

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

**JULIANA ZAMBOM PIASSI**

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS  
COM ZINCO POR PLANTAS ORNAMENTAIS *Zinnia  
elegans* Jacq. E *Brassica oleracea* L. var. *acephala*  
DC.**

**São Mateus – ES**

**Abril de 2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS  
COM ZINCO POR PLANTAS ORNAMENTAIS *Zinnia  
elegans* Jacq. E *Brassica oleracea* L. var. *acephala*  
DC.**

**JULIANA ZAMBOM PIASSI**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para a obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires

**São Mateus – ES**

**Abril de 2025**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas -  
SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

P579f Piassi, Juliana Zambom, 1999-  
Fitorremediação de solos contaminados com zinco por plantas ornamentais *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. / Juliana Zambom Piassi. - 2025.  
93 f. : il.

Orientador: Fábio Ribeiro Pires.  
Coorientador: Fernando Barboza Egreja Filho.  
Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) -  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário  
Norte do Espírito Santo.

1. Manejo do Solo. 2. Fitorremediação. 3. Metais Pesados. 4.  
Zinco. 5. Plantas Ornamentais. I. Pires, Fábio Ribeiro. II.  
Egreja Filho, Fernando Barboza. III. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV.  
Título.

---

CDU: 63


JULIANA ZAMBOM PIASSI

# FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM ZINCO POR PLANTAS ORNAMENTAIS *Zinnia elegans* Jacq. E *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.


Aprovada em 22 de abril de 2025.

## COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **FABIO RIBEIRO PIRES**  
Data: 22/04/2025 16:43:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

**Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

Documento assinado digitalmente  
 **IVONEY GONTIJO**  
Data: 24/04/2025 17:01:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Ivoney Gontijo**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

Documento assinado digitalmente  
 **DOUGLAS GOMES VIANA**  
Data: 24/04/2025 19:58:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Dr. Douglas Gomes Viana**  
**Universidade de São Paulo**

## DEDICATÓRIA

À minha avó Hozana, cujo gosto por documentários e curiosidade científica me inspirou a seguir este caminho.

## AGRADECIMENTOS

À vida e a natureza, pelas oportunidades e experiências que vivi.

Aos meus pais, Eliana Zambom Piassi e Graciliano Piassi, pelo suporte, incentivo, inspiração e conselhos.

Aos meus avós Hozana e (*in memoriam*) Antônio, Aurora e Pedrinho, por todos os ensinamentos e bons momentos vividos.

Ao meu padrinho, Adalberto Piassi (*in memoriam*), que desde cedo apoiou meus estudos e sempre torceu por mim.

A minha irmã, Jordana Zambom Piassi, e minha prima, Alana Zambon Piassi, pelo incentivo, momentos de descontração, alegrias e apoio.

Ao meu namorado André Orlandi Nardotto Júnior, por ser especial e estar sempre ao meu lado nos momentos de alegria e dificuldade ao longo desses anos.

Ao professor Fábio Ribeiro Pires pela orientação, sugestões, amizade e ensinamentos.

Ao professor Fernando Barboza Egreja Filho pela coorientação, parceria, contribuição e esclarecimentos.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, em especial Antelmo Falqueto, Edilson Schimdt, Edney Leandro da Vitória, Ivoney Gontijo e Robson Bonomo pelos valiosos ensinamentos.

À equipe do laboratório de Fitotecnologia composta por Adriel, Mikaely, Rickelme, Eduardo, Tiago, Pedro e em especial, Marcelo, pela parceria, apoio e amizade.

À Thales Gomes dos Santos, Ana Carolina Lopes Francisco de Oliveira e Édlen dos Santos Bonelá, pela amizade, apoio e companheirismo durante esses anos.

Ao Francisco Ferreira pelos ensinamentos e parceria na realização das análises laboratoriais.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pela bolsa que possibilitou meu ingresso e permanência no mestrado.

À Universidade Federal do Espírito Santo - Campus São Mateus (CEUNES/UFES), e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical (PPGAT) pela oportunidade e educação pública, gratuita e de qualidade.

À todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste estudo e para minha formação como pessoa e profissional.

“A recuperação da paisagem, do meio ambiente, é um fator básico para a agricultura sadia.”

Ana Maria Primavesi

## SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULOS</b> .....	x
<b>1.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM METAIS PESADOS UTILIZANDO PLANTAS ORNAMENTAIS (2004-2024)</b> .....	xi
<b>Resumo</b> .....	xi
<b>Abstract</b> .....	xii
<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Material e Métodos</b> .....	2
<b>3. Resultados e Discussão</b> .....	5
3.1 Evolução das publicações.....	5
3.2 Contribuição e co-autoria entre países e instituições .....	6
3.3 Periódicos relevantes e artigos mais citados.....	10
3.4 Contribuição científica e citações entre autores .....	14
3.5 Nuvem e rede de conexões entre as palavras-chave.....	15
<b>4. Conclusões</b> .....	18
<b>Referências</b> .....	19
<b>1.2 FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM ZINCO POR PLANTAS ORNAMENTAIS DAS ESPÉCIES <i>Zinnia elegans</i> Jacq. E <i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.</b> .....	23
<b>Resumo</b> .....	23
<b>Abstract</b> .....	24
<b>1. Introdução</b> .....	25
<b>2. Material e Métodos</b> .....	27
2.1 Localização.....	27
2.2 Solo e caracterização .....	28
2.3 Material vegetal .....	30
2.4 Delineamento experimental, tratamentos, contaminação do solo, transplante e condução das plantas.....	31
2.5 Avaliações biométricas, fitotoxicidade e pigmentos.....	34
2.6 Quantificação de Zn na planta e no solo .....	35
2.7 Índices de fitorremediação .....	36
2.8 Análise estatística .....	37
<b>3. Resultados e Discussão</b> .....	38
3.1 Solo arenoso.....	38
3.2 Solo argiloso .....	51
<b>4. Conclusões</b> .....	65

<b>Referências</b> .....	66
<b>2. CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	75
<b>ANEXO</b> .....	76

## RESUMO

PIASSI, Juliana Zambom; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; Abril de 2025; **Fitorremediação de solos contaminados com zinco por plantas ornamentais *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.;** Orientador: Dr. Fábio Ribeiro Pires; Coorientador: Dr. Fernando Barboza Egreja Filho.

A fitorremediação é uma tecnologia sustentável e de baixo custo para a descontaminação de áreas poluídas com metais pesados, como o zinco (Zn). Embora o uso de plantas ornamentais na fitorremediação seja promissor, ainda é pouco relatado. Portanto, visando explorar o uso de plantas ornamentais na fitorremediação de Zn, este trabalho foi estruturado em duas etapas, cada uma compondo um capítulo da dissertação. Na primeira etapa investigou-se, com uma análise bibliométrica, o estado da arte da fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais. Realizou-se um levantamento quantitativo sobre o tema (2004-2024) na base de dados *Scopus* e utilizaram-se os softwares *SigmaPlot* e *VOSviewer* para criação de gráficos e mapas de conexão. Houve aumento das pesquisas sobre o tema, com 100 documentos publicados e destaque para a produção científica da China, Índia e Paquistão. *Environmental Science and Pollution Research* sobressaiu-se como o periódico mais influente e a Academia Chinesa de Ciências como principal instituição de pesquisa. Na segunda etapa, avaliou-se o desempenho de *Zinnia elegans* Jacq. (zínia) e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. (couve ornamental) em solos arenoso e argiloso contaminados com Zn. Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, um para cada tipo de solo, delineados em blocos casualizados em esquema fatorial 5x2. Os tratamentos foram compostos por quatro doses de Zn + controle (0, 50, 100, 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>), aplicado na forma de ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, e as duas espécies vegetais, com quatro repetições. Avaliaram-se atributos morfológicos, fitotoxicidade, pigmentos e Zn no solo e nas plantas. O aumento das doses de Zn afetou negativamente a produção de biomassa da parte aérea e das raízes das plantas. Ambas espécies não foram eficientes em extrair Zn dos solos. Couve ornamental apresentou maior tolerância ao estresse por Zn.

**Palavras-chave:** Manejo do solo, Zn, metal pesado, zínia, couve ornamental, remediação.

## ABSTRACT

PIASSI, Juliana Zambom; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; April 2025; **Phytoremediation of soils contaminated with zinc using ornamental plants of the species *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.**; Advisor: Dr. Fábio Ribeiro Pires; Co-advisor: Dr. Fernando Barboza Egreja Filho.

Phytoremediation is a sustainable and low-cost technology for the decontamination of areas polluted with heavy metals, such as zinc (Zn). Although the use of ornamental plants in phytoremediation is promising, it is still poorly reported. Therefore, aiming to explore the use of ornamental plants in the phytoremediation of Zn, this work was structured in two stages, each composing a chapter of the dissertation. In the first stage, a bibliometric analysis was conducted to investigate the state of the art in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals using ornamental plants. A quantitative survey on the topic (2004-2024) was performed using the Scopus database, and the software SigmaPlot and VOSviewer were employed to create graphs and connection maps. The results revealed an increase in research on this subject, with 100 documents published, highlighting scientific contributions from China, India, and Pakistan. Environmental Science and Pollution Research stood out as the most influential journal, and the Chinese Academy of Sciences emerged as the leading research institution. In the second stage, the performance of *Zinnia elegans* Jacq. (zinnia) and *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. (ornamental kale) was evaluated in sandy and clay soils contaminated with Zn. Two greenhouse experiments were conducted, one for each soil type, using a randomized block design in a 5x2 factorial scheme. Treatments consisted of four Zn doses plus a control (0, 50, 100, 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>), applied as ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, and two plant species, with four replications. Morphological attributes, phytotoxicity, pigments, and Zn in the soil and plants were evaluated. The increase in Zn doses negatively affected the production of shoot and root biomass in the plants. Both species were not efficient in extracting Zn from the soils. Ornamental kale showed greater tolerance to Zn stress.

**Keywords:** Soil management, Zn, heavy metal, zinnia, ornamental kale, remediation.

## 1. CAPÍTULOS

## 1.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM METAIS PESADOS UTILIZANDO PLANTAS ORNAMENTAIS (2004-2024)

### Resumo

A contaminação do solo por metais pesados representa um desafio ambiental e de saúde pública. Nesse contexto, a fitorremediação, inclusive com o uso de plantas ornamentais, emerge como uma tecnologia sustentável capaz de mitigar a poluição por esses contaminantes. Uma análise abrangente da literatura científica é essencial para sintetizar o conhecimento existente e fornecer diretrizes para futuras pesquisas. Assim, foi realizada uma revisão bibliométrica com o objetivo de explorar o uso de plantas ornamentais na fitorremediação de solos contaminados com metais pesados, apresentando uma análise detalhada da literatura disponível, para visualizar e mapear o desenvolvimento científico nesta área. Utilizou-se a base de dados *Scopus* e foram empregados os termos "fitorremediação", "metais pesados", "solo", "plantas ornamentais" e seus sinônimos para a pesquisa, que posteriormente foi analisada com os softwares *SigmaPlot* e *VOSviewer* para a criação de gráficos e mapas de conexão. A análise identificou 100 documentos publicados sobre o tema nos últimos 20 anos. O periódico *Environmental Science and Pollution Research* destacou-se como o mais influente na área, enquanto a China liderou em número de publicações, com a Academia Chinesa de Ciências sendo a principal contribuinte, seguida de Índia e Paquistão. Esses achados ressaltam a importância da fitorremediação como uma estratégia viável para enfrentar a contaminação do solo por metais pesados, além de evidenciar a necessidade de mais pesquisas que integrem o uso de plantas ornamentais nesse cenário.

**Palavras-chave:** Bibliometria, poluição do solo, plantas acumuladoras, remediação do solo, *VOSviewer*.

## **BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS USING ORNAMENTAL PLANTS (2004- 2024)**

### **Abstract**

Soil contamination with heavy metals represents an environmental and public health challenge. Phytoremediation (including the use of ornamental plants) is emerging as a sustainable technology capable of mitigating the pollution caused by these contaminants. A comprehensive analysis of the scientific literature is essential to synthesize existing knowledge and provide guidelines for future research. Therefore, a bibliometric review was conducted to evaluate the use of ornamental plants in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. Accordingly, the paper presents a detailed analysis of the available literature to visualize and map scientific development in this area. The Scopus database was used, and the terms “phytoremediation”, “heavy metals”, “soil”, “ornamental plants” and their synonyms were utilized for the research. These were then analyzed using the SigmaPlot and VOSviewer software to create graphs and connection maps. Our analysis identified 100 documents published on this subject over the past 20 years. The journal *Environmental Science and Pollution Research* was identified as the most influential in this area. Meanwhile, China ranked first in terms of the number of publications (with the Chinese Academy of Sciences being the main contributor), followed by India and Pakistan. These observations emphasize the importance of phytoremediation as a viable strategy for addressing soil contamination with heavy metals, as well as the need for further research that integrates the use of ornamental plants in this scenario.

**Keywords:** Bibliometrics, soil pollution, accumulator plants, soil remediation, VOSviewer

## 1. Introdução

Em meio à rápida industrialização e urbanização global, a poluição por metais pesados tem se tornado um tema de crescente relevância (TANG et al., 2024). A contaminação do solo por metais pesados, como cromo (Cr), arsênio (As), níquel (Ni), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), zinco (Zn) e cobre (Cu), representa um grande desafio ambiental e de saúde pública, pois afeta a qualidade do solo, a saúde humana e a produtividade das culturas (ANGON et al., 2024; RABHA; DHANEESH, 2024; SARMA et al., 2024).

A fitorremediação se destaca como um método promissor, econômico e sustentável para mitigar os efeitos adversos da contaminação por metais pesados, em que as plantas atuam estabilizando, transformando, acumulando ou degradando poluentes em seus tecidos (DENG et al., 2024; KUMAR et al., 2024; LAVANYA; VISWANATH; SIVAPULLAIAH, 2024).

Considerando os benefícios do uso de plantas para descontaminação ou mitigação da poluição por metais pesados no solo, a fitorremediação tem sido objeto de intensos estudos. Nesse contexto, plantas ornamentais são candidatas interessantes a estudos de fitorremediação devido à sua capacidade de tolerância e acumulação de contaminantes, crescimento rápido, aliada ao apelo estético e potencial econômico (KHAN et al., 2021; ROCHA et al., 2022; SWETHA et al., 2023).

A análise bibliométrica é um método que pode ser empregado para avaliar e compreender o progresso e o impacto da pesquisa científica ao longo do tempo, permitindo que pesquisadores e instituições detectem tendências, padrões de colaboração e entidades influentes (ÍRI; ÜNAL, 2024). Embora tenham sido realizados diversos estudos, incluindo análises bibliométricas com abordagem global sobre a remediação de solos contaminados e suas tecnologias (GAO; FAHEEM; YU, 2022; MAO et al., 2018; VALDIVIEZO GONZALES et al., 2023), fitorremediação da poluição por metais pesados (LI; JI; LUO, 2019; YANG et al., 2022) e de solos contaminados por elementos potencialmente tóxicos e metais pesados (ZHANG et al., 2024, ZHANG et al., 2022), fitorremediação da contaminação com mercúrio e cádmio (MOSQUERA CHAVERRA et al., 2024; ZHAO; LEI; GU, 2022), análise da literatura científica sobre nutrientes (PAN et al., 2021) e metais pesados em solos urbanos (TANG et al., 2024), e fitorremediação de terras agrícolas (WANG et al., 2024; XIAO et al., 2021) e de rejeitos (KEITH et al., 2024; PUTRA et al., 2025), esses trabalhos frequentemente se

concentram em aspectos como técnicas de remediação, poluentes e fontes de contaminação, distribuição ambiental, ou formas de análise mais amplas e extensas da literatura. No entanto, são escassos estudos que compilam métricas científicas sobre o uso de plantas ornamentais para a fitorremediação de solos contaminados com metais pesados.

Portanto, o objetivo desta revisão é explorar o uso de plantas ornamentais em estudos de fitorremediação de solos contaminados com metais pesados, no período de 2004 a 2024, por meio de uma análise bibliométrica da literatura científica, abordando as palavras-chave, métricas das publicações por ano, país, periódico, instituição e autor. Tais informações contribuirão para o avanço do conhecimento científico, identificação de tendências/lacunas e o fomento de pesquisas relacionadas a tecnologias sustentáveis.

## **2. Material e Métodos**

A base de dados *Scopus* foi escolhida para a realização da pesquisa, devido à sua ampla e abrangente cobertura de conteúdo científico (PRANCKUTÉ, 2021). Além disso, a ferramenta “*Analyzer Results*”, o analisador de busca da *Scopus*, fornece acesso rápido a dados bibliométricos, ao possibilitar a visualização de informações de forma gráfica e permite ainda identificar tendências, periódicos e autores relevantes (HILTON, 2024). Dessa forma, a *Scopus* se caracteriza como uma ótima ferramenta para análise bibliométrica em vários campos de pesquisa, inclusive nas ciências ambientais e agrárias.

Definiram-se termos de pesquisa relacionados ao estudo da fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais, sendo os termos principais “*phytoremediation*”, “*soil*”, “*heavy metal*” e “*ornamental plants*”. O dicionário de sinônimos *Thesaurus* foi consultado para verificar sinônimos e termos afins. Os termos foram dispostos de acordo com a ordem dos operadores booleanos “*AND*” e “*OR*”, para ampliar e direcionar a pesquisa. A busca foi realizada nos títulos dos artigos, nos resumos e nas palavras-chave e limitou-se aos registros de publicações de 2004 a 2024. Foram selecionados apenas artigos, revisões e publicações em conferências científicas, conforme as opções “*Limited to Article, Review, Conference paper e Conference review*”.

Ajustadas as configurações, inseriu-se o código de pesquisa conforme critérios apresentados na tabela 1.

**Tabela 1.** Critérios de busca e seleção de documentos na base de dados Scopus.

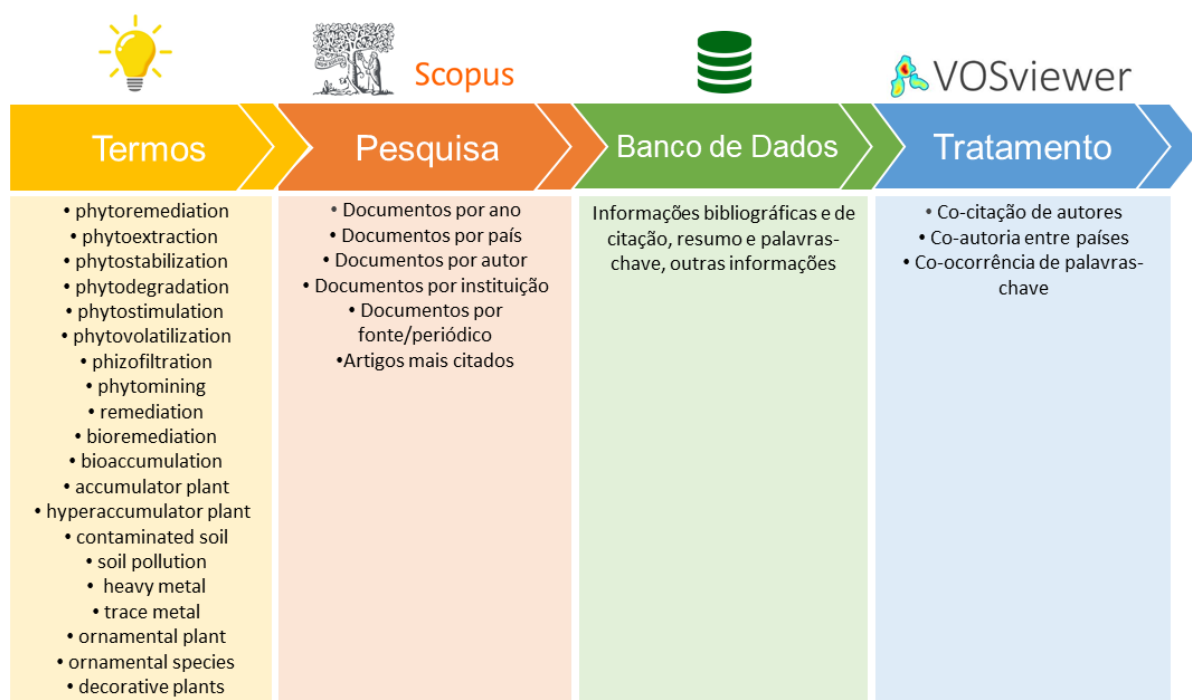
<b>Critérios</b>	<b>Detalhes</b>
Termos	<i>(TITLE-ABS-KEY (phytoremediation) OR TITLE-ABS-KEY (phytoextraction) OR TITLE-ABS-KEY (phytostabilization) OR TITLE-ABS-KEY (phytodegradation) OR TITLE-ABS-KEY (phytostimulation) OR TITLE-ABS-KEY (phytovolatilization) OR TITLE-ABS-KEY ("hyperaccumulator plant*") OR TITLE-ABS-KEY (phytoaccumulation) OR TITLE-ABS-KEY(phytoavailability) OR TITLE-ABS-KEY ("accumulat* plant*") OR TITLE-ABS-KEY (bioremediation) OR TITLE-ABS-KEY (remediation) OR TITLE-ABS-KEY (phytomining) OR TITLE-ABS-KEY (bioaccumulation) AND TITLE-ABS-KEY (soil) OR TITLE-ABS-KEY ("contaminat* soil") OR TITLE-ABS-KEY ("soil polut*") AND TITLE-ABS-KEY ("heavy metal*") OR TITLE-ABS-KEY ("trace metal") OR TITLE-ABS-KEY ("trace element") OR TITLE-ABS-KEY ("inorganic contaminant*") AND TITLE-ABS-KEY ("ornamental* plant*") OR TITLE-ABS-KEY ("ornamental* specie*") OR TITLE-ABS-KEY ("decorative plant*"))</i>
Idiomas	<i>English, Chinese, Spanish</i>
Tipo de documentos	<i>Article, Review, Conference paper, Conference review</i>
Período	<i>2004 – 2024</i>
Base de dados	<i>Scopus</i>

\*Asterisco (\*) é um caractere curinga que indica qualquer grupo de caracteres, incluindo flexões de número e gênero.

Com base nos fundamentos da pesquisa bibliométrica, adotou-se uma sequência lógica composta pelas etapas de obtenção, extração, organização, visualização e análise dos dados gerados. Essa sequência foi aplicada à pesquisa realizada na base *Scopus*, resultando em 100 documentos, os quais foram submetidos a processamento por análise das métricas dos dados na própria base *Scopus*, através da opção "*Analyze results*". A partir dos resultados das métricas de número de publicações, autores, periódicos, países e instituições fornecidos pela *Scopus*, foram produzidos gráficos com o auxílio do programa *SigmaPlot* versão 12.0 (SYSTAT SOFTWARE INC., 2011).

O conjunto de dados obtido na base *Scopus* foi exportado em *.csv* e carregado no *software* livre *VOSviewer* versão 1.6.19 (<https://www.vosviewer.com/>), utilizado para mapear as conexões entre os dados bibliográficos (VAN ECK; WALTMAN, 2010). O *VOSviewer* é uma ferramenta de *software* desenvolvida por Nees Jan Van Eck e Ludo Waltman da Universidade de Leiden, lançada em 2010, que se destaca por sua interface intuitiva e capacidade de gerar visualizações que facilitam a análise da literatura científica (ARRUDA et al., 2022). O mesmo conjunto de dados foi carregado na plataforma *Smart Bibliometrics*, uma plataforma de mapeamento científico e análise bibliométrica, para produção da nuvem de palavras-chave (PESSIN; YAMANE; SIMAN, 2022).

A sequência metodológica detalhada utilizada na análise bibliométrica para observação das redes de contribuição foi a seguinte: análise de co-autoria entre países, co-citação entre autores e co-ocorrência de palavras-chave. A Figura 1 ilustra a metodologia proposta, destacando os termos utilizados para a consulta na base de dados *Scopus*, a filtragem da pesquisa, a constituição do banco de dados, os gráficos elaborados a partir das métricas fornecidas e os tipos de conexões entre os dados bibliográficos gerados por meio do *software VOSviewer*.



