do metal para a parte aérea. Conclui-se que a associação sinérgica entre *M. caesalpiniiifolia* e o consórcio microbiano confirma a hipótese de potencialização do crescimento, apresentando-se como uma estratégia promissora para a recuperação de áreas degradadas por metais pesados.

Palavras chaves: fitorremediação; consórcio microbiano; metais pesados; *Mimosa caesalpiniiifolia*.

## ABSTRACT

Soil contamination by cadmium (Cd) poses a serious risk to the environment and public health, demanding efficient remediation strategies. This study evaluated the potential of co-inoculation with the bacterium *Bacillus aryabhatai* and the fungus *Trichoderma harzianum* in promoting growth and phytoremediation of *Mimosa caesalpinifolia* (“sabiá”) in contaminated soil. The experiment was conducted in a greenhouse using a completely randomized design, in a factorial scheme, combining the presence or absence of Cd with four biological treatments: control, single inoculation of *B. aryabhatai*, *T. harzianum*, and co-inoculation (consortium), with 4 replications per treatment, statistically analyzed via ANOVA using the F-test ( $p \leq 0,05$ ). After 90 days, biometric parameters, soil enzymatic activity ( $\beta$ -glucosidase, arylsulfatase, and phosphatases), microbial biomass carbon (MBC), and Cd content in soil and plant were evaluated. The results demonstrated that the presence of Cd severely inhibited the growth of non-inoculated plants. However, co-inoculation mitigated metal toxicity, promoting an increase in shoot dry mass compared to the contaminated control. Furthermore, the inoculated treatments-maintained soil biological quality, increasing MBC and enzymatic activity. Regarding pollutant dynamics, co-inoculation reduced Cd concentration in roots and significantly increased the Translocation Factor, favoring metal transfer to the shoot. It is concluded that the synergistic association between *M. caesalpinifolia* and the microbial consortium confirms the growth potentiation hypothesis, presenting itself as a promising strategy for the recovery of areas degraded by heavy metals.

Keywords: phytoremediation; microbial consortium; heavy metals; *Mimosa caesalpinifolia*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Parâmetros de crescimento de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B), altura (C), diâmetro do caule (D) e comprimento da raiz (E).....	25
Figura 2 -	Padrão morfológico de <i>M. caesalpiniiifolia</i> em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd), e severidade dos sintomas de toxicidade (C) sob diferentes tratamentos de inoculação.....	27
Figura 3 -	Carbono da biomassa microbiana (CBM) sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). As barras representam média $\pm$ erro padrão. Letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos de inoculação dentro de cada condição.....	28
Figura 4 -	Atividade enzimática do solo sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). Atividades de $\beta$ -glicosidase (A), arilsulfatase (B), fosfatase ácida (C) e fosfatase alcalina (D).....	29
Figura 5 -	Teores de cádmio na parte aérea (A), raiz (B) e solo (C) de <i>M. caesalpiniiifolia</i> cultivada com diferentes tratamentos de inoculação em solo contaminado com Cd.....	30
Figura 6 -	Fator de translocação de Cd (FT) (A) e fator de bioconcentração de Cd (FBC) (B) em <i>M. caesalpiniiifolia</i> cultivada sob diferentes tratamentos de inoculação em solo contaminado com Cd.....	31
Figura 7 -	Correlações de Spearman entre atributos biológicos do solo e parâmetros de crescimento de <i>M. caesalpiniiifolia</i> em solo sem Cd (-Cd) (A) e com Cd (+Cd) (B).....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização química do solo antes da instalação do experimento.....	21
------------	--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALT – Altura da planta

As – Arsênio

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry

$\beta$ -glicosidase ( $\beta$ -GLI) – Enzima  $\beta$ -glicosidase

*B. aryabhattai* – *Bacillus aryabhattai*

*B. cereus* – *Bacillus cereus*

CBM – Carbono da Biomassa Microbiana

Cd – Cádmió

Co – Cobalto

CR – Comprimento da raiz

Cr – Cromo

Cu – Cobre

DC – Diâmetro do caule

FBC – Fator de Bioconcentração

FT – Fator de Translocação

Hg – Mercúrio

*M. caesalpinifolia* – *Mimosa caesalpinifolia*

MSPA – Massa Seca da Parte Aérea

MSR – Massa Seca da Raiz

Ni – Níquel

Pb – Chumbo

*T. harzianum* – *Trichoderma harzianum*

Zn – Zinco

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	13
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	15
2.1	<b>Contaminação do solo por metais pesados .....</b>	15
2.2	<b>Cádmio no solo e na planta .....</b>	16
2.3	<b>Uso de micro-organismos na remediação de solos contaminados por metais pesados.....</b>	18
2.4	<b>Leguminosas como estratégia para remediação de solos contaminados por metais pesados.....</b>	20
3	<b>HIPÓTESES.....</b>	21
4	<b>OBJETIVOS.....</b>	21
4.1	<b>Objetivo geral.....</b>	21
4.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	21
5	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	22
5.1	<b>Delineamento experimental.....</b>	22
5.2	<b>Caracterização da área experimental.....</b>	22
5.3	<b>Condução do experimento.....</b>	23
5.4	<b>Parâmetros de crescimento.....</b>	23
5.5	<b>Análises enzimáticas.....</b>	24
5.6	<b>Carbono da biomassa microbiano (CBM).....</b>	24
5.7	<b>Extração cádmio do solo.....</b>	25
5.8	<b>Extração cádmio raiz e parte aérea.....</b>	25
5.9	<b>Fator de bioacumulação e Fator de translocação de cádmio.....</b>	25
5.10	<b>Análises estatísticas.....</b>	26
6	<b>RESULTADOS .....</b>	27
7	<b>DISCUSSÃO .....</b>	35
8	<b>CONCLUSÕES .....</b>	39
	<b>REFERÊNCIAS</b>	

## 1.INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por metais pesados é um problema ambiental global, cada vez mais relevante devido à intensificação das atividades antrópicas. Entre esses elementos, o cádmio (Cd) se destaca por possuir persistência e toxicidade e alta mobilidade, apresentando grande capacidade de acumulação em tecidos vegetais, o que pode consequência pode comprometer o crescimento das plantas e representar riscos significativos à saúde humana e animal. (Shaari et al., 2024; Wang et al., 2019).

O Cd pode ser introduzido no solo tanto por processos naturais, como o intemperismo de rochas, quanto por fontes antrópicas, incluindo o uso de agroquímicos e o descarte inadequado de resíduos urbanos e industriais (Raza et al., 2020). Uma vez presente, sua persistência pode durar décadas, sendo influenciada por características do solo, como pH, potencial redox, teor de argila e matéria orgânica, fatores que determinam sua biodisponibilidade e toxicidade (Gul et al., 2021).

Além disso, o Cd é um contaminante prioritário em muitas regiões, estando presente em 60,8% dos locais de resíduos perigosos listados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, e associado a efeitos adversos em micro-organismos do solo, plantas e na saúde humana (ATSDR, 2008; Vareda et al., 2019; Siyar et al., 2020; Li et al., 2016; Wahid et al., 2009).

Diante desse cenário, o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para a mitigação da contaminação por Cd torna-se essencial. Uma alternativa promissora para solucionar essa questão é a fitorremediação, que consiste na utilização de plantas capazes de acumular, estabilizar ou transformar metais pesados. Leguminosas da família Fabaceae, que abrange mais de 750 gêneros e cerca de 19 mil espécies, possuem particular interesse devido à sua capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas e ampla distribuição (Christenhusz et al., 2016).

A *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., conhecida como sabiá, é uma leguminosa nativa da Caatinga, caracterizada por rápido crescimento, alta produção de biomassa e utilização em cercas e estacas (EMBRAPA, 2003). Estudos indicam que o sabiá pode atuar como planta fitoestabilizadora, especialmente quando associado a fungos micorrízicos arbusculares, evidenciando seu potencial em programas de recuperação de solos contaminados (Garcia et al., 2017).

A importância dos microrganismos do solo na fitorremediação é igualmente relevante. Espécies do gênero *Bacillus* apresentam elevada tolerância a metais pesados e podem promover o crescimento vegetal por meio de múltiplos mecanismos, incluindo a solubilização de fósforo, produção de sideróforos, fitormônios e enzimas hidrolíticas (Goyal et al., 2019; Blake et al., 2021; Setiawati et al., 2022). Estudo em regiões mineradas demonstram que cepas de *Bacillus cereus* possuem potencial para biorremediação e resistência a múltiplos metais pesados (Liang et al., 2025).

De maneira complementar, fungos do gênero *Trichoderma* desempenham funções cruciais na promoção do crescimento vegetal e na melhoria da qualidade do solo, ao mesmo tempo em que apresentam capacidade de antagonismo contra patógenos e de biossorção de metais pesados (Harman et al., 2004a; Contreras-Cornejo et al., 2009; Lorito et al., 2010). Ensaios *in vitro* com *Trichoderma tomentosum* evidenciaram crescimento mesmo sob concentrações tóxicas de Cd, Pb e Ni, confirmando seu potencial de tolerância e biossorção de metais (Universidade de Maragheh e Universidade Alzahra, Irã).

O cádmio representa riscos à saúde humana, mesmo em baixas concentrações, devido à sua persistência no organismo, indução de estresse oxidativo e classificação como elemento potencialmente carcinogênico (Ebrahimi et al., 2020). Ele compromete o sistema antioxidante natural, aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e causa danos a proteínas, lipídeos e material genético, elevando o risco de mutações e carcinogênese. Esses efeitos reforçam a importância de estratégias de biorremediação seguras e eficientes.

Apesar do potencial isolado de *Bacillus aryabhattai*, *Trichoderma harzianum* e *M. caesalpiniiifolia* em tolerar e mitigar metais pesados, estudos que avaliem a ação combinada dessas espécies para biorremediação de Cd ainda são escassos.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da co-inoculação bacteriana e fúngica na fitorremediação de cádmio em solos cultivados com *M. caesalpiniiifolia*, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de recuperação de áreas contaminadas.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Contaminação do solo por metais pesados

Metais pesados são elementos com propriedades metálicas e massa atômica > 20. Os contaminantes mais comuns de metais pesados são: Cd, Cr, Hg, Pb, Cu, Zn e As (He et al., 2015). São considerados também um grupo de elementos químicos que em sua grande maioria são essenciais para a saúde humana, como o ferro (Fe) e zinco (Zn) e outros que são possivelmente tóxicos como chumbo (Pb) e cádmio (Cd) quando acumulados em grandes quantidades (Johri et al., 2010). A exposição à esses metais pode ocorrer por diversas vias, dentre eles destacam-se a ingestão de água e alimentos contaminados, emissões industriais e atividades de mineração (Mota et al.2022). Na natureza, altos níveis de metais pesados podem ocorrer, principalmente, por questões de alterações geográficas como erupções vulcânicas, erosão de rochas que posteriormente são lixiviadas a rios, lagos e oceanos devido a movimentação das águas (Bagul et al, 2015). Entretanto, atividades antrópicas como mineração, também promovem o aumento dos teores desses elementos possivelmente tóxicos, uma vez que, seus resíduos podem se difundir através do ar, solo, e água, gerando uma perturbação nos ambientes próximos. Outro fator que intensifica a disseminação desses metais é o descarte inadequado de produtos eletrônicos, uma vez que, em grande parte, possuem metais pesados, concentrados principalmente em pilhas e baterias. (Sankhla et al.2016).

A utilização de fertilizantes e pesticidas na agricultura é um fator que vem corroborando para o aumento dos níveis de metais tóxicos no solo, o lodo de esgoto e esterco de animais são uns dos principais componentes orgânicos que contribuem para o aumento da contaminação por metais pesados no solo, principalmente se aplicados de maneira recorrente. Um estudo conduzido em Bangladesh avaliou a aplicação de diferentes tipos de inseticida e constatou que diferentes doses de inseticidas como o Abamectina, promovem um aumento nos teores de metais pesados (Aktaruzzaman et al., 2024), dentre eles está o cádmio (Cd) que é um elemento químico preocupante, pois causa sérios danos à saúde humana. Portanto, alguns países determinaram limites para a adição de metais pesados no solo, em que os limites geralmente estão relacionados às camadas de cultivo (camada 20-30 cm) em que ocorre a maior parte da atividade radicular (Mortvedt et al., 1995).

