UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL

NÍVEIS CRÍTICOS DE TOXICIDADE DE ZINCO NO SOLO E NA FOLHA E SUAS IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS NA CULTURA DA SOJA CULTIVADA EM LATOSSOLO EM DUAS SAFRAS

João Victor da Silva Santos
Engenheiro Agrônomo

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL

NÍVEIS CRÍTICOS DE TOXICIDADE DE ZINCO NO SOLO E NA FOLHA E SUAS IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS NA CULTURA DA SOJA CULTIVADA EM LATOSSOLO EM DUAS SAFRAS

João Victor da Silva Santos
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2026

S237n

Santos, João Victor da Silva

Níveis críticos de toxicidade de zinco no solo e na folha e suas implicações fisiológicas e nutricionais na cultura da soja cultivada em Latossolo em duas safras/ João Victor da Silva Santos. -- Jaboticabal, 2026

118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

1. Zinco. 2. Toxicidade. 3. Nutrição de plantas. 4. Fertilidade do solo. 5. Estresse oxidativo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: NÍVEIS CRÍTICOS DE TOXICIDADE DE ZINCO NO SOLO E NA FOLHA E SUAS IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS NA CULTURA DA SOJA CULTIVADA EM LATOSSOLO EM DUAS SAFRAS

AUTOR: JOÃO VICTOR DA SILVA SANTOS
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 30/07/2026 18:38:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participaçao Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

gov.br Documento assinado digitalmente
GUSTAVO CAIONE
Data: 31/07/2026 13:38:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. GUSTAVO CAIONE (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências Biológicas e Agrárias / Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) - Alta Floresta/MT

gov.br Documento assinado digitalmente
GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA
Data: 31/07/2026 08:50:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA (Participaçao Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Jaboticabal, 30 de julho de 2026.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

João Victor da Silva Santos, filho de Lúcia Aparecida da Silva Santos e Roberto Gonzaga dos Santos, nasceu em Colíder, Mato Grosso, em 30 de outubro de 2001. Ingressou no curso de Engenharia Agronômica, em fevereiro de 2020, na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Câmpus de Alta Floresta, Mato Grosso, onde concluiu a graduação em 2024. Durante a graduação, desenvolveu atividades de ensino, pesquisa e extensão, com ênfase em Fertilidade do Solo, Nutrição Mineral de Plantas, Geotecnologias e Manejo Sustentável de Sistemas Agrícolas. Participou de projetos de iniciação científica e de extensão universitária financiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), atuando em estudos relacionados ao monitoramento ambiental, recuperação de áreas degradadas, climatologia agrícola e sensoriamento remoto. Também realizou estágio no Grupo de Estudos em Fertilidade do Solo (GeFert), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), aprofundando sua formação em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Em agosto de 2024, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, no Departamento de Ciência do Solo, sob a orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado. Atualmente, desenvolve pesquisas na área de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas, com ênfase na determinação de níveis críticos de zinco em solos tropicais, toxicidade de zinco em culturas agrícolas e no uso do silício na mitigação de estresses abióticos.

"O tempo ajeita tudo, mas só para quem age."
(João Victor da Silva Santos)

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por guiar meus passos e me conceder força e sabedoria ao longo desta caminhada. Aos meus pais, Lúcia Aparecida da Silva Santos e Roberto Gonzaga dos Santos, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Esta conquista também é de vocês, fruto de seus esforços e da confiança que sempre depositaram em meus sonhos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a oportunidade de chegar até aqui, iluminando meu caminho com inteligência, sabedoria, força e perseverança para superar os desafios e tornar possível a realização deste sonho.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela excelência na formação acadêmica e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de mestrado, processo nº 2025/02596-5, fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelo incentivo constante e por todo o apoio oferecido ao longo desta caminhada. Nada disso seria possível sem o esforço, a dedicação e a confiança que sempre depositaram em mim.

Ao meu amigo e colega Antônio Márcio Rocha, pela acolhida em Jaboticabal, pelo apoio desde a minha chegada e pela amizade construída ao longo dessa trajetória. Agradeço pelas inúmeras conversas, pelos ensinamentos, pelas valiosas trocas de conhecimento e pelas experiências compartilhadas, que contribuíram significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos grandes amigos que a UNESP me proporcionou, Prof. Afonso Lopes e Prof. Anderson Coelho, Orlando Ventura pela amizade, pelo companheirismo e pelos momentos de aprendizado e convivência que tornaram essa jornada ainda mais enriquecedora. À Prof.ª Mara Cristina Cruz, pela grande contribuição para minha formação, pelos ensinamentos compartilhados e pelo constante incentivo durante essa trajetória.

Aos meus amigos do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GenPlant), Sales Ferreira, Felipe Corse, Milton Garcia, Edilaine Transpadini e Kamilla Oliveira, João Vitor Silva, Mayara Cotrim pela amizade, convivência diária, apoio mútuo e pelos conhecimentos compartilhados ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela confiança, orientação, incentivo e valiosas contribuições para minha formação acadêmica, científica e profissional. Sua dedicação, experiência e comprometimento foram fundamentais para a realização deste trabalho e para a minha evolução como pesquisador.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, Cláudia, Tatiana e Adalto, pelo apoio, disponibilidade e dedicação em todas as etapas desta pesquisa, sempre contribuindo para o bom andamento das atividades desenvolvidas.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e fizeram parte desta importante etapa da minha vida, expresso minha mais sincera gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO **1**

ABSTRACT **2**

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais **3**

1. INTRODUÇÃO **3**

2. REVISÃO DE LITERATURA **5**

2.1 IMPORTÂNCIA DO Zn EM SOLOS TROPICAIS: EFEITOS IMEDIATOS E RESIDUAIS **5**

2.1.1 Distribuição e fracionamento do Zn em Latossolos 5

2.1.2 Efeitos imediatos da adubação corretiva de Zn sobre as frações do solo 8

2.1.3 Efeito residual 9

2.2. ABSORÇÃO RADICULAR, TRANSPORTE E FUNÇÕES DO Zn NAS PLANTAS **12**

2.2.1 Absorção radicular: da solução do solo à célula epidérmica 12

2.2.2 Transporte de longa distância, redistribuição e carregamento nos grãos 13

2.2.3 Funções bioquímicas e fisiológicas do Zn nas plantas 15

2.2.4 Funções sobre produtividade e qualidade dos grãos 17

2.3. IMPORTÂNCIA DA ADUBAÇÃO CORRETIVA DO Zn E NÍVEIS CRÍTICOS NO SOLO E NA FOLHA **18**

2.4 SINTESE E PERSPECTIVAS FUTURAS **22**

3. REFERÊNCIAS **23**

CAPÍTULO 2 – Níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha e implicações fisiológicas e nutricionais na cultura da soja após um ano da incorporação do Zn em Latossolo **32**

1. INTRODUÇÃO **34**

2. MATERIAL E MÉTODOS **36**

2.1 Deliamento Experimental 36

2.2 Preparo do solo e aplicação dos tratamentos 37

2.3 Análise química do Zn no Solo 38

2.4 Análise nutricional na folha diagnose, planta inteira e grãos 39

2.5 A eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) e pigmentos fotossintéticos 39

2.6 Índice de flavonóides e antocianinas 39

2.7 Fenóis totais 39

2.8 Teor de Malondialdeído (MDA) 40

2.9 Extração e análise da atividade da superóxido dismutase 40

2.10 Ácido Ascórbico (AsA) 40

2.11 Trocas gasosas 41

2.12 Produtividade 41

2.13 Acúmulo de nutrientes 41

2.14 Determinação de níveis críticos 41
2.15 Análise de dados 41
3. RESULTADOS 42
4. DISCUSSÃO 49
4.1 Efeitos do zinco incorporado ao solo no sistema solo-planta, nas interações do zinco com outros nutrientes, no estado nutricional e na concentração de nutrientes nos grãos da soja 49
4.2 Resposta da soja submetida toxicidade e os mecanismo de defesa induzidos antioxidantes e seus impactos fisiológicos 52
4.3 Efeitos do Zn na produtividade e nos níveis críticos no solo e na folha 55
5. CONCLUSÃO 57
6. REFERÊNCIAS 57
CAPÍTULO 3 - Níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha e implicações fisiológicas e nutricionais na cultura da soja após dois anos da incorporação do Zn em Latossolo 71
1. INTRODUCÃO 73
2. MATERIAL E MÉTODOS 75
2.1 Deliamento experimental 75
2.2 Preparo do solo e aplicação dos tratamentos 76
2.3 Análise química do Zn no Solo 77
2.4 Clima 78
2.5 Análise nutricional na folha diagnose, planta inteira e grãos 78
2.6 Determinação dos teores de Zn no solo 78
2.7 Fluorescência da Clorofila a e pigmentos fotossintéticos 79
2.8 Fenóis totais 79
2.9 Teor de Malondialdeído (MDA) 79
2.10 Extração e análise da atividade da superóxido dismutase 79
2.11 Ácido Ascórbico (AsA) 80
2.12 Trocas gasosas 80
2.13 Produtividade 80
2.14 Acúmulo de nutrientes 80
2.15 Determinação de níveis críticos. 80
2.16 Análise de dados 81
3. RESULTADOS 81
4. DISCUSSÃO 87

4.1 Efeitos do zinco incorporado ao solo no sistema solo-planta, nas interações do zinco com outros nutrientes, no estado nutricional e na concentração de nutrientes nos grãos da soja 87

4.2 Resposta da soja submetida toxicidade e os mecanismo de defesa induzidos antioxidantes e seus impactos fisiológicos 91

4.3 Efeitos do Zn na produtividade e nos níveis críticos no solo e na folha 95

5. CONCLUSÃO 98

6. REFERÊNCIAS 99

NÍVEIS CRÍTICOS DE TOXICIDADE DE ZINCO NO SOLO E NA FOLHA E IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS NA CULTURA DA SOJA CULTIVADA EM LATOSSOLO EM DUAS SAFRAS

RESUMO – O zinco (Zn) é um micronutriente para às plantas, cuja disponibilidade é frequentemente limitada em solos tropicais altamente intemperizados devido à elevada adsorção aos coloides do solo. Nesse contexto, a adubação corretiva com Zn pode proporcionar efeito residual relevante, contribuindo para o fornecimento do micronutriente às culturas subsequentes. Entretanto, a aplicação de doses elevadas pode resultar em concentrações potencialmente tóxicas às plantas. Ainda são escassas as informações sobre o efeito residual do Zn em cultivos sucessivos e sobre os níveis críticos de toxicidade no solo e nas folhas da soja em condições de campo. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo estabelecer critérios para o manejo da adubação corretiva com Zn, avaliando seus efeitos residuais sobre a disponibilidade de Zn no solo, o estado nutricional, em atividades fisiológicas e a produtividade da soja cultivada em Latossolo de textura argilosa durante duas safras. O experimento foi conduzido em condições de campo, em delineamento de blocos casualizados, com cinco doses de Zn (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}), aplicadas a lanço e incorporadas ao solo antes do cultivo do milho, sendo seus efeitos residuais avaliados em dois cultivos sucessivos de soja. O efeito residual da adubação promoveu incremento linear dos teores disponíveis de Zn no solo e aumento das concentrações do micronutriente nas folhas e nos grãos, sem alterar o estado nutricional dos demais nutrientes. Em contrapartida, doses elevadas de Zn intensificaram o estresse oxidativo, aumentando a atividade da superóxido dismutase e o teor de ácido ascórbico. Contudo, esses mecanismos de defesa não foram suficientes para evitar os danos oxidativos, resultando em redução da eficiência fotoquímica do fotossistema II, da taxa fotossintética, da concentração de sacarose e da produtividade de grãos. A produtividade máxima foi obtida com a dose de 46 kg ha^{-1} de Zn, enquanto os níveis críticos de toxicidade, considerando uma redução de 5% da produtividade, foram de 12,7 mg dm^{-3} de Zn no solo e 76,4 mg kg^{-1} de Zn na folha diagnóstica. Os resultados demonstram que a toxicidade de Zn em condições de campo está associada predominantemente ao estresse oxidativo e fornecem subsídios para o aprimoramento das recomendações de adubação corretiva e da interpretação das análises de solo e foliar para a cultura da soja em solos tropicais.