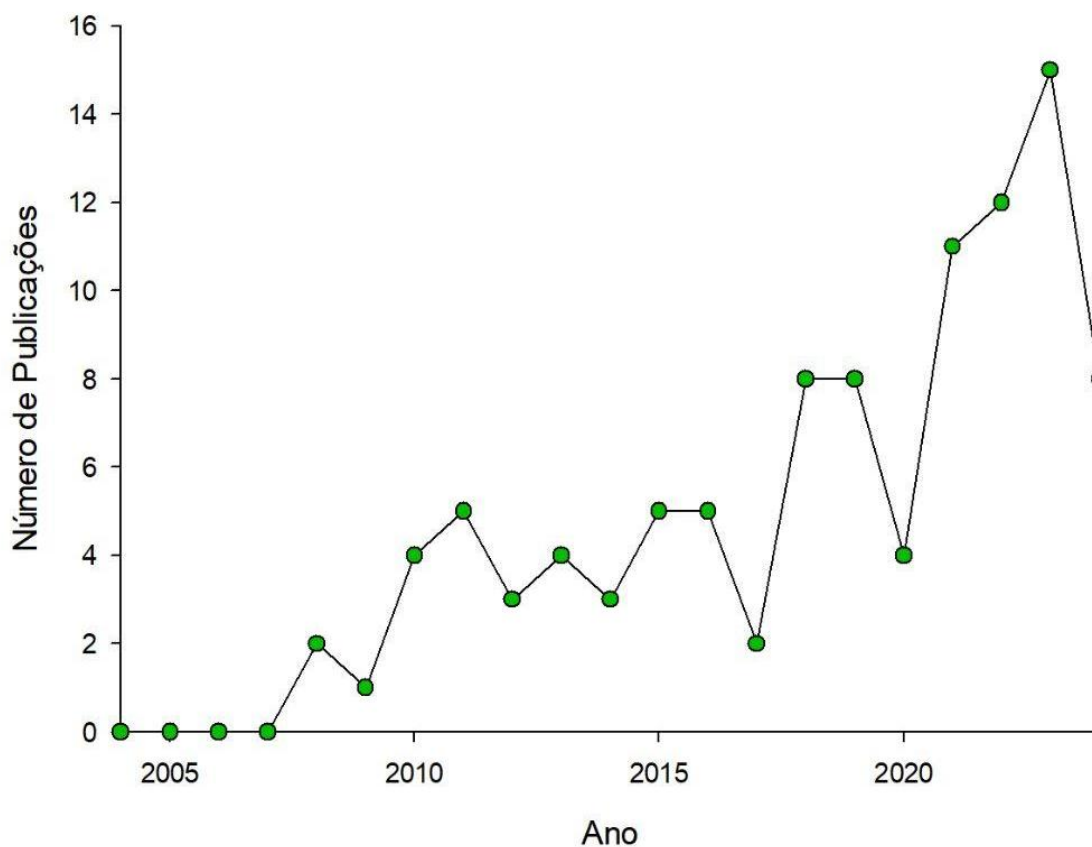
**Figura 1.** Fluxograma da metodologia utilizada, retratando a escolha dos termos, pesquisa na base de dados, montagem do banco de dados e tratamento dos dados.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Evolução das publicações

A pesquisa na base de dados *Scopus* resultou em 104 documentos, que após filtragem por tipo foram reduzidos a 100 documentos. A média de publicações no período estudado foi de 4,76 documentos por ano, com um desvio padrão de 4,22, o que demonstra considerável variabilidade na publicação de documentos ao longo dos anos. Os documentos foram filtrados como artigo, revisão e publicações em conferências científicas (*Limited to Article, Review, Conference paper e Conference review*), sendo 86 artigos, nove revisões e cinco publicações em conferências científicas, que abordam sobre algum aspecto da fitorremediação de metais pesados utilizando plantas ornamentais no período de 2004 a 2024.

A busca por tecnologias verdes e sustentáveis tem impulsionado as pesquisas, como evidenciado pela tendência geral de aumento das publicações indexadas na *Scopus* (Figura 2), principalmente entre os anos de 2021 e 2023.



**Figura 2.** Evolução de publicações ao longo dos anos, de 2004 a 2024.

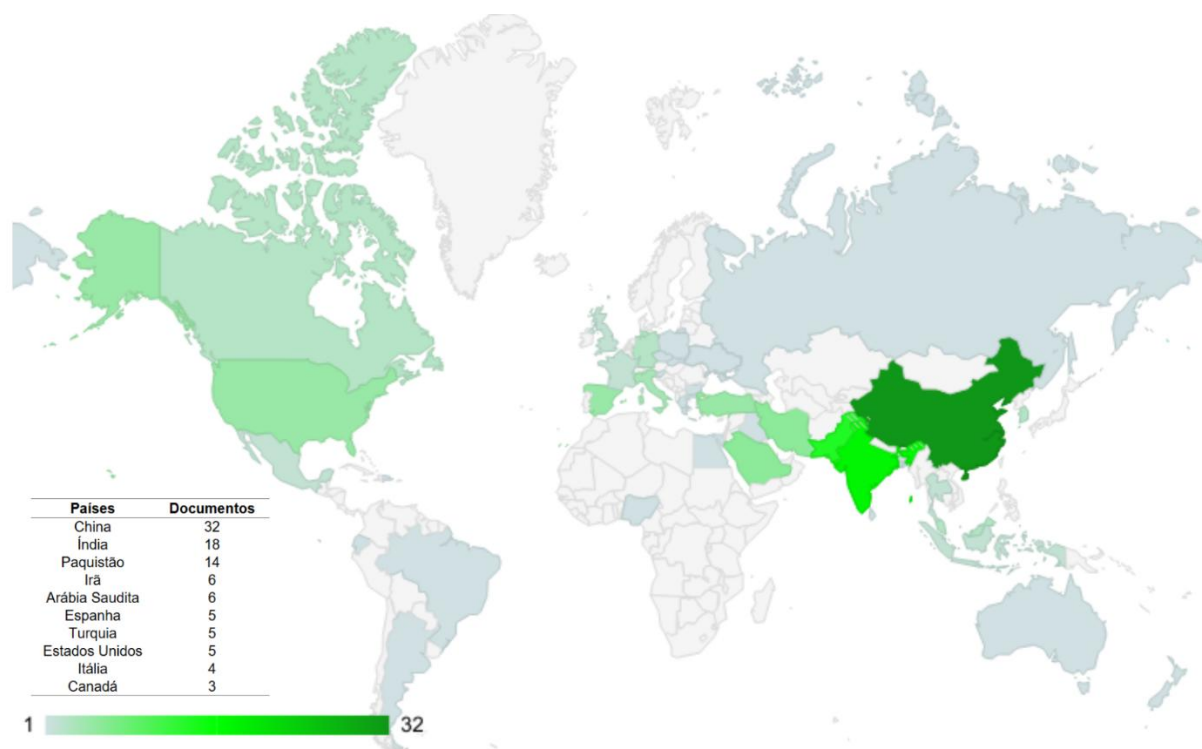
Em 2023 foram publicados 15 documentos, a maior concentração de publicações por ano, o que pode estar relacionado à maior conscientização sobre a necessidade de soluções para a poluição por metais pesados. Em 2024, no entanto, nota-se uma redução do número de publicações, o que não reflete necessariamente diminuição de interesse no tema, mas pode sinalizar mudanças importantes no foco da pesquisa, envolvendo questões mais complexas, ou períodos de transição.

O ano de 2020 foi um período marcado pela pandemia do COVID-19, onde estudos foram interrompidos e o número de publicações apresentou uma redução, com apenas 4 documentos publicados. Uma redução de 50% do número de publicações de 2019, que apresentou a mesma quantidade de publicações de 2018. Essa queda na produção científica pode ter impactado o desenvolvimento de estratégias eficazes para a remediação e aumentado a urgência em retomar os estudos, o que gerou um aumento nas publicações nos anos seguintes.

A conscientização acerca da contaminação do solo com metais pesados demanda a implementação de estratégias eficazes de remediação por meio dos avanços em pesquisa, visando à proteção da saúde pública e à manutenção do equilíbrio ecológico (GAO; FAHEEM; YU, 2022). Portanto, ainda há necessidade de intensificar os esforços na pesquisa sobre poluição do solo e fitorremediação, visando o desenvolvimento de soluções sustentáveis que respondam aos desafios ambientais emergentes.

### 3.2 Contribuição e co-autoria entre países e instituições

Os principais países com produção de conhecimento científico a respeito da fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais são China, Índia e Paquistão (Figura 3).



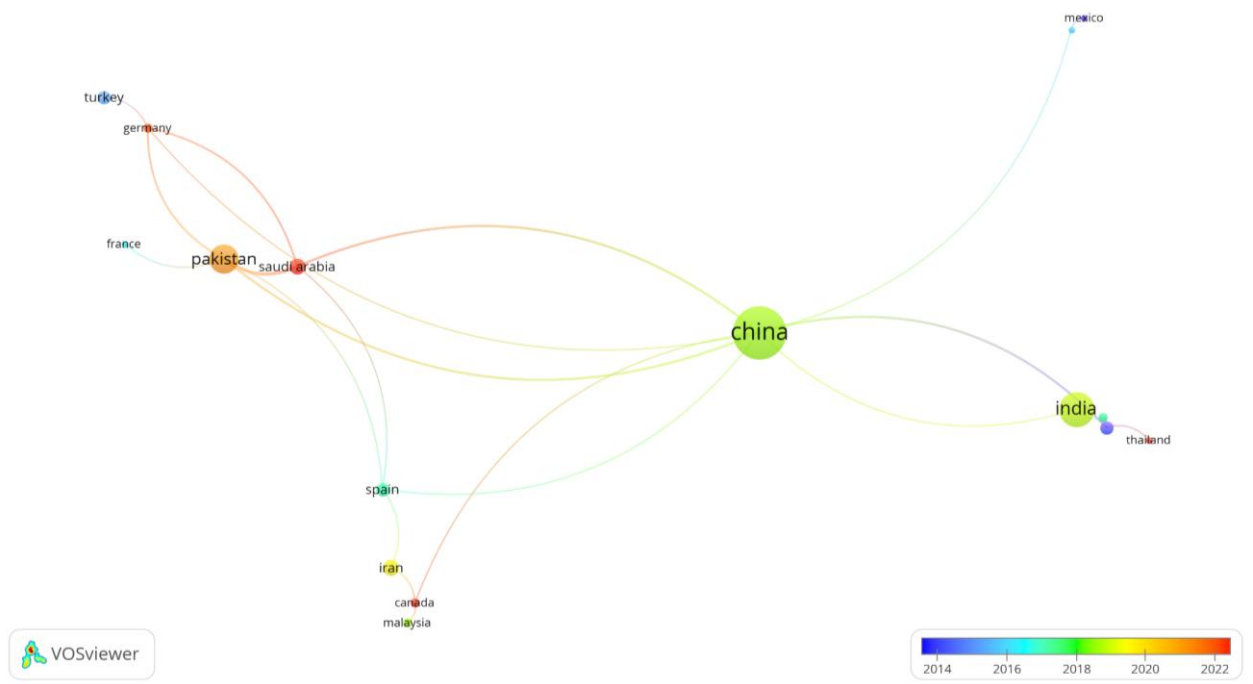
**Figura 3.** Documentos científicos, por país, sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais, presentes na base de dados *Scopus* em um período de 20 anos.

O maior número de documentos foi registrado pela China, com 32 publicações, seguida pela Índia com 18 documentos e Paquistão com 14 documentos. Os três países representam 64% das publicações entre 2004 e 2024. Irã e Arábia Saudita também se destacam, com a publicação de 6 documentos cada, representando 12% das publicações.

Esses dados refletem um esforço concentrado em países asiáticos, sugerindo que a pesquisa sobre fitorremediação e contaminação ambiental está ganhando importância na agenda científica dessas nações. Propensão semelhante foi encontrada por Zhang et al. (2022), que analisaram as tendências globais da pesquisa em fitorremediação de elementos tóxicos no solo e identificaram China, Índia, Estados Unidos e Paquistão como os países que mais publicaram. Yang et al. (2022), analisando pontos críticos e perspectivas futuras sobre fitorremediação de metais pesados em publicações indexadas na base *Web of Science*, identificaram a mesma tendência, em que China, Índia, Espanha, Itália e Paquistão contribuíram com 34% dos 1.123 artigos analisados. Por fim, Zhang et al. (2024) que revisaram o progresso da pesquisa sobre fitorremediação de metais pesados em solos da coleção da *Web*

of Science com o software CiteSpace também identificaram China, Índia e Paquistão como os maiores contribuintes da área.

A rede de co-autoria (Figura 4) apresenta as conexões e intercâmbios científicos entre países, baseada nas relações interconectadas entre autores e suas publicações colaborativas (ARIEL XU; CHANG, 2020).



**Figura 4.** Rede de co-autoria entre países (2004-2024), em estudos de fitorremediação de metais pesados no solo utilizando plantas ornamentais, com número máximo de países por documento igual a 25 e número mínimo de documentos por país igual a 2.

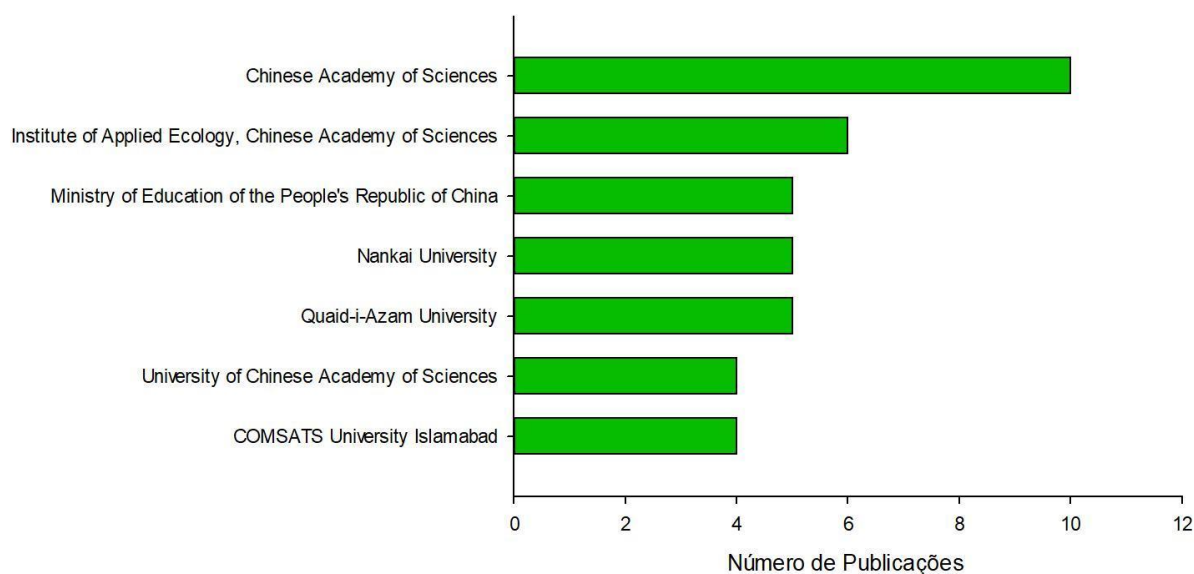
A China se destaca como o principal país, com o maior *cluster* e mais conexões, indicando que lidera em volume de publicações e colaborações. As conexões são com o Reino Unido, Estados Unidos, Índia, Espanha, Paquistão, Arábia Saudita, Canadá e Alemanha, evidenciando a extensa e diversificada rede de colaboração dos pesquisadores chineses.

O Paquistão também apresenta destaque de colaboração, com conexões com a China, Arábia Saudita, Alemanha, França e Espanha. Já a Índia, segundo maior em número de publicações, tem conexão direta apenas com a China e a Coreia do Sul. Países como Turquia, México, Tailândia, França e Malásia apresentam menor destaque, sugerindo contribuições mais pontuais e menor rede de colaboração.

A rede de colaboração internacional é influenciada por múltiplos e complexos

fatores, incluindo aspectos científicos, econômicos, geopolíticos e culturais (HOU; PAN; ZHU, 2021). Essa dinâmica ressalta a importância das colaborações internacionais na promoção do avanço científico e na troca de conhecimentos entre nações.

Diante da necessidade de globalização do conhecimento científico e valorização da abordagem multidisciplinar, é de suma importância identificar os principais polos de avanço nos estudos de fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais. Dentre as principais instituições que desenvolvem pesquisa sobre fitorremediação de metais pesados utilizando plantas ornamentais, 5 são chinesas e 2 paquistanesas (Figura 5).



**Figura 5.** Principais instituições colaborativas na geração de conhecimento em fitorremediação de metais pesados com plantas ornamentais.

A *Chinese Academy of Sciences* (Beijing, China) lidera, com 10 documentos publicados sobre o tema. Outras instituições chinesas relevantes são o *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences* (Liaoning, China), *Ministry of Education of the People's Republic of China* (Beijing, China), *Nankai University* (Tianjin, China) e *University of Chinese Academy of Sciences* (Beijing, China), com 6, 5, 5 e 4 documentos publicados, respectivamente. Gao, Faheem e Yu (2022) no estudo que emprega abordagens bibliométricas para avaliar um conjunto de dados de 6.648 artigos indexados na *Web of Science* (2001 a 2020) sobre remediação de solos contaminados também identificaram a Academia Chinesa de Ciências como a

instituição mais produtiva e a China como país líder em número de publicações.

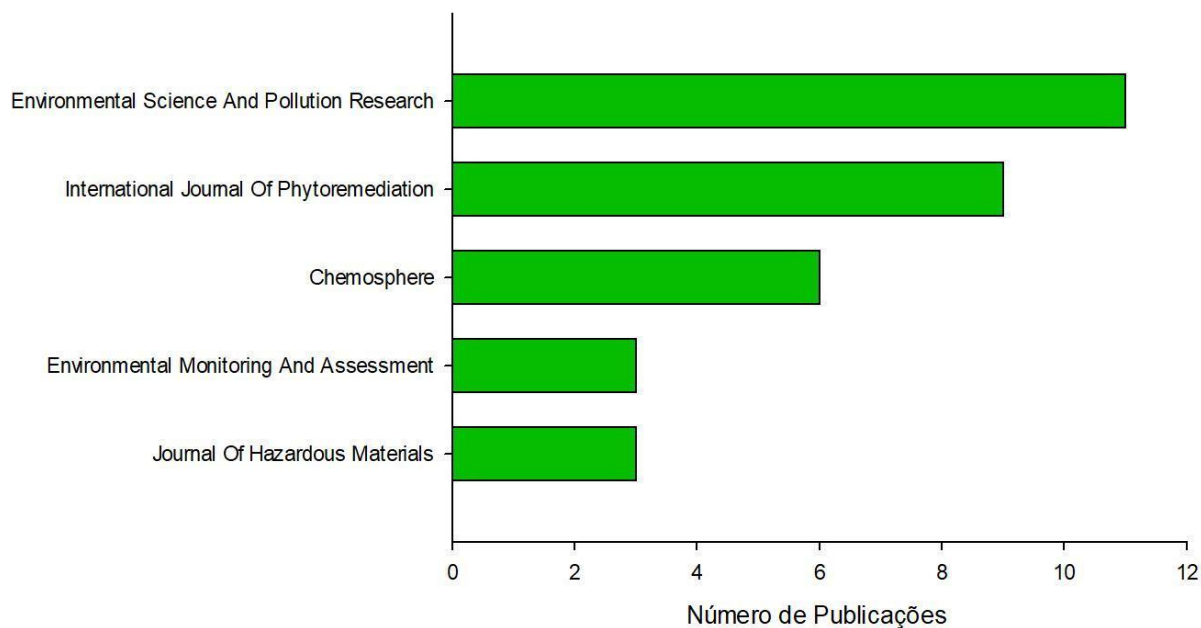
Das sete instituições com maior número de publicações sobre o tema, as instituições chinesas detêm 76,92% das publicações. Esses dados destacam o papel da China como o principal país a desenvolver pesquisas sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais.

No Paquistão, as instituições que se destacam na pesquisa sobre o tema são a *Quaid-i-Azam University* e a *COMSATS University Islamabad*, ambas localizadas em Islamabad, com 5 e 4 documentos publicados, respectivamente, o que representa 23,08% do número de publicações das sete instituições principais.

### 3.3 Periódicos relevantes e artigos mais citados

Identificar periódicos relevantes para a publicação na área da Ciência do Solo é fundamental para pesquisadores que buscam divulgar suas descobertas de maneira eficaz. A escolha do periódico pode ter um impacto significativo na visibilidade e na repercussão do trabalho, tornando essencial a seleção de periódicos adequados com base nos fatores de impacto, importância histórica e escopo dos tópicos de pesquisa (SUN; YUAN, 2023).

O periódico *Environmental Science and Pollution Research*, da editora *Springer Nature*, com *CiteScore* de 8.7 (2023), lidera com 11 publicações, seguido por *International Journal of Phytoremediation*, da editora *Taylor & Francis*, *CiteScore* 7.6 (2023), com 9 documentos publicados, e *Chemosphere*, da editora *Elsevier*, *CiteScore* 15.8 (2023), com 6 artigos publicados (Figura 6).



**Figura 6.** Top 5 periódicos com maior número de publicações sobre o tema no período de 2004 a 2024.

Destacam-se também os periódicos *Environmental Monitoring and Assessment*, da editora *Springer Nature*, com *CiteScore* de 4.7 (2023), e *Journal of Hazardous Materials*, da editora *Elsevier*, *CiteScore* 25.4, com 3 documentos cada. Juntos, os cinco periódicos com maior número de publicações, detêm 32% do total de documentos publicados sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais. Os periódicos citados são destacadamente relevantes e especializados em áreas ambientais, indicando que o tema tem caráter interdisciplinar e é amplamente explorado nas Ciências Ambientais.

Os artigos mais citados foram publicados nos periódicos *Journal of Hazardous Materials*, *Environmental Science and Pollution Research* e *Chemosphere*.

O artigo mais citado envolvendo plantas ornamentais na fitorremediação de metais pesados em solos contaminados foi “Fitorremediação de solos co-contaminados com benzo[a]pireno (B[a]P) e metais pesados usando a planta ornamental *Tagetes patula*”, de pesquisadores chineses do Ministério da Agricultura e da Universidade de Nankai, que apresentou 199 citações (Tabela 2). O estudo investigou o potencial do cravo-francês para fitorremediação de solos co-contaminados com os metais pesados Cd, Cu, Pb e benzo[a]pireno, e identificou que a planta pode ser útil para a fitorremediação de locais contaminados com benzo[a]pireno e benzo[a]pireno associado a Cd, pois exibiu características de

hiperacumulador (SUN et al., 2011).

**Tabela 2.** Artigos mais citados sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados usando plantas ornamentais na base de dados Scopus.

Título	Autores	Periódico	Ano	Citações
<i>Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene (B[a]P) and heavy metals using ornamental plant <u>Tagetes patula</u></i>	Sun, Y., Zhou, Q., Xu, Y., Wang, L., Liang, X.	<i>Journal of Hazardous Materials</i> , 186 (2-3), pp. 2075 – 2082	2011	199
<i>Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies</i>	Asgari Lajayer, B., Khadem Moghadam, N., Maghsoodi, M.R., Ghorbanpour, M., Kariman, K.	<i>Environmental Science and Pollution Research</i> , 26 (9), pp. 8468 –8484	2019	163
<i>Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics</i>	Liu, J.-n., Zhou, Q.-x., Sun, T., Ma, L.Q., Wang, S.	<i>Journal of Hazardous Materials</i> , 151 (1), pp. 261–267	2008	146
<i>In situ phytoremediation of dyes from textile wastewater using garden ornamental plants, effect on soil quality and plant growth</i>	Chandanshive, V. V., Kadam, S. K., Khandare, R. V., Kurade, M. B., Jeon, B. H., Jadhav, J. P., Govindwar, S. P.	<i>Chemosphere</i> , 210, pp. 968 –976	2018	142
<i>Combining phytoextraction and biochar addition improves soil biochemical properties in a soil contaminated with Cd</i>	Lu, H., Li, Z., Fu, S., Méndez, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J.	<i>Chemosphere</i> , 119, pp. 209 –216	2015	138
<i>Ornamental plants for the phytoremediation of heavy metals: Present knowledge and future perspectives</i>	Khan, A. H. A., Kiyani, A., Mirza, C. R., Butt, T. A., Barros, R., Ali, B., Iqbal, M., Yousaf, S.	<i>Environmental Research</i> , 195, 110780	2021	105

Phytoremediation of contaminated soils using ornamental plants	Liu, J., Xin, X., Zhou, Q.	<i>Environmental Reviews</i> , 26(1), pp. 43–54	2018	85
Expression of an Arabidopsis Ca <sup>2+</sup> /H <sup>+</sup> antiporter CAX1 variant in petunia enhances cadmium tolerance and accumulation	Wu, Q., Shigaki, T., Williams, K. A., Han, J. S., Kim, C. K., Hirschi, K. D., Park, S.	<i>Journal of Plant Physiology</i> , 168(2), pp. 167–173	2011	83
Growth, Cadmium and Zinc Accumulation of Ornamental Sunflower ( <i>Helianthus annuus</i> L.) in Contaminated Soil with Different Amendments	Hao, X.-Z., Zhou, D.-M., Li, D.-D., Jiang, P.	<i>Pedosphere</i> , 22(5), pp. 631–639	2012	56
Integrated micro-biochemical approach for phytoremediation of cadmium and lead contaminated soils using <i>Gladiolus grandiflorus</i> L. cut flower	Mani, D., Kumar, C., Patel, N.K.	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i> , 124, pp. 435 – 446	2016	53

---

\*Número de citações consultado em 30/12/24.