O cádmio (Cd) é um metal maleável que se apresenta geralmente como um pó de coloração azulada ou branco-prateada. Ele reage com facilidade a diversas substâncias, sendo amplamente utilizado na fabricação de baterias, especialmente as de níquel- cádmio, além de ligas metálicas, pigmentos, estabilizadores plásticos, corantes, tintas, vidros e em processos da indústria galvânica. Descoberto por F. Stromeyer em 1817, na cidade de

Göttingen, Alemanha (John et al., 1991), o cádmio também possui aplicação em reatores nucleares, atuando como regulador da fissão do urânio por meio da captura de elétrons. Esse elemento ocorre naturalmente em solos, minerais como sulfetos, sulfatos, carbonatos, cloretos e sais de hidróxido e em corpos d'água. Industrialmente, o cádmio é obtido como subproduto do refino de zinco a partir do sulfeto de zinco (ZnS), sendo frequentemente encontrado associado a minerais de zinco, chumbo ou cobre, devido às suas propriedades químicas semelhantes. As maiores fontes de exposição ao Cd estão relacionadas às atividades metalúrgicas, especialmente em fundições de zinco e unidades de purificação de ferro-gusa (Charkiewicz et al., 2019).

Em relação a saúde humana a toxicidade causada por esses elementos não se limita apenas a efeitos agudos, mas também em impactos crônicos como alterações comportamentais, déficit cognitivo, além de impactar em predisposições em enfermidades como Alzheimer e Parkinson (Jomova. et al.2025). Nos últimos anos a importância da avaliação dos efeitos do cádmio tem se intensificado, pois os seus efeitos na saúde podem variar dependendo da sua localização. A ingestão aguda pode resultar em dores abdominais, náuseas, vômitos, além de que a exposição prolongada ao Cd pode estar associada à alguns tipos de câncer (Pâncreas, bexiga, mama.). Outro ponto preocupante é que o cádmio é excretado do corpo humano muito lentamente, sendo as principais vias, urina, fezes, saliva e suor, o que faz com que as análises para verificar o nível de exposição à esse elemento apresenta estágios para se identificar o seu diagnóstico (Charkiewicz et al.2023).

### **Cádmio no solo e na planta**

Altas concentrações de cd no solo, geralmente, são provenientes de fontes antrópicas, que podem ser liberados no solo com a lixiviação e escoamento de metais não ferrosos de produtos industriais, além disso, a poeira proveniente da combustão de combustíveis fósseis, podem impactar solos agrícolas a grandes distâncias (HU, Y. et al. 2016).O cádmio no solo pode ser encontrado na forma físico-química com variações em carga, sendo a sua forma dissolvida na solução do solo podendo apresentar cátions livres ou complexos ligantes orgânicos ou inorgânicos (Wu et al., 2000). A disponibilidade do cádmio no solo está relacionada com o pH. O pH ácido está, em grande parte, associado aos maiores biodisponibilidades do cádmio, permitindo uma maior taxa de absorção desse elemento nos tecidos vegetais (Yang et al., 2016). Outro fator impactante é a decomposição de matéria orgânica de animais e plantas, sendo um dos principais meios de aumento da biodisponibilidade de Cd no solo, pois promove a formação de de complexo organometálicos que limitam a solubilidade do cádmio no solo (Mohamed et al., 2010).

Alterações na comunidade microbiana podem resultar em diferenciações na tolerância ao estresse das plantas, aumentando a sua capacidade de resistir a poluição por metais pesados incluindo o cádmio (Liu et al., 2020). No entanto, a diversidade microbiana é relativamente baixa, fazendo com que apenas espécies bem adaptadas consigam sobreviver a condições de alto estresse (Seneviratne et al., 2015). O cádmio é encontrado, principalmente, no solo como cátion  $Cd^{2+}$ , estudos realizados com *Panax ginseng* avaliou os efeitos da contaminação de cádmio no solo e constatou que a diversidade e a abundância microbiana diminuíram quando em expostos a alta disponibilidade de Cd no solo, sendo a comunidade bacteriana mais afetada em relação a fúngica (Sun et al., 2022).

A absorção de cádmio nas plantas irá depender, principalmente, da relação sólido/líquido e do tipo de solo, além da partição de Cd no solo que está relacionada à absorção da planta (Yuan et al., 2021). As plantas incorporam o cádmio (Cd) principalmente por meio da água presente nos poros do solo, a qual resulta do equilíbrio entre as fases sólida e líquida desse ambiente (Imoto & Yasutaka, 2020). As raízes são as zonas da planta que mais absorvem o Cd, o cádmio pode entrar na planta pelos canais iônicos, que são as passagens primárias desse elemento, que permite a entrada de cátions divalentes, além disso a alta concentração externa de  $Cd^{2+}$  gera um gradiente eletroquímico significativo, facilitando a associação do  $Cd^{2+}$  com proteínas transportadoras à medida que passa pelos canais iônicos (canal de  $Ca^{2+}$ ) e então entra na camada da epiderme da raiz pela rota do simplasto (Sterckeman & Thomine, 2020).

A disponibilidade Cd na planta causa toxicidade e afetam severamente a fisiologia da planta e a morfologia dos seus órgãos, tanto vegetativos quanto reprodutivos. O Cd é um poluente prejudicial, afetando negativamente as funções fisiológicas e o desenvolvimento das plantas (Sardar et al., 2022). O acúmulo de Cd em partes vegetativas retarda o seu crescimento, diminuindo parâmetros como peso fresco (Hladun et al., 2015). Além de provocar a redução dos parâmetros fitomorfológicos, o cádmio (Cd) também afeta de forma negativa a anatomia vegetal. Sua presença interfere na estrutura radicular, promovendo a expansão das células do parênquima e a degradação celular nas regiões da córtex, endoderme e periciclo da raiz (Pérez Chaca et al., 2014).

## Uso de microorganismos na remediação de solos contaminados por metais pesados

A biorremediação tem atraído a atenção da comunidade científica nos últimos anos. Os mecanismos envolvidos fundamentam-se predominantemente em transformações de natureza redox, processos de absorção e modificações na reação química do meio. Atualmente, as abordagens microbianas mais empregadas na remoção de metais pesados compreendem a bioabsorção e a bioacumulação, a síntese de biosurfactantes, a biolixiviação, as reações de oxidação e redução, bem como os processos de biovolatilização e biomineralização, dentre outros (Rahman et al., 2020).

A interação entre microrganismos e os metais pesados podem ocorrer de maneira direta ou indireta, dependendo da espécie dos microbios, e o tipo de metal, além de fatores como pH, temperatura. As bactérias são um exemplo de organismos que podem sobreviver a diversas condições ambientais por apresentarem fatores como tamanho pequeno, rápida taxa de crescimento e fácil cultivo, sendo uma opção de destaque para a remediação de metais pesados no solo. De modo geral, os metais pesados apresentam alta afinidade por grupos funcionais presentes na parede celular bacteriana, como amino, carboxila, sulfato e fosfato. Esses grupos, localizados nas camadas de polissacarídeos da parede celular, atuam como sítios de ligação, favorecendo a adsorção e a imobilização dos íons metálicos (Yue et al., 2015). Geralmente, o potencial de absorção de metais pesados pelas bactérias varia de 1 mg/g a 500 mg/g. Cepas de *Pseudomonas aeruginosa* resistentes ao mercúrio absorvem íons de mercúrio seletivamente com uma capacidade máxima de absorção de cerca de 180 mg/g (Yin et al., 2016).

Fungos possuem a capacidade de sobreviver em ambientes com metais pesados, podendo adsorver íons desses metais. a troca catiônica que ocorre deve-se ao fato desses microrganismos apresentarem quitina, polissacarídeos, fosfato e ácido glucurônico em/sobre suas células (Purchase et al., 2009). Outro fato que influencia na adsorção é a especificidade da cepa fúngica ao íon de metal como o *Trichoderma* que é conhecido por desintoxicar Cd (Bazrafshan et al., 2016). A espécie *Trichoderma harzianum* (*T. harzianum*) tem se demonstrado uma alternativa promissora na remediação de metais pesados em especial o cádmio (Cd), um estudo realizado com uso desse isolado em tratamentos de águas residuais com presença de metais pesados relatou o crescimento desses fungos utilizando os metais como fonte de energia, o estudo também teve como resultado a diminuição dos níveis de cádmio após 28 dias de biorremediação utilizando como medição a técnica de absorção atômica em placa de petri (Hussain et al., 2021).

O gênero *Bacillus*, pertencente à família Bacillaceae, abrange cerca de 293 espécies e subespécies (Patel e Gupta, 2020). As bactérias desse grupo são tipicamente em formato de bastonete, Gram-positivas, podendo apresentar metabolismo aeróbico ou facultativamente anaeróbico. Uma característica marcante do gênero é a capacidade de formar endósporos, o que lhes confere resistência a condições ambientais adversas (Patel e Gupta, 2020).

Diversos microrganismos possuem, de forma natural, o operon *cadA*, responsável por conferir resistência à toxicidade do cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ). Esse operon, com aproximadamente 3,5 kb, está localizado no plasmídeo pI258 e é composto por dois genes: *cadA* e *cadC* (Patel e Gupta, 2020). O gene *cadA* codifica uma proteína de 727 aminoácidos que atua como uma ATPase de efluxo de cádmio dependente de energia, promovendo a remoção do metal do interior celular. Já o gene *cadC* codifica uma proteína menor, com 122 aminoácidos, que funciona como regulador transcricional positivo do operon *cadA* (Solovieva e Entian, 2002). Estudos demonstram que a expressão de *cadA* é induzida na presença de íons  $\text{Cd}^{2+}$ , indicando um mecanismo adaptativo de resposta ao metal. Além disso, Solovieva e Entian (2002) também relataram que, em *Bacillus subtilis*, o gene *cadA* pode estar localizado no cromossomo, juntamente com o gene *yvgW*, também associado à resistência ao cádmio. Um estudo realizado na China avaliou a remediação de metais pesados utilizando a bactéria *Bacillus aryabhattai* juntamente com biochar constatou que a utilização de biochar inoculado com bactérias tem se mostrado uma estratégia eficaz para a imobilização de metais pesados no solo. Esse material é capaz de converter as formas trocáveis de arsênio (As) e cádmio (Cd) em frações residuais menos disponíveis, reduzindo, conseqüentemente, a biodisponibilidade desses elementos tanto no solo quanto nos tecidos aéreos do espinafre-d'água. Além disso, a aplicação do biochar bacteriano contribui para o crescimento vegetal, promovendo a melhoria das propriedades físico-químicas do solo e influenciando positivamente a estrutura da comunidade microbiana (Huang et al., 2024).

## **Leguminosas como estratégia para remediação de solos contaminados por metais pesados**

As plantas são organismos vivos que podem estar expostas a diversas condições ambientais desafiadoras ao longo do seu ciclo de vida, que podem influenciar negativamente o seu desenvolvimento e crescimento (Seleiman et al., 2020). Os metais pesados como chumbo (Pb), arsênio(As), cádmio(Cd), níquel (Ni), zinco (Zn), cobalto (Co), alumínio (Al) e cromo (Cr), podem induzir toxicidade graves quando expostos ao agroecossistema do solo, seja por processos naturais ou antropogênicas(Luo et al., 2021). Nas plantas os metais pesados são absorvidos pela raiz e translocados para parte aérea, causando danos significativos em ambas as áreas, bem como estruturas internas como organelas internas, como cloroplastos e mitocôndrias, reduzindo assim a produção de energia e impondo estresse oxidativo, afetando, em última instância, a morfologia e a taxa de sobrevivência da planta (Garg et al., 2011). Embora muitas plantas sejam prejudicadas por metais pesados, algumas espécies são tolerantes ou até mesmo hiperacumuladoras (Singh et al., 2016).