Palavras-chave: zinco, toxicidade, nutrição de plantas, fertilidade do solo, estresse oxidativo.

CRITICAL ZINC TOXICITY THRESHOLDS IN SOIL AND LEAVES AND THEIR PHYSIOLOGICAL AND NUTRITIONAL IMPLICATIONS FOR SOYBEAN GROWN IN A CLAYEY OXISOL OVER TWO GROWING SEASONS

ABSTRACT – Zinc (Zn) is an essential micronutrient for plants, but its availability is often limited in highly weathered tropical soils because of its strong adsorption onto soil colloids. In this context, corrective Zn fertilization may provide a relevant residual effect, contributing to micronutrient supply for subsequent crops. However, the application of high Zn rates may result in concentrations that are potentially toxic to plants. Information regarding the residual effects of Zn in successive crops and the critical soil and leaf Zn toxicity levels for field-grown soybean remains scarce. Therefore, this study aimed to establish criteria for managing corrective Zn fertilization by evaluating its residual effects on soil Zn availability, plant nutritional status, physiological traits, and soybean yield in a clayey Oxisol over two growing seasons. The field experiment was conducted using a randomized complete block design with five Zn rates (0, 12, 24, 48, and 96 kg ha^{-1}), which were broadcast and incorporated into the soil before maize cultivation. Their residual effects were subsequently evaluated in two successive soybean crops. Residual Zn fertilization linearly increased soil-available Zn and Zn concentrations in leaves and grains without affecting the nutritional status of the other nutrients. Conversely, high Zn rates intensified oxidative stress, increasing superoxide dismutase activity and ascorbic acid concentration. However, these defense mechanisms were insufficient to prevent oxidative damage, resulting in reductions in the maximum quantum efficiency of photosystem II, photosynthetic rate, sucrose concentration, and grain yield. Maximum grain yield was obtained at a Zn rate of 46 kg ha^{-1}, whereas the critical toxicity levels, based on a 5% reduction in maximum yield, were 12.7 mg dm^{-3} of Zn in the soil and 76.4 mg kg^{-1} of Zn in the diagnostic leaf. The results demonstrate that Zn toxicity under field conditions is predominantly associated with oxidative stress and provide a basis for improving corrective Zn fertilization recommendations and the interpretation of soil and leaf analyses for soybean grown in tropical soils.

Keywords: zinc, toxicity, plant nutrition, soil fertility, oxidative stress.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de zinco (Zn) representa uma das principais limitações nutricionais à produção agrícola mundial, especialmente em regiões tropicais, onde predominam Latossolos e Argissolos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica, reduzidos teores de matéria orgânica e alta concentração de óxidos de ferro e alumínio (Raij, 2001; Alloway, 2009; Fageria, 2016). Nessas condições, a disponibilidade de Zn na solução do solo é limitada pela intensa adsorção do micronutriente às superfícies minerais, restringindo sua absorção pelas plantas.

A soja (*Glycine max* L.) apresenta elevada resposta à adubação com Zn, uma vez que esse micronutriente participa da ativação de numerosas enzimas, da síntese de proteínas e de pigmentos fotossintéticos, da manutenção da integridade estrutural e funcional do fotossistema II, da formação e estabilidade de compostos ricos em energia, além de atuar na regulação do sistema antioxidante (Broadley et al., 2007; Prado, 2021; Kaur; Garg, 2021). Em conjunto, essas funções são essenciais para o crescimento vegetal, a eficiência fotossintética e a produtividade da cultura.

Diante da elevada capacidade de retenção do Zn em solos tropicais, a adubação corretiva por meio da aplicação a lanço seguida de incorporação, constitui uma das principais estratégias para aumentar a disponibilidade desse micronutriente ao longo do tempo. Diferentemente da adubação localizada no sulco de semeadura, essa prática utiliza doses mais elevadas para superar a elevada capacidade tampão do solo, promovendo o enriquecimento da camada arável e permitindo que parte do Zn permaneça disponível para o cultivo em sucessão (Galrão, 1996; Inocêncio, 2012; Leite et al., 2020).

A persistência do Zn no solo decorre de sua baixa mobilidade no perfil, uma vez que o micronutriente apresenta reduzidas perdas por lixiviação, permanecendo predominantemente na camada superficial mesmo após sucessivos ciclos de cultivo (Walsh et al., 1972). Dessa forma, o efeito residual da adubação corretiva representa importante alternativa para aumentar a eficiência de uso do fertilizante e reduzir os custos de reaplicação em sistemas agrícolas tropicais.

Em Latossolos de textura média a argilosa, óxidos de Fe e Al e argilas do tipo 1:1 apresentam grupos hidroxila superficiais, cuja desprotonação com o aumento do pH gera cargas negativas que favorecem a adsorção específica do Zn^{2+} (Ferreira

Fontes et al., 2000; Fontes; Gomes, 2003). Após a prática de calagem para corrigir a acidez do solo, o aumento do pH e da saturação por bases intensifica a adsorção desse micronutriente, reduzindo sua atividade na solução do solo e sua disponibilidade para absorção pelas plantas (Abreu et al., 2007). Em contrapartida, aplicações excessivas de fontes altamente solúveis podem elevar gradativamente a disponibilidade do micronutriente a concentrações potencialmente tóxicas, comprometendo o metabolismo vegetal (Santos et al., 2017). Assim, a definição de doses capazes de suprir adequadamente a demanda da cultura, sem provocar efeitos tóxicos, constitui um dos principais desafios da adubação corretiva com Zn em solos tropicais.

Embora os benefícios da adubação corretiva de Zn sejam amplamente reconhecidos, a maior parte dos estudos concentram-se na resposta imediata da cultura que recebeu diretamente a aplicação do fertilizante, havendo escassez de informações sobre seus efeitos residuais em culturas cultivadas em sucessão, especialmente a soja (Martínez Cuesta et al., 2023). Essa lacuna é particularmente relevante em sistemas agrícolas brasileiros, nos quais a sucessão de culturas constitui uma prática amplamente adotada.

Os estudos disponíveis sobre toxicidade de Zn em soja foram conduzidos predominantemente em condições controladas, utilizando vasos ou solução nutritiva, nas quais o crescimento radicular, a dinâmica do Zn no solo e as interações solo e planta diferem substancialmente das observadas em condições de campo. Nessas condições, o excesso de Zn tem sido associado à degradação da clorofila, à redução da eficiência fotoquímica do fotossistema II, ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, à intensificação do estresse oxidativo e à redução da assimilação de carbono (Kaur; Garg, 2021; de Oliveira et al., 2023). Entretanto, esses efeitos podem diferir em condições de campo devido à maior complexidade das interações solo e planta e ao maior volume de solo explorado pelas raízes, evidenciando a necessidade de avaliações em sistemas de produção.

A diagnose nutricional e a definição de níveis críticos de Zn na soja devem basear-se na análise da folha diagnóstica, tecido de referência para a interpretação do estado nutricional. Entretanto, grande parte dos estudos sobre toxicidade determinou a concentração de Zn na parte aérea total, dificultando sua aplicação à diagnose foliar (Borkert et al., 1998; Fageria, 2000). Atualmente, são estabelecidas apenas faixas de suficiência, de 20 a 50 mg kg^{-1} de Zn nas folhas e de 0,6 a 1,2 mg

dm^{-3} no solo, as quais permanecem praticamente inalteradas há décadas (Ambrosano et al., 1997; Boaretto, 2022; Quaggio et al., 2022). Essas faixas permitem identificar a suficiência nutricional, mas não definem o limite superior a partir do qual o Zn reduz a produtividade. Portanto, a ausência de níveis críticos de toxicidade determinados em condições de campo dificulta a interpretação conjunta das análises de solo e folha e o estabelecimento de recomendações seguras para a cultura.

Evidências obtidas em ambiente controlado sugerem que a toxicidade esteja relacionada principalmente ao aumento do estresse oxidativo, capaz de comprometer a integridade das membranas celulares, reduzir a eficiência fotossintética e limitar o crescimento vegetal (Kaur; Garg, 2021). Além disso, o excesso de Zn tem sido associado à redução dos teores de Fe, Mn e Cu nos tecidos vegetais, possivelmente em razão de interações antagônicas durante a absorção e o transporte desses nutrientes, agravando os sintomas de toxicidade (de Oliveira et al., 2023). No entanto, ainda não está esclarecido se esses desequilíbrios nutricionais apresentam a mesma importância em condições de campo, onde o sistema radicular é mais desenvolvido e a disponibilidade de nutrientes difere daquela observada em experimentos conduzidos em vasos.

Nesse contexto, hopotetizamos que: (i) o efeito residual da adubação corretiva com Zn altera o estado nutricional, as respostas fisiológicas, os mecanismos bioquímicos e a produtividade da soja cultivada em sucessão; (ii) os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha da soja cultivada em Latossolo argiloso são relativamente elevados devido à alta capacidade de adsorção e retenção de Zn desse solo; (iii) os efeitos negativos do excesso de Zn decorrem predominantemente do estresse oxidativo e das alterações fisiológicas, sendo menos influenciados por desequilíbrios nutricionais envolvendo outros elementos.