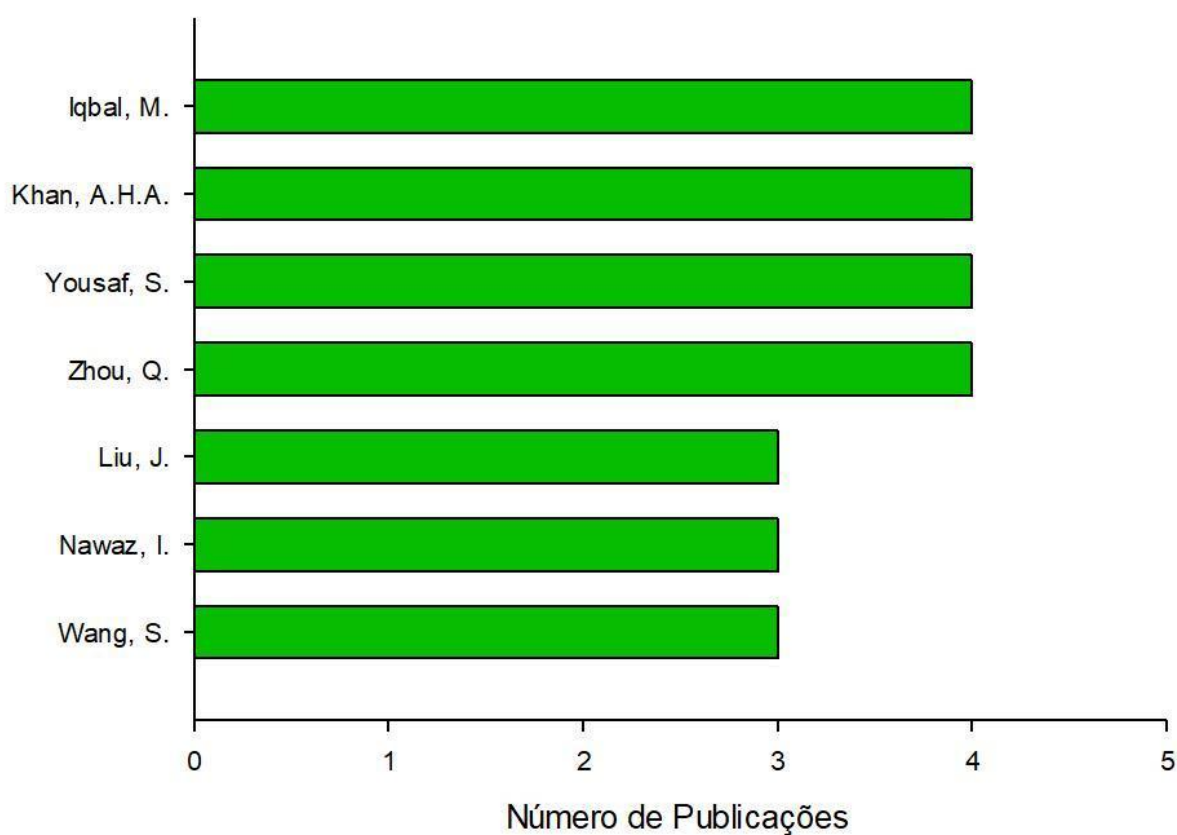
O segundo artigo mais citado foi a revisão intitulada “Fitoextração de metais pesados de solo, água e atmosfera contaminados usando plantas ornamentais: mecanismos e estratégias de melhoria de eficiência”, de autoria de pesquisadores iranianos e australianos. Eles destacam que plantas ornamentais têm um potencial promissor para fitoextração de metais pesados em ambientes poluídos e que sua modificação genética, bem como a modificação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo podem resultar em uma fitoextração aprimorada (ASGARI LAJAYER et al., 2019).

Por fim, ocupando a terceira posição entre os artigos mais citados, encontra-se o estudo intitulado “Respostas de crescimento de três plantas ornamentais ao estresse por Cd e Cd-Pb e suas características de acumulação de metais” que investiga as respostas de crescimento e hiperacumulação de Cd ou Cd-Pb nas plantas ornamentais herbáceas *Impatiens balsamina*, *Calendula officinalis* e *Althaea rosea*. As três espécies apresentaram maior tolerância à contaminação por Cd-Pb e foram

capazes de acumular os metais, especialmente *C. officinalis* e *A. rosea* (LIU et al., 2008).

### 3.4 Contribuição científica e citações entre autores

Os 7 autores mais produtivos publicaram 25 documentos ao longo do período estudado (2004-2024). Os autores Mazhar Iqbal (Universidade Quaid-i-Azam, Paquistão), Aqib Hassan Ali Khan (Universidade de Burgos, Espanha), Sohail Yousaf (Universidade Quaid-i-Azam, Paquistão) e Qixing Zhou (Universidade de Nankai, China), se destacam, com 4 publicações cada (Figura 7).

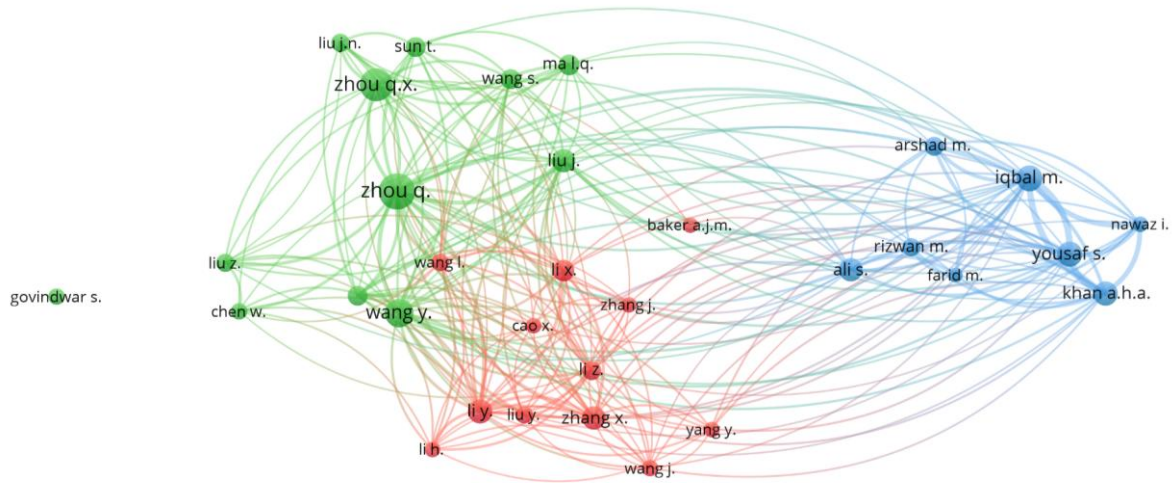


**Figura 7.** Top 7 autores com maior número de publicações sobre o tema no período de 2004 a 2024.

Outros autores importantes são Jianv Liu (Universidade Nankai, China), Ismat Nawaz (Universidade COMSATS Islamabad, Paquistão) e Song Wang (Academia de Ciências Ambientais de Tianjin, China).

Visando analisar a rede de conexões entre as citações dos autores, foi elaborado um mapa de co-citações que considerou apenas aqueles com publicações

que receberam, no mínimo, 25 citações (Figura 8). O mapa gerado possibilitou a identificação de agrupamentos entre os autores, os quais foram discernidos pelas cores e menores distâncias entre os círculos representativos.



**Figura 8.** Co-citações entre os autores com pelo menos 25 citações no período de 2004 a 2024.

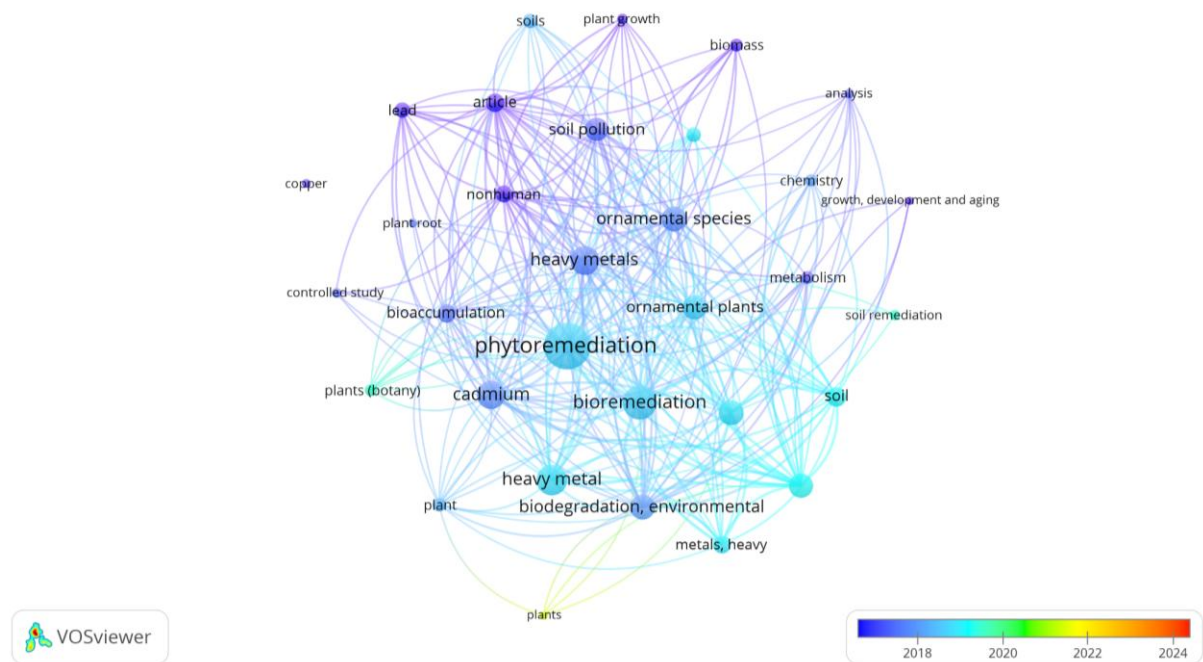
A rede é organizada em três grupos principais (clusters), representados por cores distintas (verde, vermelho e azul). O cluster azul é formado por pesquisadores do Paquistão, enquanto os pesquisadores da China foram distribuídos entre os clusters verde e vermelho. Cada cluster indica grupos de autores que apresentam uma forte conexão em termos de co-citação, sugerindo uma proximidade nos tópicos abordados ou nas abordagens metodológicas utilizadas.

### 3.5 Nuvem e rede de conexões entre as palavras-chave

As palavras-chave em artigos de pesquisa desempenham um papel importante ao auxiliar leitores, autores e indexadores na localização de informações relevantes. Elas aumentam a visibilidade e a relevância das publicações, contribuindo para a acessibilidade e o impacto da literatura científica (HARTLEY; KOSTOFF, 2003).

Sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais foi gerada uma nuvem de palavras-chave no período estudado e um mapa de co-ocorrência de palavras-chave entre os anos de 2017 e 2024 (Figura





**Figura 10.** Rede de co-ocorrência de palavras-chave sobre estudos de fitorremediação de metais pesados no solo usando plantas ornamentais entre os anos de 2017 a 2024. A escala de cores representa a predominância das palavras nos anos.

Há predominância de termos utilizados entre os anos de 2017 a 2019, representados pelas cores azul escuro/roxo. Maiores esferas indicam maior relevância do item dentro do tema analisado. Sendo assim, destacam-se as palavras-chave “*phytoremediation*”, “*bioremediation*”, “*heavy metal*”, “*cadmium*”, “*ornamental plants*” e “*ornamental species*”.

Desperta atenção o fato de que, entre os metais pesados pesquisados na fitorremediação utilizando plantas ornamentais, o cádmio seja o mais citado. Chumbo, cobalto e níquel também parecem despertar maior interesse da pesquisa mundial. O cádmio se destaca devido a sua alta toxicidade e persistência nos ecossistemas, levando a efeitos adversos para o meio ambiente e saúde humana, por apresentar maior mobilidade e biodisponibilidade em relação a outros elementos tóxicos (ANDREI ESTRADA et al., 2024; RAJ; MAITI, 2020).

#### 4. Conclusões

A análise bibliométrica identificou 100 documentos publicados sobre fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais no período de 2004 a 2024, com aumento do número de publicações nos anos de 2021, 2022 e 2023.

O periódico *Environmental Science and Pollution Research* sobressaiu-se como o mais influente na área e a Academia Chinesa de Ciências como principal instituição que desenvolve pesquisas sobre o tema. Os países China, Índia e Paquistão se destacam como líderes na produção de estudos, evidenciando um protagonismo regional na área. Sendo assim, há oportunidades para expandir colaborações com países da América, Europa e África, visando aumentar o impacto global das pesquisas e promover a transferência de tecnologia.

A fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando plantas ornamentais necessita de maior investigação, a fim de contribuir para o avanço do conhecimento e a aplicação prática das técnicas de fitorremediação em diferentes contextos ambientais.

## Referências

ANDREI ESTRADA, C. et al. A Systematic Review on Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils: Identifying Hyperaccumulator Plants, Assessing Soil Quality, Analyzing Contamination Sources and Determining Health Risks. **International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)**, v. 9, n. 7, p. 3095–3102, 2024.

ANGON, P. B. et al. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. **Heliyon**, v. 10, n. 7, p. e28357, 2024.

ARIEL XU, Q.; CHANG, V. Co-authorship network and the correlation with academic performance. **Internet of Things (Netherlands)**, v. 12, p. 100307, 2020.

ARRUDA, H. et al. VOSviewer and Bibliometrix. **Journal of the Medical Library Association : JMLA**, v. 110, n. 3, p. 392–395, 2022.

ASGARI LAJAYER, B. et al. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 9, p. 8468–8484, 2019.

DENG, S. et al. Recent advances in phyto-combined remediation of heavy metal pollution in soil. **Biotechnology Advances**, v. 72, n. March, p. 108337, 2024.

GAO, J.; FAHEEM, M.; YU, X. Global Research on Contaminated Soil Remediation: A Bibliometric Network Analysis. **Land**, v. 11, n. 9, p. 1–16, 2022.

HARTLEY, J.; KOSTOFF, R. N. How useful are “key words” in scientific journals? **Journal of Information Science**, v. 29, n. 5, p. 433–438, 2003.

HILTON, M. Scopus Search Analyzer. **Journal of the Canadian Health Libraries Association**, v. 45, n. 2, p. 108–113, 2024.

HOU, L.; PAN, Y.; ZHU, J. J. H. Impact of scientific, economic, geopolitical, and cultural factors on international research collaboration. **Journal of Informetrics**, v. 15, n. 3, p. 101194, 2021.

İRİ, R.; ÜNAL, E. Bibliometric Analysis Bibliometric Analysis of Research (1980-2023). **Ahi Evran Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, v. 10, n. 2, p. 386–403, 2024.

KEITH, B. F. et al. The scientific landscape of phytoremediation of tailings: a bibliometric and scientometric analysis. **International Journal of Phytoremediation**, v. 26, n. 13, p. 2084–2102, 2024.

KHAN, A. H. A. et al. Ornamental plants for the phytoremediation of heavy metals: Present knowledge and future perspectives. **Environmental Research**, v. 195, n. January, p. 110780, 2021.

KUMAR, A. et al. Phytoremediation: Sustainable Approach for Heavy Metal Pollution. **Scientifica**, v. 2024, n. Cd, 2024.

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 and Management**, v. 22, n. June, p. 100975, 2024.

LI, C.; JI, X.; LUO, X. Phytoremediation of heavy metal pollution: A bibliometric and scientometric analysis from 1989 to 2018. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 23, 2019.

LIU, J. NV et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. **Journal of Hazardous Materials**, v. 151, n. 1, p. 261–267, 2008.

MAO, G. et al. Bibliometric analysis of insights into soil remediation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 7, p. 2520–2534, 2018.

MOSQUERA CHAVERRA, L. et al. Phytoremediation of Mercury Contamination: Bibliometric Analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 21, p. 1–28, 2024.

PAN, X. et al. Bibliometric analysis of soil nutrient research between 1992 and 2020. **Agriculture (Switzerland)**, v. 11, n. 3, p. 1–12, 2021.

PESSIN, V. Z.; YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R. Smart bibliometrics: an integrated

method of science mapping and bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 127, n. 6, p. 3695–3718, 2022.

PRANCKUTĖ, R. Scopus and Web of Science stands out for systematic reviews, offering comprehensive coverage across disciplines, including journals, conferences, and patents. **Publications**, v. 9, n. 1, p. 1–59, 2021.

PUTRA, B. et al. Assessing phytoremediation strategies for gold mine tailings: a bibliometric and systemic review. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 47, n. 1, p. 1–34, 2025.

RABHA, S.; DHANEESH, K. V. The Impact of Heavy Metal Accumulation on Agricultural Soils and Its Mitigation. **Uttar Pradesh Journal of Zoology**, v. 45, n. 20, p. 77–89, 2024.

RAJ, D.; MAITI, S. K. Sources, bioaccumulation, health risks and remediation of potentially toxic metal(loid)s (As, Cd, Cr, Pb and Hg): an epitomised review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 2, 2020.

ROCHA, C. S. et al. Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3336–3354, 2022.

SARMA, H. H. et al. Impact of Heavy Metal Contamination on Soil and Crop Ecosystem with Advanced Techniques to Mitigate Them. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 27, n. 6, p. 53–63, 2024.

SUN, J.; YUAN, B.-Z. Mapping of top papers in the subject category of Soil Science. **COLLNET Journal of Scientometrics and Information Management**, v. 17, n. 1, p. 7–22, 2023.

SUN, Y. et al. Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo [ a ] pyrene ( B [ a ] P ) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2–3, p. 2075–2082, 2011.

SWETHA, T. N. et al. Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils Using Various Flower and Ornamentals. **International Journal of Plant & Soil Science**, v.

35, n. 18, p. 747–752, 2023.

TANG, S. et al. Advances in Studies on Heavy Metals in Urban Soil: A Bibliometric Analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 2, p. 1–24, 2024.

VALDIVIEZO GONZALES, L. G. et al. Scientometric study of treatment technologies of soil pollution: Present and future challenges. **Applied Soil Ecology**, v. 182, n. October 2022, 2023.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

WANG, C. et al. Farmland phytoremediation in bibliometric analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 351, n. January, p. 119971, 2024.

XIAO, P. et al. Assessment of heavy metals in agricultural land: A literature review based on bibliometric analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 8, 2021.

YANG, L. et al. Phytoremediation of heavy metal pollution: Hotspots and future prospects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 234, n. October 2021, p. 113403, 2022.

ZHANG, K. et al. Trends in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils: A Web of science and CiteSpace bibliometric analysis. **Chemosphere**, v. 352, n. January, p. 141293, 2024.

ZHANG, Y. LE et al. Bibliometrics-Based: Trends in Phytoremediation of Potentially Toxic Elements in Soil. **Land**, v. 11, n. 11, 2022.

ZHAO, X.; LEI, M.; GU, R. Knowledge Mapping of the Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soil: A Bibliometric Analysis from 1994 to 2021. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 12, 2022.

## 1.2 FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM ZINCO POR PLANTAS ORNAMENTAIS *Zinnia elegans* Jacq. E *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.

### Resumo

O zinco (Zn) é um metal pesado que, em concentrações elevadas, apresenta toxicidade, comprometendo a saúde dos ecossistemas e a produtividade agrícola. A textura do solo desempenha um papel importante na biodisponibilidade de Zn, influenciando sua mobilidade e absorção pelas plantas. Nesse cenário, o uso de plantas ornamentais na fitorremediação surge como uma tecnologia sustentável eficaz para estabilizar ou remediar diferentes solos contaminados com Zn, pois agregam, além de valor estético, benefícios ecológicos e econômicos. Objetiva-se, com este estudo, avaliar o potencial remediador de duas plantas ornamentais, *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., em solos arenoso e argiloso contaminados com Zn. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e delineados em blocos casualizados em esquema fatorial 5x2, um para cada tipo de solo. Os tratamentos foram compostos pela combinação de quatro doses de Zn + controle (0, 50, 100, 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>), aplicado na forma de ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, e duas espécies (*Z. elegans* Jacq. e *B. oleracea* L. var. *acephala* DC.), com quatro repetições. Foram avaliados atributos morfológicos, fitotoxicidade, pigmentos e quantificação de Zn no solo e nas plantas. O aumento das doses de Zn afetou negativamente a produção de biomassa da parte aérea e das raízes das plantas. Ambas espécies não foram eficientes em fitoextrair Zn em solos arenoso e argiloso. *B. oleracea* L. var. *acephala* DC. apresentou melhores parâmetros morfofisiológicos, caracterizando-se como mais tolerante ao estresse por Zn (<300 mg dm<sup>-3</sup>).

**Palavras-chave:** Manejo do solo, metal pesado, fitoextração, fitotoxicidade, zínia, couve ornamental.

## Abstract

Zinc (Zn) is a heavy metal that, at high concentrations, exhibits toxicity, compromising ecosystem health and agricultural productivity. Soil texture plays an important role in the bioavailability of Zn, influencing its mobility and absorption by plants. In this context, the use of ornamental plants in phytoremediation emerges as an effective green technology to stabilize or remediate different Zn-contaminated soils, as they provide, in addition to aesthetic value, ecological and economic benefits. This study aims to evaluate the remediation potential of two ornamental plants, *Zinnia elegans* Jacq. and *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., in sandy and clayey soils contaminated with Zn. Two experiments were conducted in a greenhouse and designed in randomized blocks in a 5x2 factorial scheme, one for each soil type. The treatments consisted of a combination of four Zn doses + control (0, 50, 100, 300, and 450 450 mg dm<sup>-3</sup>), applied as ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, and two species (*Z. elegans* Jacq. and *B. oleracea* L. var. *acephala* DC.), with four replicates. The morphological attributes, phytotoxicity, pigments and quantification of Zn in the soil and plants were evaluated. The increase in Zn doses negatively affected the production of shoot and root biomass in the plants. Both species were not efficient in phytoextracting Zn in sandy and clayey soils. *B. oleracea* L. var. *acephala* DC. showed better morphophysiological parameters, characterized as more tolerant to Zn stress (<300 mg dm<sup>-3</sup>).

**Keywords:** Soil management, heavy metal, phytoextraction, phytotoxicity, zinnia, ornamental kale.

## 1. Introdução

A contaminação do solo por metais pesados é um problema ambiental significativo, que se origina principalmente de atividades antrópicas e representa riscos para plantas e animais, impedindo o crescimento e causando toxicidade (ABDULLAHÍ et al., 2023; KUMAR et al., 2023).

O zinco (Zn) é um metal pesado e um dos principais elementos ( $23^{\circ}$ ) encontrados na crosta terrestre, com concentração média de aproximadamente  $78 \text{ mg kg}^{-1}$  (HUSSAIN et al., 2022). A contaminação do solo com Zn ocorre principalmente devido a operações de mineração e atividades industriais, como extração de minerais, mineração de carvão, processos de fundição e refino, incineração de resíduos e processamento de aço (POURESMAIELI et al., 2022). O Zn, além de metal pesado, é um micronutriente indispensável para a atividade enzimática e o crescimento das plantas, mas pode ser tóxico em concentrações elevadas, prejudicando os ecossistemas e a agricultura (BALAFREJ et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2023). A manutenção de níveis adequados de Zn no solo, portanto, é crucial para uma produtividade agrícola sustentável.

No Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2009) estabelece como  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  a concentração limite de Zn no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções primárias (valor de prevenção), e  $450 \text{ mg kg}^{-1}$  a concentração de Zn em área agrícola para investigação, considerando que a partir deste valor já existem riscos potenciais diretos ou indiretos à saúde humana (BRASIL, 2009). Nesse contexto, a fitorremediação, tecnologia que usa plantas para remover ou imobilizar contaminantes de áreas poluídas, surge como uma alternativa prática, sustentável e de baixo custo para a remediação de solos contaminados por metais pesados, inclusive com Zn (LAVANYA; VISWANATH; SIVAPULLAIAH, 2024; SARWAR et al., 2017).

Solos com atributos químicos e físicos distintos, como pH, capacidade de troca catiônica (CTC), teor de matéria orgânica e textura, apresentam variações na retenção, mobilidade e biodisponibilidade de Zn (KAUR et al., 2024). Portanto, compreender como esses fatores influenciam o comportamento do Zn em solos com características químicas e físicas distintas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo e remediação ambiental. Além disso, a escolha de espécies adequadas para a fitorremediação também é um fator determinante no

sucesso de projetos de descontaminação e mitigação de impactos em áreas contaminadas. Diferentes espécies de plantas possuem variações em sua tolerância e capacidade de absorção de Zn (WEI et al., 2021), tornando essencial a seleção criteriosa de espécies alinhadas aos objetivos específicos de cada projeto de remediação.

A utilização de plantas ornamentais, como flores e folhosas exuberantes, apresenta vantagens significativas na fitorremediação devido ao seu rápido crescimento e ciclos de vida curtos. Por não serem destinadas ao consumo humano ou como forragem, minimiza-se o risco de contaminação da cadeia alimentar por metais pesados, permitindo que a fitorremediação seja realizada de forma eficaz em um curto período. Isso abre caminho para pesquisas mais seguras, intensivas e aprofundadas (DEEPIKA; HARITASH, 2023; MAJUMDAR et al., 2022). Além disso, o emprego de espécies ornamentais na fitorremediação de metais pesados proporciona benefícios ecológicos, estéticos e econômicos para as áreas descontaminadas, promovendo o bem-estar social e ambiental (ROCHA et al., 2022).

A zínia (*Zinnia elegans* Jacq.), da família botânica *Asteraceae*, e a couve ornamental (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.), uma *Brassicaceae*, famílias que apresentam espécies hiperacumuladoras de metais (BORTOLOTTI; BARON, 2022; RASCIO; NAVARI-IZZO, 2011; REEVES, 2024), são duas plantas ornamentais de ciclo curto que podem ser empregadas em programas de fitorremediação de áreas contaminadas.