A família Fabaceae reúne mais de 19 mil espécies, englobando diversas culturas agrícolas de grande relevância, como a soja (*Glycine max*), a ervilha (*Pisum sativum*) e o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*), todas fundamentais para a segurança alimentar em escala global (Xia et al., 2022). Além dessas leguminosas amplamente cultivadas, espécies consideradas subutilizadas, como o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e o feijão- arroz (*Vigna aconitifolia*), também desempenham papel importante na alimentação das populações rurais, especialmente em regiões sujeitas a condições ambientais adversas, como períodos de seca e escassez de alimentos (Hu et al., 2022). Os efeitos mais acentuados do estresse de cádmio em leguminosas são a inibição do crescimento e a redução do peso seco e o comprimento da raiz (Pérez Chaca et al., 2014).

A espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth., popularmente conhecida como sabiá na região Nordeste do Brasil e como sansão-do-campo nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, pertence à família Fabaceae, subfamília Mimosoideae. É uma espécie nativa do Nordeste brasileiro, amplamente distribuída em áreas de caatinga nos estados do Piauí, Pernambuco, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia e Ceará (De Araújo et al 2022). Além disso, o sabiá, além de possuir capacidade de associação simbiótica com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e resistência a adversidades ambientais. Frequentemente utilizada em programas de reflorestamento no bioma Caatinga, o sabiá é introduzido como espécie pioneira devido à sua rusticidade e rápida adaptação a solos pobres. Além disso, tem se mostrado eficaz em processos de fitoestabilização e biorremediação de áreas contaminadas por metais pesados (Garcia et al., 2017).

## HIPOTESES

Hipótese 1: A co-inoculação de *Bacillus aryabhattai* e *Trichoderma harzianum* atenuam a severidade dos sintomas fitotóxicos do cádmio em *Mimosa caesalpinifolia*, resultando em maior acúmulo de biomassa e integridade dos tecidos vegetais.

Hipótese 2: A introdução de microrganismos (*B. aryabhattai* e *T. harzianum*) sustenta a atividade metabólica do solo sob estresse por cádmio, preservando o carbono da biomassa microbiana e a atividade de enzimas essenciais para a ciclagem de nutrientes

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

Avaliar a eficiência da co-inoculação dos microrganismos *Bacillus aryabhattai* e *Trichoderma harzianum* na promoção do crescimento vegetal e na fitorremediação de cádmio (Cd) em plantas de *Mimosa caesalpinifolia* (Sabiá) cultivadas em solo contaminado.

### Objetivos específicos

- I. Analisar o desenvolvimento vegetal e a dinâmica do contaminante: Mensurar os parâmetros biométricos (altura, diâmetro, biomassa) e quantificar os teores de cádmio na raiz e na parte aérea para determinar os fatores de translocação e bioconcentração, verificando o potencial de fitoextração da espécie.
- II. Avaliar a qualidade biológica do solo: Investigar o efeito dos tratamentos microbianos sobre a funcionalidade do solo através da quantificação do Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e da atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatases sob estresse metálico.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial duplo, sendo: (i) solo contaminado com cádmio e não contaminado e (ii) tratamentos controle, com presença de inoculante *Bacillus Aryabhatai*, *Trichoderma harzianum* e coinoculação, com quatro repetições, constituindo 32 unidades experimentais.

### Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências do Solo, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará (UFC), em região de clima tropical com inverno seco, precipitação média anual de 1.600 mm e temperatura média de 27 °C (Álvares et al., 2013). As amostras de solo foram coletadas na camada de 0–20 cm em área de preservação do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Agricultura Urbana (NEPAU), peneiradas em malha de 2 mm para remoção de partículas grosseiras, homogêneas e armazenadas em sacos plásticos. A caracterização química do solo foi realizada no Laboratório de Solos FUNCEME, incluindo parâmetros como pH, matéria orgânica, fósforo disponível, capacidade de troca catiônica (CTC), teores de cálcio, magnésio, potássio, alumínio e outros nutrientes.

Tabela 01. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento.

pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al	Al <sup>3+</sup>	SB	CTC	V
<b>H<sub>2</sub>O</b>									<b>(%)</b>
4,5	0,18	2,40	0,4	0,06	4,46	0,50	3,04	7,44	41,0
<b>MO</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>C/N</b>		<b>Argila</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>		
<b>g/kg</b>		<b>g/kg</b>			<b>g/kg</b>				
21,39	12,49	1,36	9		37,0	868,0	95,0		

Fonte: Laboratório de solos e água (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). pH (Potencial Hidrogeniônico): medido na relação solo:água de 1:2,5 pelo método de Walkley-Black; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: extraídos com KCl 1 mol/L; H<sup>+</sup>+ Al (Acidez Potencial): determinada com (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Ca.H<sub>2</sub>O 0,5 mol/L a pH 7; CTC (Capacidade de Troca de Cátions): calculada pela soma de (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>); SB (Soma de Bases): calculada pela soma de (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>); V (Índice de Saturação por Bases): calculado como (SB/CTC) x 100; argila, areia e silte: determinados pelo método da pipeta.

## Condução do experimento

Foram utilizados vasos de 3 kg de solo, nos quais foram revestidos em sacos plásticos. Após 15 dias a aplicação do calcário para corrigir o pH do solo com base na análise química e utilizando a fórmula  $NC = (V_2 - V_1) \times CTC / 100$ , o Cd foi colocado nos vasos 16 vasos sendo divididos em 4 tratamentos que continham controle, inoculação de pelo menos um microrganismo e coinoculação e incubados durante 7 dias. O inoculo *Trichoderma harzianum*, seguindo a recomendação do fabricante e adaptado as condições do experimento, foram utilizados 4,6 mL da solução por vaso aplicado direto no solo. Já o outro microrganismo utilizado foi o *Bacillus aryabhatai* cepa CMAA 1363 e  $1 \times 10^8$  UFC/mL de concentração em que foram utilizados 4 mL em para inocular todas as sementes utilizadas. As sementes foram tratadas previamente utilizando uma solução de hipoclorito de sódio com água em proporção 2:1 durante 10 minutos e limpas com água destilada afim de quebrar a tensão superficial, sendo essas sementes adquiridas já com quebra de dormência. Foram semeadas 4 sementes por vasos e após 10 dias da emergência, realizou-se o desbaste restando apenas uma planta em cada vaso. Após o desbaste, as plantas permaneceram em casas de vegetação até 90 dias.

## Parâmetros de crescimento

Noventa dias após a emergência, as plantas foram coletadas, separadas e avaliadas quanto aos parâmetros de crescimento, incluindo altura da parte aérea, diâmetro do caule e comprimento da raiz. A altura da planta foi determinada como a distância do nível do solo até o broto terminal da haste principal, utilizando trena, enquanto o diâmetro do caule foi medido com paquímetro digital em milímetros e o comprimento da raiz com régua, em centímetros. Para determinação da massa seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA), as plantas foram colocadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa a 60 °C até atingirem peso constante. Em seguida, o material seco foi pesado em balança analítica para obtenção da massa seca final.

## **Análises enzimáticas**

As atividades enzimáticas avaliadas no solo foram  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase, fosfatase ácida e fosfatase alcalina, enzimas indicadoras da ciclagem de carbono, enxofre e fósforo, respectivamente. Para todas as análises, utilizou-se 1 g de solo úmido, pesado em tubos Falcon, aos quais foram adicionados tampões e substratos específicos de acordo com a enzima a ser determinada. Para  $\beta$ -glicosidase, utilizou-se tampão MUB (pH 6) e substrato p-nitrofenil- $\beta$ -D-glicosídeo (PNG) a 0,05 M. Para arilsulfatase, o tampão foi de acetato (pH 5,8) e o substrato p-nitrofenil sulfato (PNS). As fosfatases ácida e alcalina foram determinadas utilizando tampão MUB ajustado para pH 6,5 e pH 11, respectivamente, com substrato p-nitrofenil fosfato de sódio (PNP).

Após a adição do substrato, os tubos foram agitados em vórtex e incubados em banho-maria a 37 °C por 1 hora. Em seguida, a reação foi interrompida pela adição de soluções de parada específicas (Tris 0,1 M pH 12 para  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase; para fosfatases, ajustadas conforme o pH da enzima). O conteúdo foi filtrado em papel Whatman nº 2 e a absorbância medida em espectrofotômetro de feixe único (KASVI) nas faixas de 410–420 nm, dependendo da enzima.

## **Carbono da biomassa microbiano (CBM)**

A determinação do CBM utilizou o método de fumigação-extração (VANCE et al., 1987), em que, com solo úmido, são pesados 20g em frascos de vidro de 100 mL para amostras fumigadas e não fumigadas. Na sequência da pesagem, foi adicionado 1 mL de clorofórmio isento de etanol em todos os recipientes que foram destinados a fumigação e imediatamente fechados e armazenados em local sem luminosidade e temperatura ambiente por 24 horas. Após 24 horas, deixou-se evaporar todo o clorofórmio em capela. Seguindo para a extração, transferiu-se o solo dos frascos fumigados e não fumigados para Erlenmeyer e adicionou-se 80 mL de solução de sulfato de potássio 0,5M, em seguida agitou-se por 30 minutos a 200 rpm, depois de decantado, o sobrenadante foi filtrado. Retirou-se 8 mL do extrato, adicionando 2 mL de dicromato de potássio 0,0667M e 15 mL da mistura de ácido sulfúrico/fosfórico acondicionados para o tubo digestor e seguindo para a digestão por 30 minutos a 100°C em bloco digestor. Após esfriado, o conteúdo foi transferido para Erlenmeyer, e aplicou-se 7 gotas de ferroin e titulou-se com sulfato ferroso amoniacal. Após esse processo, o cálculo para a obtenção de CBM foi realizado utilizando a diferença entre as amostras fumigadas e não fumigadas, com a utilização do fator de conversão de 0,33.

### Extração cádmio do solo

A extração de Cd no solo se deu baseada na metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), em que foi utilizado solução de DTPA (ácido dietilenotriaminopentacético) a  $0,005 \text{ mol L}^{-1}$  mais trietanolamina (TEA)  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  mais cloreto de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , a pH 7,30. Na sequência foi pesado 20g de solo em Erlenmeyer e adicionados 40 mL da solução extratora (DTPA + TEA +  $\text{CaCl}_2$ ) e tampados, em seguidos colocados para agitar a 220 rpm por 2 horas. Ao parar de agitar, a suspensão foi filtrada utilizando filtros de papel do tipo Whatman n° 2 em um período de 1 hora. As análises de absorção atômica dos conteúdos filtrados foram realizadas utilizando um espectrofotômetro (Thermo Scientific iCE 3000 Series AA). O cálculo para a obtenção das concentrações de Cd em  $\text{mg dm}^{-3}$  de solo, foi utilizado os valores das leituras multiplicados por 2.

### Extração cádmio raiz e parte aérea

Seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017), as raízes e a parte aérea das plantas em solo contaminado com Cd foram moídas e pesadas 0,5g de ambas as partes e de todos os tratamentos, em seguida transferidos para um Erlenmeyer e adicionados 25 mL da solução de HCL 0,1 M e colocados para agitar por 1 hora a 150 rpm. Após esse procedimento o conteúdo foi filtrado em papel Whatman n° 2 e levados para leituras em espectrofotômetro (Thermo Scientific iCE 3000 Series AA). O cálculo para a obtenção das concentrações de cádmio em ppM, foi utilizado os valores das leituras multiplicado por 50.