Para testar essas hipóteses foi realizado esse estudo que teve o objetivo de estabelecer critérios para o manejo da adubação corretiva com Zn, avaliando os efeitos residuais nos teores de Zn no solo e no estado nutricional, em aspectos fisiológicos e na produtividade da soja cultivada em Latossolo de textura argilosa durante duas safras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DO Zn EM SOLOS TROPICAIS: EFEITOS IMEDIATOS E RESIDUAIS

2.1.1 Distribuição e fracionamento do Zn em Latossolos

A compreensão do manejo e dos impactos da adubação corretiva com Zn sobre os teores críticos no solo exige, antes de tudo, o entendimento de como esse micronutriente se distribui entre as diferentes frações químicas e camadas dos solos tropicais. Em Latossolos e Argissolos, classes de solo predominantes em importantes polos agrícolas do Brasil, o Zn naturalmente presente no solo distribui-se predominantemente entre a fração residual e as formas associadas aos óxidos cristalinos de ferro, caracterizadas por baixíssima disponibilidade às plantas. Em contraste, as frações trocável e ligada à matéria orgânica, diretamente relacionadas à solução do solo e à absorção radicular, representam apenas uma pequena parcela do Zn total no solo (Abreu et al., 2007; Barreto et al., 2024).

Estudos de fracionamento sequencial conduzidos em Latossolos demonstraram que a distribuição do Zn presente no solo entre as frações segue a ordem decrescente: residual > óxidos de Fe cristalino > óxidos de Fe amorfo > óxidos de Mn > matéria orgânica > trocável (Abreu et al., 2007; Nascimento et al., 2002). Esse padrão reflete a intensa intemperização característica desses solos e a elevada superfície específica dos óxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita), que atuam como principais sítios de adsorção específica do Zn no solo retendo-se por complexação de esfera interna, ligações de alta energia praticamente irreversíveis no curto prazo e restringindo sua transferência para a solução do solo limitando sua absorção as plantas (Barrow, 1993; Liang et al., 2022). Nesse mecanismo, os grupos funcionais presentes na superfície dos óxidos reagem com o Zn^{2+} por troca de ligantes. A adsorção aumenta com a elevação do pH, devido à desprotonação dos grupos hidroxila superficiais e à formação de cargas negativas, e tende a ser maior em óxidos de menor cristalinidade, que apresentam maior superfície específica e maior quantidade de sítios reativos (Barrow, 1993). A goethita apresenta capacidade de adsorção de Zn superior à da hematita, ambas superiores à gibbsita ordem que reflete diretamente a mineralogia dos horizontes B dos Latossolos (Barreto et al., 2024; Cornell & Schwertmann, 2003).

O Zn é transportado até a superfície das raízes predominantemente por difusão, processo impulsionado pelo gradiente de concentração gerado pela absorção do nutriente pelas plantas. Esse fluxo depende da concentração de Zn na solução, da umidade e das características do solo que controlam sua adsorção. Pegoraro et al. (2006) demonstraram que a calagem reduziu o fluxo difusivo de Zn, especialmente no Latossolo argiloso, pois o aumento do pH e a maior presença de argila e óxidos de Fe

e Al intensificaram sua adsorção, diminuindo a concentração do micronutriente na solução. Esses resultados evidenciam que o pH e a composição mineralógica controlam a fração de Zn potencialmente disponível às plantas.

Esses resultados têm implicação direta para a escolha do extrator a ser empregado na avaliação da disponibilidade de Zn: o extrator DTPA (pH 7,3), desenvolvido por Lindsay e Norvell, (1978) especificamente para solos com pH próximo à neutralidade, mostrou-se mais sensível às variações de pH e mais correlacionado à absorção pelas plantas do que o Mehlich-1, extrator ácido que superestima a disponibilidade por extrair formas de Zn ligadas a sítios de adsorção específica, com baixa biodisponibilidade real (Menezes et al., 2010). A calagem, embora necessária para a correção da acidez e o aumento da disponibilidade dos nutrientes especialmente em solos tropicais (Mossa et al., 2021), provoca redistribuição das frações de Zn que agrava sua limitação (Abreu et al., 2007; Barreto et al., 2024). O aumento do pH desloca o Zn da fração trocável a mais biodisponível para as frações ligadas a óxidos de Fe amorfo e cristalino e à matéria orgânica, reduzindo drasticamente os teores extraíveis por DTPA (Abreu et al., 2002; Pegoraro et al., 2006). Tal redistribuição ocorre porque em pH mais elevado a densidade de carga negativa na superfície dos óxidos aumenta, intensificando a atração eletrostática e a subsequente complexação de esfera interna com o Zn^{2+}(Roberts et al., 2003; Waychunas et al., 2002).

No longo prazo, o processo de aging (envelhecimento geoquímico), caracterizado pela transferência progressiva do Zn das frações lábeis para formas mais estáveis, pode ser intensificado em solos tropicais quentes e úmidos. As temperaturas elevadas aumentam a energia cinética das reações de superfície e favorecem a difusão do Zn^{2+} para o interior das partículas de óxidos (Barrow, 1993), resultando na redução contínua da disponibilidade do micronutriente, mesmo na ausência de nova extração pelas culturas (Chahal et al., 2026; Donner et al., 2010; Lock; Janssen, 2003). Utilizando isótopos de Zn para rastrear o processo de aging em solos altamente intemperizados e ricos em ferro, Donner et al. (2010) demonstraram que a perda de labilidade do Zn adicionado aumenta com o pH e é mais intensa em solos com maiores concentrações de óxidos cristalinos, características comuns aos Latossolos. Esse padrão é corroborado por Mossa et al. (2021), que, por meio da técnica de diluição isotópica com ^{70}Zn em solos com valores de pH ajustados entre 4

e 7, demonstraram que 94% da variação no coeficiente de partição lábil do Zn foi explicada pelo pH do solo.

2.1.2 Efeitos imediatos da adubação corretiva de Zn sobre as frações do solo

A aplicação de fertilizantes de Zn (Ex. Sulfato de Zinco) ao solo promove aumento imediato e mensurável nas frações mais lábeis, com repercussão direta na disponibilidade do micronutriente para a cultura. Nascimento et al., (2002), em um estudo clássico conduzido com seis Latossolos brasileiros, demonstraram que o Zn recém aplicado ao solo é retido predominantemente nas frações trocável e ligada à matéria orgânica, enquanto as frações associadas aos óxidos de ferro e a fração residual permanecem praticamente inalteradas no curto prazo. Esse comportamento decorre da cinética de adsorção do micronutriente na qual inicialmente o Zn ocupa preferencialmente sítios de adsorção inespecífica de menor energia e maior reversibilidade (Degryse et al., 2011). Com o decorrer do tempo, ocorre sua transferência gradual para sítios de adsorção específica presentes na superfície dos óxidos de Fe e Al, processo mais lento e fortemente influenciado pela temperatura e pelo grau de cristalinidade desses minerais (Degryse et al., 2015; Donner et al., 2012). Assim, a aplicação de Zn aumenta inicialmente sua participação nas frações mais lábeis do solo. Contudo, essa maior disponibilidade não implica elevada recuperação pela cultura na primeira safra, pois parte do micronutriente é rapidamente adsorvida e, com o tempo, transferida para frações menos disponíveis.

No entanto, um aspecto frequentemente subestimado na prática é que a taxa de aproveitamento do Zn aplicado via solo é em geral baixa na primeira safra especialmente em Latossolos e Argissolos. Botoman et al., (2025) documentaram que apenas 0,5 a 5% do Zn anualmente aplicado é recuperado pela cultura na safra de aplicação, dependendo do tipo de solo, da fonte de fertilizante e da dose empregada. Mattiello et al., (2021), utilizando ^{67}Zn marcado isotopicamente em experimento com trigo, azevém e milho em sequência, confirmaram que a contribuição relativa dos fertilizantes de Zn foi menor na primeira safra do que nas safras subsequentes independentemente da fonte utilizada ($ZnSO_4$, ZnO ou ZnO co-granulado com enxofre elementar), evidenciando que o aproveitamento imediato é estruturalmente limitado pela dinâmica de adsorção do solo. (Morais et al., 2021), avaliando o efeito residual da adubação com Zn em Latossolos cultivados em sucessão milho e braquiária, verificaram que parte do micronutriente aplicado permaneceu disponível após a colheita do milho, contribuindo para a nutrição da cultura subsequente. Esses

resultados corroboram que a baixa recuperação imediata do Zn pelas culturas não representa necessariamente perda do fertilizante, uma vez que parcela significativa do micronutriente pode permanecer retida em formas potencialmente disponíveis, sustentando o efeito residual da adubação em sistemas de produção tropicais.

Esse comportamento decorre da forte interação do Zn com os constituintes do solo, especialmente em Latossolos e Argissolos ricos em óxidos de Fe e Al, onde a elevada capacidade de adsorção reduz a atividade do Zn^{2+} na solução do solo para níveis inferiores aos necessários para uma absorção eficiente pelo sistema radicular das culturas anuais nas semanas subsequentes à adubação (Anisimov et al., 2021; Hamzah Saleem et al., 2022). A intensidade desse processo, entretanto, depende da dose de Zn aplicada. Botoman et al., (2025) demonstraram que, em doses reduzidas (1 kg Zn ha^{-1}), praticamente todo o micronutriente é rapidamente imobilizado em formas de baixa labilidade, enquanto doses mais elevadas (30 kg Zn ha^{-1}) excedem temporariamente a capacidade tampão do solo, mantendo maiores concentrações de Zn em formas lábeis e, consequentemente, aumentando sua disponibilidade tanto para a cultura da safra de aplicação quanto para a subsequente.

Do ponto de vista agronômico, a baixa eficiência de aproveitamento imediato do Zn aplicado ao solo evidencia a necessidade de calibrar adequadamente as doses corretivas em função da capacidade tampão do solo. Em solos com elevada adsorção de Zn, o emprego de fontes apropriadas e de doses ajustadas às condições edáficas constitui uma estratégia essencial para garantir o suprimento do micronutriente durante todo o ciclo da cultura. Dessa forma, a planta pode atender sua demanda nutricional nos estádios iniciais e intermediários de crescimento, enquanto o Zn aplicado ao solo gradualmente se redistribui e entra em equilíbrio com as frações potencialmente disponíveis, aumentando a eficiência da adubação e reduzindo os riscos de deficiência (Oliveira et al., 2021; Botoman et al., 2025).

2.1.3 Efeito residual

O efeito residual da adubação com Zn corresponde à contribuição do micronutriente aplicado em safras anteriores para a nutrição das culturas subsequentes, sendo relevante para o manejo da adubação em solos tropicais. De acordo com o Boletim 100, a disponibilidade de Zn no solo é classificada como baixa (<0,6 mg dm^{-3}), média (0,6 a 1,2 mg dm^{-3}) ou alta (>1,2 mg dm^{-3}), considerando a extração por DTPA. Para a soja cultivada em solo com baixa disponibilidade, recomenda-se a aplicação de 5 kg ha^{-1} de Zn. Nesse contexto, conhecer o efeito

residual permite ajustar a frequência das aplicações, manter a disponibilidade do micronutriente em níveis adequados e evitar seu acúmulo excessivo no solo (Boaretto, 2022).