Estudos têm sido realizados com zínia e couve ornamental na fitorremediação de metais pesados, em que zínia foi utilizada na fitorremediação de Cr (ANDARISTA UTOMO; MANGKOEDIHARDJO, 2018; EHSAN et al., 2016; PANDA et al., 2020), Pb (BADAWY et al., 2017; BAHMANZADEGAN JAHROMI et al., 2023; CUI et al., 2007; EHSAN et al., 2016; ESRINGÜ; TURAN; CANGÖNÜL, 2021; JUHRIAH et al., 2023; PATEL; MODI, 2020), As (SIGNES-PASTOR et al., 2015), Cu (AFROUSHEH et al., 2015; TUGBAEVA et al., 2022), Cd (CHEN et al., 2001; ESRINGÜ; TURAN; CANGÖNÜL, 2021; JIANG et al., 2021; LIU; CHEN; HE, 2018; THAMAYANTHI; SHARAVANAN, 2012), Ag e Zn em solução hidropônica (SINGH et al., 2024), e couve ornamental na fitorremediação de Pb (HAGHIGHI et al., 2016), Cd (HAGHIGHI et al., 2016; JIA et al., 2015; ŠUTKOVIĆ et al., 2024), B (EMAN GÖKSEVEN; KIRAN; ELLİALTIOĞLU, 2021, 2022), TI (AL-NAJAR; SCHULZ; RÖMHELD, 2005) e Zn em meio aquoso (TAGHIZADEH et al., 2018). Contudo, a fitorremediação de solos com

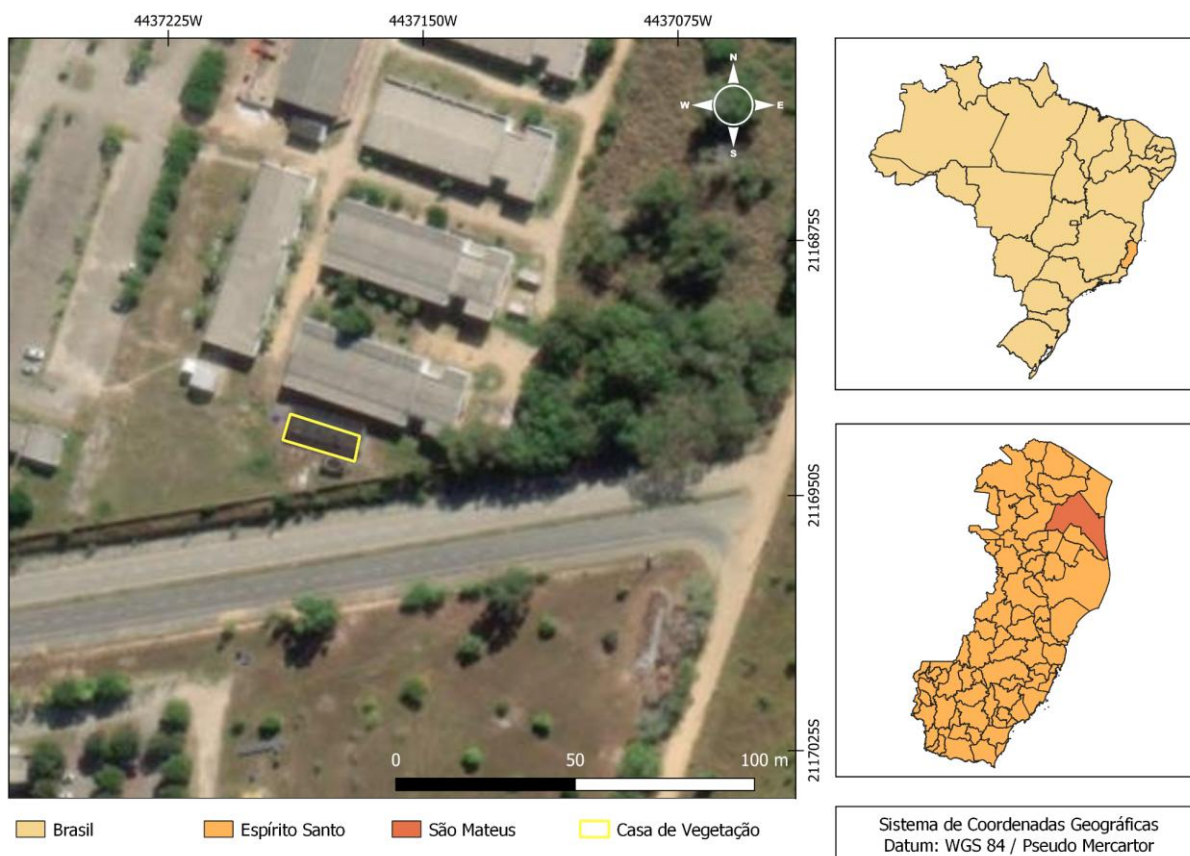
diferentes texturas e contaminados com Zn, utilizando essas espécies ornamentais, ainda demanda uma investigação mais aprofundada.

Diante disso, objetiva-se com este estudo avaliar o potencial remediador das plantas ornamentais *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. em solos arenoso e argiloso, contaminados com Zn.

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Localização

Foram conduzidos dois experimentos independentes, de junho a agosto de 2024, que se diferiram apenas pela textura dos solos contaminados. Os experimentos foram realizados em casa de vegetação no Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical da Universidade Federal do Espírito Santo - Campus São Mateus (CEUNES/UFES), localizada na latitude  $18^{\circ} 40' 37''$  S e longitude  $39^{\circ} 51' 36''$  W, com aproximadamente 37 m de altitude (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é tropical úmido, tipo Aw, com as estações outono-inverno secas e as estações primavera-verão chuvosas (ALVARES et al., 2013).



**Figura 1.** Mapa de localização da Casa de Vegetação onde foram instalados os

experimentos, São Mateus - ES.

## 2.2 Solo e caracterização

Para o estabelecimento das espécies em cada experimento, foram coletadas amostras de solo provenientes da camada superficial (0-20 cm) de um Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2018), localizado na Fazenda Experimental do CEUNES/UFES, São Mateus-ES, e de um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2018), localizado em propriedade particular em Pinheiros - ES. Ambos os solos foram obtidos em áreas cultivadas com pastagem.

Após a coleta, os solos foram transportados para a Fazenda Experimental (CEUNES/UFES), secos ao ar e peneirados em malha de 4 mm. Uma amostra representativa de cada solo foi peneirada em malha de 2 mm e analisada quanto à textura do solo, à densidade de partículas (Tabelas 1) e à caracterização química (Tabela 2), realizadas no Laboratório de Física do Solo e no Laboratório de Análises de Solo e Folha - LAGRO do CEUNES/UFES. As análises de textura e densidade de partículas foram realizadas seguindo os métodos da Pipeta e do Balão Volumétrico (EMBRAPA, 2017), respectivamente, e as análises químicas do solo seguiram as metodologias propostas pelo Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 2009).

**Tabela 1.** Valores médios de areia, silte e argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), textura do solo e densidade de partículas para cada solo estudado, na camada de 0-0,20 m.

Solo	Areia	Silte	Argila	Textura do Solo*	Densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	----- $\text{g kg}^{-1}$ -----				
Argissolo Amarelo	852,86	30,23	116,91	Areia Franca	2,63
Latossolo Vermelho	307,05	116,46	576,49	Argila	2,67

\*Com base no triângulo textural de Lemos e Santos (1984).

**Tabela 2.** Análise química do Argissolo Amarelo e do Latossolo Vermelho utilizados no experimento, coletados na camada de 0-0,20 m.

Atributos	Unidade	Argissolo Amarelo	Latossolo Vermelho
$\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$	-	5,1	5,8

Matéria Orgânica (MO)	dag kg <sup>-1</sup>	1,8	1,1
Sódio (Na)	mg dm <sup>-3</sup>	6,0	6,0
Fósforo (P)	mg dm <sup>-3</sup>	2,9	2,1
Potássio (K)	mg dm <sup>-3</sup>	16,0	29,0
Ferro (Fe)	mg dm <sup>-3</sup>	123,0	59,0
Manganês (Mn)	mg dm <sup>-3</sup>	2,0	36,1
Zinco (Zn)	mg dm <sup>-3</sup>	0,8	2,0
Cobre (Cu)	mg dm <sup>-3</sup>	0,3	0,7
Cálcio (Ca)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,1	0,9
Magnésio (Mg)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,3	0,3
Alumínio (Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,8	0,0
Acidez potencial (H+Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,5	1,3
Soma de bases (SB)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,5	1,3
CTC a pH 7 (T)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	3,9	2,6
CTC efetiva (t)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,2	1,3
Saturação por bases (V)	%	12,2	48,9
Saturação por alumínio (m)	%	60,9	0,0

pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> 1:2,5; P: extrator Mehlich-1 e determinação por espectrofotometria; K e Na: extrator Mehlich-1 e determinação por espectrofotometria de chama; Ca e Mg: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinação por espectrometria de absorção atômica; Al: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinação por titulometria com hidróxido de sódio 0,025 mol L<sup>-1</sup>; Fe, Mn, Zn e Cu: extrator Mehlich-1 e determinação por espectrometria de absorção atômica; H + Al: extrator acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> e determinação por titulometria com hidróxido de sódio 0,025 mol L<sup>-1</sup>; e MO: oxidação de CO<sub>2</sub> com dicromato de potássio em meio ácido e determinação por titulometria com sulfato ferroso amoniacal.

Cada solo foi acondicionado em vasos de polietileno, sem furos, com volume de 5 dm<sup>-3</sup>. Foram adicionados 5 kg de solo peneirado em malha de 4 mm por vaso, sem qualquer tipo de intervenção química para correção de acidez ou fertilidade. As espécies vegetais estudadas foram adquiridas a partir da produção de mudas em substrato comercial (Tabela 3), produzidas em sementeiras alocadas na mesma casa de vegetação da realização dos experimentos. A casa de vegetação é totalmente coberta por sombrite 50% e utilizou-se uma cobertura plástica transparente para evitar a incidência direta de chuva nas plantas.

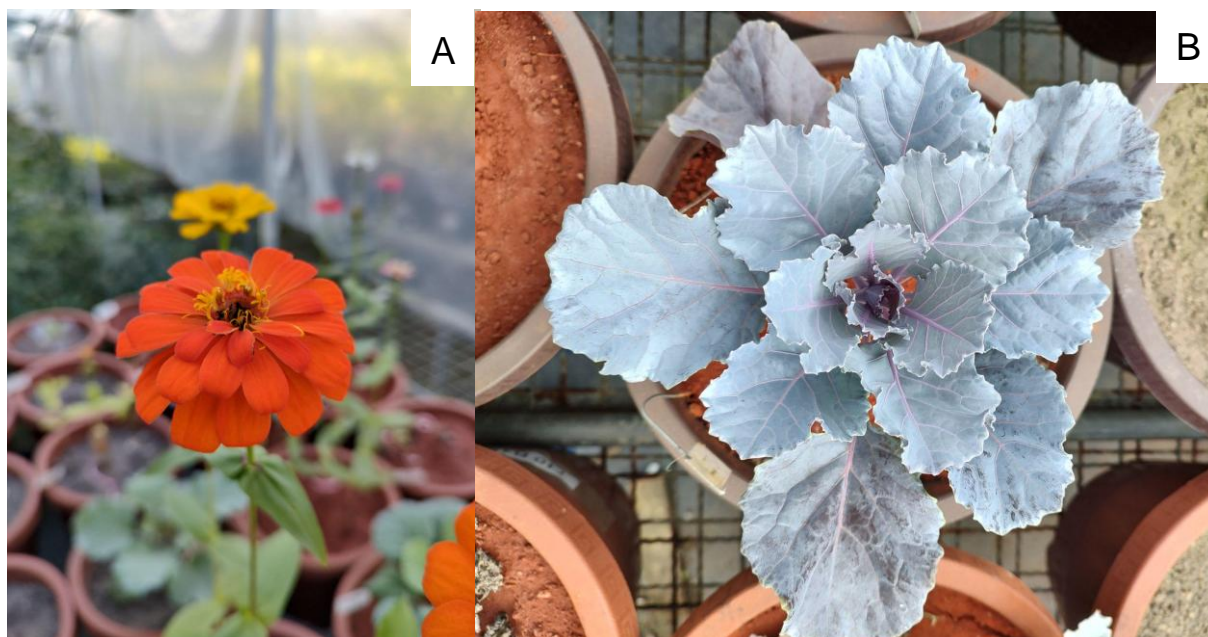
**Tabela 3.** Caracterização do substrato utilizado para a produção das mudas de zínia e couve ornamental.

Especificação	Resultado
Nome comercial	Tropstrato hortaliça HT
Natureza física	Sólido (sem especificação granulométrica)
Composição	Casca de pinus, turfa e vermiculita
pH	5,8
CE (mS/cm)	2,1
CRA (% p/p)	130
Umidade (% p/p)	60
Densidade base seca (kg m <sup>-3</sup> )	200
Densidade base úmida (kg m <sup>-3</sup> )	500

Fonte: Vidaverde Tecnologia em Substratos.

### 2.3 Material vegetal

As plantas ornamentais *Zinnia elegans* Jacq., zínia, e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., couve ornamental, (Figura 2, Tabela 4) foram utilizadas para a fitorremediação dos solos contaminados com Zn nos dois experimentos independentes (Tabela 5).



**Figura 2.** Espécies investigadas (A) *Zinnia elegans* Jacq. e (B) *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.

**Tabela 4.** Principais características das plantas ornamentais utilizadas nos experimentos.

<b>Espécies</b>	<b>Nome Popular</b>	<b>Família</b>	<b>Ciclo (Inverno)</b>	<b>Altura da Planta (cm)</b>
<i>Zinnia elegans</i> Jacq.	Zínia	Asteraceae	70 dias	60 - 90
<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.	Couve Ornamental	Brassicaceae	60 dias	10 - 30

**Tabela 5.** Experimentos de fitorremediação de solos contaminados com Zn utilizando plantas ornamentais.

<b>Solo</b>		<b>Espécies</b>	
Experimento 1	Argissolo Amarelo	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.
Experimento 2	Latossolo Vermelho	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.

As sementes de zínia utilizadas foram obtidas de uma empresa comercial, cujas informações de germinação e pureza são de 81,0% e 99,4%, respectivamente. As sementes de couve ornamental também foram obtidas de uma empresa comercial, cujas informações de germinação e pureza são de 81,0% e 99,9%, respectivamente. A semeadura ocorreu em sementeiras de plástico transparente com células de 3,8 cm x 3,8 cm e com 3,5 cm de profundidade. Cada célula recebeu duas sementes e foi irrigada com água deionizada de acordo com a necessidade, mantendo uma distribuição de água uniforme.

O desbaste das mudas foi realizado quando as mesmas apresentavam sistema radicular bem desenvolvido, correspondendo a sete dias após a semeadura para zínia e dez dias após a semeadura para couve ornamental. Deixou-se apenas a muda mais vigorosa por célula.

#### 2.4 Delineamento experimental, tratamentos, contaminação do solo, transplântio e condução das plantas

As plantas ornamentais zínia e couve ornamental foram conduzidas no Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho como experimentos independentes, em um delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) em um esquema fatorial 5x2, com quatro repetições, (Figuras 3 e 4), totalizando 40 parcelas por experimento.



**Figura 3.** Croqui experimental da disposição dos tratamentos utilizando Argissolo Amarelo (solo arenoso).



**Figura 4.** Croqui experimental da disposição dos tratamentos utilizando Latossolo Vermelho (solo argiloso).

Os tratamentos consistiram na combinação de quatro doses de contaminação por Zn + controle (sem contaminação) e as duas plantas (zínia e couve ornamental), conforme Tabela 6.

**Tabela 6.** Descrição dos tratamentos experimentais.

<b>Tratamento</b>	<b>Fator Dose</b>	<b>Fator Planta</b>
Tratamento 1	Dose 0	Zínia
Tratamento 2	Dose 0	Couve ornamental
Tratamento 3	Dose 1	Zínia
Tratamento 4	Dose 1	Couve ornamental
Tratamento 5	Dose 2	Zínia
Tratamento 6	Dose 2	Couve ornamental
Tratamento 7	Dose 3	Zínia
Tratamento 8	Dose 3	Couve ornamental
Tratamento 9	Dose 4	Zínia
Tratamento 10	Dose 4	Couve ornamental

As doses de Zn foram definidas levando-se em conta os padrões de prevenção e investigação estabelecidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (2009), sendo  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  para prevenção e  $450 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Zn}^{2+}$  para intervenção agrícola/área de proteção máxima, respectivamente. Foram utilizadas doses crescentes (0, 50, 100, 300 e  $450 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{Zn}^{2+}$ ), na forma de sulfato de zinco heptahidratado PA ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), aplicado em solução (Tabela 7).

**Tabela 7.** Laudo do sulfato de zinco heptahidratado ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) utilizado para preparo da solução de contaminação do solo.

<b>Especificação</b>	<b>Resultado</b>
Teor	99,45 %
Ferro (Fe)	5 ppm
pH da solução 5% a 25°C	4,7
Aparência	Cristal incolor a branco
Cloreto (Cl)	0,001 %
Solubilidade em água	Solúvel
Chumbo (Pb)	10 ppm

Fonte: Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda.

As soluções de contaminação com  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  foram preparadas no

Laboratório de Fitorremediação situado no prédio do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical. Considerando a solubilidade em água do sulfato de zinco heptahidratado como  $57,1 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ , foram preparados 500 mL de cada solução de contaminação. As soluções foram preparadas utilizando água deionizada e dissolvendo o conteúdo de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  necessário para contaminar os  $5 \text{ dm}^3$  de solo presente em cada vaso, seguindo as quantidades de reagente apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8.** Quantidade de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  utilizada para produção das soluções de cada dose de contaminação, considerando o conteúdo de  $5 \text{ dm}^3$  de solo em cada vaso.

	<b>Dose 1</b>	<b>Dose 2</b>	<b>Dose 3</b>	<b>Dose 4</b>	<b>Dose 5</b>
mg Zn $\text{kg}^{-1}$ solo	0	50	100	300	450
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (g)	0	1,1	2,2	6,6	9,9

O solo de cada vaso foi contaminado no mesmo dia do transplântio das mudas. As mudas de zínia e couve ornamental com 15 dias de idade foram transferidas para os vasos contendo solo contaminado. Os vasos destinados ao cultivo de zínia receberam três mudas dispostas em arranjo triangular e os vasos de couve receberam uma muda posicionada no centro, caracterizando cada vaso como uma unidade experimental.

Cada vaso foi irrigado com água deionizada sempre que necessário e com pesagens semanais, a fim de manter a umidade do solo em torno de 75% da capacidade de campo. As plantas de zínia foram conduzidas em vaso até o pleno florescimento e as de couve ornamental até o pleno desenvolvimento vegetal e colhidas antes de entrarem em senescência. Para a zínia, a colheita ocorreu 34 dias após o transplântio/contaminação do solo, e para a couve ornamental, 56 dias após o transplântio/contaminação do solo.

## 2.5 Avaliações biométricas, fitotoxicidade e pigmentos

Durante a condução dos experimentos foram realizadas avaliações biométricas, fisiológicas (pigmentos vegetais) e químicas, incluindo avaliação visual de sintomas de intoxicação (fitotoxicidade) e a quantificação de  $\text{Zn}^{2+}$  no solo e extraído/acumulado na parte aérea das plantas.

As avaliações biométricas, de pigmentos e fitotoxicidade foram realizadas aos 15 e 30 dias após o transplante das mudas e contaminação dos solos. Foram avaliadas as seguintes variáveis: altura da planta (AP), utilizando uma trena graduada em milímetros; número de folhas (NF), determinado por meio da contagem de todas as folhas desenvolvidas; e clorofila, flavonoides, antocianina e índice nitrogênio-flavonoides (NFI) utilizando um medidor multi pigmentos MPM-100 (ADC BioScientific Ltd., UK). O NFI (Nitrogen-Flavonoid Index) é calculado pela relação entre clorofila e flavonoides, sendo um indicador do *status* do nitrogênio nas plantas. Para a avaliação visual da fitotoxicidade, foram atribuídas notas em uma escala de 0 a 100, com base nos sintomas de intoxicação observados na parte aérea das plantas. Nesta escala, a nota 0 indicava a ausência de sintomas (planta saudável), a nota 50 correspondia a sintomas moderados (amarelecimento, murcha, encarquilhamento) e a nota 100 representava danos irreversíveis muito severos (tombamento, necrose, morte).

Quando as plantas de zínia floresceram e as de couve ornamental atingiram o pleno desenvolvimento, foi realizada a colheita dos experimentos. As plantas foram colhidas utilizando tesouras de poda, para efetuar o corte rente ao solo e separar a parte aérea das raízes. Após o corte, as folhas foram destacadas, acondicionadas em sacos de papel, transportadas ao laboratório de Ecofisiologia Vegetal e determinada a área foliar (AF) empregando medidor de área foliar eletrônico modelo L1-3100C (Li-Cor, Inc., USA) e as biomassas fresca e seca de parte aérea e raiz, empregando uma balança analítica com precisão de 0,001 g.

Após a retirada da parte aérea, o solo de cada vaso foi vertido sobre uma bandeja, para realizar a separação das raízes do solo. As raízes foram separadas das partículas de solo aderentes e lavadas com água corrente. Em seguida, o material vegetal foi pesado para obtenção da massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR) e massa fresca total (MFT), em balança analítica com precisão de 0,001 g. Por fim, o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar, a  $65 \pm 2$  °C, até atingir massa constante, e novamente o material teve sua massa aferida em balança analítica, para obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), bem como a massa seca total (MST).

## 2.6 Quantificação de Zn na planta e no solo

A biomassa da parte aérea e das raízes secas foi triturada separadamente em moinho de faca, tipo Willey (modelo Tecnal TE-650), com peneira de 1 mm,

catalogadas e acondicionadas para posterior análise de Zn. A análise de Zn no tecido vegetal foi realizada em laboratório, seguindo o método de Digestão nitroperclórica e determinação por espectroscopia de absorção atômica (MALAVOLTA et al., 1997). Com base nos resultados de Zn no tecido vegetal, a quantidade de Zn na parte aérea da planta foi calculada multiplicando-se a concentração de Zn na planta ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) pela matéria seca da planta ( $\text{g vaso}^{-1}$ ), obtendo-se o Zn acumulado na parte aérea (RIBEIRO et al., 2018).

Para permitir comparações entre as espécies, que apresentam naturalmente diferenças morfológicas, os dados referentes à altura da planta (cm), número de folhas, área foliar ( $\text{cm}^2$ ) e biomassas (fresca, seca e total, em g) foram convertidos em índices. Estes índices foram calculados dividindo-se os valores obtidos para determinada variável em cada tratamento pelo valor correspondente da testemunha de cada espécie, estabelecendo-se um valor de referência de 1 como índice para a testemunha.

Após a separação das raízes, foi coletada uma amostra de solo homogênea de cada vaso que, posteriormente, foi seca à sombra, peneirada em peneira de 2 mm (TFSA), identificada e levada ao Laboratório de Análise do Solo e de Folhas (LAGRO) do CEUNES/UFES para análise de Zn. A metodologia utilizada para a análise de Zn no solo foi adaptada da proposta pela Embrapa no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 2009), com uso de diluições intermediárias para manter as concentrações na faixa da curva de calibração, a fim de proporcionar detecção precisa da concentração de Zn no solo.

## 2.7 Índices de fitorremediação

Para avaliar o comportamento das espécies em relação ao Zn foram calculados índices (fatores). O Fator de Bioacumulação (FB), Equação 1, representa a relação entre a concentração de metais na parte aérea da planta e a concentração de metais no solo, funcionando como um indicador da capacidade da planta de acumular metais pesados em seus tecidos, em  $\text{mg kg}^{-1}$  (BILMAYER et al., 2024).

$$\text{FB} = \frac{[\text{Zn}] \text{ parte aérea}}{[\text{Zn}] \text{ solo}} \quad (1)$$

O Fator de Translocação (FT), Equação 2, se refere à capacidade da planta em

translocar o metal para suas partes aéreas, sendo definido como a razão entre a concentração de metais nas partes aéreas e a concentração de metais nas raízes, em  $\text{mg kg}^{-1}$  (BILMAYER et al., 2024; SHARMA; MATHUR, 2023).

$$FT = \frac{[\text{Zn}] \text{ parte aérea}}{[\text{Zn}] \text{ raiz}} \quad (2)$$

O Fator de Translocação em Massa (FTm), Equação 3, determina o fator de translocação com base na massa total de Zn acumulada em cada parte da planta. É calculado pela relação entre a massa de Zn na parte aérea e na raiz, onde mZn é a massa de Zn na respectiva parte da planta (parte aérea ou raiz) em  $\text{mg vaso}^{-1}$  (CARVALHO et al., 2019; RIBEIRO et al., 2018).

$$FTm = \frac{m\text{Zn parte aérea}}{m\text{Zn raiz}} \quad (3)$$

Por fim, foi calculado o Índice de Tolerância (IT), Equação 4, definido como a razão entre o rendimento de biomassa seca (BS) das plantas cultivadas em solo contaminado (tratamentos) e o rendimento de biomassa seca das plantas cultivadas em solo não contaminado (controle), em  $\text{g vaso}^{-1}$  (SHI et al., 2011).

$$IT = \frac{BS \text{ tratamento}}{BS \text{ controle}} \quad (4)$$

## 2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram tabulados e submetidos à Análise de Variância. As médias das espécies, quando significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro no programa estatístico R versão 4.3.1 (R Core Team, 2022), utilizando-se o pacote 'ExpDes.pt' (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021). As doses foram submetidas à análise de regressão, procedendo-se ao ajuste de modelos e teste de significância dos coeficientes. Os gráficos de regressão foram produzidos com auxílio do software SigmaPlot versão 12.0 (SYSTAT SOFTWARE INC., 2011).

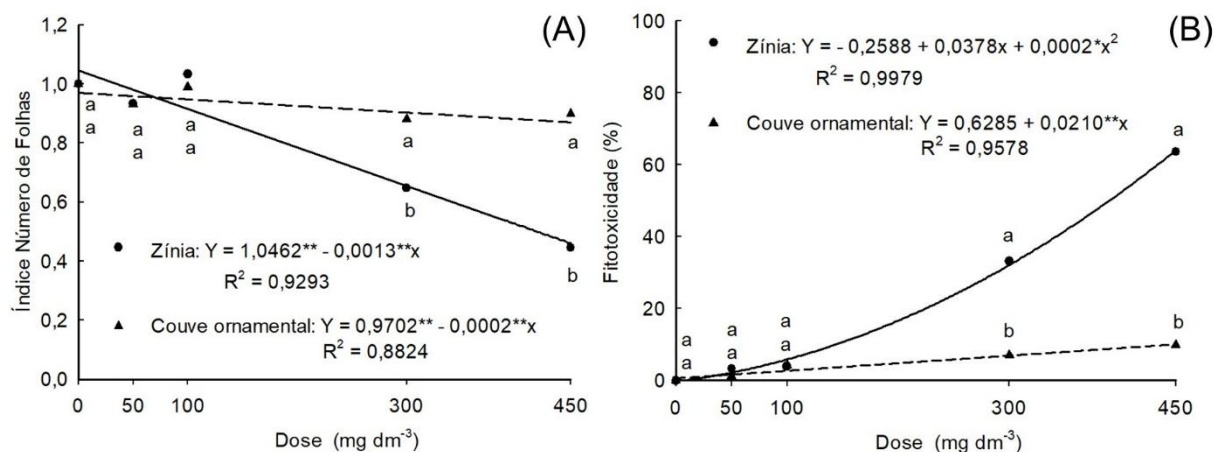
### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Solo arenoso

##### 3.1.1 Avaliação aos 15 dias

Aos 15 dias após a contaminação do solo e transplântio das mudas, observou-se interação significativa entre os fatores (dose x espécie) para as variáveis índice número de folhas e fitotoxicidade. Esse resultado indica que o efeito do Zn sobre estas variáveis depende tanto da espécie vegetal quanto da dose aplicada.