### Fator de bioacumulação e Fator de translocação de cádmio

BCF é o fator de bioconcentração em que S representa o teor de metais pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea de *M. caesalpinifolia* e T é a concentração correspondente do metal no solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Eq.1). Altos valores de BFC indicam uma maior capacidade da planta de acumular metais pesados. TF é o fator de translocação em que S é a concentração de Cd nas partes aéreas da planta e o R é o teor condizente do metal nas raízes (Eq.2). Altos valores de TF indicam uma maior capacidade de transporte de metal das raízes para as estruturas aéreas da planta (Shan et al., 2025).

$$BCF = \frac{S}{T} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$TF = \frac{S}{R} \quad (\text{Eq. 2})$$

### **Análises estatísticas**

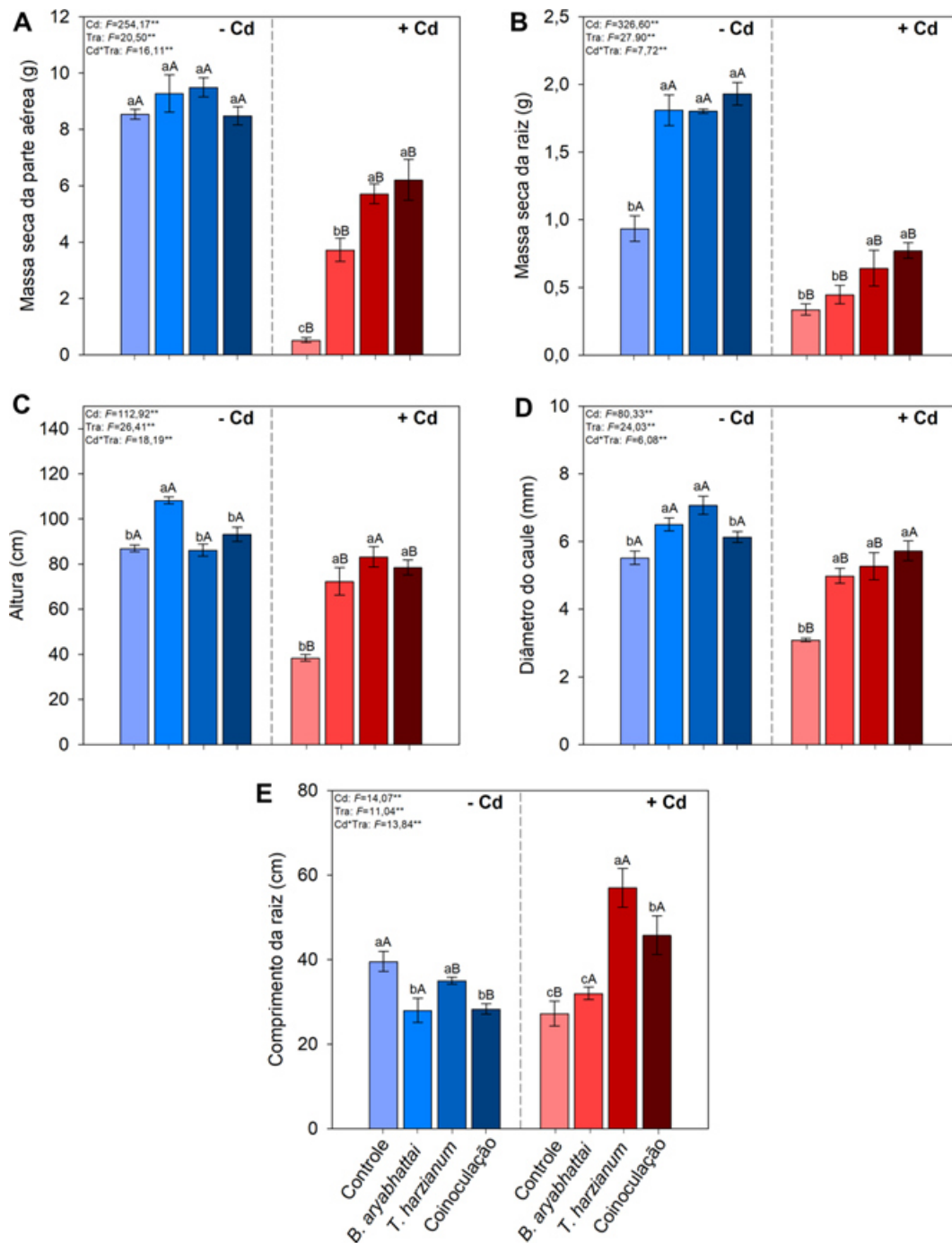
As análises estatísticas foram submetidos a avaliação da normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro–Wilk ( $p \leq 0,05$ ) e a homogeneidade de variâncias. Atendidos os pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, adotando-se nível de significância de  $p \leq 0,05$ . Quando identificados efeitos significativos, as médias foram comparadas pelo método de agrupamento de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ). Todas as análises foram executadas no software AgroEstat v.1.1.0.712 rev. 77 (Barbosa e Maldonado, 2011).

## RESULTADOS

### Parâmetros de crescimento de *M. Caesalpinifolia*

Efeitos dos tratamentos de inoculação e da exposição ao Cd foram identificados nas variáveis de crescimento das plantas (Figura 1). Na ausência de Cd, a MSPA não diferiu entre os tratamentos (Figura 1A), enquanto a MSR foi maior nos tratamentos com *B. aryabhatai*, *T. harzianum* e na coinoculação (Figura 1B). A altura foi maior apenas no tratamento com *B. aryabhatai* (Figura 1C). O diâmetro do caule foi maior nos tratamentos com *B. aryabhatai* e *T. harzianum* (Figura 1D). O comprimento radicular foi maior no controle e menor nos tratamentos inoculados, com exceção de *T. harzianum* (Figura 1E). Na presença de Cd, os efeitos das inoculações foram mais expressivos. A MSPA foi maior com *B. aryabhatai* (660%), *T. harzianum* (1.060%) e coinoculação (1.140%) em comparação ao controle (Figura 1A). A MSR foi maior em *T. harzianum* e coinoculação (Figura 1B). A altura aumentou com *B. aryabhatai* (84%), coinoculação (102%) e *T. harzianum* (113%) em relação ao controle (Figura 1C). O diâmetro do caule e o comprimento radicular foi maior em todos os tratamentos de inoculação, quando comparado ao controle (Figura 1D e 1E). No geral, o Cd reduziu o crescimento, e as inoculações mantiveram melhor desempenho que o controle, mesmo sob exposição à contaminação.

Figura 1 - Parâmetros de crescimento de *Mimosa caesalpinifolia* sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B), altura (C), diâmetro do caule (D) e comprimento da raiz (E).



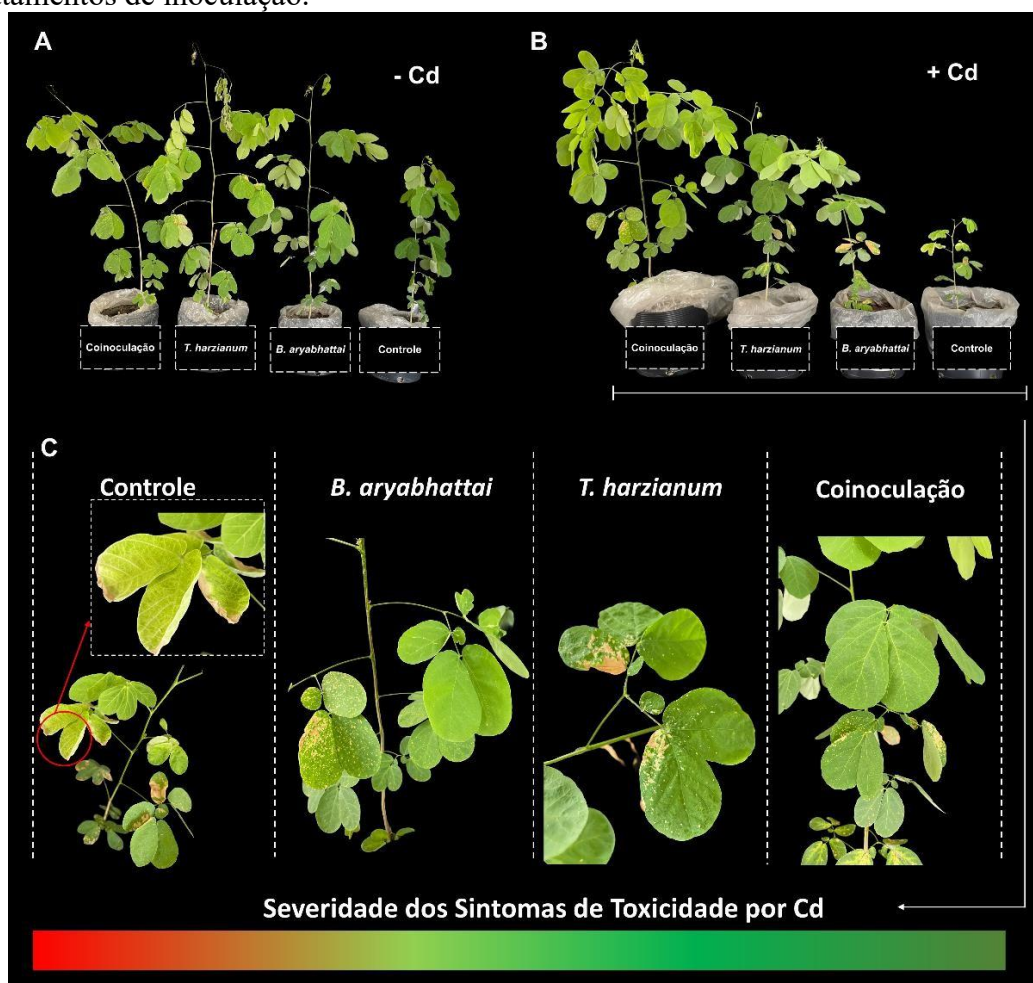
As barras representam média  $\pm$  erro padrão. Letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos de inoculação dentro de cada condição de Cd (-Cd ou +Cd), enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre -Cd e Cd dentro de cada tratamento de inoculação pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025.

### Padrão morfológico e severidade dos sintomas de toxidez por Cd

A exposição de plantas de *M. caesalpiniiifolia* ao Cd resultou em diferenças morfológicas claras entre os tratamentos, perceptíveis quando se considera o conjunto das respostas avaliadas (Figura 2). Em condições sem contaminação (-Cd), as plantas inoculadas exibiram maior vigor, com arquitetura mais desenvolvida e coloração verde uniforme (Figura 2A). Em contraste, as plantas cultivadas em solo contaminado (+Cd) apresentaram redução visível no crescimento, efeito mais pronunciado no tratamento controle (Figura 2B). Sob contaminação (+Cd), a severidade dos sintomas também variou entre os tratamentos (Figura 2C). O controle apresentou clorose acentuada, encarquilhamento foliar, textura coriácea, necrose marginal e maior deterioração dos tecidos (Figura 2C). As plantas inoculadas, por outro lado, mantiveram maior integridade da parte aérea e menor intensidade de danos, mesmo na presença do metal (Figura 2C).

Figura 1 - Padrão morfológico de *M. caesalpiniiifolia* em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd), e severidade dos sintomas de toxicidade (C) sob diferentes tratamentos de inoculação.

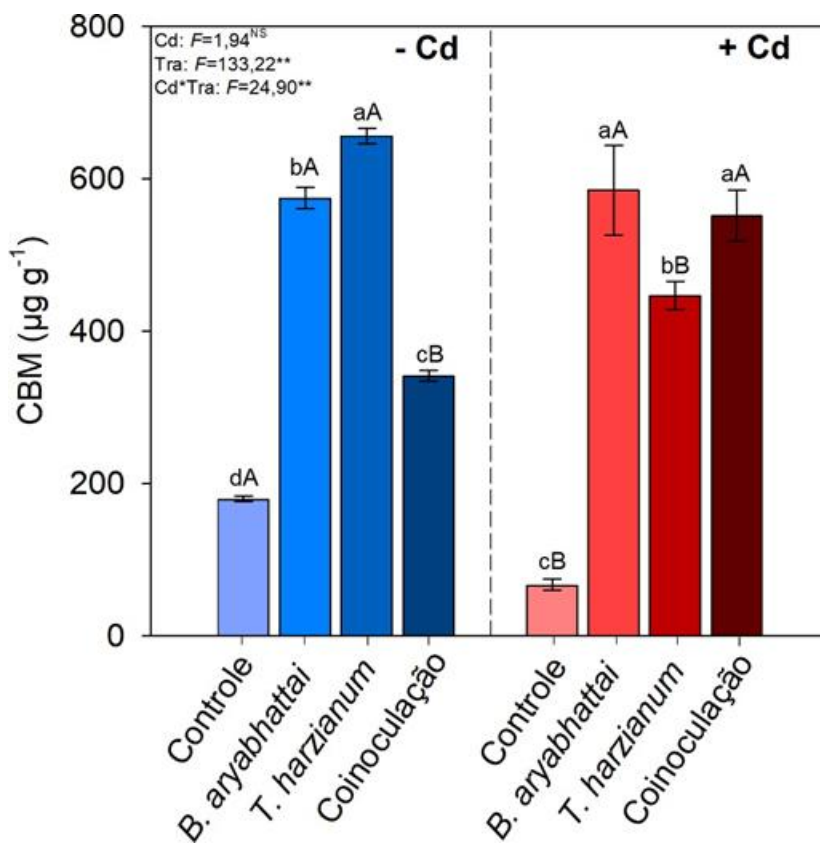


Fonte: elaborada pelo autor, 2025

### Carbono da biomassa microbiana (CBM)

O CBM variou conforme os tratamentos de inoculação e a presença ou não de Cd no solo (Figura 3). Em ambas as condições, com ou sem Cd, os maiores valores foram observados nos tratamentos inoculados. Na ausência de Cd, a CBM foi maior em *T. harzianum* e *B. aryabhatai*, seguido pela coinoculação (Figura 3). Na presença de Cd, o mesmo padrão foi mantido, com aumentos do CBM de 807%, 746% e 584% em *B. aryabhatai*, coinoculação e *T. harzianum*, respectivamente, quando comparado ao controle (Figura 4). No geral, o Cd reduziu o CBM no controle, e apenas a coinoculação apresentou valor maior na presença de Cd em comparação à ausência (Figura 4).