Saliente - se, que o mecanismo que sustenta e ao mesmo tempo limita o efeito residual é a redistribuição progressiva do Zn entre as frações do solo ao longo do tempo, fenômeno denominado *aging* (envelhecimento) (Donner et al., 2010). Imediatamente após a aplicação do Zn no solo, a sua dinâmica irá concentrar-se predominantemente nas frações trocável, ligada à matéria orgânica e a carbonatos, as chamadas frações lábeis, de maior biodisponibilidade, enquanto as frações de óxidos de Fe e Al e a residual permanecem transitoriamente inalteradas (Han et al., 2021; Ma; Uren, 2006). Com o passar de uma ou mais safras, o Zn migra progressivamente dessas frações lábeis para os sítios de adsorção específica dos óxidos de ferro cristalinos (goethita e hematita) e de alumínio (gibbsita), que o retêm por complexação de esfera interna em ligações de alta energia e baixa reversibilidade, reduzindo continuamente sua biodisponibilidade, mesmo na ausência de nova extração pelas culturas (Barrow, 1993; Donner et al., 2012; Ma; Uren, 2006).

O processo de aging é controlado por fatores como temperatura, umidade, pH e tempo de permanência do Zn no solo (Barrow, 1986). Em Latossolos argilosos altamente intemperizados, esse processo é acelerado, promovendo a transferência progressiva do Zn de formas mais lábeis para frações associadas aos óxidos de Fe e Al e à fração residual, reduzindo sua biodisponibilidade ao longo das safras (Jalali & Khanlari, 2008; Barreto et al., 2024). Estudos utilizando trocas isotópicas demonstraram que a perda de labilidade do Zn é influenciada principalmente pelo pH e pelo tempo de envelhecimento, tornando-se mais intensa em solos corrigidos por calagem (Donner et al., 2012b. Como consequência, a redução dos teores de Zn extraíveis pode refletir a redistribuição do micronutriente para formas menos lábeis, e não necessariamente sua remoção do sistema.

O trabalho pioneiro de Ritchey et al. (1986), conduzido em um Latossolo Vermelho Escuro argiloso do Cerrado, foi o primeiro a quantificar sistematicamente a duração do efeito residual da adubação corretiva com Zn em solos tropicais brasileiros. Os autores demonstraram que a aplicação de 3 kg ha^{-1} de Zn, na forma de $ZnSO_4$ e incorporado ao solo, foi suficiente para manter produtividades próximas ao máximo por pelo menos quatro safras consecutivas de milho, sorgo e soja. Esse comportamento resulta do equilíbrio entre a imobilização gradual do Zn pelo processo

de aging e sua remoção pelas culturas, permitindo que parte do micronutriente permaneça em formas lábeis e disponíveis ao longo das safras subsequentes.

Posteriormente, Galrão (1994) demonstrou que a aplicação de apenas 1 kg Zn ha^{-1}, misturado ao superfosfato simples, aumentou a produtividade, os teores de Zn no solo e a concentração foliar do micronutriente no milho até o quarto cultivo consecutivo. Em outro estudo, Galrão (1996) verificou que aplicações foliares de $ZnSO_4$ a 1% durante o ciclo da cultura prolongaram esse efeito, mantendo produtividades próximas ao máximo mesmo na ausência de nova adubação de solo. Entretanto, Sousa e Lobato (2004) destacaram que a persistência do Zn residual depende das características do solo. Em solos arenosos, a menor capacidade tampão e a maior suscetibilidade à lixiviação reduzem sua duração, enquanto, em Latossolos argilosos, a elevada capacidade de adsorção favorece a retenção do Zn nas camadas superficiais, prolongando os benefícios da adubação corretiva.

Embora os estudos clássicos tenham estabelecido as bases do manejo corretivo de Zn em solos tropicais, eles foram conduzidos em sistemas agrícolas substancialmente menos intensivos do que os atualmente praticados. O expressivo aumento da produtividade das culturas, impulsionado por cultivares de maior potencial produtivo, maior densidade de plantio e suprimento mais eficiente de macronutrientes, aliado ao uso crescente de corretivos da acidez e de fertilizantes fosfatados, modificou os principais fatores que determinam a persistência do efeito residual do Zn. Nesse cenário, a recomendação histórica de reaplicação do micronutriente a cada quatro safras tem sido reavaliada à luz de evidências mais recentes.

Estudos conduzidos em condições tropicais confirmam a importância agronômica do Zn residual, mas demonstram que sua magnitude depende da dose aplicada e das condições de manejo. Barbosa et al. (2012) verificaram, em Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto, que a dose de 2,69 kg ha^{-1} de Zn proporcionou a maior produtividade de milho na safra subsequente, evidenciando o aproveitamento do Zn residual pela cultura. De forma semelhante, Jalal et al. (2022) observaram que a aplicação de 8 kg ha^{-1} de Zn elevou a concentração de Zn na parte aérea (+15%), nos grãos (+13 a +18%) e o acúmulo total do micronutriente (+20 a +25%), confirmando a contribuição do Zn residual para a nutrição e a produtividade do milho.

Resultados consistentes também foram obtidos por Botoman et al. (2025), que registraram incrementos de 24,6% na produtividade de grãos, 12,5% na concentração de Zn e 29,6% no acúmulo total do micronutriente na segunda safra após a aplicação

de 30 kg Zn ha^{-1} em dois solos contrastantes do Malawi. Em conjunto, esses estudos demonstram que o efeito residual do Zn permanece agronomicamente relevante em sistemas modernos de produção, embora sua duração e intensidade dependam da dose aplicada e das características do sistema solo-planta. Em conjunto, os estudos demonstram que o efeito residual da adubação corretiva com Zn permanece agronomicamente relevante em sistemas de produção tropicais modernos.

Entretanto, sua persistência deixou de depender exclusivamente do intervalo entre cultivos e passou a ser determinada pela interação entre dose aplicada, capacidade tampão do solo, intensidade de cultivo, manejo da acidez, e demanda das culturas. Assim, recomendações baseadas apenas em intervalos fixos de reaplicação tendem a ser insuficientes, reforçando a necessidade de estratégias fundamentadas no monitoramento da disponibilidade de Zn no solo e do estado nutricional das plantas.

2.2. ABSORÇÃO RADICULAR, TRANSPORTE E FUNÇÕES DO Zn NAS PLANTAS

2.2.1 Absorção radicular: da solução do solo à célula epidérmica

A absorção de Zn pelas culturas agrícolas inicia-se na interface solo-raiz e depende diretamente da disponibilidade do micronutriente na solução do solo, a qual é regulada pelo equilíbrio entre suas diferentes formas químicas e por atributos edáficos, como pH, teor de matéria orgânica e mineralogia da fração argila, conforme discutido na seção anterior. Na solução do solo, o Zn encontra-se predominantemente como cátion livre (Zn^{2+}) ou complexado a compostos orgânicos de baixo peso molecular, incluindo ácidos orgânicos, aminoácidos e substâncias húmicas (Marschner, 2012; Prado, 2021). O transporte do Zn até a superfície radicular ocorre predominantemente por difusão. Em Latossolos, entretanto, a elevada adsorção do micronutriente aos constituintes da fração argila reduz sua concentração na solução e pode limitar seu fluxo difusivo até as raízes (Broadley et al., 2007; Marschner, 2012).

A entrada do Zn nas células epidérmicas é mediada por sistemas de transporte com diferentes afinidades pelo micronutriente. Em condições de deficiência predominam transportadores de alta afinidade, capazes de manter a absorção mesmo quando as concentrações de Zn na solução do solo são extremamente baixas, enquanto concentrações mais elevadas favorecem a atuação de sistemas de baixa afinidade e maior capacidade de transporte (Hacisalihoglu & Kochian, 2003). Esses sistemas são representados principalmente pelos transportadores da família ZIP (Zinc/Iron-regulated Transporter-like Proteins), responsáveis pelo influxo de Zn através da membrana plasmática das células epidérmicas e corticais (Grotz et al.,

1998; Grotz & Guerinot, 2006). Em *Arabidopsis thaliana*, membros como ZIP1, ZIP2, ZIP3, ZIP4 e IRT3 são fortemente induzidos em condições de deficiência de Zn, (Broadley et al., 2007; Grotz & Guerinot, 2006), enquanto em milho (*Zea mays*), ZmZIP5 e ZmZIP11 apresentam padrões de expressão compatíveis com sua participação na absorção radicular, sendo considerados potenciais alvos para programas de biofortificação genética (Ajeesh Krishna et al., 2020; Li et al., 2013).

A expressão dos transportadores ZIP é regulada pelos fatores de transcrição bZIP19 e bZIP23, que atuam como sensores do estado nutricional de Zn na célula. Quando a concentração citoplasmática do micronutriente diminui, esses fatores reconhecem elementos regulatórios específicos (ZDRE) presentes na região promotora dos genes da família ZIP, induzindo sua transcrição e aumentando a capacidade de absorção (Assunção et al., 2010). Esse mecanismo de regulação é amplamente conservado entre plantas terrestres, tendo sido descrito tanto em espécies modelo quanto em importantes culturas agrícolas (Ajeesh Krishna et al., 2020). Dessa forma, constitui um dos principais componentes da homeostase do Zn, permitindo que a absorção seja continuamente ajustada às necessidades fisiológicas da planta e evitando tanto a deficiência quanto o acúmulo excessivo do micronutriente (Grotz; Guerinot, 2006; Rehman et al., 2025).

Após ser absorvido pelas células epidérmicas, o Zn desloca-se radialmente pelo córtex por meio das vias apoplástica e simplástica. Na endoderme, a faixa de Caspary bloqueia o transporte apoplástico, obrigando o micronutriente a atravessar a membrana plasmática e seguir pelo simplasto até o periciclo. Posteriormente, transportadores da família HMA participam do carregamento do Zn no xilema, permitindo sua translocação para a parte aérea (Broadley et al., 2007; Marschner, 2012). Assim, o transporte radial do Zn é rigidamente controlado e não depende exclusivamente da concentração do micronutriente na solução do solo, mas também da ação coordenada dos mecanismos fisiológicos responsáveis por regular sua passagem da raiz para a parte aérea (Ajeesh et al., 2020; A. Rehman et al., 2018).

2.2.2 Transporte de longa distância, redistribuição e carregamento nos grãos

Após a absorção radicular, o Zn é carregado para o xilema por meio de transportadores da família HMA (Heavy Metal ATPases), ATPases do tipo P_1B que promovem o efluxo ativo de Zn^{2+} das células do periciclo para o apoplasto xilemático, constituindo uma etapa essencial para o suprimento do micronutriente à parte aérea (Sinclair; Krämer, 2012; Stanton et al., 2022). No fluido xilemático, o Zn é transportado

predominantemente na forma de complexos com ácidos orgânicos de baixo peso molecular, principalmente citrato e malato, bem como com nicotianamina, que mantêm sua solubilidade e favorecem sua distribuição ao longo do fluxo transpiratório até as folhas e órgãos reprodutivos (Olsen; Palmgren, 2014). Ao atingir a parte aérea, parte do Zn é redistribuída internamente pelo floema, mecanismo determinante para o carregamento dos grãos durante o período reprodutivo, sendo a magnitude dessa redistribuição influenciada pelo status nutricional da planta e pela demanda dos órgãos de dreno (Martínez Cuesta et al., 2023).