Houve redução do índice número de folhas, calculado com base na variação do número de folhas dos tratamentos em comparação com a testemunha, e aumento da fitotoxicidade, de acordo com o aumento da dose de Zn em ambas as espécies, aos 15 dias após contaminação (Figura 5). Contudo, a redução e o aumento ocorrem de forma mais acentuada para zínia, com efeitos mais pronunciados nas doses de 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>, sugerindo, inicialmente, maior tolerância da couve ornamental ao estresse por Zn.



**Figura 5.** Índice número de folhas e fitotoxicidade em *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 15 dias após a contaminação com doses de Zn em solo arenoso.

Médias das espécies seguidas de mesma letra dentro de cada dose não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

Plantas da família *Brassicaceae*, como *B. oleracea* L. var. *acephala*, podem exibir diversas estratégias de tolerância a metais pesados, como mecanismos que

envolvem evitar a absorção dos metais por meio da secreção de exsudatos radiculares, quelação e armazenamento dos metais no vacúolo ou ativação de mecanismos antioxidantes (ZEREMSKI et al., 2021).

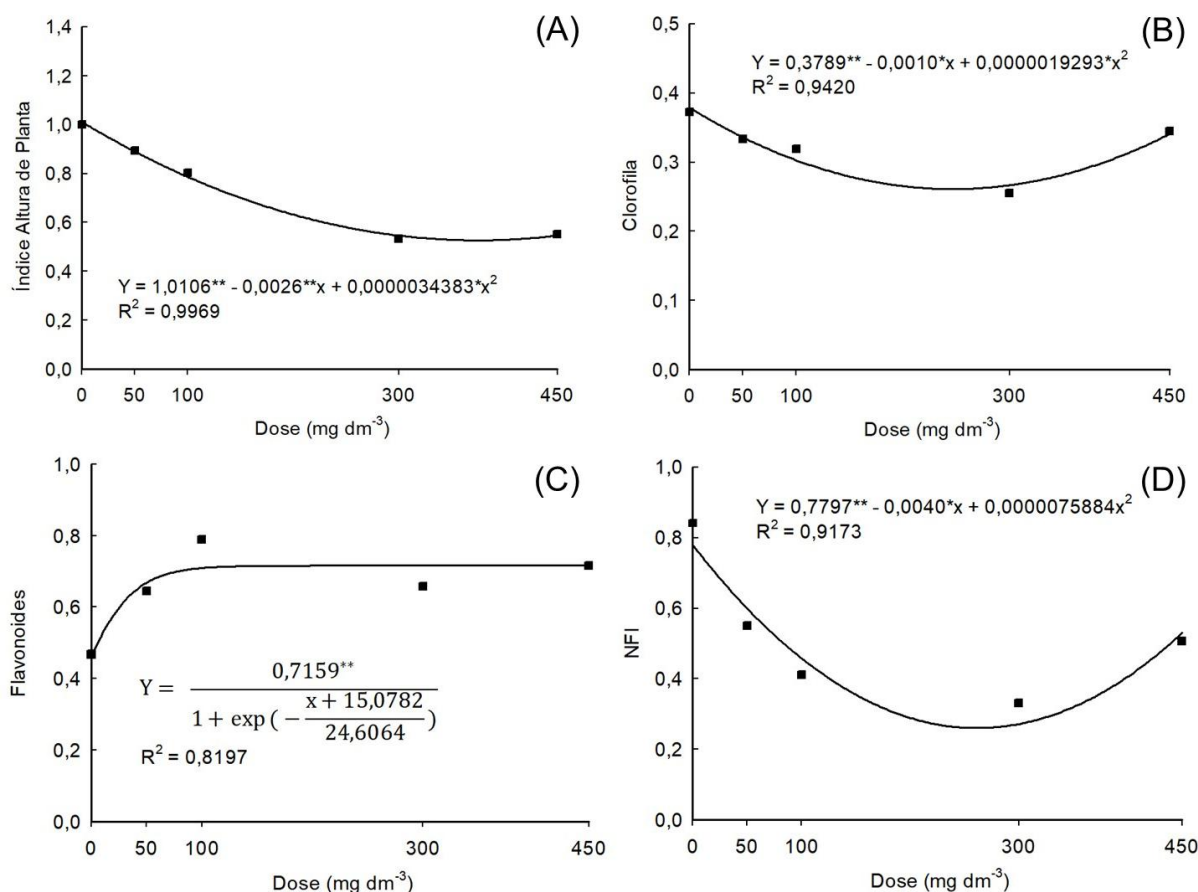
Para as variáveis índice altura de planta e teor de antocianina, houve diferença entre as espécies, entretanto, com resultados opostos (Tabela 8). A couve apresentou maior índice altura de planta, o que pode ser atribuído à menor variação entre a testemunha e os tratamentos submetidos às doses de Zn, indicando menos efeitos pronunciados de fitotoxicidade. Por outro lado, zínia apresentou maior teor de antocianina, comparada ao controle. Os níveis de antocianina aumentam quando as plantas estão expostas à estresses abióticos, como sob estresse por metais pesados, para melhorar as habilidades antioxidantes, quelantes de metais e osmorregulatórias da planta, aumentando assim a tolerância (YAN et al., 2022). Portanto, zínia pode ter acumulado antocianina nos tecidos vegetativos como forma de atenuar os efeitos do estresse por Zn. Para os demais pigmentos, não houve diferenças entre as espécies.

**Tabela 8.** Índices de altura de planta, clorofila, flavonoides, antocianina e índice nitrogênio-flavonoides de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 15 dias após a contaminação com Zn em solo arenoso.

Variáveis	Espécies	
	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.
Índice Altura de Planta	0,81 a	0,70 b
Clorofila	0,33 a	0,32 a
Flavonoides	0,69 a	0,62 a
Antocianina	0,05 b	0,06 a
Índice Nitrogênio-Flavonoides	0,52 a	0,54 a

Médias das espécies seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os efeitos das doses de Zn nas variáveis índice altura de planta, clorofila, flavonoides e índice nitrogênio-flavonoides (NFI) estão apresentados na Figura 6.



**Figura 6.** Índice Altura de Planta (A), Clorofila (B), Flavonoides (C) e Índice Nitrogênio-Flavonoides (D) em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 15 dias após a contaminação com doses de Zn em solo arenoso. Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

A altura das plantas, o teor de clorofila e o índice nitrogênio-flavonoides (NFI) apresentaram comportamento que podem ser explicados por funções polinomiais quadráticas, com ligeiro aumento na dose  $450 \text{ mg dm}^{-3}$  para clorofila e NFI. Já para o teor de flavonoides, o comportamento ajustou-se a uma função sigmoidal, com aumento até a dose de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  e posterior decréscimo e estabilização.

O padrão quadrático observado para clorofila e NFI opõe-se a resposta linear esperada de declínio na síntese de pigmentos fotossintéticos, que ocorre por dano ao mecanismo fotossintético das plantas e competição do  $\text{Zn}^{+2}$  com  $\text{Mg}^{+2}$ , essencial para formação da clorofila (KAUR; GARG, 2021; SHARMA et al., 2020). Tal comportamento foi encontrado em estudo desenvolvido por Sidhu et al. (2020), que avaliaram os efeitos de doses crescentes de Zn ( $100, 250$  e  $500 \text{ mg kg}^{-1}$ ) no crescimento, acúmulo de Zn, pigmentos fotossintéticos, estresse oxidativo e atividade enzimática

antioxidante em *Coronopus didymus* L. e constataram redução progressiva dos teores de clorofila e carotenoides em resposta ao incremento das doses de Zn. O comportamento contrário apresentado por zínia e couve pode indicar, inicialmente, mecanismos adaptativos compensatórios ao estresse ou resposta fisiológica tardia nas doses mais elevadas, sendo necessários estudos adicionais para verificar a perpetuação desse comportamento durante a fase inicial da contaminação e o impacto da produção de biomassa e fitoextração nas respostas iniciais das plantas ao estresse por Zn.

### 3.1.2 Avaliação aos 30 dias

No segundo momento avaliativo, 30 dias após a contaminação do solo e transplântio das mudas, tanto a dose quanto a espécie influenciaram, de forma independente, o índice número de folhas e o teor de clorofila (Tabela 9 e Figura 7). Para os teores de antocianina e flavonoides, os fatores doses e espécie, bem como a interação entre eles, não foram significativos, portanto, não foi possível proceder para a comparação das médias e/ou regressão.

**Tabela 9.** Índices de altura de planta e número de folhas, fitotoxicidade, clorofila e índice nitrogênio-flavonoides de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. 30 dias após a contaminação com Zn em solo arenoso.

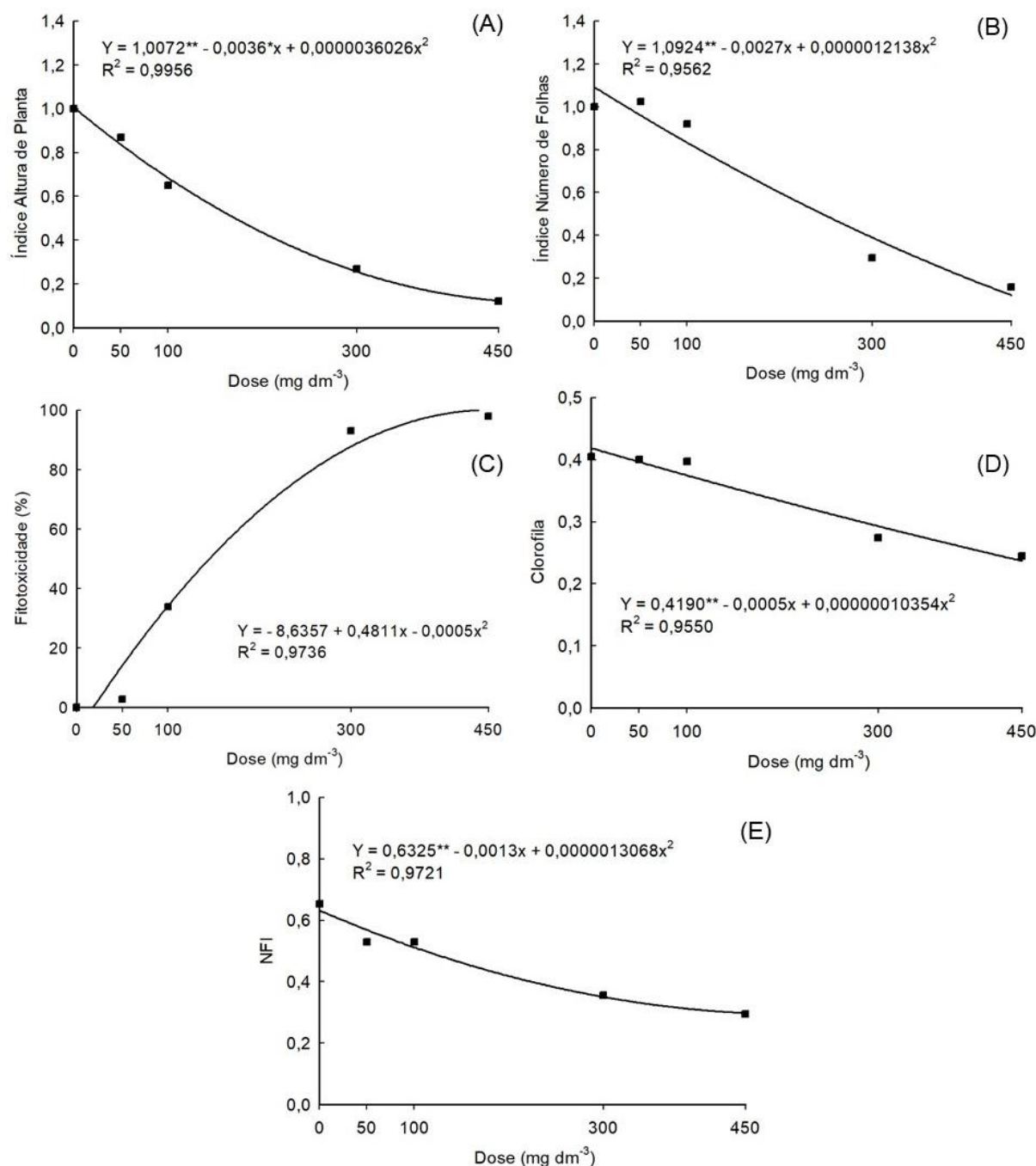
Variáveis	Espécies	
	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.
Índice Altura de Planta	0,59 a	0,57 a
Índice Número de Folhas	0,77 a	0,61 b
Fitotoxicidade (%)	44,37 a	46,62 a
Clorofila	0,29 a	0,20 b
Índice Nitrogênio-Flavonoides	0,73 a	0,62 a

Médias das espécies seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A couve ornamental apresentou maior índice número de folhas e teor de clorofila (Tabela 9). O número de folhas é um fator importante para aumentar a eficiência na captura da radiação solar, que, aliado ao aumento do teor de clorofila, promove maior taxa fotossintética e crescimento. De forma semelhante, Sharma e Mathur (2023), em um estudo que avaliava a eficácia comparativa do acúmulo de Zn usando as plantas ornamentais *Helianthus annuus* L. e *Tagetes erecta* L., constataram

que o número total de folhas aumentou quando o teor de Zn no solo era baixo (10-100 mg kg<sup>-1</sup>), e diminuiu com o aumento da concentração de Zn no solo (300-500 mg kg<sup>-1</sup>).

Ao analisar o efeito simples das doses de Zn, percebe-se que o modelo ajustado para todas as variáveis foi o polinomial quadrático, com coeficiente de determinação acima de 95% ( $R^2 > 0,95$ ) (Figura 7). Para altura de planta, número de folhas, clorofila e NFI houve redução com o aumento das doses de Zn. Em relação à fitotoxicidade, houve aumento com o incremento das doses de Zn.



**Figura 7.** Índice Altura de Planta (A), Índice Número de Folhas (B), Fitotoxicidade (C), Clorofila (D) e Índice Nitrogênio-Flavonoides (E) em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 30 dias após a contaminação com doses de Zn em solo arenoso.

Coefficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

A fitotoxicidade resulta do desequilíbrio entre a produção/liberação de espécies reativas de oxigênio (ROS), geradas excessivamente pela exposição aos poluentes metálicos, e a capacidade de desintoxicação mediada pelos mecanismos de defesa

antioxidante das células vegetais (ASGARI LAJAYER et al., 2019). Portanto, espera-se que a intoxicação aumente com o incremento das doses e do tempo de exposição ao contaminante.

### 3.1.3 Colheita

Ambas as espécies não diferiram quanto aos índices morfológicos e ao teor de Zn no solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) após cultivo em solo arenoso contaminado com doses crescentes de Zn (Tabela 10). Elas diferiram apenas na magnitude da influência da dose sobre as variáveis estudadas (Figura 8).

**Tabela 10.** Índices morfológicos de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. e concentração de Zn no solo arenoso após o cultivo.

Variáveis	Espécies	
	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.
Índice Área Foliar	0,51 a	0,46 a
Índice Massa Fresca Parte Aérea	0,50 a	0,49 a
Índice Massa Fresca Raiz	0,37 a	0,36 a
Índice Massa Fresca Total	0,46 a	0,44 a
Índice Massa Seca Parte Aérea	0,49 a	0,48 a
Índice Massa Seca Raiz	0,38 a	0,42 a
Índice Massa Seca Total	0,47 a	0,48 a
Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	197,71 a	189,70 a

Médias das espécies seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A ausência de diferenças sugere que zínia e couve têm capacidade semelhante de tolerância ou sensibilidade ao Zn no solo. As plantas apresentaram valores médios para índices morfológicos de 0,4542 para couve ornamental e 0,4471 para zínia, os quais são consideravelmente inferiores ao índice de referência da testemunha (1), indicando que o desenvolvimento vegetativo e radicular de ambas espécies foi afetado negativamente pelo Zn.

Em referência a estudos desenvolvidos com outros metais pesados, mas utilizando *Z. elegans* Jacq., Tugbaeva et al. (2022) constataram atraso no crescimento da parte aérea e redução do caule e do comprimento de raiz de zínia cultivada em substrato com solução de  $\text{CuSO}_4$ . Em outro estudo, com *Z. elegans* Jacq. submetida à cultivo em vaso com solo contaminado com doses de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , Panda et al. (2020) perceberam aumento do comprimento e biomassa das raízes e parte aérea em plantas

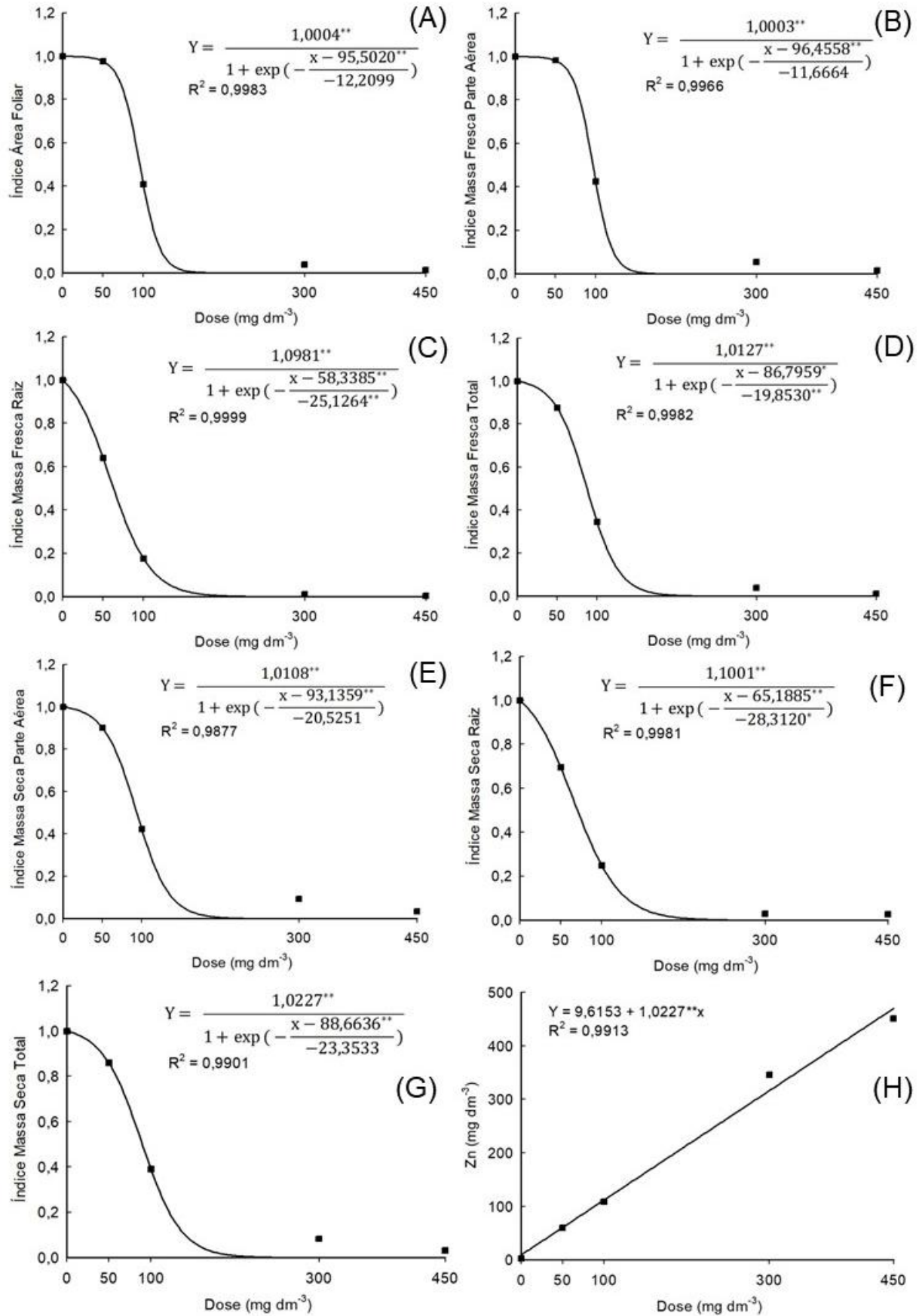
com 30, 45 e 60 dias de idade até a concentração de 25 ppm de Cr, seguido de uma redução gradual com o incremento adicional da concentração de Cr.

No estudo conduzido por Eman Gökseven, Kiran e Ellialtıođlu (2021) para determinar as respostas morfológicas e fisiológicas da couve ornamental frente ao estresse por boro (B), *B. oleracea L. var. acephala DC.* também apresentou redução do peso fresco e seco da raiz e da parte aérea com o aumento das doses de B (0-50 mg kg<sup>-1</sup>). Tais estudos corroboram o comportamento das plantas no presente experimento apresentados frente ao Zn.

De acordo com as doses crescentes de Zn adicionadas ao solo arenoso, as variáveis índice de área foliar (Figura 8A), índice de massa fresca da parte aérea (Figura 8B), índice de massa fresca da raiz (Figura 8C), índice de massa fresca total (Figura 8D), índice de massa seca da parte aérea (Figura 8E) e índice de massa seca total (Figura 8G) apresentaram comportamento sigmoidal, com queda abrupta no desenvolvimento das plantas após a dose 100 mg dm<sup>-3</sup>, culminando na morte dos indivíduos na dose de 450 mg dm<sup>-3</sup>.

A presença de Zn também afetou o desenvolvimento de milho, girassol, mostarda, mamona e jojoba em estudo conduzido por Quronfulah et al. (2023), que verificaram que os tratamentos com altas concentrações de Zn (450-600 mg kg<sup>-1</sup>) apresentaram efeitos tóxicos, evidenciados pela redução no comprimento das raízes e caules e diminuição da biomassa vegetal.

Elevados níveis de Zn no solo podem causar diversas alterações morfofisiológicas e bioquímicas nas plantas, como redução do crescimento, diminuição da taxa fotossintética e respiratória, desequilíbrio na nutrição mineral e aumento na geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), evidenciando a toxicidade do elemento (KAUR; GARG, 2021).



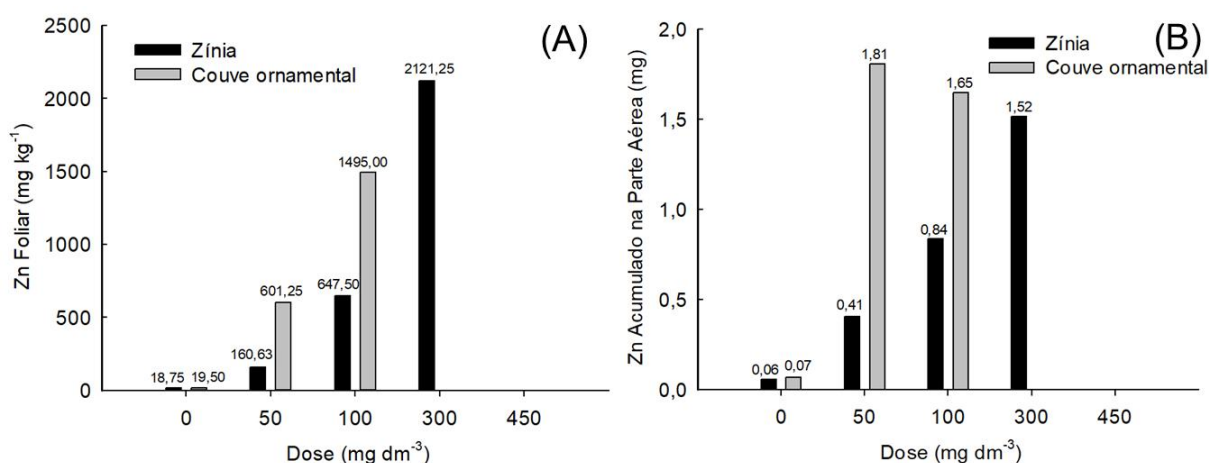
**Figura 8.** Índice Área Foliar (A), Índice de Massa Fresca da Parte Aérea (B), Índice de Massa Fresca da Raiz (C), Índice de Massa fresca Total (D), Índice de Massa Seca

da Parte Aérea (E), Índice de Massa Seca Total (G) e Teor de Zn no solo (H) em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., após cultivo em solo arenoso contaminado com Zn.

Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

Quanto ao teor de Zn no solo após o cultivo de zínia e couve ornamental (Figura 8H), as espécies não diferiram na capacidade de extração. A regressão realizada a partir dos valores médios de Zn encontrados no solo após o cultivo em vaso de cada espécie demonstra que houve um comportamento linear. O teor de Zn no solo de cada planta manteve-se próximo ao adicionado, indicando que a fitoextração foi baixa para as duas espécies.

Na fitorremediação, é desejável que as plantas acumuladoras além de apresentarem crescimento rápido, alto rendimento de biomassa, sistema radicular extenso e sejam fáceis de cultivar e colher, tenham alta capacidade de extração com grande acúmulo de metais nos tecidos aéreos (NNAJI et al., 2023). Sendo assim, a concentração de Zn na parte aérea (Zn foliar) e o Zn acumulado na parte aérea ([Zn] x biomassa) foram investigados para as espécies estudadas (Figura 9).