Figura 3- Carbono da biomassa microbiana (CBM) sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). As barras representam média  $\pm$  erro padrão.



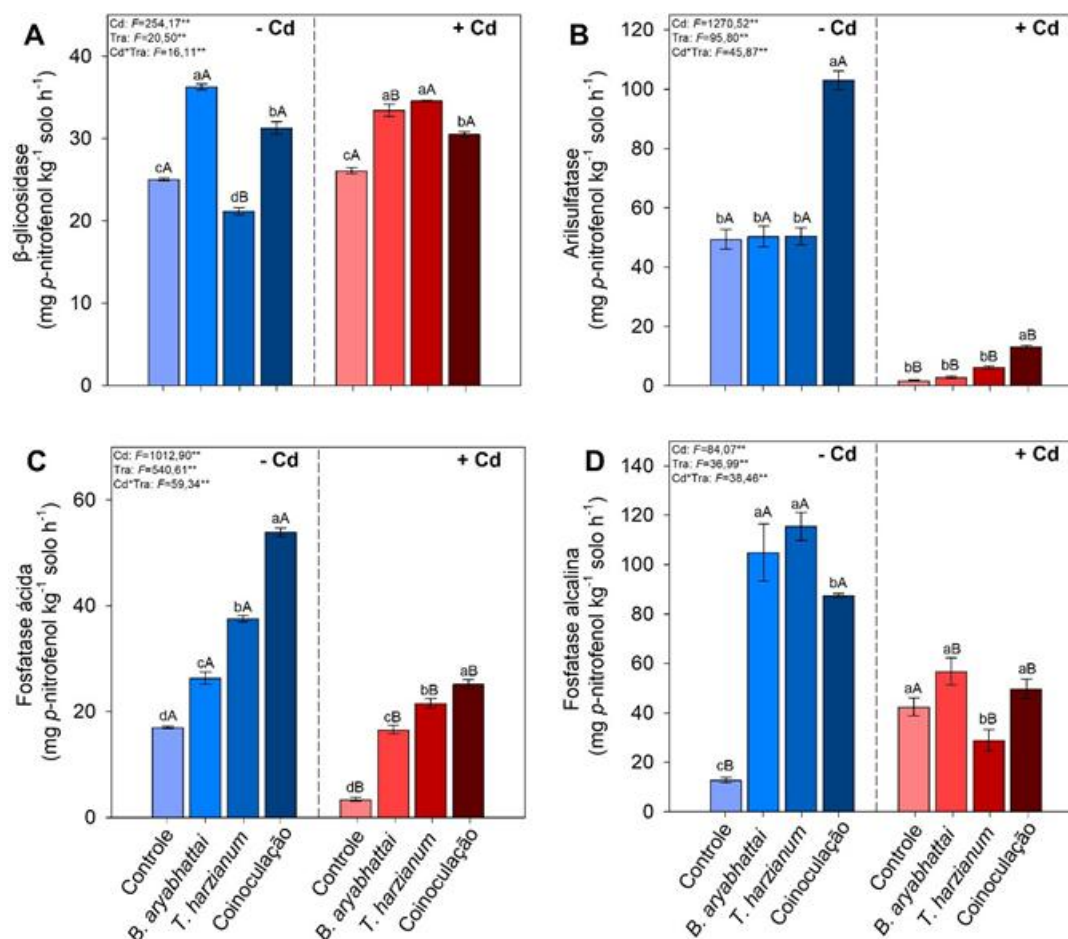
Letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos de inoculação dentro de cada condição

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

## Atividade enzimática do solo

Efeitos dos tratamentos de inoculação e da exposição ao Cd foram observados na atividade enzimática do solo (Figura 4). Na ausência de Cd, a  $\beta$ -glicosidase foi maior nos tratamentos com *B. aryabhatai* e coinoculação, enquanto a arilsulfatase foi maior apenas no tratamento com coinoculação (Figuras 4A e 4B). As fosfatases ácida e alcalina foram maiores em todos os tratamentos de inoculação, com destaque da coinoculação para a fosfatase ácida e de *B. aryabhatai* e *T. harzianum* para a fosfatase alcalina, em comparação ao controle (Figuras 4C e 4D). Na presença de Cd, os efeitos das inoculações foram mais expressivos. A  $\beta$ -glicosidase aumentou nos três tratamentos inoculados, com *T. harzianum* (31%), *B. aryabhatai* (27%) e coinoculação (15%) em comparação ao controle (Figura 4A). A arilsulfatase foi maior apenas no tratamento com coinoculação (550%) em relação ao controle (Figura 5B). A fosfatase ácida foi maior em todos os tratamentos de inoculação, com destaque para a coinoculação (733%), enquanto para a fosfatase alcalina apenas *B. aryabhatai* (36%) e coinoculação (19%) apresentaram maior atividade em comparação ao controle (Figuras 4C e 4D).

Figura 4- Atividade enzimática do solo sob inoculação microbiana em solos sem Cd (-Cd) e contaminados com Cd (+Cd). Atividades de  $\beta$ -glicosidase (A), arilsulfatase (B), fosfatase ácida (C) e fosfatase alcalina (D).



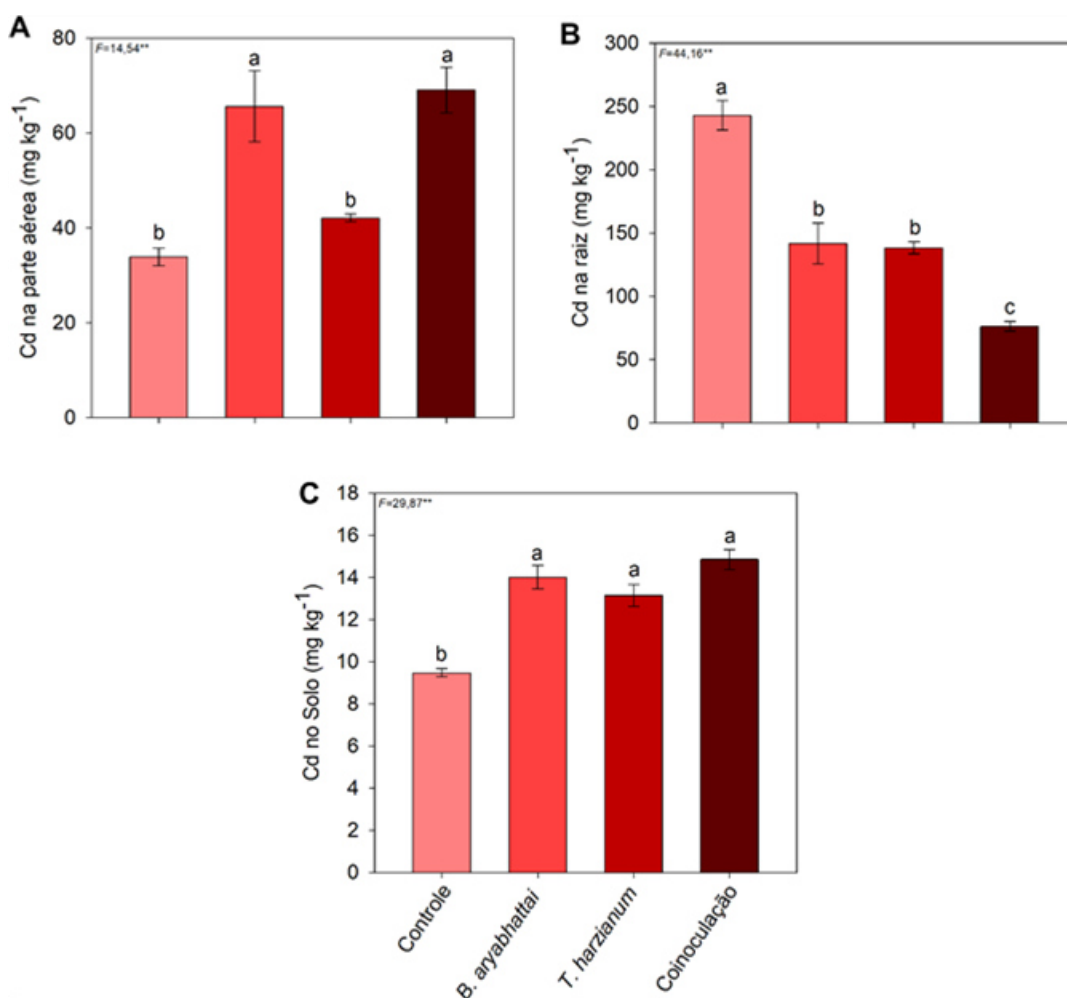
As barras representam média  $\pm$  erro padrão. Letras maiúsculas indicam diferenças entre  $-Cd$  e  $+Cd$  dentro de cada tratamento de inoculação pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025

### Cádmio no solo, raiz e parte aérea

O Cd na parte aérea foi maior nos tratamentos com *B. aryabhatai* (91%) e coinoculação (103%) em comparação ao controle (Figura 5A). Para o Cd na raiz, a maior concentração foi observada no controle, enquanto todos os tratamentos de inoculação apresentaram os menores valores, com reduções de 43% para *B. aryabhatai*, 44% para *T. harzianum* e 68% para coinoculação em relação ao controle (Figura 6B). Para o Cd no solo, verificou-se comportamento inverso, com todos os tratamentos de inoculação (*B. aryabhatai*, *T. harzianum* e coinoculação) apresentando valores superiores aos do controle.

Figura 5- Teores de cádmio na parte aérea (A), raiz (B) e solo (C) de *M. caesalpinifolia* cultivada com diferentes tratamentos de inoculação em solo contaminado com Cd.



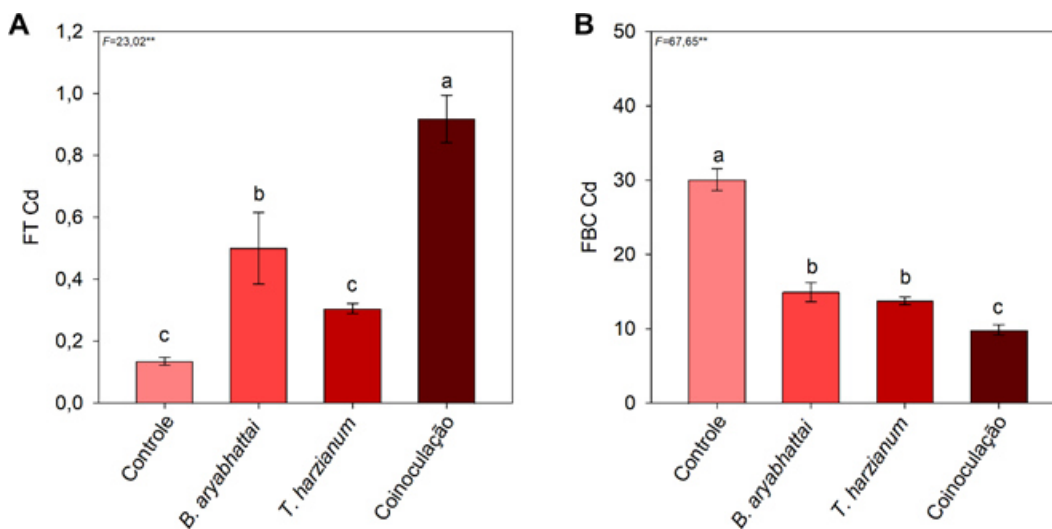
As barras representam média  $\pm$  erro padrão. Letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos de inoculação pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025.