Além do transporte ascendente pelo xilema, o Zn pode ser remobilizado entre os órgãos da planta pelo floema. A formação de complexos Zn–NA mantém o micronutriente solúvel no simplasto e favorece seu carregamento no floema por transportadores da família YSL (Yellow Stripe-Like). Durante a fase reprodutiva, esses transportadores participam da redistribuição do Zn das folhas-fonte para os órgãos-dreno, incluindo flores e semente (Curie et al., 2009; Olsen; Palmgren, 2014). Assim, parte do Zn acumulado nos tecidos vegetativos pode ser remobilizada para os grãos, embora sua contribuição varie conforme a espécie, o estádio de desenvolvimento e a disponibilidade do micronutriente para absorção radicular (Bender et al., 2015; Cakmak, 2008; Gaspar et al., 2018).

A homeostase intracelular do Zn também depende de mecanismos de compartimentalização. Em condições de elevada disponibilidade do micronutriente, proteínas da família MTP (*Metal Tolerance Proteins*) promovem o transporte de Zn^{2+} do citoplasma para o vacúolo, contribuindo para a destoxificação celular e para a formação de um reservatório temporário que pode ser mobilizado durante períodos de maior demanda fisiológica, como o enchimento dos grãos (Ricachenevsky et al., 2013; Stanton et al., 2022). Complementarmente, o transportador ZIF1 (*Zinc-Induced Facilitator 1*) regula o acúmulo vacuolar de nicotianamina, modulando o equilíbrio entre as formas citoplasmática e vacuolar do complexo Zn–NA e, assim, a disponibilidade do micronutriente para sua redistribuição via floema (Haydon et al., 2012; Haydon & Cobbett, 2007).

Em conjunto, o influxo radicular mediado pelos transportadores ZIP, o carregamento para o xilema pelas ATPases HMA, a quelação por nicotianamina, o transporte floemático via proteínas YSL e a compartimentalização vacuolar promovida pelas MTP constituem uma rede integrada de homeostase do Zn. A coordenação desses processos determina não apenas a eficiência de utilização do micronutriente

pela planta, mas também sua redistribuição para os órgãos reprodutivos e o acúmulo final nos grãos, etapa fundamental para a produtividade das culturas e para a biofortificação agronômica (Ajeesh et al., 2020; Chao; Chao, 2025; Stanton et al., 2022).

2.2.3 Funções bioquímicas e fisiológicas do Zn nas plantas

Zn atua como cofator enzimático em representantes das seis classes enzimáticas tradicionais, sendo oxidorredutases, transferases, hidrolases, liases, isomerases e ligases participando de mais de 300 reações metabólicas nas plantas como componente catalítico, estrutural ou regulador (Marschner, 2012). Diferentemente de outros metais de transição, o Zn não sofre reações de oxidação ou redução nas condições fisiológicas das células vegetais, característica que lhe confere elevada estabilidade química e explica sua ampla participação em processos metabólicos e regulatórios (Broadley et al., 2007).

A anidrase carbônica (CA), uma metaloenzima Zn-dependente que catalisa a interconversão reversível entre CO_2 e HCO_3^-, é a segunda proteína mais abundante dos cloroplastos, sendo superada apenas pela Rubisco. Em condições de deficiência de Zn, a atividade da CA é progressivamente reduzida, o que pode diminuir a fotossíntese líquida em 50 a 70% e limitar a produção de fotoassimilados destinados ao crescimento e ao enchimento dos grãos (Alloway, 2009; Escudero et al., 2012). Além da CA, o Zn contribui para a estabilização de proteínas do fotossistema II, especialmente do complexo de evolução de oxigênio e de proteínas contendo domínios *zinc finger* associadas às membranas tilacoidais, favorecendo a manutenção da integridade estrutural e funcional do aparato fotossintético, particularmente sob condições de elevada irradiância (Cakmak, 2000; Lu et al., 2011).

O Zn é componente estrutural essencial dos ribossomos de plantas, com concentrações de 300 - 380 µg de Zn g^{-1} de RNA na fração ribossomal; na ausência de Zn, os ribossomos perdem integridade quaternária e se desintegram, comprometendo toda a maquinaria de tradução (Marschner, 2012; Prask; Plocke, 1971). Adicionalmente, o Zn é requerido pelas RNA polimerases I, II e III, enzimas responsáveis pela transcrição de rRNA, mRNA e tRNA, respectivamente e a deficiência de Zn resulta em proteólise específica da RNA polimerase I no vacúolo, reduzindo a produção de rRNA e suprimindo a síntese ribossomal de modo global (Zeng et al., 2021). Esse comprometimento integrado da transcrição e tradução explica a rápida inibição do crescimento foliar e radicular observada em plantas

deficientes em Zn, sintoma que precede manifestações visuais da deficiência e reflete a supressão sistêmica da síntese proteica mesmo em condições de deficiência subclínica (Hacisalihoglu; Kochian, 2003; Lilay et al., 2024).

O Zn exerce papel essencial na biossíntese e na manutenção dos níveis de auxinas, especialmente do ácido indolacético (AIA), principal hormônio responsável pelo crescimento longitudinal dos entrenós, pela expansão celular e pelo desenvolvimento do sistema radicular (Marschner, 2012). Entre os processos dependentes desse micronutriente destaca-se a atividade da triptofano sintase, enzima envolvida na síntese de triptofano, precursor da biossíntese de AIA (Lilay et al., 2024). Em condições de deficiência de Zn, a redução dos teores de triptofano e de AIA está associada ao aparecimento de sintomas como entrenós curtos, folhas pequenas e arredondadas, encarquilhamento foliar e rosulamento, alterações que refletem a limitação do alongamento celular mediado por auxinas (Takatsuji, 1998, 1999).

Além de atuar na biossíntese de auxinas, o Zn participa da regulação da expressão gênica por meio das proteínas zinc finger, que constituem a maior superfamília de fatores de transcrição em plantas eucarióticas. Esses fatores apresentam domínios estruturais estabilizados pela coordenação do Zn^{2+} com resíduos de cisteína e histidina e abrangem famílias como C_2H_2, RING e GATA, responsáveis pela regulação de genes envolvidos no desenvolvimento floral, na identidade de órgãos, nas respostas aos estresses abióticos e na sinalização mediada por ABA (Han et al., 2020; Y. Liu et al., 2022). Como a estabilidade desses domínios depende diretamente da disponibilidade de Zn, mesmo deficiências moderadas podem comprometer a regulação da expressão gênica antes que ocorram alterações significativas no metabolismo primário.

No sistema distema de defesa das plantas, a superóxido dismutase Cu/Zn (Cu/Zn-SOD) constitui uma das principais enzimas do sistema antioxidante das plantas, atuando no citoplasma e nos cloroplastos ao catalisar a dismutação do radical superóxido ($O_2\bullet^-$) em H_2O_2, e posteriormente a destoxificado pela catalase e pela ascorbato peroxidase (Cabot et al., 2019; Cakmak, 2000). Em condições de deficiência de Zn, a atividade da Cu/Zn-SOD é reduzida, comprometendo a remoção eficiente das espécies reativas de oxigênio (EROs) (Bharti et al., 2014; Wang; Jin, 2005). Simultaneamente, o aumento da concentração intracelular de Fe livre favorece a reação de Fenton, intensificando a formação de radicais hidroxila (•OH), altamente

reativos, que promovem a peroxidação dos lipídios de membrana, a oxidação de proteínas e danos ao DNA (Becana et al., 1998; Gupta et al., 2024).

Como consequência, plantas deficientes em Zn apresentam aumento da exsudação radicular de K^+, aminoácidos, açúcares e compostos fenólicos, evidenciando o aumento da permeabilidade das membranas celulares em decorrência do dano oxidativo (Cakmak; Marschner, 1988). Essa função protetora do Zn é particularmente importante em ambientes tropicais de elevada irradiância, onde a intensa incidência de radiação solar, frequentemente associada ao déficit hídrico, favorece a geração de EROs nos fotossistemas, aumentando a importância dos mecanismos antioxidantes para a manutenção da integridade celular e da eficiência fotossintética (Alloway, 2009; Cakmak, 2000).

2.2.4 Funções sobre produtividade e qualidade dos grãos

O pleno desempenho das funções bioquímicas e fisiológicas do Zn incluindo a manutenção da fotossíntese via anidrase carbônica, da síntese proteica pela integridade da maquinaria ribossomal, do desenvolvimento vegetal mediado por auxinas, da regulação gênica por proteínas zinc finger e da proteção antioxidante promovida pela Cu/Zn-SOD reflete-se diretamente no aumento da produtividade e da qualidade nutricional dos grãos (Cakmak; Kutman, 2018; Mutambu et al., 2023). Esses benefícios representam o principal objetivo do manejo e da adubação corretiva com Zn em sistemas agrícolas, especialmente nos solos tropicais, onde a deficiência desse micronutriente é recorrente (Silva et al., 2025).

Sob o ponto de vista da produtividade, a disponibilidade adequada de Zn favorece a expressão do potencial produtivo das culturas ao integrar processos fisiológicos essenciais para o crescimento e o enchimento dos grãos. Em uma revisão abrangente, Alloway (2009) reuniu evidências de incrementos de produtividade de até 48% em arroz, 22% em milho, 50% em soja e 26% em citros em resposta ao suprimento adequado de Zn, demonstrando a magnitude das perdas ocasionadas por sua deficiência.

Em condições tropicais, Fageria et al. (2002) verificaram que a aplicação corretiva de Zn em Latossolos promoveu incrementos consistentes na produtividade de milho, arroz, feijão, soja e trigo, confirmando que a deficiência desse micronutriente constitui uma das principais limitações nutricionais ao potencial produtivo das culturas no Cerrado brasileiro. De forma complementar, a meta-análise conduzida por Mutambu et al., (2023), baseada em 441 comparações realizadas em diferentes

países e sistemas de cultivo, demonstrou aumento médio de 17% na produtividade de grãos de milho, com incrementos que alcançaram 1 t ha^{-1} em relação ao cultivo sem ZnEsses resultados evidenciam que, em condições de baixa disponibilidade de Zn no solo, o manejo adequado desse micronutriente constitui uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade das culturas.