**Figura 9.** Concentração de Zn na parte aérea (A) e quantidade de Zn acumulado na parte aérea (B) de *Zinnia elegans* Jacq. E *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. em função da dose de Zn aplicada em solo arenoso.

Na dose de 300 mg dm<sup>-3</sup>, a couve não produziu massa seca suficiente para análise, enquanto que, na dose de 450 mg dm<sup>-3</sup>, ambas as espécies não

sobreviveram, portanto, não foi possível coletar e analisar os dados sobre a concentração e acúmulo de Zn nas plantas.

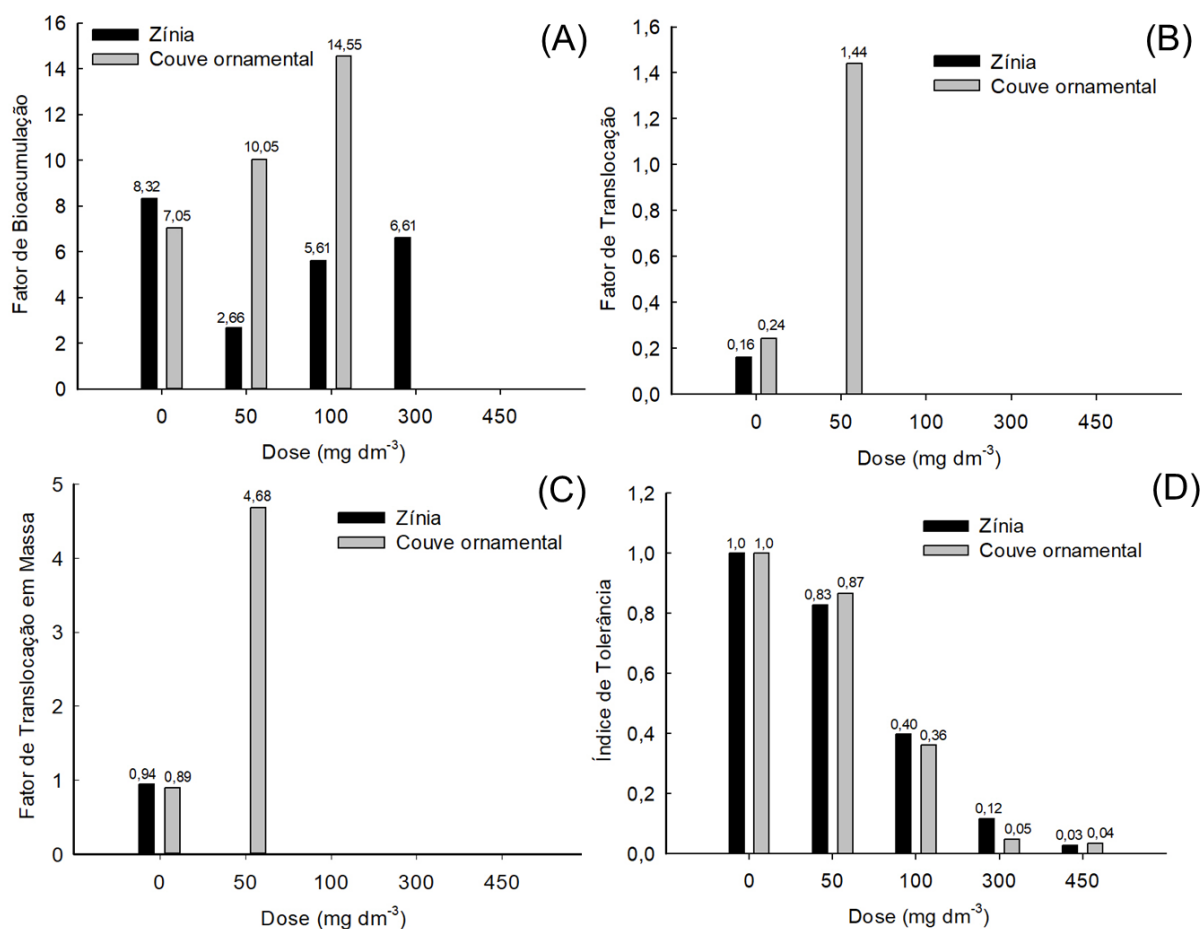
A couve ornamental apresentou maior concentração e acúmulo de Zn na parte aérea que zínia, exceto na dose  $300 \text{ mg dm}^{-3}$ , em que não foi realizada análise para couve (Figura 9). Na dose de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , a concentração foliar e o acúmulo de Zn, em massa, foram 3,7 e 4,4 vezes maior na couve que na zínia, respectivamente. Já na dose de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , a magnitude de superioridade da couve foi um pouco menor, com valores médios de concentração e acúmulo de Zn de 2,3 e 2,0 vezes maior que a zínia, respectivamente. Apesar das diferenças entre espécies e das concentrações foliares elevadas, ambas espécies acumularam diminutos conteúdos de Zn, em mg, na parte aérea das plantas (Figura 9B), provavelmente em decorrência da baixa produção de biomassa.

Além disso, para zínia, a concentração foliar e o acúmulo de Zn nas plantas (Figura 9A e 9B) estão positivamente relacionados ao incremento das doses aplicadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Karimi e Koksal (2023) que investigaram efeitos de níveis de Zn no cultivo de *Calendula officinalis* L. em vaso e perceberam que as concentrações de Zn nas plantas de calêndula aumentaram proporcionalmente aos níveis de Zn aplicados nos tratamentos. Para couve, no entanto, o aumento da concentração foliar (Figura 9A) não está associado ao aumento da absorção de Zn pela planta, como é possível observar pela redução do Zn acumulado (Figura 9B), mas à diminuição da produção de biomassa em decorrência dos efeitos fitotóxicos do Zn, o que fez com que a concentração na planta se elevasse. É possível observar um efeito de dano à couve na dose de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ , onde há redução do Zn absorvido e acumulado, em comparação com a dose de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 9B). O Zn acumulado, portanto, que representa a massa de metal efetivamente extraída, é uma variável mais adequada para selecionar espécies fitorremediadoras do que a concentração foliar isolada, conforme também argumentaram Ribeiro et al. (2018).

As concentrações de Zn na parte aérea de zínia e couve ornamental (Figura 9A) e a quantidade total acumulada (Figura 9B), indicam um potencial de fitoextração baixo quando comparado às espécies hiperacumuladoras estabelecidas na literatura. Enquanto hiperacumuladoras clássicas como *Thlaspi caerulescens* J. Presl & C. Presl, atualmente *Noccaea caerulescens* (J.Presl & C.Presl) F.K.Mey., e *Arabidopsis halleri* (L.) O'Kane & Al-Shehbaz podem apresentar concentrações de Zn em suas partes

aéreas de até 52.000 mg kg<sup>-1</sup> e 26.400 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (KASHEM; SINGH; KUBOTA, 2010; ZHAO; LOMBI; MCGRATH, 2003), as concentrações máximas observadas em zínia (2.121,25 mg kg<sup>-1</sup>) e couve (1.495 mg kg<sup>-1</sup>) neste estudo situam-se consideravelmente abaixo. No entanto, quando se analisam espécies tolerantes à altos teores de Zn no solo, como *C. didymus* L., que após seis semanas de cultivo e exposição a até 500 mg dm<sup>-3</sup> concentrou entre 513 e 1.845 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea e que, por isso, é indicada para recuperação de solos contaminados (SIDHU et al., 2020), e tendo em vista que a maioria das plantas cultivadas apresenta concentrações foliares de Zn entre 30-100 mg kg<sup>-1</sup>, com níveis acima de 300 mg kg<sup>-1</sup> sendo considerados prejudiciais para as plantas (HAMZAH SALEEM et al., 2022; NOULAS; TZIOUVALEKAS; KARYOTIS, 2018), couve e zínia mostram potencial para estudos futuros que considerem o uso de tecnologias capazes de proporcionar resposta em aumento de biomassa e fitoextração das plantas.

Para avaliar a eficiência de acúmulo de Zn nas plantas, a eficiência das plantas no transporte do metal das raízes para a parte aérea e a tolerância das plantas ao Zn, o fator de bioacumulação (FB), o fator de translocação (FT), o fator de translocação em massa (mFT) e o índice de tolerância (IT) foram calculados (Figura 10).



**Figura 10.** Fator de Bioacumulação (A), Fator de Translocação (B), Fator de Translocação em Massa (C) e Índice de Tolerância (D) de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. em função da dose de Zn no solo arenoso.

Como não houve massa seca suficiente para análise de Zn foliar da couve ornamental na dose 300 mg dm<sup>-3</sup> e da couve e da zínia na dose 450 mg dm<sup>-3</sup>, não foi possível calcular o FB, expresso pela relação entre a concentração de Zn na parte aérea e no solo. O FT e o FTm também foram prejudicados, principalmente por causa da baixa quantidade de massa seca de raiz. O maior FB foi o da couve ornamental e ocorreu na dose 100 mg dm<sup>-3</sup>.

É desejável que as plantas utilizadas para fitorremediação apresentem características de acúmulo de metais pesados, com FB >1 e FT >1 (BUSCAROLI, 2017). Para as espécies avaliadas, o FB foi superior ao valor desejável. Além disso, o FB para couve foi maior que para zínia nas doses de 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 10A). No caso do FT e do FTm, no entanto, não é possível afirmar se as plantas foram eficientes em translocar o Zn para a parte aérea, devido às limitações na quantidade de informações geradas, em decorrência da toxicidade do Zn para as plantas. Porém,

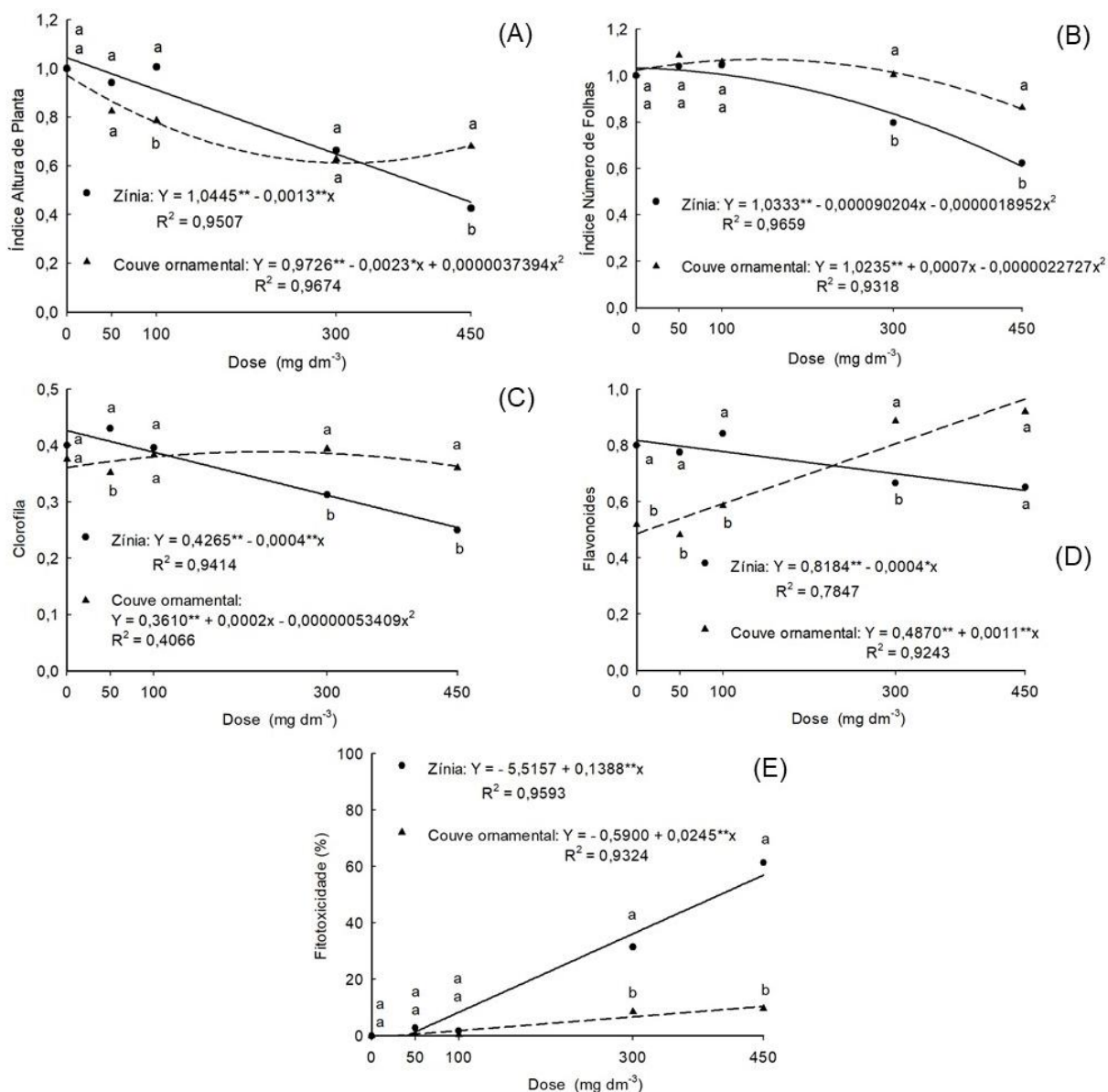
destaca-se na dose  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , o  $FT > 1$  e o FTm de 4,68 para couve que indica eficiência na translocação do metal para a parte aérea. Esses resultados de FB e FT sugerem que a couve ornamental é capaz de tolerar apenas baixas doses de Zn, não sendo recomendadas para estratégias de fitorremediação, nas condições avaliadas neste trabalho.

O índice de tolerância (IT) demonstra como as doses de Zn afetaram a produção de biomassa das plantas em relação à testemunha, sendo que valores mais próximos a 1 indicam maior tolerância. Na Figura 10D, é possível observar que na dose de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , ambas as espécies apresentaram um índice de tolerância (IT) próximo a 1, indicando uma boa tolerância ao Zn. Com o aumento das doses de Zn, o IT diminuiu para ambas as espécies, sugerindo que a tolerância diminuiu à medida que a concentração do metal no solo aumenta. Em doses mais altas ( $300$  e  $450 \text{ mg dm}^{-3}$ ), o IT foi próximo de zero, indicando uma redução expressiva na capacidade de suportar a toxicidade do zinco, o que é coerente com as médias encontradas para as variáveis biométricas analisadas neste trabalho. As espécies estudadas, portanto, não são boas candidatas a fitorremediar solos arenosos contaminados por Zn.

## 3.2 Solo argiloso

### 3.2.1 Avaliação aos 15 dias

Houve interação entre os fatores dose x espécie para as variáveis índice altura de planta, índice número de folhas, clorofila, flavonoides e fitotoxicidade, avaliando-se os efeitos conjuntos dos fatores, no solo argiloso, aos 15 dias após contaminação (Figura 11). Para as variáveis antocianina e índice nitrogênio-flavonoides, os fatores dose e espécie, bem como a interação entre eles, não foram significativos e, por isso, não se procederam comparações de médias ou análises de regressão.



**Figura 11.** Índice Altura de Planta (A), Índice Número de Folhas (B), Clorofila (C), Flavonoides (D) e Fitotoxicidade (E), em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 15 dias após a contaminação com doses de Zn em solo argiloso.

Médias das espécies seguidas de mesma letra dentro de cada dose não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

Para índice altura de planta e clorofila (Figuras 11A e 11C), zínia apresentou comportamento linear de decréscimo nas doses 300 e 450  $\text{mg dm}^{-3}$ , enquanto couve ornamental apresentou comportamento quadrático, com altura de planta e teor de clorofila superior à zínia na dose de 450  $\text{mg dm}^{-3}$ . Ao analisar o índice número de folhas (Figura 11B), em que ambas as espécies apresentaram comportamento

quadrático, observa-se que a couve ornamental tende a diminuir de forma menos acentuada, enquanto zínia apresenta uma diminuição expressiva nas doses mais altas de Zn.

No teor de flavonoides e fitotoxicidade, o comportamento das espécies apresentou uma relação linear. A couve demonstrou menor intoxicação pelo Zn nas maiores doses e aumento do teor de flavonoides. Flavonoides são compostos relacionados à proteção contra estresses ambientais, como a exposição à metais pesados, que atuam inibindo a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) ou desintoxicando ROS geradas durante o estresse, aliviando assim os danos oxidativos (PATIL et al., 2024). O aumento de flavonoides, portanto, caracterizou-se como um mecanismo de defesa da couve ornamental para atenuar o estresse por Zn. Estudos desenvolvidos por Kaur et al. (2018), utilizando *Brassica juncea* L. (mostarda) submetida ao estresse por Cd, e por Rehman et al. (2023), utilizando *B. oleracea* var. *botrytis* (couve-flor) submetida ao estresse por Cd e Zn, também relataram o aumento da produção de flavonoides como resposta de defesa exibida pela planta.

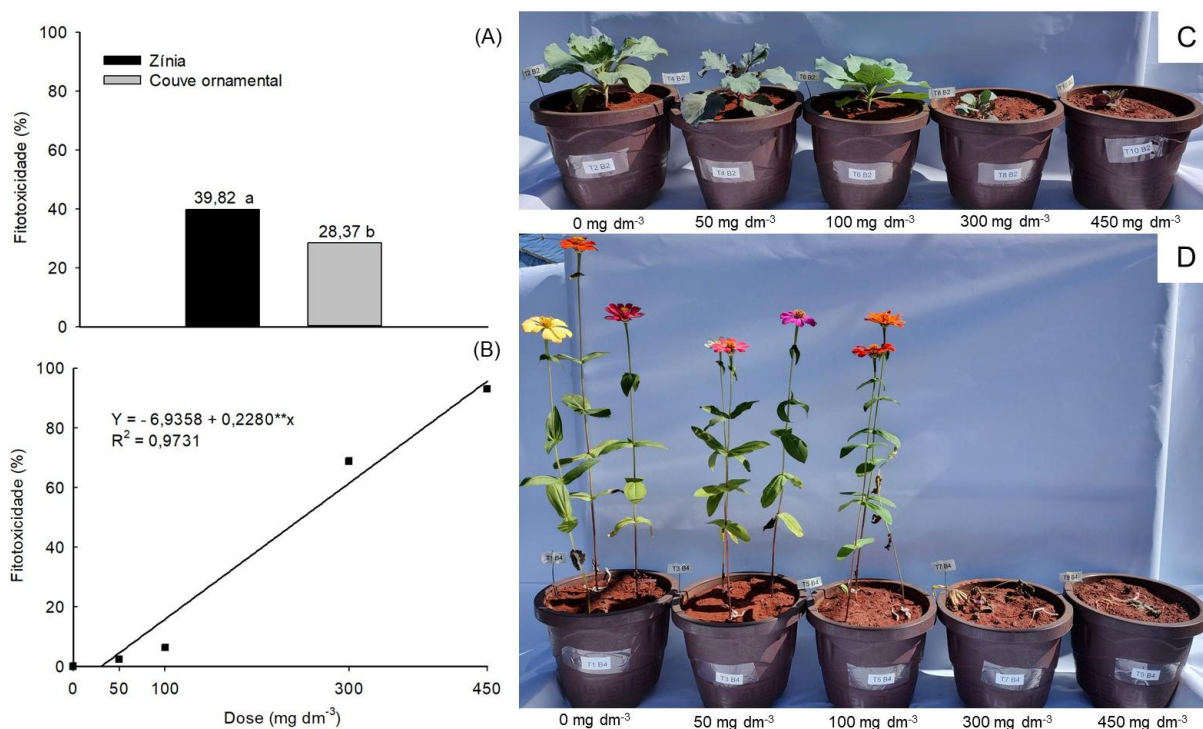
Destaca-se ainda, nesses resultados, que os sintomas de intoxicação exibidos pela couve, aos 15 dias após a contaminação, foram cerca de quatro e seis vezes menores que para zínia, nas doses de 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>.

Esses resultados reforçam a maior tolerância da couve ao estresse por Zn. As espécies do gênero *Brassica*, como a couve ornamental, mostram tolerância e potencial fitorremediador devido aos mecanismos fisiológicos de defesa enzimático e não enzimático (ex.: carotenoides, poliaminas, fenóis, prolinas e flavonoides) eficientes, que amenizam danos oxidativos causado por espécies reativas de oxigênio (ROS) geradas por metais tóxicos nos tecidos vegetais (BORTOLOTTI; BARON, 2022).

### 3.2.2 Avaliação aos 30 dias

Não houve interação dose x espécie para fitotoxicidade aos 30 dias após a contaminação do solo. A couve ornamental apresentou maior tolerância às doses crescentes de Zn em solo argiloso (Figura 12). Constatou-se aumento linear dos sintomas de intoxicação, com média de 28,37% de fitotoxicidade. Apesar da intoxicação severa, as plantas sobreviveram, mesmo nas doses mais altas. Os sintomas apresentados incluíram clorose e redução do porte na dose de 300 mg dm<sup>-3</sup> e necrose na dose 450 mg dm<sup>-3</sup>. Comportamento de maior sensibilidade ao Zn foi encontrado nas plantas de zínia, que apresentaram sintomas drásticos de clorose,

encarquilhamento, tombamento, necrose e morte nas doses mais altas (300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>).



**Figura 12.** Fitotoxicidade média em *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. (A) em função da dose de Zn aplicada em solo argiloso (B), 30 dias após a contaminação. Comparação visual dos tratamentos em couve (C) e zínia (D). Médias das espécies seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

O modelo de regressão melhor ajustado às variáveis índice altura de planta (Figura 13A), índice número de folhas (Figura 13B), clorofila (Figura 13C), antocianina (Figura 13E) e índice de nitrogênio-flavonoides (Figura 13F) foi o polinomial linear, sendo que os maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) estão relacionados ao índice altura de plantas da zínia e à antocianina da couve ornamental, com  $R^2$  de 0,9708 e 0,9961, respectivamente.

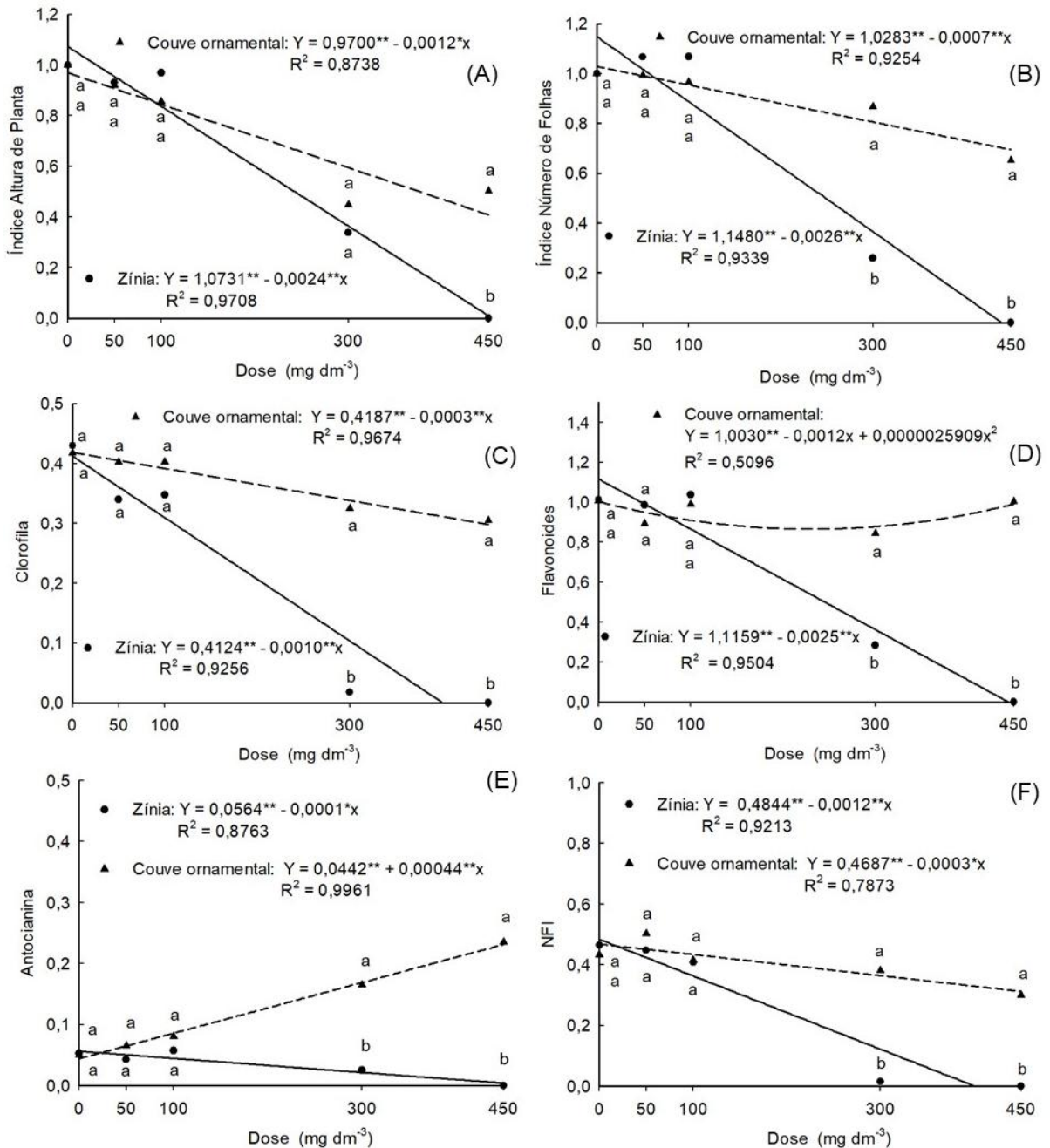
Em relação à altura de plantas, número de folhas, clorofila e índice nitrogênio-flavonoides, observou-se redução de acordo com o aumento das doses de Zn, principalmente para zínia, que demonstrou maior declínio nas doses de 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>, atingindo valor zero devido à morte das plantas na dose 450 mg dm<sup>-3</sup>. Resultado

similar foi observado por Singh et al. (2024), que constataram redução significativa de clorofila a, clorofila b e carotenoides em mudas de zínia submetidas a  $\text{AgNO}_3$  e  $\text{ZnSO}_4$ .