### Fator de translocação (FTC) e Fator de bioconcentração (FBC)

A coinoculação, seguida de *B. aryabhatai*, apresentou os maiores valores de FT de Cd, com aumentos de 600% e 284%, respectivamente, quando comparados ao controle (Figura 6A). Para o FBC de Cd, ocorreu o comportamento inverso, com reduções em todos os tratamentos de inoculação, destacando-se a coinoculação, que apresentou a maior redução (66%) em relação ao controle (Figura 6B).

Figura 6- Fator de translocação de Cd (FT) (A) e fator de bioconcentração de Cd (FBC) (B) em *M. caesalpinifolia* cultivada sob diferentes tratamentos de inoculação em solo contaminado com Cd.



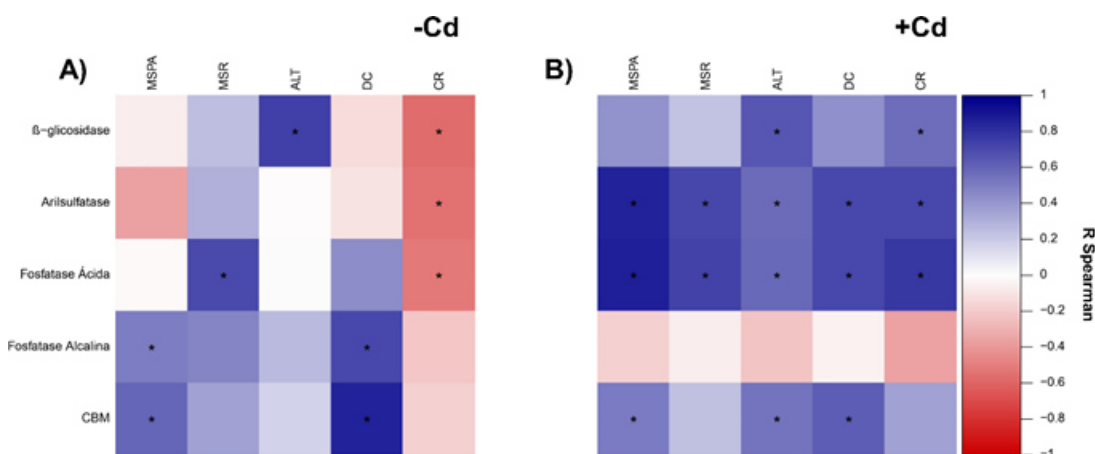
As barras representam média  $\pm$  erro padrão. Letras minúsculas indicam diferenças entre os tratamentos de inoculação pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025.

### Correlação entre atividade enzimática, CBM e parâmetros de crescimento

Na ausência de Cd, a  $\beta$ -glicosidase apresentou correlação positiva significativa com ALT e negativa com CR (Figura 7A). A arilsulfatase correlacionou-se negativamente com CR (Figura 7A). A fosfatase ácida mostrou correlação positiva com MSR e negativa com CR (Figura 7A). A fosfatase alcalina e o CBM apresentaram correlação positiva significativa com MSPA e com o DC (Figura 8A). Na presença de Cd, observaram-se apenas correlações positivas, sendo essas mais fortes entre a atividade biológica do solo e o crescimento de *M.caesalpinifolia* (Figura 7B). A  $\beta$ -glicosidase correlacionou-se positivamente com ALT e CR, enquanto a arilsulfatase e a fosfatase ácida apresentaram correlações positivas com todas as variáveis de crescimento avaliadas (MSPA, MSR, ALT, DC e CR) (Figura 7B). O CBM mostrou correlação positiva significativa com MSR, ALT e DC (Figura 7B).

Figura 2- Correlações de Spearman entre atributos biológicos do solo e parâmetros de crescimento de *M. caesalpinifolia* em solo sem Cd (-Cd) (A) e com Cd (+Cd) (B).



As cores representam os coeficientes de correlação de Spearman (R), indicando relações (azul) e negativas (vermelho). Asteriscos (\*) indicam correlações

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2025.

## DISCUSSÕES

### Parâmetros de crescimento

Os resultados demonstram que a resposta de *M. caesalpinifolia* à inoculação microbiana é significativamente modulada pela presença de cádmio, com maior expressão sob estresse. Em condições sem Cd, *B. aryabhatai* e *T. harzianum* promoveram aumentos em MSR, altura e diâmetro do caule, indicando ativação de processos associados à disponibilização de nutrientes, síntese de fitormônios e modulação fisiológica do crescimento. Esses efeitos são consistentes com a literatura, que atribui a

*B. aryabhatai* a capacidade de estimular rotas hormonais e metabólicas (Baruah et al., 2024) e a *T. harzianum* a habilidade de solubilizar micronutrientes e liberar sideróforos, ampliando a absorção mineral (Ali et al., 2022). A redução do comprimento radicular em alguns tratamentos sugere um ajuste alométrico típico de plantas sob maior eficiência nutricional proporcionada pelos microrganismos.

Sob exposição ao Cd, o controle exibiu forte inibição do crescimento, refletindo os efeitos tóxicos do metal sobre fisiologia, integridade celular e metabolismo oxidativo. Entretanto, todos os tratamentos inoculados mitigaram substancialmente esses impactos. O desempenho superior de *T. harzianum* na MSPA e MSR indica sua reconhecida capacidade de imobilizar ou transformar íons metálicos, reduzir a biodisponibilidade de Cd e melhorar a absorção de nutrientes, mecanismos amplamente descritos para o gênero (Song et al., 2024). Já *B. aryabhatai* parece ter atuado regulando o sistema antioxidante e a homeostase iônica, contribuindo para a manutenção da biomassa aérea mesmo sob toxicidade (Siddika et al., 2024).

A coinoculação apresentou os maiores ganhos em crescimento, sugerindo sinergia entre mecanismos bacterianos e fúngicos — integração entre promoção hormonal, modulação antioxidante, solubilização de nutrientes e redução da disponibilidade de Cd na rizosfera. Esse padrão converge com estudos que demonstram maior eficiência de consórcios microbianos na tolerância a metais pesados (Santoyo et al., 2021).

Em conjunto, os achados evidenciam o elevado potencial de *B. aryabhatai* e *T. harzianum*, isolados ou combinados, para aumentar a tolerância de espécies nativas ao Cd, reforçando seu uso em estratégias de fitorremediação e na recuperação ecológica de áreas contaminadas (Wang et al., 2024).

## **Padrão morfológico e severidade dos sintomas de toxidez por Cd**

A exposição de *M. caesalpiniiifolia* ao Cd promoveu alterações morfológicas evidentes, refletindo a sensibilidade da espécie ao metal e o papel modulador da inoculação microbiana (Pirsarandib et al, 2022). Em condições sem contaminação (-Cd), as plantas inoculadas apresentaram crescimento mais vigoroso e coloração uniforme, indicando que a inoculação favoreceu o desenvolvimento mesmo na ausência de estresse (Balestrini et.al., 2021). No entanto, sob contaminação (+Cd), houve redução significativa do crescimento, sobretudo no tratamento controle, confirmando o efeito tóxico do metal (Chen et al., 2021).

A severidade dos sintomas reforça essa diferenciação, enquanto o controle (+Cd) exibiu clorose intensa, encarquilhamento foliar e necrose, as plantas inoculadas mostraram danos visivelmente menores, mantendo maior integridade estrutural. Esses resultados sugerem que a inoculação atenuou os efeitos do Cd, possivelmente por favorecer mecanismos fisiológicos relacionados à tolerância ao estresse, como maior estabilidade dos tecidos ou modulação da absorção do metal (El Rasafi et al., 2022). No conjunto, o padrão morfológico observado evidencia que o Cd compromete fortemente o desenvolvimento da espécie, mas que a inoculação microbiana pode reduzir a severidade da toxidez e sustentar melhor desempenho das plantas sob estresse.

## **Carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática**

A elevação do carbono da biomassa microbiana nos solos inoculados indica que os microrganismos introduzidos foram capazes de estruturar comunidades mais ativas e funcionais, mesmo diante da presença de Cd (Ma et al., 2022). Esse comportamento sugere que tanto *B. aryabhatai* quanto *T. harzianum* possuem mecanismos de tolerância ao metal como produção de exopolímeros, imobilização intracelular ou estratégias antioxidantes que reduzem os efeitos citotóxicos sobre as células microbianas (Pal et al., 2022). Quando combinados, esses mecanismos tendem a atuar de forma complementar, o que explicaria a maior estabilidade da biomassa microbiana observada na coinoculação (Burlakoti et., 2024).

A dinâmica enzimática reforça esse padrão de resiliência. O estímulo às enzimas associadas à ciclagem do carbono, enxofre e fósforo indica que a comunidade microbiana inoculada não apenas resistiu ao estresse imposto pelo Cd, mas manteve a capacidade de catalisar processos fundamentais do metabolismo do solo (Zhang et al., 2024). Essa manutenção da atividade funcional sob condições adversas sugere que os microrganismos introduzidos contribuem para amortecer a supressão metabólica normalmente causada por metais pesados (Abd Elnabi et al., 2023). A resposta mais expressiva na coinoculação aponta

para possíveis interações cooperativas, seja pela maior diversidade metabólica, maior capacidade de ocupação de nichos ou pela atenuação conjunta da toxicidade via diferentes rotas de tolerância (Wu et al., 2023).

De forma integrada, o aumento do CBM e a intensificação da atividade enzimática indicam que a inoculação microbiana promove um ambiente edáfico mais funcional, reduzindo a perda de qualidade biológica causada pelo Cd (Cui et al., 2023). Esses resultados reforçam o papel das inoculações — especialmente quando combinadas — como estratégias promissoras para restaurar a atividade microbiana e manter a ciclagem de nutrientes em solos contaminados por metais pesados (Hu et al., 2024).

### **Dinâmica do cádmio no solo e na planta**

A distribuição do cádmio entre solo, raiz e parte aérea evidencia que a inoculação microbiana modulou fortemente a absorção e translocação do metal (You et al., 2023). A redução do Cd nas raízes das plantas inoculadas indica que *B. aryabhatai* e *T. harzianum*, isoladamente ou em consórcio, atuaram na limitação da absorção radicular, provavelmente por mecanismos de imobilização no solo, complexação de íons ou formação de barreiras radiculares (Taghavi Ghasemkheili et al., 2022). Esse efeito contribui para reduzir o estresse citotóxico direto nas células radiculares, preservando a função fisiológica da raiz.

A maior presença de Cd na parte aérea, especialmente na coinoculação, sugere que os microrganismos também promoveram translocação seletiva, aumentando o transporte do metal das raízes para a parte aérea. Esse padrão é consistente com a ideia de que a coinoculação pode favorecer mecanismos de sequestro ou compartimentalização do metal em tecidos menos sensíveis, reduzindo danos metabólicos críticos (Ma et al., 2016). A análise do fator de translocação reforça essa interpretação, enquanto a redução do fator de bioconcentração evidencia que os microrganismos diminuíram a absorção relativa de Cd pelo sistema radicular, concentrando o metal de forma controlada (Shi et al., 2024).

De forma integrada, esses resultados sugerem que a inoculação microbiana atua tanto na barreira de absorção quanto na redistribuição do metal dentro da planta, mitigando efeitos tóxicos no sistema radicular e permitindo que a parte aérea desempenhe funções fisiológicas essenciais (Niu et al., 2021). Essa capacidade de modular a dinâmica do Cd reforça o potencial da coinoculação como estratégia de manejo biológico em solos contaminados, com implicações para fitorremediação e manutenção da produtividade de espécies nativas em ambientes impactados por metais pesados (Feng et al., 2024).