Além dos ganhos em rendimento, a fertilização adequada de Zn melhora a qualidade nutricional dos grãos. Em revisão abrangente sobre biofortificação agronômica de cereais, Cakmak e Kutman (2018) demonstraram que a aplicação de Zn promove incremento médio de 53% na concentração do micronutriente nos grãos, com expressiva variação em função da cultura, da dose, do método de aplicação e das condições edafoclimáticas. O fornecimento adequado do micronutriente também favorece o acúmulo de proteína bruta, aminoácidos essenciais especialmente lisina e triptofano, além de compostos antioxidantes como tocoferóis (Vitamina E) e carotenoides (Cakmak; Kutman, 2018; Sangnak et al., 2026).

Essas evidências demonstram que o adequado suprimento de Zn não apenas assegura o funcionamento pleno dos processos bioquímicos e fisiológicos das plantas, mas também se traduz em ganhos consistentes de produtividade e qualidade nutricional dos grãos. Esses resultados reforçam a importância da manutenção dos teores de Zn no solo e na planta acima dos níveis críticos específicos para cada cultura e sistema de produção.

2.3. IMPORTÂNCIA DA ADUBAÇÃO CORRETIVA DO Zn E NÍVEIS CRÍTICOS NO SOLO E NA FOLHA

Os processos de absorção, transporte e redistribuição do Zn, bem como suas funções bioquímicas e fisiológicas nas plantas, somente se expressam plenamente quando o micronutriente está com seus teores adequados no solo, de modo que é absorvido pelas plantas em quantidade suficiente para atender à demanda nutricional das culturas sem ocasionar distúrbios fisiológicos. Assim, a fertilização de Zn para manter os teores em níveis adequados de Zn no sistema solo e planta constitui o principal objetivo da adubação corretiva, cuja eficiência depende da definição de níveis críticos capazes de distinguir condições de deficiência, suficiência e os limiares de toxidade. Nesse contexto, compreender os fundamentos da adubação corretiva e da calibração dos níveis críticos torna-se essencial para maximizar a produtividade, a qualidade dos grãos e a eficiência de uso do micronutriente em sistemas agrícolas tropicais.

A necessidade da adubação corretiva e de manutenção com Zn em sistemas de produção decorre da limitada capacidade natural dos solos em suprir esse micronutriente de forma contínua para atender à elevada demanda das culturas de alto potencial produtivo. Como discutido anteriormente, os Latossolos apresentam teores totais de Zn relativamente elevados, entretanto, apenas uma pequena fração encontra-se disponível para absorção pelas plantas. A maior parte do elemento permanece retida em formas pouco lábeis, principalmente associadas à fração residual e aos óxidos de Fe e Al, tornando-se praticamente inacessível ao sistema radicular (Abreu et al., 2007; Barreto et al., 2024). Essa limitação se baseia na exportação das culturas através das colheitas e práticas de correção do solo através da calagem. Recentemente, Moreira et al. (2026) propuseram um método de estimativa da necessidade de calagem baseado nos atributos químicos do solo e na composição do calcário, contemplando a correção do perfil até 0,40 m. Embora essa estratégia favoreça o aprofundamento do sistema radicular e a produtividade das culturas, o aumento do pH pode intensificar a adsorção e o envelhecimento do Zn, promovendo sua transferência gradual das frações mais lábeis para formas de menor disponibilidade. Portanto, o monitoramento do micronutriente torna-se necessário em áreas submetidas à correção intensiva do perfil do solo.

A importância da adubação corretiva torna-se ainda mais evidente diante da ocorrência da deficiência ou toxidade de Zn em condições nas quais frequentemente não são observados sintomas visuais característicos, embora alterações fisiológicas e metabólicas já estejam comprometendo o crescimento e a produtividade das plantas, fenômeno conhecido como fome ou toxidade oculta (Kaur; Garg, 2021). Nessa condição, reduções na atividade fotossintética, trocas gasosas na regulação do crescimento e nos mecanismos de defesa antioxidante limitam o desempenho das culturas antes mesmo do aparecimento de sintomas visíveis de deficiência e toxidade (Andresen et al., 2018; Dobrikova et al., 2021).

Hacisalihoglu e Kochian, (2003) demonstraram que a eficiência de utilização do Zn, e não apenas sua absorção pelas raízes, constitui um dos principais fatores responsáveis pelas diferenças de tolerância entre genótipos submetidos à deficiência do micronutriente. Esses resultados reforçam a importância da diagnose precoce e da manutenção de teores adequados de Zn no solo e na planta, de modo a garantir que cultivares modernas expressem plenamente seu potencial produtivo em ambientes tropicais.

Os níveis críticos de Zn atualmente utilizados nas recomendações de adubação foram estabelecidos a partir de estudos de calibração que relacionam os teores do micronutriente no solo e na planta com a produtividade relativa das culturas. Em experimento conduzido em vasos com soja cultivada em Latossolo Vermelho-Escuro franco-argiloso, Fageria (2000) adotou 90% da produção máxima de matéria seca para determinar os níveis críticos de suficiência. Os valores obtidos foram de 0,8 mg kg^{-1} de Zn no solo pelo extrator Mehlich-1, 0,3 mg kg^{-1} pelo DTPA e 20 mg kg^{-1} na matéria seca da parte aérea. Para definir a toxicidade, o autor considerou a concentração associada à redução de 10% da produção após o ponto de máximo, obtendo níveis críticos de 53 mg kg^{-1} pelo Mehlich-1, 33 mg kg^{-1} pelo DTPA e 187 mg kg^{-1} na parte aérea. Esses resultados demonstram que os níveis críticos dependem do extrator e do tecido analisado; contudo, por terem sido obtidos em vasos e na parte aérea total, sua aplicação à diagnose foliar e às condições de campo é limitada.

Para a soja, a faixa adequada de concentração de Zn na folha diagnóstica em condições tropicais de campo é de 20 a 50 mg kg^{-1} (Ambrosano et al., 1997), permanecendo inalterada há mais de 25 anos (Quaggio et al., 2022), o que evidencia o limitado avanço das pesquisas sobre nutrição com Zn nessa cultura. Para o solo, os teores considerados adequados variam de 0,6 a 1,2 mg dm^{-3} de Zn, dependendo do método de extração e do sistema de recomendação adotado (Boaretto, 2022). Apesar desses avanços na definição de faixas de suficiência, ainda inexistem níveis críticos de toxicidade estabelecidos para o solo e para a folha da soja em condições de campo, evidenciando uma importante lacuna no conhecimento e justificando estudos voltados ao estabelecimento desses limites.

A variabilidade dos níveis críticos observada na literatura decorre não apenas das diferenças entre os métodos de extração, mas também das características físicas, químicas e mineralógicas dos solos, bem como da cultura utilizada na calibração. Nos Oxisol, essa variabilidade é particularmente expressiva em razão da elevada diversidade textural e mineralógica desses solos. Solos mais argilosos e ricos em óxidos de Fe e Al apresentam maior capacidade de retenção do Zn, enquanto solos arenosos, com menor capacidade tampão, são mais suscetíveis ao esgotamento das formas disponíveis do micronutriente (Fageria, 2000; Sousa; Lobato, 2004).

Além das diferenças entre solos e métodos analíticos, evidências indicam que os níveis críticos tradicionalmente utilizados podem não representar adequadamente os sistemas agrícolas modernos de alta produtividade. Grande parte das calibrações

empregadas foi desenvolvida há várias décadas, com cultivares de menor potencial produtivo e menor demanda por Zn. Nesse sentido, Inocêncio et al., (2012) verificaram, em Latossolo Vermelho argiloso, respostas positivas da soja à adubação com Zn mesmo em solo com teores acima do nível crítico estabelecido para a cultura, indicando que os critérios de suficiência vigentes podem estar subestimados para os sistemas de produção atuais e sinalizando a necessidade de revisão dos parâmetros de calibração (Fageria, 2000; Galrão, 1996; Sousa; Lobato, 2004).

A confiabilidade dos níveis críticos de Zn, tanto no solo quanto na planta, é influenciada por fatores metodológicos, edáficos e fisiológicos que impedem sua interpretação como valores absolutos. No solo, atributos como pH, matéria orgânica, textura e mineralogia, especialmente o teor de óxidos de Fe e Al, modificam a disponibilidade do micronutriente e sua extração pelos diferentes métodos químicos. Na planta, a interpretação dos teores foliares depende do estádio fenológico, da folha amostrada, da cultivar e das condições ambientais durante o ciclo de cultivo, uma vez que processos de crescimento, redistribuição e senescência alteram naturalmente a concentração de Zn nos tecidos (Abreu et al., 2007; Barrow, 1993; Malavolta et al., 1997). Essas limitações tornam-se ainda mais relevantes nos sistemas agrícolas atuais, caracterizados pelo uso de cultivares de elevado potencial produtivo e maior demanda por Zn. Nessas condições, pesquisas de campo têm demonstrado respostas positivas à adubação com Zn mesmo em solos classificados como suficientes pelos critérios convencionais, indicando que parte dos níveis críticos tradicionalmente utilizados pode não representar adequadamente os sistemas agrícolas modernos e reforçando a necessidade de sua atualização periódica (Inocêncio et al., 2012; Kihara et al., 2024; Liu et al., 2020).

Diante desse cenário, a integração entre a análise de solo e a análise foliar constitui a estratégia mais robusta para o diagnóstico da disponibilidade de Zn e para a recomendação da adubação corretiva. Enquanto a análise de solo estima o potencial de fornecimento do micronutriente pelo sistema edáfico, a análise foliar permite verificar se esse Zn está sendo efetivamente absorvido, transportado e utilizado pela planta (Hamzah et al., 2022). Assim, situações em que o solo apresenta teores considerados adequados, mas a planta manifesta deficiência, indicam restrições à biodisponibilidade do Zn, ao passo que concentrações foliares satisfatórias em solos com baixos teores podem refletir maior eficiência de absorção e utilização pela cultivar (Hacisalihoglu, 2022). Dessa forma, a diagnose integrada aumenta a precisão das

recomendações de adubação corretiva, tornando o manejo do Zn mais eficiente sob os pontos de vista agronômico, econômico e ambiental.

2.4 SINTESE E PERSPECTIVAS FUTURAS

Diante das lacunas apresentadas, esta pesquisa avaliou o efeito residual de doses elevadas de Zn sobre sua disponibilidade no solo, o estado nutricional, as respostas fisiológicas e bioquímicas e a produtividade da soja cultivada em sucessão. Essa abordagem busca ampliar a compreensão da toxicidade do micronutriente em condições de campo e contribuir para a interpretação conjunta das análises de solo e folha. Espera-se que os resultados subsidiem o estabelecimento de níveis críticos de toxicidade e recomendações mais seguras para o manejo do Zn residual. Estudos futuros em diferentes Latossolos, cultivares e condições edafoclimáticas serão necessários para ampliar a aplicabilidade das informações obtidas.

3. REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645–736.

AJEESH KRISHNA, T. P.; MAHARAJAN, T.; VICTOR ROCH, G.; IGNACIMUTHU, S.; ANTONY CEASAR, S. Structure, function, regulation and phylogenetic relationship of zip family transporters of plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00662.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico; Fundação IAC, 1997. p. 189–203.

ANDRESEN, E.; PEITER, E.; KÜPPER, H. Trace metal metabolism in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 5, p. 909–954, 2018. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/erx465.

ANISIMOV, V. S.; ANISIMOVA, L. N.; SANZHAROV, A. I. Zinc plant uptake as result of edaphic factors acting. **Plants**, v. 10, n. 11, 2496, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10112496.

ASSUNÇÃO, A. G. L.; HERRERO, E.; LIN, Y.-F.; HUETTEL, B.; TALUKDAR, S.; SMACZNIAK, C.; IMMINK, R. G. H.; VAN ELDIK, M.; FIERS, M.; SCHAT, H.; AARTS, M. G. M. *Arabidopsis thaliana* transcription factors bZIP19 and bZIP23 regulate the adaptation to zinc deficiency. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 22, p. 10296–10301, 2010. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1004788107.

BARBOSA, J. M.; REZENDE, C. F. A.; LEANDRO, W. M.; RATKE, R. F.; FERNANDES, E. P. Micronutrient application and residual effect on corn production in a no-tillage system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2187–2198, 2012. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n6p2187.

BARRETO, M. S. C.; ELZINGA, E. J.; ROUFF, A. A.; SIEBECKER, M. G.; SPARKS, D. L.; ALLEONI, L. R. F. Zinc speciation in highly weathered tropical soils affected by large scale vegetable production. **Science of The Total Environment**, v. 916, 170223, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170223.

BARROW, N. J. Testing a mechanistic model. II. The effects of time and temperature on the reaction of zinc with a soil. **Journal of Soil Science**, v. 37, n. 2, p. 277–286, 1986. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00029.x.

BARROW, N. J. Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. In: ROBSON, A. D. (ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Springer, 1993. p. 15–31. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_2.

BECANA, M.; MORAN, J. F.; ITURBE-ORMAETXE, I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. **Plant and Soil**, v. 201, n. 1, p. 137–147, 1998. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1004375732137.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj14.0435.

BHARTI, K.; PANDEY, N.; SHANKHDHAR, D.; SRIVASTAVA, P. C.; SHANKHDHAR, S. C. Effect of different zinc levels on activity of superoxide dismutases & acid phosphatases and organic acid exudation on wheat genotypes. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 20, n. 1, p. 41–48, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s12298-013-0201-7.

BORKERT, C. M.; COX, F. R.; TUCKER, M. R. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice, and corn in soil mixtures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, p. 2991–3005, 1998. DOI: https://doi.org/10.1080/00103629809370171.

BOTOMAN, L.; NALIVATA, P. C.; CHIMUNGU, J. G.; BAILEY, E. H.; MUNTHALI, M. W.; ANDER, E. L.; MOSSA, A.-W.; LARK, R. M.; BROADLEY, M. R. Residual soil-applied zinc improves grain zinc nutritional quality of maize grown under contrasting soil types in Malawi. **Frontiers in Soil Science**, v. 5, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1656634.

BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P.; ZELKO, I.; LUX, A. Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x.

CABOT, C.; MARTOS, S.; LLUGANY, M.; GALLEGO, B.; TOLRÀ, R.; POSCHENRIEDER, C. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivores. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01171.

CAKMAK, I. Tansley Review No. 111. **New Phytologist**, v. 146, n. 2, p. 185–205, 2000. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?. **Plant and Soil**, v. 302, n. 1–2, p. 1–17, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3.

CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/ejss.12437.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Increase in membrane permeability and exudation in roots of zinc deficient plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 132, n. 3, p. 356–361, 1988. DOI: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(88)80120-2.

CHAHAL, S. K.; HETTIARACHCHI, G. M.; NELSON, N.; GUTTIERI, M. Chemical speciation of zinc in fertilized neutral soils governs zinc mobility and phytoavailability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 90, n. 1, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/saj2.70176.

CHAO, Z.-F.; CHAO, D.-Y. Barriers and carriers for transition metal homeostasis in plants. **Plant Communications**, v. 6, n. 2, 101235, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101235.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. DOI: https://doi.org/10.1002/3527602097.

CURIE, C.; CASSIN, G.; COUCH, D.; DIVOL, F.; HIGUCHI, K.; LE JEAN, M.; MISSON, J.; SCHIKORA, A.; CZERNIC, P.; MARI, S. Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. **Annals of Botany**, v. 103, n. 1, p. 1–11, 2009. DOI: https://doi.org/10.1093/aob/mcn207.

DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; MCLAUGHLIN, M. J. Diffusion and solubility control of fertilizer-applied zinc: chemical assessment and visualization. **Plant and Soil**, v. 386, n. 1–2, p. 195–204, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-014-2266-7.

DEGRYSE, F.; VOEGELIN, A.; JACQUAT, O.; KRETZSCHMAR, R.; SMOLDERS, E. Characterization of zinc in contaminated soils: complementary insights from isotopic exchange, batch extractions and XAFS spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 2, p. 318–330, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01332.x.

DOBRIKOVA, A.; APOSTOLOVA, E.; HANĆ, A.; YOTSOVA, E.; BORISOVA, P.; SPERDOULI, I.; ADAMAKIS, I.-D. S.; MOUSTAKAS, M. Tolerance mechanisms of the aromatic and medicinal plant salvia sclarea l. to excess zinc. **Plants**, v. 10, n. 2, 194, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10020194.

DONNER, E.; BROOS, K.; HEEMSBERGEN, D.; WARNE, M. St. J.; MCLAUGHLIN, M. J.; HODSON, M. E.; NORTCLIFF, S. Biological and chemical assessments of zinc ageing in field soils. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 1, p. 339–345, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.034.

DONNER, E.; MCLAUGHLIN, M. J.; HODSON, M. E.; HEEMSBERGEN, D.; WARNE, M. St. J.; NORTCLIFF, S.; BROOS, K. Ageing of zinc in highly-weathered iron-rich soils. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1–2, p. 83–95, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1247-y.

ESCUDERO-ALMANZA, D. J.; OJEDA-BARRIOS, D. L.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O. A.; SÁNCHEZ CHÁVEZ, E.; RUÍZ-ANCHONDO, T.; SIDA-ARREOLA, J. P. Carbonic anhydrase and zinc in plant physiology. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 72, n. 1, p. 140–146, 2012. DOI: https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000100022.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2000.

FAGERIA, N. K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: https://doi.org/10.1201/9781420075113.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 77, p. 185–268, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6.

FERREIRA FONTES, M. P.; DE MATOS, A. T.; DA COSTA, L. M.; LIMA NEVES, J. C. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper, and lead in three highly-weathered Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 17–18, p. 2939–2958, 2000. DOI: https://doi.org/10.1080/00103620009370640.

GALRÃO, E. Z. Métodos de correção da deficiência de zinco para o cultivo do milho num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso sob Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 18, n. 2, p. 229–233, 1994.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 20, n. 2, p. 283–289, 1996.

GASPAR, A. P.; LABOSKI, C. A. M.; NAEVE, S. L.; CONLEY, S. P. Secondary and micronutrient uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1328–1338, 2018. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0699.

GROTZ, N.; FOX, T.; CONNOLLY, E.; PARK, W.; GUERINOT, M. Lou; EIDE, D. Identification of a family of zinc transporter genes from Arabidopsis that respond to zinc deficiency. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 95, n. 12, p. 7220–7224, 1998. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.7220.

GROTZ, N.; GUERINOT, M. Lou. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research**, v. 1763, n. 7, p. 595–608, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2006.05.014.

GUPTA, R.; VERMA, N.; TEWARI, R. K. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. **Plant Cell Reports**, v. 43, n. 9, 213, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6.

HACISALIHOGLU, G. Unraveling the Mechanisms of zinc efficiency in crop plants: From Lab to Field Applications. **Plants**, v. 11, n. 2, 177, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11020177.

HACISALIHOGLU, G.; KOCHIAN, L. V. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v. 159, n. 2, p. 341–350, 2003. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00826.x.

HAMZAH SALEEM, M.; USMAN, K.; RIZWAN, M.; AL JABRI, H.; ALSAFRAN, M. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092.

HAN, G.; LU, C.; GUO, J.; QIAO, Z.; SUI, N.; QIU, N.; WANG, B. C2H2 Zinc Finger Proteins: Master Regulators of Abiotic Stress Responses in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00115.

HAN, Y.-S.; PARK, J. H.; AHN, J. S. Aging effects on fractionation and speciation of redox-sensitive metals in artificially contaminated soil. **Chemosphere**, v. 263, 127931, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127931.

HAYDON, M. J.; COBBETT, C. S. A novel major facilitator superfamily protein at the tonoplast influences zinc tolerance and accumulation in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 143, n. 4, p. 1705–1719, 2007. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.106.092015.

HAYDON, M. J.; KAWACHI, M.; WIRTZ, M.; HILLMER, S.; HELL, R.; KRÄMER, U. Vacuolar nicotianamine has critical and distinct roles under iron deficiency and for zinc sequestration in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 24, n. 2, p. 724–737, 2012. DOI: https://doi.org/10.1105/tpc.111.095042.

INOCÊNCIO, M. F.; RESENDE, Á. V. de; FURTINI NETO, A. E.; VELOSO, M. P.; FERRAZ, F. M.; HICKMANN, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 10, p. 1550–1554, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012001000020.

JALAL, A.; OLIVEIRA, C. E. da S.; FERNANDES, H. B.; GALINDO, F. S.; SILVA, E. C. da; FERNANDES, G. C.; NOGUEIRA, T. A. R.; DE CARVALHO, P. H. G.; BALBINO, V. R.; LIMA, B. H. de; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Diazotrophic Bacteria is an alternative strategy for increasing grain biofortification, yield and zinc use efficiency of maize. **Plants**, v. 11, n. 9, 1125, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11091125.

JALALI, M.; KHANLARI, Z. V. Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran. **Geoderma**, v. 143, n. 1–2, p. 26–40, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.002.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, v. 253, n. 6, 129, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z.

KIHARA, J.; SILESHI, G. W.; BOLO, P.; MUTAMBU, D.; SENTHILKUMAR, K.; SILA, A.; DEVKOTA, M.; SAITO, K. Maize-grain zinc and iron concentrations as influenced by agronomic management and biophysical factors: a meta-analysis. **Food Security**, v. 16, n. 5, p. 1147–1173, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12571-024-01478-5.

LI, S.; ZHOU, X.; HUANG, Y.; ZHU, L.; ZHANG, S.; ZHAO, Y.; GUO, J.; CHEN, J.; CHEN, R. Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. **BMC Plant Biology**, v. 13, n. 1, 114, 2013. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-114.