Tal redução se deve ao efeito fitotóxico das altas concentrações de Zn, que afetam vários parâmetros fisiológicos e bioquímicos nas plantas, como redução do crescimento, da taxa fotossintética e respiratória, clorose, danos às membranas celulares, degradação de proteínas, desequilíbrio entre espécies reativas de oxigênio (ROS) e antioxidantes, induzindo, por fim, a morte celular (KAUR; GARG, 2021; WEI et al., 2021). A zínia demonstra um comportamento menos tolerante, sendo, portanto, mais afetada pelo efeito fitotóxico do Zn.

Para antocianina, houve aumento considerável do teor em couve com o aumento das doses de Zn. Em condições desfavoráveis, como estresses abióticos causados por metais pesados, a síntese de antocianinas pode ser induzida para eliminar o excesso de espécies reativas de oxigênio (ROS) e fornecer proteção antioxidante (NAING; KIM, 2021). As antocianinas, sendo assim, desempenharam um papel de atenuação e melhora da tolerância das plantas de couve ao estresse por Zn.

Apenas a variável flavonoides da couve ornamental apresentou modelo polinomial quadrático, porém com baixo ajuste ( $R^2 = 0,5096$ ), possivelmente devido à grande variabilidade genética das plantas, que apresentaram diferentes concentrações de flavonoides. A zínia apresentou comportamento linear do teor de flavonoides, com a mesma tendência observada para número de folhas e clorofila.



**Figura 13.** Índice Altura de Planta (A), Índice Número de Folhas (B), Clorofila (C), Flavonoides (D), Antocianina (E) e Índice Nitrogênio-Flavonoides (F) em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., 30 dias após a contaminação com doses de Zn em solo argiloso.

Médias das espécies seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

### 3.2.3 Colheita

Não houve interação entre os fatores dose x espécie para os índices morfológicos, os quais foram influenciados de forma independente pelo aumento das doses de Zn no solo argiloso e pelas espécies remediadoras. Para os índices área foliar, massa fresca da parte aérea e massa fresca total, verificou-se superioridade da couve ornamental (Tabela 11).

A alta produção de biomassa, sistema radicular profundo, crescimento rápido e eficiência na absorção e transporte de metais pesados para a parte aérea são características desejáveis quando se busca espécies fitorremediadoras (PRIYA et al., 2023). Dessa forma, a couve ornamental parece exibir vantagem em relação a zínia, o que não se refletiu na extração de Zn do solo, já que ambas as espécies não diferiram.

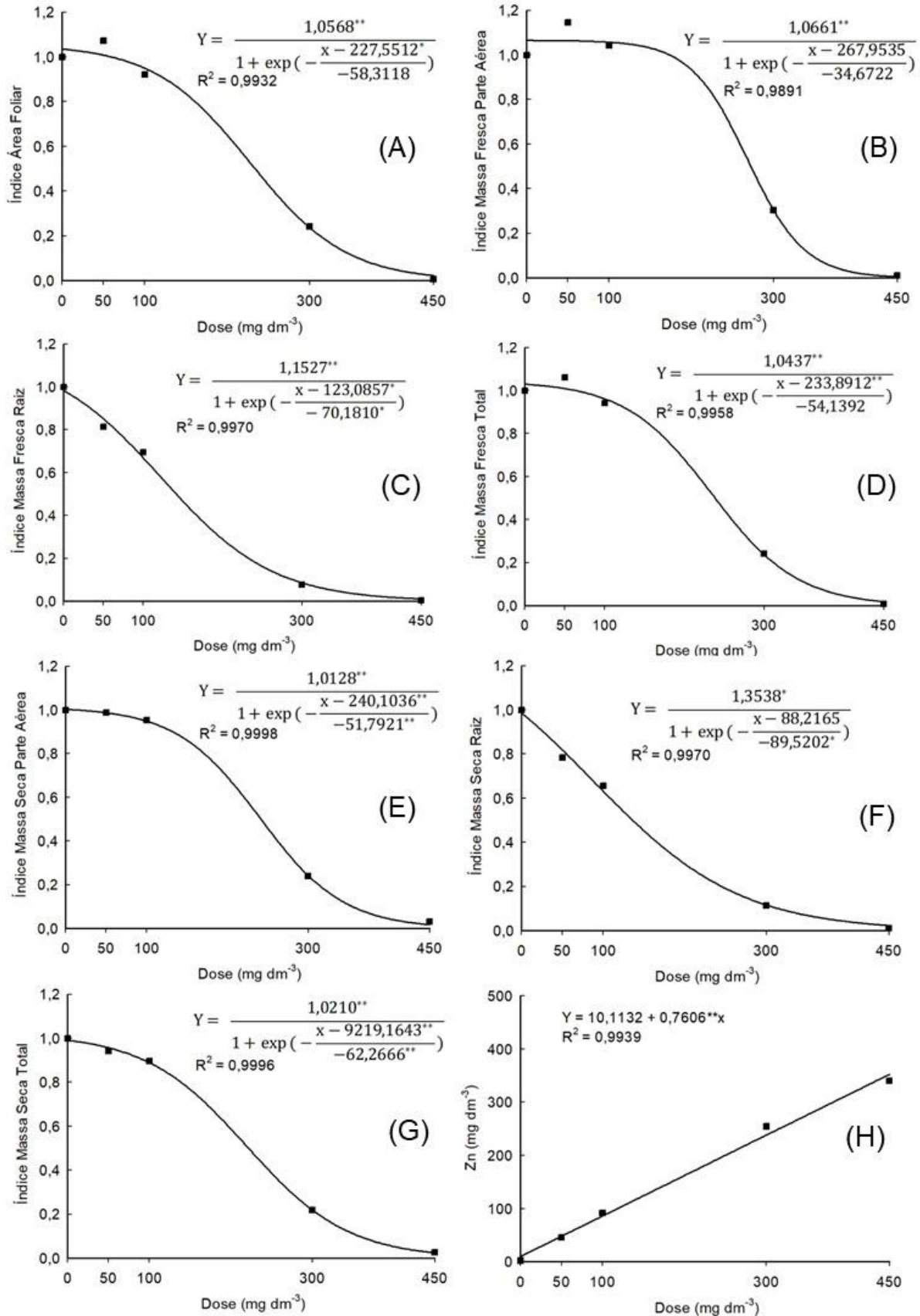
**Tabela 11.** Índices morfológicos de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. e concentração de Zn no solo argiloso após o cultivo em solo contaminado com doses de Zn.

Variáveis	Espécies	
	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> DC.	<i>Zinnia elegans</i> Jacq.
Índice Área Foliar	0,75 a	0,55 b
Índice Massa Fresca Parte Aérea	0,84 a	0,56 b
Índice Massa Fresca Raiz	0,51 a	0,53 a
Índice Massa Fresca Total	0,75 a	0,55 b
Índice Massa Seca Parte Aérea	0,71 a	0,58 a
Índice Massa Seca Raiz	0,49 a	0,54 a
Índice Massa Seca Total	0,66 a	0,57 a
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	146,43 a	147,60 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Para as variáveis morfológicas, o ajuste das regressões que melhor estimou o efeito das doses de Zn no comportamento das espécies foi o sigmoidal, com funções sigmóides de três parâmetros (Figura 14). Observou-se diminuição nos índices de massa fresca e seca de parte aérea, raiz e total, bem como da área foliar, com o aumento das doses de Zn. O efeito do Zn fica mais pronunciado nas doses elevadas, com redução abrupta das variáveis avaliadas. A absorção excessiva de Zn pode se manifestar por meio da redução do crescimento e do rendimento, com a presença de sintomas como clorose e diminuição da biomassa das raízes e da parte aérea (EJAZ et al., 2023).

As espécies apresentaram comportamento semelhante para os valores de Zn extraído, em que o teor de Zn no solo seguiu uma tendência linear (Figura 14H). Os teores de Zn no solo após o cultivo de zínia e couve ornamental encontram-se próximos ao que foi adicionado via  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , indicando que as plantas não foram eficientes em extrair Zn do solo argiloso.



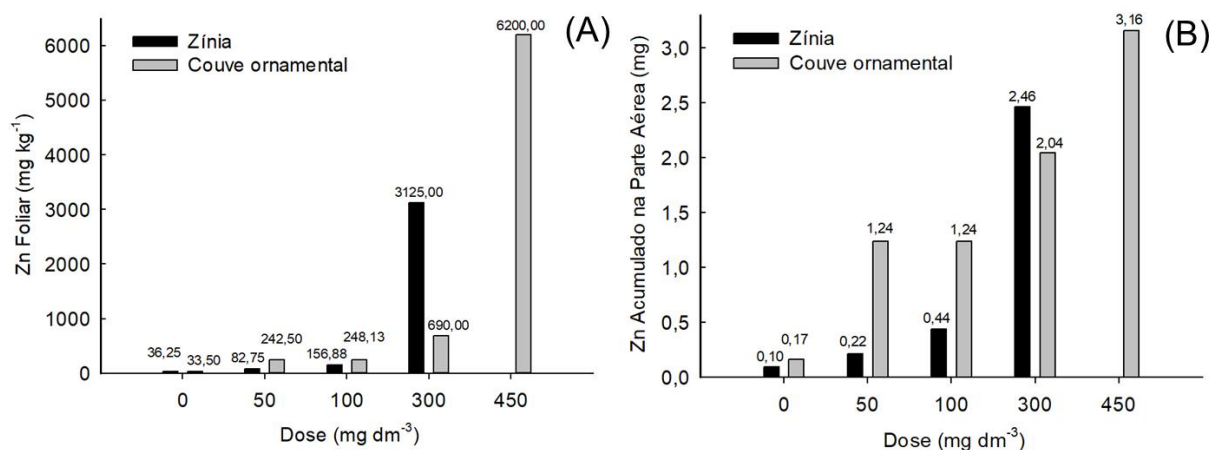
**Figura 14.** Índice de Área Foliar (A), Índice de Massa Fresca da Parte Aérea (B), Índice de Massa Fresca da Raiz (C), Índice de Massa fresca Total (D), Índice de Massa

Seca da Parte Aérea (E), Índice de Massa Seca Total (G) e Teor de Zn no solo (H) em plantas de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., após cultivo em solo argiloso contaminado com Zn.

Coeficientes acompanhados por um e dois asteriscos são significativos ao nível de 5% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ).

O aumento das doses de Zn resultou em maior concentração do metal na parte aérea das plantas (Figura 15A). Resultado semelhante foi encontrado por Chaudhry et al. (2020) que exploraram o acúmulo, tolerância, toxicidade, translocação e acúmulo em nível celular de Zn em *B. juncea* L. e constataram que a concentração de Zn nos tecidos foliares aumentou conforme elevação da concentração de Zn (0-160 mg L<sup>-1</sup>). A couve ornamental apresentou maior concentração foliar para as doses de 50, 100 e 450 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 15A) e ainda maior capacidade de acúmulo nas doses de 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup>, nas plantas sobreviventes (Figura 15B). De forma surpreendente, a zínia absorveu e acumulou mais Zn na dose de 300 mg dm<sup>-3</sup>. Embora zínia tenha absorvido maior quantidade de Zn na dose de 300 mg dm<sup>-3</sup>, a quantidade de 2,46 mg extraída por vaso, mostra-se insuficiente para reduzir o teor de Zn no solo. Uma retirada de 2,46 mg de Zn em um vaso com 5 kg de solo, reduziria o teor de Zn em 0,492 mg kg<sup>-1</sup>. Essa redução é irrelevante na dose 300 mg dm<sup>-3</sup>, onde o teor residual permaneceria aproximadamente 299,5 mg dm<sup>-3</sup>. Para a dose de 450 mg dm<sup>-3</sup>, em que foi realizada análise apenas da couve, a extração também é mínima, com diminuição de 0,632 mg kg<sup>-1</sup> no teor de Zn, resultando em 449,36 mg dm<sup>-3</sup>. Sendo assim, apesar dos teores foliares elevados, nas condições experimentais adotadas, a baixa eficiência de extração limita o potencial prático do emprego da zínia e da couve como espécies fitoextratoras.

A baixa eficiência da fitoextração observada pode ser atribuída à reduzida produção de biomassa pelas plantas. Esse resultado, contudo, não reflete necessariamente o potencial genético das espécies avaliadas, mas, possivelmente, as condições experimentais. É importante destacar que o desenvolvimento dessas plantas é influenciado pela intensidade de luz e o fotoperíodo (LIU et al., 2022; WAHOCHO et al., 2016). Sendo assim, o cultivo em outras condições fotoperiódicas poderia ser mais favorável ao crescimento vegetativo e induzir diferentes respostas ao contaminante.



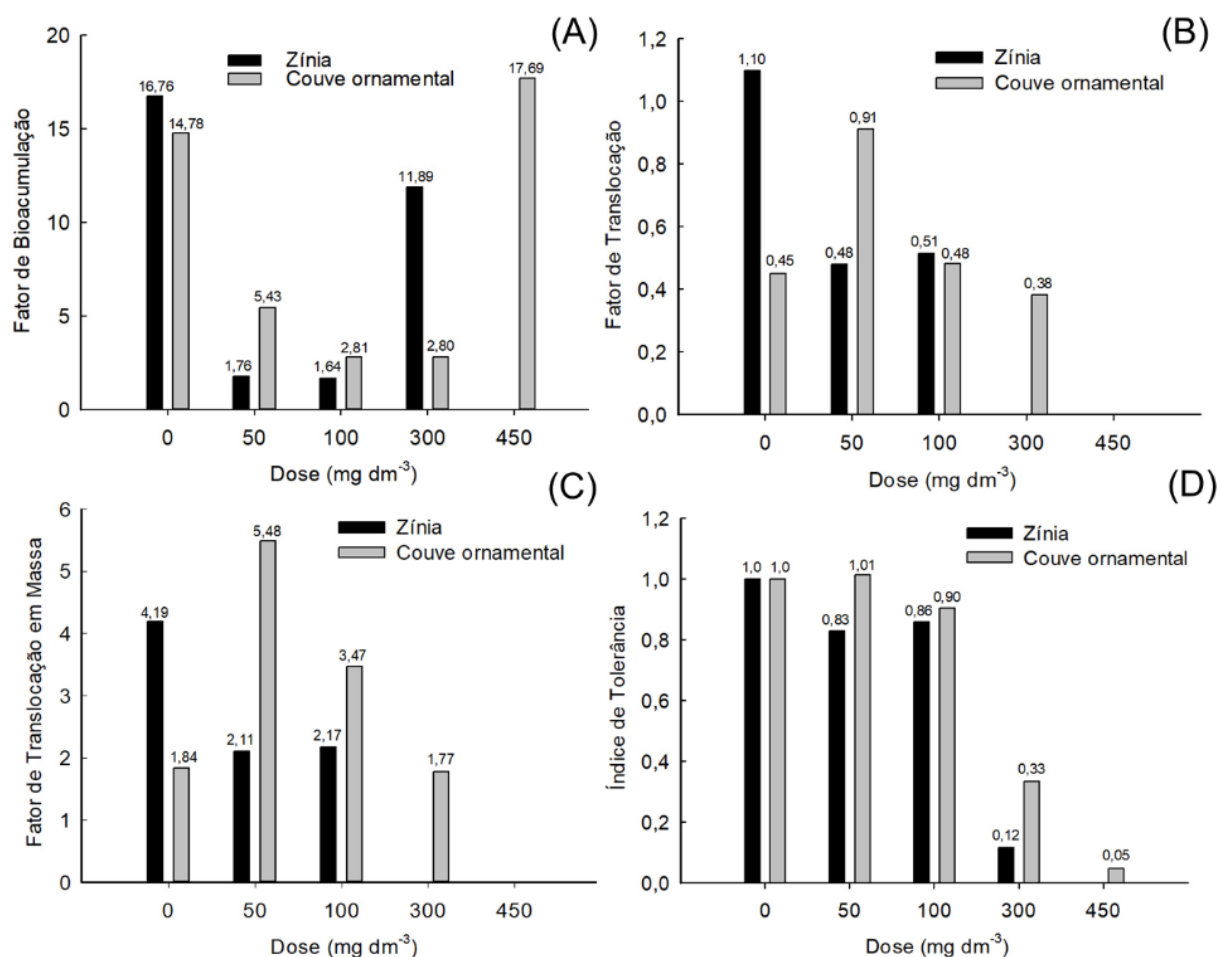
**Figura 15.** Concentração de Zn na parte aérea (A) e quantidade de Zn acumulado na parte aérea (B) de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC., em função da dose de Zn aplicada em solo argiloso.

Os valores máximos de teor de Zn foliar encontrados para zínia (3.125 mg kg<sup>-1</sup>) e couve (6.200 mg kg<sup>-1</sup>) classificaria ambas como boas candidatas para fitorremediação (Figura 15A), porém quando se analisa a quantidade de metal extraído (Figura 15B), verifica-se que a alta concentração foliar não se traduz em remoção significativa do contaminante do solo.

Segundo definição clássica, proposta por Baker e Brooks (1989), plantas hiperacumuladoras de Zn, muito almejadas para fitorremediação, são aquelas capazes de acumular mais de 10.000 mg kg<sup>-1</sup> em suas partes aéreas quando cultivadas em um ambiente natural. Outros pesquisadores, como Van der Ent et al. (2013), no entanto, sugerem que plantas que acumulam Zn em tecidos aéreos acima de 3.000 mg kg<sup>-1</sup> já demonstram resposta adaptativa anormal à presença do metal pesado, sendo classificadas como notáveis para estudos de fitorremediação. Taghizadeh et al. (2018) investigando o pré-tratamento de sementes com ácido salicílico na tolerância e capacidade de remediação de *B. oleracea* var. *acephala* sob estresse por Pb e Zn (0, 50, 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>) identificou um acúmulo de Zn de 1.085,1 mg kg<sup>-1</sup> em peso seco e classificou a espécie como promissora para fitorremediação. Tendo em vista essas variáveis, e que a extração máxima de metal foi 0,492 mg kg<sup>-1</sup> para zínia e 0,632 mg kg<sup>-1</sup> para couve, as espécies foram eficientes em concentrar Zn na parte aérea nas doses 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>, mas não foram eficientes em extrair o metal do solo. Recomenda-se, portanto, o desenvolvimento de pesquisas para validar a consistência dos comportamentos apresentados neste estudo, aprofundar na

investigação de processos fisiológicos, já que o acúmulo de metais pesados é uma característica fisiológica complexa determinada pela expressão conjunta de mecanismos de absorção, transporte, distribuição e acúmulo em diferentes partes da planta (GUPTA; RAM; KUMAR, 2016), e compreender se a baixa extração do Zn relaciona-se com a fisiologia/genética das plantas empregadas ou com a baixa produção de biomassa decorrente das condições experimentais adotadas.

A fim de comparar o comportamento das espécies em relação ao Zn foram calculados os seguintes índices, apresentados na Figura 16, Fator de bioacumulação (FB), fator de translocação (FT), fator de translocação em massa (FTm) e índice de tolerância (IT).



**Figura 16.** Fator de Bioacumulação (A), Fator de Translocação (B), Fator de Translocação em Massa (C) e Índice de Tolerância (D) de *Zinnia elegans* Jacq. e *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. em função da dose de Zn no solo argiloso.

O fator de bioacumulação (FB) e o fator de translocação (FT) são importantes

para determinar a eficiência do processo de fitoextração. Espera-se que plantas com mais de um FT e FB ( $FT > 1$  e  $FB > 1$ ) sejam adequadas para fitoextração de metais pesados (SHARMA et al., 2023). O FB da couve ornamental é superior ao da zínia nas doses de 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 16A), o que indica que a couve foi mais eficiente na absorção de Zn. Na dose de 450 mg dm<sup>-3</sup>, não foi possível calcular o FB da zínia devido à ausência de biomassa suficiente para análise foliar. Quando cultivadas com 300 mg dm<sup>-3</sup> de Zn no solo, destaca-se o elevado FB da zínia, o que concorda com os dados de Zn foliar e Zn acumulado para essa dose (Figura 15).

Quanto ao FT, a couve ornamental apresentou superioridade em relação à zínia apenas na dose de 50 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 16B). Nas doses de 300 e 450 mg dm<sup>-3</sup>, também não foi possível obter dados de FT para a zínia devido à falta de biomassa das raízes. Os resultados encontrados para FT são inferiores a um ( $FT < 1$ ) para ambas espécies em todas as doses de Zn estudadas, o que significa que as plantas não foram eficientes em translocar o metal da raiz para a parte aérea. No entanto, a couve foi a que mais se aproximou do valor desejável ( $TF > 1$ ), chegando a 0,91 na dose de 50 mg dm<sup>-3</sup>.

Ao analisar o FTm, nota-se que o comportamento da couve foi diferente do exibido para o FT (Figuras 16B e 16C). Houve redução gradativa do acúmulo de Zn a partir da dose de 50 mg dm<sup>-3</sup>, que apresentou a maior quantidade de metal extraído. Esse comportamento é um indicativo dos danos fitotóxicos do Zn causados à planta, que reduziu a produção de biomassa e prejudicou a extração do metal.

Em relação ao índice de tolerância (IT), a couve ornamental exibiu um índice maior do que a zínia em todas as doses de Zn aplicado (Figura 16C). Este resultado corrobora as informações encontradas nos índices/variáveis determinados neste trabalho, que indicaram maior tolerância da couve, notadamente até a dose de 100 mg dm<sup>-3</sup> (Figuras 11, 12 e 13 e Tabela 11).

Recomenda-se o desenvolvimento de mais pesquisas para investigar os detalhes fisiológicos, genéticos e ambientais que influenciam na extração de Zn por zínia e couve ornamental.

Cabe ressaltar que, embora couve tenha apresentado maior tolerância e acúmulo de Zn na parte aérea, os resultados observados no presente estudo não convergem para indicação como espécie fitorremediadora, uma vez que não houve biomassa suficiente para extrair quantidades consideráveis de Zn do solo. Recomenda-se, portanto, que estudos posteriores com couve ornamental utilizem

tecnologias capazes de proporcionar resposta em biomassa da planta, como aditivos (ex.: fertilizantes, corretivos, amenizantes, quelantes) e microrganismos (ex.: bactérias promotoras de crescimento vegetal, fungos micorrízicos arbusculares) ou selecionem cultivares mais produtivas e aptas à fitoextração.

No estudo de Shehzad et al. (2023), por exemplo, é destacado que as interações entre microrganismos e espécies de *Brassicás* auxiliam no crescimento e sobrevivência bem-sucedida em solos contaminados, atuando na mobilização/imobilização, desintoxicação, transformação e alteração da biodisponibilidade dos metais.

Chunwichit et al. (2024) avaliaram o potencial de fitorremediação da planta ornamental *Tagetes erecta* L. para Cd e Zn em função da aplicação de vermicomposto, biodigestato e vermicomposto + biodigestato no solo e observaram benefícios, como o aumento de biomassa, do número de flores e das quantidades de Cd e Zn acumulados nas raízes.

Em outro estudo, também investigando fitorremediação de Cd e Zn, Hao et al. (2012) constataram que tanto o uso de esterco suíno como KCl aumentou altura de planta, o diâmetro da flor, a biomassa e a translocação dos metais para a parte aérea em girassol ornamental (*Helianthus annuus* L.).

Por fim, Šutković et al. (2024), avaliando, por meio da análise da expressão gênica, variedades de *B. oleracea* var. *acephala* submetidas ao estresse por Cd, identificaram diferentes níveis de expressão dos genes associados à resposta ao metal pesado e puderam distinguir a variedade mais tolerante e adequada para êxito da fitorremediação.

A exploração de tais tecnologias em trabalhos futuros pode elucidar questões importantes e aprimorar a fitorremediação de elementos tóxicos em áreas contaminadas.

#### 4. Conclusões

O aumento das doses de Zn influenciou negativamente a produção de biomassa foliar e radicular das plantas em ambos os solos.

As espécies não foram eficientes em extrair Zn dos solos.

O aumento das doses de Zn proporcionou aumento da concentração foliar, mas não necessariamente maior acúmulo do metal na parte aérea.

*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. (couve ornamental) apresentou melhores parâmetros morfofisiológicos e tolerância, sendo indicada para continuidade dos estudos.

Recomenda-se que pesquisas futuras com couve ornamental otimizem as práticas de cultivo, com o uso de aditivos no solo ou seleção de variedades mais aptas.

## Referências

- ABDULLAHÍ, N. et al. A review of heavy metals accumulation and control in active agricultural soil. **Turkish Journal of Food and Agriculture Sciences**, v. 5, n. 1, p. 7–18, 2023.
- AFROUSHEH, M. et al. Salicylic Acid Alleviates the Copper Toxicity in *Zinnia elegans*. **Journal of Ornamental plants**, v. 5, n. 1, p. 51–59, 2015.
- AL-NAJAR, H.; SCHULZ, R.; RÖMHELD, V. Phytoremediation of thallium contaminated soils by brassicaceae. **Environmental Chemistry: Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems**, n. Green, p. 187–196, 2005.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDARISTA UTOMO, A.; MANGKOEDIHARDJO, S. Preliminary Assessment of Mixed Plants for Phytoremediation of Chromium Contaminated Soil. **Current World Environment**, v. 13, n. Special issue 1, p. 22–24, 2018.
- ASGARI LAJAYER, B. et al. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 9, p. 8468–8484, 2019.
- BADAWY, E. S. M. et al. Effect of mycorrhizal fungi (AMF), brassinosteroids and sodium silicate on vegetative growth, flower production and pb concentration of zinnia (*Zinnia elegans*) plant under pb stress. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 4, p. 157–174, 2017.
- BAHMANZADEGAN JAHROMI, M. J. et al. New approach of antioxidant properties of *Zinnia elegans* using bioremediation of Pb-contaminated soils. **Bioremediation Journal**, v. 27, n. 4, p. 345–362, 2023.
- BAKER, A J. M.; BROOKS, R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, v. 1, n. 2, p. 81–126, 1989.