### **Correlação entre atividade enzimática, CBM e parâmetros de crescimento**

A análise de correlação de Spearman revelou que a presença de cádmio reconfigurou as interações entre a atividade microbiana e o crescimento de *M. caesalpinifolia*, evidenciando que o estresse metálico altera as relações planta-microrganismo (Chen et al., 2024). Outro fator, é que o crescimento da parte aérea está intimamente relacionado à saúde e à biomassa da comunidade microbiana, em concordância com estudos que apontam o microbioma do solo como mediador do vigor vegetal em condições não estressantes (Nadarajah et al., 2021).

Sob presença de Cd, os parâmetros de crescimento foram mais acentuados nos tratamentos com inoculação de *B. aryabhatai* e coinoculação, enquanto o controle apresentou maior acúmulo de Cd na raiz (Zeng et al., 2024). Isso indica que os microrganismos testados podem ter contribuído para limitar a translocação de Cd para tecidos vegetais e reduzir a toxicidade, possivelmente via promoção de crescimento e aumento da disponibilidade de nutrientes (Khanna et al., 2022). Além disso, a atividade enzimática dos microrganismos aumentou significativamente, com exceção da fosfatase alcalina, sugerindo que tanto a bactéria quanto o fungo intensificaram processos de ciclagem de nutrientes e manutenção da funcionalidade do solo (Wang et al., 2024).

Esses resultados reforçam que a inoculação com bioinoculantes pode mitigar os efeitos adversos de metais pesados, promovendo maior atividade microbiana, manutenção da qualidade do solo e melhor desenvolvimento vegetal (Song et al., 2024). O aumento da solubilização de fósforo e outros nutrientes essenciais pode ter sido determinante para que *M. caesalpinifolia* mantivesse seu crescimento mesmo sob estresse por Cd, evidenciando o papel sinérgico de microrganismos na tolerância a contaminantes (Maia et al., 2023).

## CONCLUSÕES

A utilização de microrganismos promotores de crescimento vegetal, especificamente *Bacillus aryabhattai* e *Trichoderma harzianum*, demonstrou elevada eficiência na mitigação da toxicidade do cádmio (Cd) em *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá). A coinoculação promoveu ganhos expressivos nos parâmetros de crescimento, favorecendo tanto o desenvolvimento da parte aérea quanto a arquitetura radicular, mesmo sob condições de estresse por Cd. Além disso, esse consórcio microbiano contribuiu para a estabilização do metal no sistema solo-planta, reduzindo seu acúmulo nas raízes e intensificando sua translocação para a parte aérea, conforme evidenciado pelo aumento significativo do Fator de Translocação. No solo, a coinoculação também manteve a qualidade biológica, refletida nos maiores teores de carbono da biomassa microbiana e nas atividades enzimáticas. Assim, conclui-se que a interação sinérgica entre *M. caesalpinifolia*, *B. aryabhattai* e *T. harzianum* constitui uma estratégia robusta para fitorremediação, atuando simultaneamente na promoção de biomassa vegetal, na modulação da absorção e redistribuição de Cd e na manutenção da funcionalidade biológica do solo.

## REFERÊNCIAS

ABD ELNABI, Manar K.; EL-KALAMY, Osama A.; EL-SAYED, Hoda A.; EL-NAGGAR, Mehrez E. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: a review. **Toxics**, v. 11, n. 7, p. 580, 2023.

AKTARUZZAMAN, M.; ZAKIR, H. M.; QUADIR, Q. F.; RASHID, M. H.; MALLICK, Supti; BISWAS, P.; NAYEEM, S. M. M. R. Toxic heavy metals content in different agrochemicals available in markets of Bangladesh and their loads to the agricultural lands. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 11, p. 1053, 2024.

ALTAF, Mohammad; AL-OTHMAN, Manal R.; ALHARBI, S. A.; EHSAN, Muhammad; ABDELWAHAB, Ahmed M.; HUSSAIN, Shahzad; ALKHALIFAH, Khaled H.; YOUSUF, Abuzar. A inoculação de *Trichoderma* alivia a toxicidade induzida por Cd e Pb e melhora o crescimento e a fisiologia de *Vigna radiata* (L.). **ACS Omega**, v. 9, n. 7, p. 8557–8573, 2024.

ALTOMARE, Cosima; NORVELL, W. Albert; BJÖRKMAN, Thomas; HARMAN, Gary E. Solubilização de fosfatos e micronutrientes pelo fungo promotor de crescimento vegetal e de biocontrole *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 65, n. 7, p. 2926–2933, 1999.

ÁLVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo Moraes; SPAROVEK, Gerd. Mapa de Classificação Climática de Köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BABU, A. Giridhar; JAYANTHI, S.; SHEEJA, M.; BALAMURUGAN, K.; TAMILARASAN, K.; KAMALA-KANNAN, S. *Trichoderma virens* PDR-28: a heavy metal-tolerant and plant growth-promoting fungus for remediation and bioenergy crop production on mine tailing soil. **Journal of Environmental Management**, v. 132, p. 129–134, 2014.

BALESTRINI, Raffaella; BRUNETTI, Cecilia; CHITARRINI, Giulia; PIERACCINI, Giuseppe. Strategies to modulate specialized metabolism in Mediterranean crops: From molecular aspects to field. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 6, p. 2887, 2021.

BURLAKOTI, Saroj; CHHEM, Raksmei; ROEM, Sreyov; CHOUN, Sreyneang. Beneficial plant–microbe interactions and stress tolerance in maize. **Applied Microbiology**, v. 4, n. 3, p. 1000–1015, 2024.

CAI, Feng; CHEN, Wujun; CHEN, Jie; YU, Fenlan; GUO, Siyi; RONG, Weimin; WENG, Qifang; LIU, Xiliang. Colonização da cepa SQR-T037 de *Trichoderma harzianum* em raízes de tomate e sua relação com o crescimento da planta, disponibilidade de nutrientes e microflora do solo. **Plant and Soil**, v. 388, n. 1, p. 337–350, 2015.

CHARKIEWICZ, Agnieszka Ewa; OMELJANIUK, Witold J.; ORYWAL, Kinga; CZYGIER, Marek; SZMITKOWSKI, Maciej; MROCZKO, Barbara; MASLACH, Dariusz; SZPAK, Adam. Concentração de elementos selecionados e potencial antioxidante em um grupo de homens que trabalham na indústria metalúrgica. **American Journal of Men's Health**, v. 13, n. 4, p. 1–10, 2019.

CHARKIEWICZ, Agnieszka Ewa; OMEJANIUK, Witold Jerzy; ORYWAL, Kinga; CZYGIER, Marek; SZMITKOWSKI, Maciej; MROCZKO, Barbara; MASLACH, Dariusz; SZPAK, Artur. Cadmium and its toxic effects in humans. **Molecules**, v. 28, n. 18, p. 6620, 2023.

CHEN, Lin; HU, Wei-Feng; LONG, Chang-Lin; WANG, Dan. Exogenous plant growth regulator alleviate the adverse effects of U and Cd stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and improve the efficacy of U and Cd remediation. **Chemosphere**, v. 262, p. 127809, 2021.

CHEN, Zhao-Jin; WANG, Jie; ZHANG, Yan; LIU, Xin. Plant growth-promoting bacteria influence microbial community composition and metabolic function to enhance the efficiency of hybrid pennisetum remediation in cadmium-contaminated soil. **Microorganisms**, v. 12, n. 5, p. 870, 2024.

CUI, Xiaoyan; CAO, Xinde; XUE, Wenjing; XU, Li; CUI, Zhaojie; ZHAO, Renxin; NI, Shou-Qing. Integrative effects of microbial inoculation and amendments on improved crop safety in industrial soils co-contaminated with organic and inorganic pollutants. **Science of The Total Environment**, v. 873, p. 162202, 2023.

EL RASAFI, Taoufik; OUKARROUM, Abdallah; HADDIOUI, Amina; SONG, Hong; QIAN, Yi; KWON, Eilhann E.; BOLAN, Nanthi S.; RINKLEBE, Jörg. Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 5, p. 675–726, 2022.

FENG, Huiping; WANG, J.; LIU, X. Effective soil remediation with fungal Co-inoculation and king grass for robust cadmium and chromium phytoextraction. **Environmental Pollution**, v. 362, p. 124979, 2024.

FENG, MengFei; XU, Qiang; LIU, Yuan; ZHANG, XiaoFei; FAN, HaiJuan. Análises fisiológicas e do transcriptoma de sementes imaturas de arroz transgênico FGF21.

**Russian Journal of Plant Physiology**, v. 67, n. 2, p. 360–368, 2020.

FIorentino, Nunzio; Fagnano, Massimo; Adamo, Paola; Izacchino, Roberto; Liguori, Giampiero; Mele, Giulio; Modesto, Marcello; Zaccardeli, Marilena. Assisted phytoextraction of heavy metals: compost and *Trichoderma* effects on giant reed (*Arundo donax* L.) uptake and soil N-cycle microflora. **Italian Journal of Agronomy**, v. 8, n. 4, p. 244–254, 2013.

GARG, Neera; SINGLA, Priyanka. Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms. **Environmental Chemistry Letters**, v. 9, n. 3, p. 303–321, 2011.

GOYAL, Priyanka; BELAPURKAR, Pankaj; KAR, Ambar. Uma revisão sobre o potencial de biorremediação in vitro e in vivo de espécies ambientais e probióticas de *Bacillus* e outros microrganismos probióticos para dois metais pesados, cádmio e níquel. **Bioscience Biotechnology Research Asia**, v. 16, n. 1, p. 101–107, 2019.

HE, Z.; SHENTU, J.; YANG, X.; BALIGAR, V. C.; ZHANG, T.; STOFFELLA, P. J. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators, and assessment. **Journal of Environmental Indicators**, v. 9, p. 17–18, 2015.

HLADUN, Kristen R.; PARKER, David R.; TRUMBLE, John T. Cadmium, copper, and lead accumulation and bioconcentration in the vegetative and reproductive organs of *Raphanus sativus*: implications for plant performance and pollination. **Journal of Chemical Ecology**, v. 41, n. 4, p. 386–395, 2015.

HU, Cheng; ZHANG, Y.; LIU, X. Unlocking soil revival: The role of sulfate-reducing bacteria in mitigating heavy metal contamination. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 46, n. 10, p. 417, 2024.

HU, Yannan; CHEN, Jin; LIU, Ling; CHEN, Guorong. O papel dos fungos micorrízicos arbusculares na tolerância à seca em culturas de leguminosas: uma revisão. **Legume Research-An International Journal**, v. 45, n. 1, p. 1–9, 2022.

HU, Yue; CHENG, Hefa; TAO, Shu. Os desafios e soluções para o arroz contaminado com cádmio na China: uma revisão crítica. **Environment International**, v. 92–93, p. 53–64, 2016.

HUANG, Yutian; LI, Yangyang; XIONG, Chen; ZHANG, Chunlin; HUANG, Biao; LI, Qingsheng; WANG, Jihong. Exceptional anti-toxic growth of water spinach in arsenic and cadmium co-contaminated soil remediated using biochar loaded with *Bacillus aryabhattai*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 469, p. 133966, 2024.

IMOTO, Yukari; YASUTAKA, Tetsuo. Comparison of the impacts of the experimental parameters and soil properties on the prediction of the soil sorption of Cd and Pb. **Geoderma**, v. 376, p. 114538, 2020.

JABEEN, Zahra; NOREEN, Saadia; HASSAN, Muhammad Jamil; RAFAQAT, Safila; REHMAN, Abdul; AKHTER, Huma; ALI, Farhad; IQBAL, Muhammad Sajid. Alleviation of cadmium stress in rice by inoculation of *Bacillus cereus*. **PeerJ**, v. 10, p. e13131, 2022.

JOHN, Edwin. **The Elements**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1991.

JOHRI, Nidhi; JACQUILLET, Gilles; UNWIN, Richard. Heavy metal poisoning: the effects of cadmium on the kidney. **Biometals**, v. 23, n. 5, p. 783–792, 2010.

JOMOVA, Klaudia; HUPKA, Jozef; MICHALIK, Jozef; MAKOVICKY, Peter. Heavy metals: toxicity and human health effects. **Archives of Toxicology**, v. 99, n. 1, p. 153–209, 2025.