BALAFREJ, H. et al. Zinc hyperaccumulation in plants: A review. **Plants**, v. 9, n. 5, 2020.

BILMAYER, A. F. et al. Phytoremediation Assessment of *Mentha crispa* L. in Zinc-Contaminated Oxisols: Tolerance and Accumulation Dynamics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 0, n. 1, p. 2215–2230, 2024.

BORTOLOTTI, G. A.; BARON, D. Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. **Environmental Advances**, v. 8, n. February, p. 100204, 2022.

BRASIL. Resolução N° 420 De 28 De Dezembro De 2009. **Cosenho Nacional Do Meio Ambiente (Conama)**, p. 16, 2009.

BUSCAROLI, A. An overview of indexes to evaluate terrestrial plants for phytoremediation purposes (Review). **Ecological Indicators**, v. 82, n. June, p. 367–380, 2017.

CARVALHO, C. F. M. DE et al. Phytoremediation of barium-affected flooded soils using single and intercropping cultivation of aquatic macrophytes. **Chemosphere**, v. 214, p. 10–16, 2019.

CHAUDHRY, H. et al. Indian Mustard *Brassica juncea* efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 23, n. November 2019, p. 101489, 2020.

CHEN, W.-T. et al. Distribution of cadmium and its effect on growth of *Zinnia elegans*. **Taiwania**, v. 46, n. 4, p. 295–306, 2001.

CHUNWICHIT, S. et al. Influence of soil amendments on phytostabilization, localization and distribution of zinc and cadmium by marigold varieties. **Science of the Total Environment**, v. 919, n. January, p. 170791, 2024.

CUI, S. et al. Effects of exogenous chelators on phytoavailability and toxicity of Pb in *Zinnia elegans* Jacq. **Journal of Hazardous Materials**, v. 146, n. 1–2, p. 341–346, 2007.

DEEPIKA; HARITASH, A. K. Phytoremediation potential of ornamental plants for

heavy metal removal from contaminated soil: a critical review. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 64, n. 5, p. 709–734, 2023.

EHSAN, N. et al. Remediation of heavy metal-contaminated soil by ornamental plant Zinnia (*Zinnia elegance* L.). **Asian Journal of Chemistry**, v. 28, n. 6, p. 1338–1342, 2016.

EJAZ, U. et al. Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, n. May, p. 1–17, 2023.

EMAN GÖKSEVEN, Ş. B.; KIRAN, S.; ELLİALTIOĞLU, Ş. Ş. Determination of Morphological and Physiological Changes of Ornamental Cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) against Boron Toxicity in Phytoremediation. **Horticultural Studies**, v. 38, n. 1, p. 29–38, 2021.

EMAN GÖKSEVEN, Ş. B.; KIRAN, S.; ELLİALTIOĞLU, Ş. Ş. The effects of humic acid and chelate applications on some morphophysiological properties and antioxidant enzyme activities of ornamental cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) under boron stress. **Soil Studies**, v. 11, n. 2, p. 85–95, 2022.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev ed. Brasília, DF: [s.n.]. v. 11

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev ed. Brasília, DF: [s.n.].

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev ed. Brasília, DF: [s.n.].

ESRINGÜ, A.; TURAN, M.; CANGÖNÜL, A. Remediation of Pb and Cd Polluted Soils with Fulvic Acid. **Forests**, v. 12, n. 11, p. 1–13, 2021.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Package 'ExpDes.pt'**. , 2021.

GUPTA, N.; RAM, H.; KUMAR, B. Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 15, n. 1, p. 89–109, 2016.

HAGHIGHI, M. et al. Using kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) as a phytoremediation plant species for lead (Pb) and cadmium (Cd) removal in saline soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 10, p. 1460–1471, 2016.

HAMZAH SALEEM, M. et al. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. October, p. 1–13, 2022.

HAO, X. Z. et al. Growth, Cadmium and Zinc Accumulation of Ornamental Sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Contaminated Soil with Different Amendments. **Pedosphere**, v. 22, n. 5, p. 631–639, 2012.

HUSSAIN, S. et al. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, n. May, 2022.

JIA, Y. et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC. **Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica**, v. 35, n. 5, p. 971–977, 2015.

JIANG, C. et al. Effects of organic phosphonic acid on the germination characteristics of plants after remediation of Cd contaminated soil. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 791, n. 1, 2021.

JUHRIAH et al. Kemampuan Tanaman Hias Bunga *Zinnia Elegans* (jacq.) Kuntze dan *Impatiens Balsamina* L. Dalam Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Timbal (pb) Dari Lokasi Pembuangan Sampah Tamangapa Antang Makassar. **Bioma : Jurnal Biologi Unhas**, v. 8, n. 1, p. 76–83, 2023.

KARIMI ANSARI, B.; KOKSAL, N. Phytotoxicity level and accumulation ability of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) to zinc. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 9, p. 1225–1233, 2023.

KASHEM, A.; SINGH, B. R.; KUBOTA, H. Zinc tolerance and uptake by *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera* grown in nutrient solution. p. 1174–1176, 2010.

KAUR, H. et al. Behavior of zinc in soils and recent advances on strategies for ameliorating zinc phyto-toxicity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 220, n.

February, p. 105676, 2024.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, v. 253, n. 6, p. 1–28, 2021.

KAUR, R. et al. Castasterone and Citric Acid Supplementation Alleviates Cadmium Toxicity by Modifying Antioxidants and Organic Acids in Brassica juncea. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 1, p. 286–299, 2018.

KUMAR, D. et al. Behavior, risk, and bioremediation potential of heavy metals/metalloids in the soil system. **Rendiconti Lincei**, v. 34, n. 3, p. 809–831, 2023.

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 and Management**, v. 22, n. April, p. 100975, 2024.

LIU, K. et al. Light Intensity and Photoperiod Affect Growth and Nutritional Quality of Brassica Microgreens. **Molecules**, v. 27, n. 3, 2022.

LIU, Z.; CHEN, W.; HE, X. Evaluation of hyperaccumulation potentials to cadmium (Cd) in six ornamental species (compositae). **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 14, p. 1464–1469, 2018.

MAJUMDAR, A. et al. Enhanced phytoremediation of Metal(loid)s via spiked ZVI nanoparticles: An urban clean-up strategy with ornamental plants. **Chemosphere**, v. 288, n. P2, p. 132588, 2022.

NAING, A. H.; KIM, C. K. Abiotic stress-induced anthocyanins in plants: Their role in tolerance to abiotic stresses. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 3, p. 1711–1723, 2021.

NNAJI, N. D. et al. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. **SN Applied Sciences**, v. 5, n. 5, 2023.

NOULAS, C.; TZIOUVALEKAS, M.; KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 49, n. February, p. 252–260, 2018.

OLIVEIRA, V. DE S. et al. The Nutrient Zinc in Soil and Plant: A Review. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 4, p. 25–30, 2023.

PANDA, A. et al. Assessment of the phytoremediation potential of *Zinnia elegans* L. plant species for hexavalent chromium through pot experiment. **Environmental Technology and Innovation**, v. 20, p. 101042, 2020.

PATEL, E. P.; MODI, N. R. The bioaccumulation study off *Zinnia Elegans* L.: Bioaccumulating high concentrations of lead (Pb) from contaminated soils. **Journal of Advanced Scientific Research**, v. 11, n. 4, p. 344–346, 2020.

PATIL, J. R. et al. Flavonoids in plant - environment interactions and stress responses. **Discover Plants**, 2024.

POURESMAIELI, M. et al. Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 108482, 2022.

PRIYA, A. K. et al. Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. **Toxics**, v. 11, n. 5, 2023.

QURONFULAH, A. S. et al. Phytoaccumulation of zinc and its associated impact on the growth performance and tolerance index of six non-food crop plants grown in Zn-contaminated soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 15, p. 43872–43885, 2023.

RASCIO, N.; NAVARI-IZZO, F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? **Plant Science**, v. 180, n. 2, p. 169–181, 2011.

REEVES, R. D. The discovery and global distribution of hyperaccumulator plants: A personal account. **Ecological Research**, v. 39, n. 4, p. 416–436, 2024.

REHMAN, Z. et al. Influence of Lead, Cadmium, and Zinc on Phenols, Flavonoids and Antioxidant Activity in Cauliflower (*Brassica Oleracea*. Var. *Botyris*). **Pakistan Journal of Botany**, v. 55, n. 3, p. 1083–1088, 2023.

RIBEIRO, P. R. C. DE C. et al. Selection of plants for phytoremediation of barium-polluted flooded soils. **Chemosphere**, v. 206, p. 522–530, 2018.

ROCHA, C. S. et al. Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3336–3354, 2022.

SARWAR, N. et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. **Chemosphere**, v. 171, p. 710–721, 2017.

SHARMA, A. et al. Photosynthetic Response of Plants Under Different Abiotic Stresses: A Review. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 2, p. 509–531, 2020.

SHARMA, J. K. 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, n. January, p. 1–13, 2023.

SHARMA, M.; MATHUR, J. Phytoaccumulation of zinc from contaminated soil using ornamental plants species *Helianthus annuus* L. and *Tagetes erecta* L. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 10, p. 1289–1305, 2023.

SHEHZAD, J. et al. Insights into heavy metal tolerance mechanisms of Brassica species: physiological, biochemical, and molecular interventions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 50, p. 108448–108476, 2023.

SHI, X. et al. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 2, p. 266–274, 2011.

SIDHU, G. P. S. et al. Insights into the tolerance and phytoremediation potential of *Coronopus didymus* L. (Sm) grown under zinc stress. **Chemosphere**, v. 244, p. 125350, 2020.

SIGNES-PASTOR, A. J. et al. Phytoremediation assessment of *Gomphrena globosa* and *Zinnia elegans* grown in arsenic-contaminated hydroponic conditions as a safe

and feasible alternative to be applied in arsenic-contaminated soils of the Bengal Delta. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 6, 2015.

SINGH, Y. et al. Comparative physiological and anatomical responses of *Tagetes erecta* L. and *Zinnia elegans* Jacq. seedlings to AgNO<sub>3</sub> and ZnSO<sub>4</sub> metals and their nanoparticles. **Industrial Crops and Products**, v. 212, n. December 2023, p. 118378, 2024.

ŠUTKOVIĆ, J. et al. Phytoremediation potential of *Brassica oleracea* varieties through cadmium tolerance gene expression analysis. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 22, n. 2, p. 0–6, 2024.

TAGHIZADEH, M. et al. Heavy Metals Effects on *Brassica Oleracea* and Elements Accumulation by Salicylic Acid. **Archives of Hygiene Sciences**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2018.

THAMAYANTHI, D.; SHARAVANAN, P. S. Phytoaccumulation of cadmium polluted soil using *Zinnia* plants ( *Zinnia elegans* L .). n. 1, p. 311–315, 2012.

TUGBAEVA, A. et al. Copper Stress Enhances the Lignification of Axial Organs in *Zinnia elegans*. **Horticulturae**, v. 8, n. 6, p. 3–5, 2022.

VAN DER ENT, A. et al. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. **Plant and Soil**, v. 362, n. 1–2, p. 319–334, 2013.

WAHOCHO, S. A. et al. Photoperiodic Effect on Vegetative Growth and Flower Quality of *Zinnia* (*Zinnia elegans* Jacq.). **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 32, n. 4, p. 316–324, 2016.

WEI, Z. et al. Perspectives on phytoremediation of zinc pollution in air, water and soil. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 24, n. November, p. 100550, 2021.

YAN, W. et al. Changes in plant anthocyanin levels in response to abiotic stresses: a meta-analysis. **Plant Biotechnology Reports**, v. 16, n. 5, p. 497–508, 2022.

ZEREMSKI, T. et al. *Brassica* species in phytoextractions: Real potentials and challenges. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 1–25, 2021.

ZHAO, F. J.; LOMBI, E.; MCGRATH, S. P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. **Plant and Soil**, v. 249, n. 1, p. 37–43, 2003.

## 2. CONCLUSÕES GERAIS

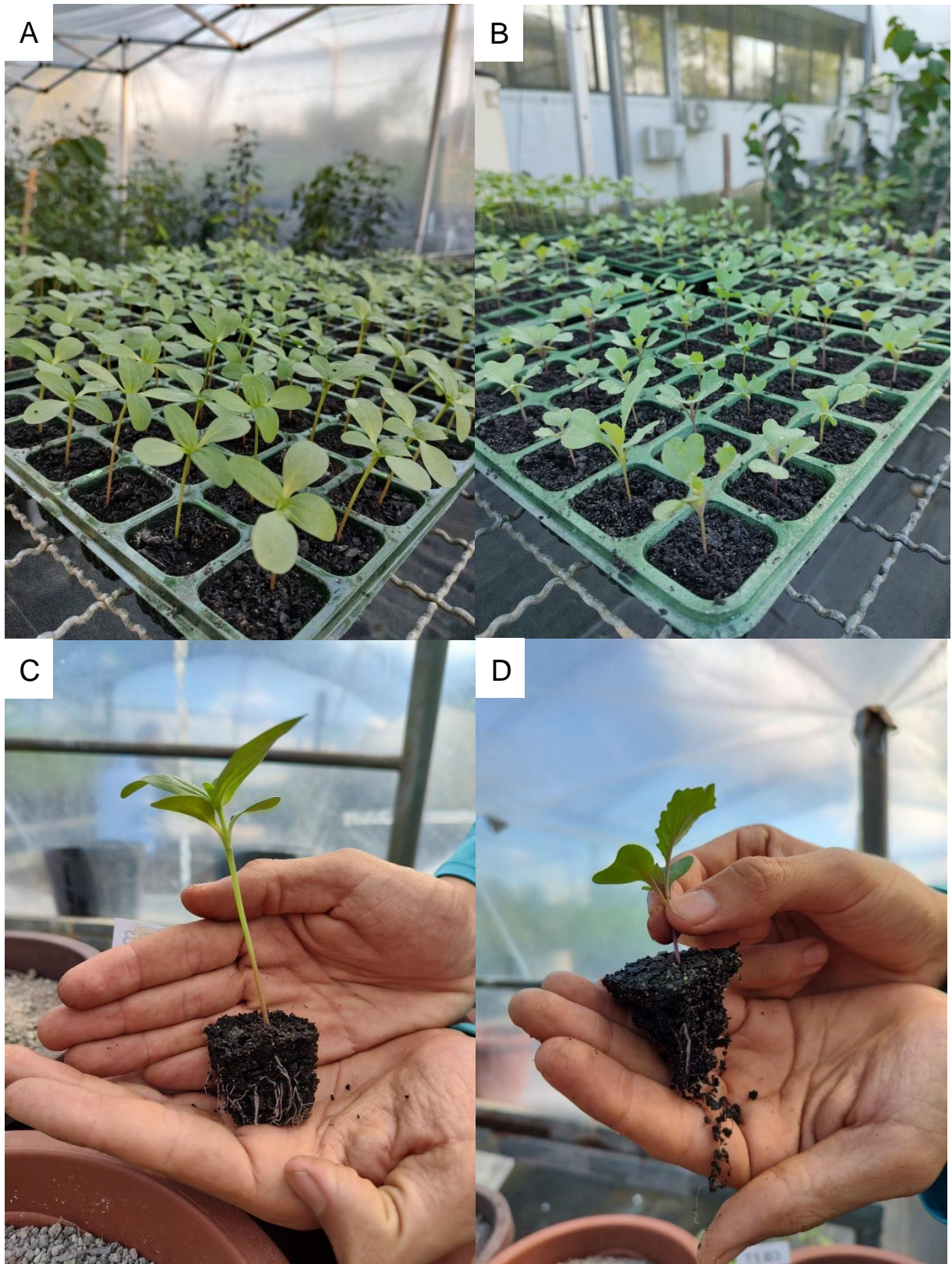
Há um crescente interesse científico e potencial para o uso de plantas ornamentais na fitorremediação de áreas contaminadas com metais pesados.

A pesquisa mundial sobre o tema está concentrada em países asiáticos (China, Índia e Paquistão), apontando a necessidade de expansão e aplicação em outros contextos ambientais.

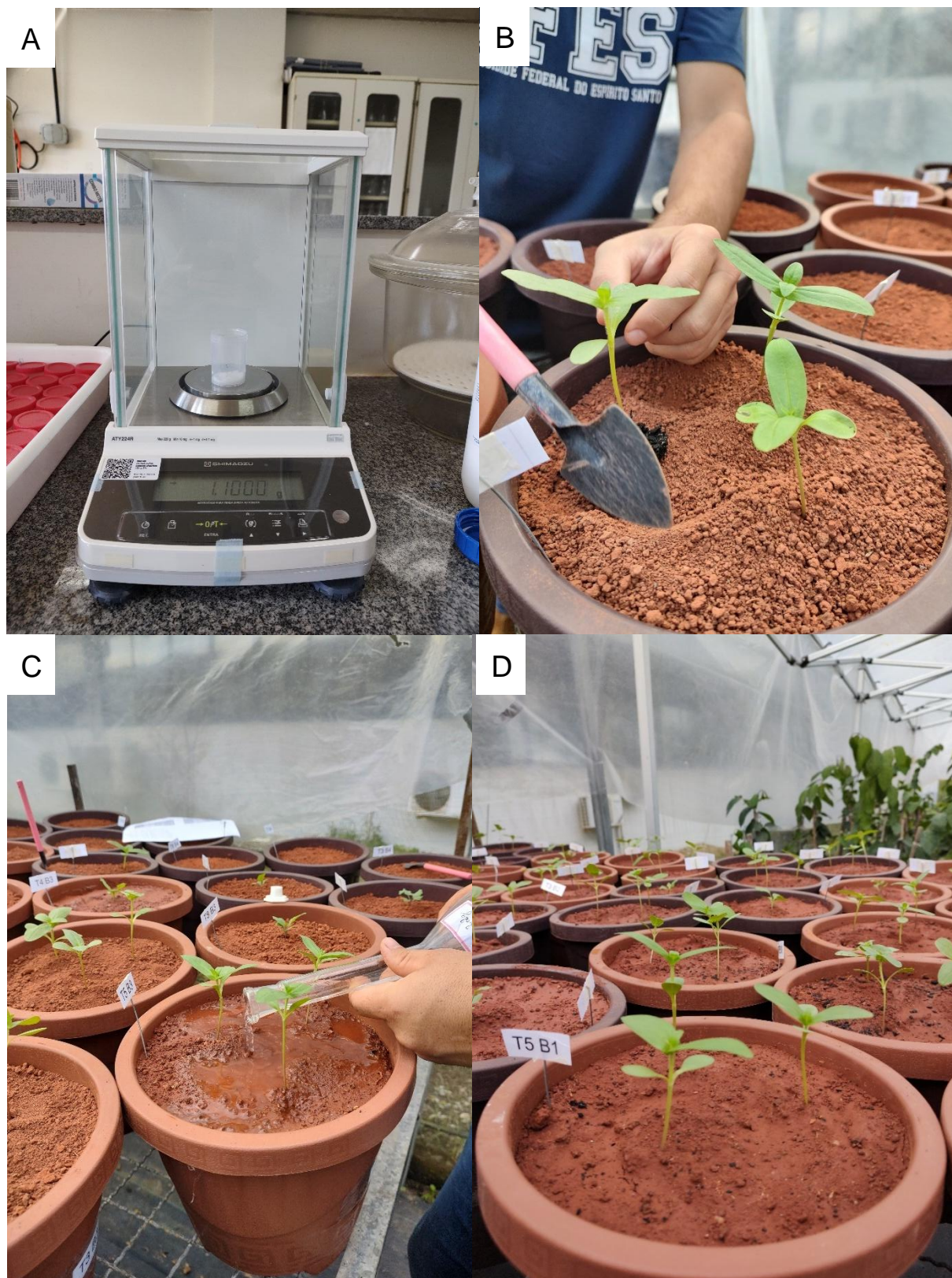
Zínia (*Zinnia elegans* Jacq.) e couve ornamental (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC.) não foram eficientes em fitoextrair Zn dos solos arenoso e argiloso. Couve ornamental apresentou maior tolerância ao estresse por Zn, sendo indicada para continuidade dos estudos.

Embora plantas ornamentais com baixo potencial de fitoextração não sejam adequadas para aplicações de fitorremediação de Zn, os resultados de investigações envolvendo essas espécies são encorajadores e valiosos, pois elucidam questões sobre tolerância e norteiam futuras pesquisas, notadamente aquelas envolvendo uso de amenizantes e insumos e ainda interações com microrganismos no solo.

## ANEXO



**Figura 1.** Produção das mudas e desenvolvimento do sistema radicular de zínia (A, C) e couve ornamental (B,D) no momento do transplantio.



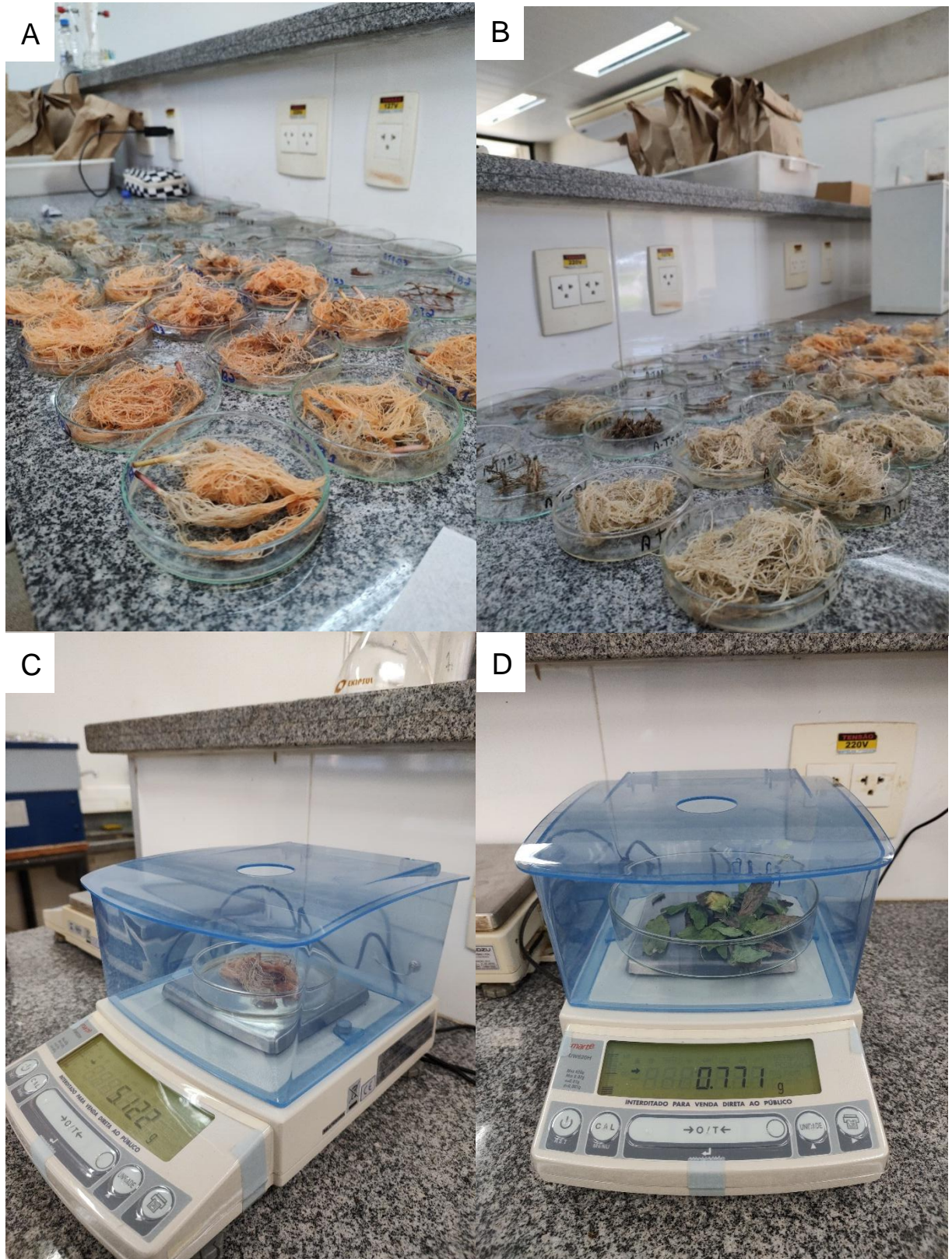
**Figura 2.** Pesagem do  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (A), transplântio das mudas (B), contaminação do solo (C) e aspecto do solo argiloso após a contaminação (D).



**Figura 3.** Aspecto do solo arenoso após a contaminação (A), exemplos de avaliações de altura de planta (B), pigmentos (C) e fitotoxicidade (D) em solo arenoso aos 15 dias após a contaminação.



**Figura 4.** Florescimento da zínia (A), colheita do experimento (B) e separação das raízes em solo argiloso (C) e arenoso (D).



**Figura 5.** Raízes de zínia em solo argiloso (A) e em solo arenoso (B), pesagem da massa fresca de raízes (C) e da parte aérea (D) das plantas.



**Figura 6.** Couve ornamental em pleno desenvolvimento (A), colheita do experimento (B), pesagem da massa seca das plantas (C), trituração da massa seca de raízes e parte aérea em moinho tipo Willey (D).