KACPRZAK, Marcin J.; ROSIKON, Karolina; FIJALKOWSKI, Karol; GROBELAK, Anna. The effect of *Trichoderma* on heavy metal mobility and uptake by *Miscanthus giganteus*, *Salix* sp., *Phalaris arundinacea*, and *Panicum virgatum*. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2014, p. 1–8, 2014.

KHANNA, Kanika; JAMWAL, V.; GANDHI, S. Unsnarling plausible role of plant growth-promoting rhizobacteria for mitigating Cd-toxicity from plants: an environmental safety aspect. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, n. 6, p. 2514–2542, 2022.

LIANG, Bixia; ZHU, Hong; LI, Xiaoyuan; MA, Xiangrong; LIU, Ling; LIU, Jianbo; WANG, Peng; LI, Guangxu; LIU, Yong. Isolamento e caracterização de cepas de *Bacillus cereus* resistentes a cádmio provenientes de áreas de mineração contaminadas com Cd para potenciais aplicações de biorremediação. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, p. 1550830, 2025.

LIU, Yun-Meng; LIU, De-Yong; ZHANG, Wei; CHEN, Xiang-Xin; ZHAO, Qun-Ying; CHEN, Xing-Ping; ZOU, Chun-Qin. Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers. **Environmental Pollution**, v. 257, p. 113581, 2020.

LUO, Lu; LI, Jun; LI, Hui; YUE, Xiaojuan; WANG, Tingting; WANG, Yuzhen. Heavy metal contaminations in herbal medicines: Determination, comprehensive risk assessments, and solutions. **Frontiers in Pharmacology**, v. 11, p. 595335, 2021.

MA, Wenyan; LIU, Y.; ZHANG, Y. In-situ immobilization remediation, soil aggregate

distribution, and microbial community composition in weakly alkaline Cd-contaminated soils: A field study. **Environmental Pollution**, v. 292, p. 118327, 2022.

MA, Ying; OLIVEIRA, R. S.; FREITAS, H.; ZHANG, C. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 918, 2016.

MAIA, Ericka Paloma Viana; MARTINS, C. M.; SOUSA, C. S.; SILVA, A. J. Co-inoculation of rhizobium and arbuscular mycorrhiza increases *Mimosa caesalpiniaefolia* growth in soil degraded by manganese mining. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 5, p. 289, 2023.

MILJAKOVIC, Dragana; MARINKOVIC, Jelena; BALEŠEVIC-TUBIC, Svetlana. The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. **Microorganisms**, v. 8, n. 7, p. 1037, 2020.

MOHAMED, Ibrahim; AHAMADOU, Bakary; LI, Min; GONG, Congqin; CAI, Ping; LIANG, Wei; HUANG, Qiaoyun. Fracionamento de cobre e cádmio e sua ligação com matéria orgânica do solo em solo contaminado e adubado com materiais orgânicos. **Journal of Soils and Sediments**, v. 10, n. 6, p. 973–982, 2010.

MOTA, Paula Junqueira; BARBOSA, Flávio; CÂMARA, Volney de M.; CASTRO, Herling G.; FIGUEIREDO, Denise de M.; JÁCOME, Camila T. A.; KATAOKA, Maria Silvia; PINHEIRO, Maria Cláudia N.; POLACCHINI, Cíntia R. Prevalência dos níveis de metais acima dos valores de referência em município atingido pelo rompimento de barragem de rejeitos da mineração: Projeto Saúde Brumadinho. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 25, p. e220014, 2022.

MUSCOLO, Adele; BOLOGNA, Maria Antonietta; GIOFFRÈ, Gabriele; MAURO, Loredana; PLACANICA, Giuseppina; PROCHILO, Gabriele; FERRARA, Rosaria. Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. **Ecological Indicators**, v. 45, p. 416–423, 2014.

NADARAJAH, Kalaivani; ABDUL RAHMAN, Nur Sabrina Natasha. Plant-microbe interaction: aboveground to belowground, from the good to the bad. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 19, p. 10388, 2021.

NIU, Xiao-yun; WU, F.; ZHANG, Z. Inoculation with indigenous rhizosphere microbes enhances aboveground accumulation of lead in *Salix integra* Thunb. by improving transport coefficients. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 686812, 2021.

PAL, Anindita; BHATTACHARJEE, Shuvendu; SAHA, J.; SARKAR, M.; MANDAL,

P. Bacterial survival strategies and responses under heavy metal stress: a comprehensive overview. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 48, n. 3, p. 327–355, 2022.

PÉREZ CHACA, M. V.; HERRERA, J. L.; LÓPEZ, C. L.; ARNAO, M. B.; ZAYAS, L. B.; SERRANO, R. G. Effects of cadmium stress on growth, anatomy and hormone contents in *Glycine max* (L.) Merr. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 10, p. 2815–2826, 2014.

PIRSARANDIB, Yaghoub; SEPEHR, Ebrahim; BARIN, Mohsen; RAHIMI, Asghar; ZARDARI, Saeid. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals via arbuscular mycorrhiza (*Funneliformis mosseae*) inoculation ameliorates the growth responses and essential oil content in lavender (*Lavandula angustifolia* L.). **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1221, 2022.

RAHMAN, Zularif; SINGH, Vivek P. Biorremediação de locais contaminados por metais pesados tóxicos (THMs): conceitos, aplicações e desafios. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 27563–27581, 2020.

SANKHLA, Manish S.; KUMAWAT, Manisha; SHARMA, Kundan; SINGH, Vijay K. Heavy metals contamination in water and its effects on human health: a review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 5, n. 10, p. 759–766, 2016.

SARDAR, Rehana; AHMED, Shakil; YASIN, Nasim Ahmad. Titanium dioxide nanoparticles mitigate cadmium toxicity in *Coriandrum sativum* L. through modulating antioxidant system, stress markers and reducing cadmium uptake. **Environmental Pollution**, v. 292, p. 118373, 2022.

SAXENA, Anil K.; KUMAR, Manish; CHAKDAR, Harsha; ANUROOPA, N.; BAGYARAJ, Dennis J. *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 6, p. 1583–1594, 2020.

SELEIMAN, Mahmoud F.; SANTANEN, Arja; MÄKELÄ, Pirjo S. A. Recycling sludge on cropland as fertilizer—Advantages and risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104647, 2020.

SENEVIRATNE, Mihiri; CHALMERS, David; SINGH, Sarita P.; CHEN, Longbin; GOULD, Rebecca M.; COLLINS, Richard N. A preliminary study of the role of bacterial–fungal co-inoculation on heavy metal phytotoxicity in serpentine soil. **Australian Journal of Botany**, v. 63, n. 4, p. 261–268, 2015.

SHAN, Xiangyu; HE, Xin; LI, Yanhua; CHEN, Yunfeng; YE, Shaoyi; ZHANG,

Xiaorong; FAN, Deju; MA, Ling. Cadmium accumulation and translocation in maize cultivars on contaminated soils in southern China. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 589, 2025.

SHI, Ben; LIU, X.; WANG, J. Factors influencing cadmium accumulation in plants after inoculation with rhizobacteria: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 916, p. 170277, 2024.

SINGH, Naveen K.; SINGH, Rajeev P. Potential of plants and microbes for the removal of metals: Eco-friendly approach for remediation of soil and water. In: **Plant Metal Interaction**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 469–482.

SONG, Yu Qing; SHAHIR, Shafinaz; ABD MANAN, Fazilah. Bacterial inoculant-assisted phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: inoculant development and the inoculation effects. **Biologia**, v. 76, n. 9, p. 2675–2685, 2021.

STERCKEMAN, Thibault; THOMINE, Sebastien. Mechanisms of cadmium accumulation in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 39, n. 4, p. 322–359, 2020.

SUN, Hai; ZHANG, Yuanyuan; SUN, Honghong; CHEN, Xiufang; SUN, Xiaodong; JIN, Yuntao; WU, Jingping; SHEN, Bing. Effects of cadmium contamination on bacterial and fungal communities in Panax ginseng-growing soil. **BMC Microbiology**, v. 22, n. 1, p. 77, 2022.

SUN, Yan-Mei; HORNG, Chi-Yuan; CHANG, Fu-Ling; HUANG, Chiung-Chih; CHUNG, Yi-Jen; FAN, Chien-Hsing. Biosorption of lead, mercury, and cadmium ions by *Aspergillus terreus* immobilized in a natural matrix. **Polish Journal of Microbiology**, v. 59, n. 1, p. 37–44, 2010.

TAGHAVI GHASEMKHEILI, Fatemeh; MAFTOUN, Mostafa R.; RAHIMIAN, Mohammad H.; RAHMANI, Hossein A.; AHMADZADEH, Mohammad; HOSSEINI, Seyed M. Ameliorative effects of *Trichoderma harzianum* and rhizosphere soil microbes on cadmium biosorption of barley (*Hordeum vulgare* L.) in Cd-polluted soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 527–539, 2022.

WANG, Lei; ZHANG, Y.; LIU, X. Long-term organic fertilization reshapes the communities of bacteria and fungi and enhances the activities of C-and P-cycling enzymes in calcareous alluvial soil. **Applied Soil Ecology**, v. 194, p. 105204, 2024.

WANG, Peng; LUO, Chunling; XU, Qiaoying; GENG, Jing; XU, Shengbo; KONG, Zhaofang; LI, Yong; WANG, Yuxing. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 1038–1048,

2019.

WU, Di; ZHANG, Hanlin; LI, Feng. Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health. **Science of The Total Environment**, v. 900, p. 165801, 2023.

WU, Qing; HENDERSHOT, William H.; MARSHALL, William D.; GE, Yong. Speciation of cadmium, copper, lead, and zinc in contaminated soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 7-8, p. 1129–1144, 2000.

XIA, Wenjun; MIAO, Ruidan; LIU, Jian; WANG, Wenbin; YANG, Yanming; LIU, Fangzheng; HOU, Lingling; ZHANG, Wenbo; LI, Xiaoli; CUI, Yongxing. Mutant library resources for legume crops and the emerging new screening technologies. **Euphytica**, v. 218, n. 3, p. 27, 2022.

XU, Hongli; CHEN, Guangfeng; XU, Yiyuan; HU, Xiaofeng; CHEN, Jie; ZHANG, Yongqiang. Endophytic bacterium *Bacillus aryabhatai* induces novel transcriptomic changes to stimulate plant growth. **PLoS One**, v. 17, n. 8, p. e0272500, 2022.

YANG, Yuanyuan; CHEN, Wei; WANG, Ming; PENG, Chuansheng. Características regionais de acumulação de cádmio em vegetais: fatores de influência, modelo de transferência e indicação do teor limite do solo. **Environmental Pollution**, v. 219, p. 1036–1043, 2016.

YIN, Kai; LV, Min; WANG, Qiuhui; WU, Yingyan; LIAO, Chunsheng; ZHANG, Wei; CHEN, Li. Simultaneous bioremediation and biodetection of mercury ion through surface display of carboxylesterase E2 from *Pseudomonas aeruginosa* PA1. **Water Research**, v. 103, p. 383–390, 2016.

YOU, Meng; LIU, Jia; CHEN, P.; LI, Z. Effects of microbial agents on cadmium uptake in *Solanum nigrum* L. and rhizosphere microbial communities in cadmium-contaminated soil. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 1106254, 2023.

YUAN, Chaolei; XU, Li; ZHAO, Qianrong; JIA, Jia; ZHU, Hongwen; WANG, Jun. Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: a review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 104, p. 204–215, 2021.

YUE, Zheng-Bo; HUANG, Zhi-Yan; DAI, Yu-Jie; DENG, Jie; WANG, Xiu-Fen. Component analysis and heavy metal adsorption ability of extracellular polymeric substances (EPS) from sulfate reducing bacteria. **Bioresource Technology**, v. 194, p. 399–402, 2015.

ZENG, Rujiong; WANG, J.; LIU, X. Co-inoculation effects of *B. licheniformis* and *P. aeruginosa* on soil Cd and As availability and rice accumulation. **Journal of**

**Environmental Management**, v. 351, p. 119739, 2024.

ZHANG, Hanlin; LI, Feng; WU, Di; LI, Qi. Effect of Cd (II) shock loading on performance, microbial enzymatic activity and microbial community in a sequencing batch reactor. **Journal of Environmental Management**, v. 342, p. 118108, 20