LIANG, B.; HAN, G.; ZHAO, Y. Zinc isotopic signature in tropical soils: A review. **Science of The Total Environment**, v. 820, 153303, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153303.

LILAY, G. H.; THIÉBAUT, N.; DU MEE, D.; ASSUNÇÃO, A. G. L.; SCHJOERRING, J. K.; HUSTED, S.; PERSSON, D. P. Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 242, n. 3, p. 881–902, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.19645.

LIU, D.-Y.; ZHANG, W.; LIU, Y.-M.; CHEN, X.-P.; ZOU, C.-Q. Soil application of zinc fertilizer increases maize yield by enhancing the kernel number and kernel weight of inferior grains. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00188.

LIU, Y.; KHAN, A. R.; GAN, Y. C2H2 Zinc finger proteins response to abiotic stress in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 5, 2730, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23052730.

LOCK, K.; JANSSEN, C. R. Influence of ageing on zinc bioavailability in soils. **Environmental Pollution**, v. 126, n. 3, p. 371–374, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00232-X.

LU, Y.; HALL, D. A.; LAST, R. L. A small zinc finger thylakoid protein plays a role in maintenance of photosystem ii in Arabidopsis thaliana. **The Plant Cell**, v. 23, n. 5, p. 1861–1875, 2011. DOI: https://doi.org/10.1105/tpc.111.085456.

MA, Y. B.; UREN, N. C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 76, n. 1, p. 11–18, 2006. DOI: https://doi.org/10.1007/s10705-006-9036-8.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9.

MARTÍNEZ CUESTA, N.; CARCIOCHI, W.; WYNGAARD, N.; SAINZ ROZAS, H.; SILVA, S.; SALVAGIOTTI, F.; BARBIERI, P. Zinc fertilization strategies in soybean: plant uptake, yield, and seed concentration. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 6, p. 1134–1144, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067059.

MATTIELLO, E. M.; CANCELLIER, E. L.; DA SILVA, R. C.; DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; MCLAUGHLIN, M. J. Efficiency of soil-applied 67Zn-enriched fertiliser across three consecutive crops. **Pedosphere**, v. 31, n. 4, p. 531–537, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60044-3.

MENEZES, A. A.; DIAS, L. E.; NEVES, J. C. L.; SILVA, J. V. O. da. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DPTA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 34, n. 2, p. 417–424, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200015.

MORAIS, E. G. de; SILVA, C. A.; JINDO, K. Humic Acid Improves Zn Fertilization in Oxisols Successively Cultivated with Maize–Brachiaria. **Molecules**, v. 26, n. 15, 4588, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules26154588.

MOREIRA, S. G. et al. A practical method for estimating liming requirements based on soil chemical attributes and limestone composition. **Soil & Tillage Research**, v. 255, 106816, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106816.

MOSSA, A.-W.; GASHU, D.; BROADLEY, M. R.; DUNHAM, S. J.; MCGRATH, S. P.; BAILEY, E. H.; YOUNG, S. D. The effect of soil properties on zinc lability and solubility in soils of Ethiopia – an isotopic dilution study. **SOIL**, v. 7, n. 1, p. 255–268, 2021. DOI: https://doi.org/10.5194/soil-7-255-2021.

MUTAMBU, D.; KIHARA, J.; MUCHERU-MUNA, M.; BOLO, P.; KINYUA, M. Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis. **Heliyon**, v. 9, n. 5, e16040, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16040.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L.; MELÍCIO, A. C. F. D. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 26, n. 3, p. 599–606, 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300004.

OLIVEIRA, N. T. de; NAMORATO, F. A.; RAO, S.; CARDOSO, A. A. de S.; REZENDE, P. M. de; GUILHERME, L. R. G.; LIU, J.; LI, L. Iron counteracts zinc-induced toxicity in soybeans. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 194, p. 335–344, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.024.

OLSEN, L. I.; PALMGREN, M. G. Many rivers to cross: the journey of zinc from soil to seed. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, 2014. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00030.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F.; MENDONÇA, E. de S.; GEBRIM, F. de O.; MOREIRA, F. F. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 30, n. 5, p. 859–868, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000500012.

PRADO, R. de M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4.

PRASK, J. A.; PLOCKE, D. J. A role for zinc in the structural integrity of the cytoplasmic ribosomes of *Euglena gacilis*. **Plant Physiology**, v. 48, n. 2, p. 150–155, 1971. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.48.2.150.

REHMAN, A.; FAROOQ, M.; OZTURK, L.; ASIF, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. **Plant and Soil**, v. 422, n. 1–2, p. 283–315, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3.

REHMAN, R.; LATIF, M. M.; KHAN, M. A.; AHMED, Z. Agronomic biofortification of crops with zinc: a comprehensive overview. In: GOVINDARAJ, M.; GOVINDAN, V.; PALACIOS, N. (ed.). **Breeding zinc crops for better human health**. Cham: Springer, 2025. p. 153–184. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-84342-6_8.

RICACHENEVSKY, F. K.; MENGUER, P. K.; SPEROTTO, R. A.; WILLIAMS, L. E.; FETT, J. P. Roles of plant metal tolerance proteins (MTP) in metal storage and potential use in biofortification strategies. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, 2013. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00144.

RITCHEY, K. D.; COX, F. R.; GALRÃO, E. Z.; YOST, R. S. Zinc availability for corn, sorghum and soybean in a clayey dark-red latosol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 21, n. 3, p. 215–225, 1986.

ROBERTS, D. R.; FORD, R. G.; SPARKS, D. L. Kinetics and mechanisms of Zn complexation on metal oxides using EXAFS spectroscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 263, n. 2, p. 364–376, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00281-9.

SANGNAK, S.; VEERADITTAKIT, J.; PROM-U-THAI, C. Comparative impacts of nitrogen, sulfur, and zinc fertilization on grain yield, protein content, antioxidant capacity and its loss during polishing process among rice varieties. **Frontiers in Agronomy**, v. 7, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1725441.

SANTOS, A. F. dos; MORAIS, O. M.; PRADO, R. de M.; LEAL, A. J. F.; SILVA, R. P. da. Relation of toxicity in corn seeds treated with zinc and salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 10, p. 1123–1131, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1323097.

SILVA, A. B. P.; BORGES, L. F. S.; LUCINI, F.; SILVA, G. N.; SANTOS, E. F. Technologies in Agronomic Biofortification with Zinc in Brazil: A Review. **Plants**, v. 14, n. 12, 1828, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14121828.

SINCLAIR, S. A.; KRÄMER, U. The zinc homeostasis network of land plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research**, v. 1823, n. 9, p. 1553–1567, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.05.016.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/555355. Acesso em: 28 ago. 2026.

SOUZA, H. A. de; VIEIRA, P. F. de M. J.; ROZANE, D. E.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA, A. C. de M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190125, 2020. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190125.

STANTON, C.; SANDERS, D.; KRÄMER, U.; PODAR, D. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. **Molecular Plant**, v. 15, n. 1, p. 65–85, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008.

TAKATSUJI, H. Zinc-finger transcription factors in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences (CMLS)**, v. 54, n. 6, p. 582–596, 1998. DOI: https://doi.org/10.1007/s000180050186.

TAKATSUJI, H. Zinc-finger proteins: the classical zinc finger emerges in contemporary plant science. **Plant Molecular Biology**, v. 39, n. 6, p. 1073–1078, 1999. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1006184519697.

WALSH, L. M.; STEEVENS, D. R.; SEIBEL, H. D.; WEIS, G. G. Effect of high rates of zinc on several crops grown on an irrigated Plainfield sand. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 3, n. 3, p. 187–195, 1972. DOI: https://doi.org/10.1080/00103627209366367.

WANG, H.; JIN, J. Y. Photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, and lipid peroxidation of maize leaves as affected by zinc deficiency. **Photosynthetica**, v. 43, n. 4, p. 591–596, 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/s11099-005-0092-0.

WAYCHUNAS, G. A.; FULLER, C. C.; DAVIS, J. A. Surface complexation and precipitate geometry for aqueous Zn(II) sorption on ferrihydrite I: X-ray absorption extended fine structure spectroscopy analysis. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, n. 7, p. 1119–1137, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00853-5.

ZENG, H.; WU, H.; YAN, F.; YI, K.; ZHU, Y. Molecular regulation of zinc deficiency responses in plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 261, 153419, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153419.

CAPÍTULO 2 – Níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha e implicações fisiológicas e nutricionais na cultura da soja após um ano da incorporação do Zn em Latossolo

RESUMO: A toxicidade de zinco (Zn) e seus níveis críticos no solo e nas folhas da soja ainda são pouco estudados em condições de campo, especialmente em sistemas de adubação corretiva nos quais o micronutriente é incorporado em Oxisol argiloso com elevada capacidade de adsorção. Compreender as respostas da soja ao excesso de Zn e definir seus limiares de toxicidade no solo e na planta são aspectos importantes para o manejo seguro desse micronutriente. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos residuais da aplicação de Zn incorporado em Oxisol argiloso sobre o estado nutricional, os parâmetros fisiológicos e bioquímicos e a produtividade da soja. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com cinco doses de Zn (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}) e quatro repetições. As doses foram aplicadas e incorporadas ao solo antes do cultivo do milho, sendo seus efeitos residuais posteriormente avaliados na soja. A aplicação de Zn aumentou linearmente os teores disponíveis do micronutriente no solo e sua concentração nas folhas, sem alterar o estado nutricional dos demais nutrientes. Doses elevadas de Zn intensificaram o estresse oxidativo e ativaram parcialmente o sistema de defesa antioxidante, evidenciado pelo aumento da atividade da superóxido dismutase e do teor de ácido ascórbico. Entretanto, não houve contribuição de outros compostos antioxidantes relevantes, como carotenoides, fenóis, flavonoides e antocianinas. Essa resposta antioxidante foi insuficiente para evitar os danos causados pelo excesso de Zn, que reduziram a eficiência fotoquímica do fotossistema II, a taxa fotossintética, o teor de sacarose e a produtividade da soja. Os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e nas folhas foram de 13 mg dm^{-3} e 76 mg kg^{-1}, respectivamente. Os resultados indicam que os danos à fotossíntese provocados pela toxicidade de Zn estiveram associados principalmente ao estresse oxidativo e à resposta antioxidante insuficiente, e não ao antagonismo nutricional ou a alterações no metabolismo dos aminoácidos. Esta pesquisa propõe critérios iniciais para a interpretação dos teores de Zn no solo e nas folhas, contribuindo para o manejo seguro da adubação corretiva com Zn em solos tropicais e para a compreensão dos mecanismos de resposta da soja à toxicidade desse micronutriente.

Palavra-chave: Doses de Zn, Diagnose foliar, Fisiologia vegetal, nutrição de plantas, fertilidade dos solos

Critical Zn toxicity levels in soil and leaves and their physiological and nutritional implications for soybean one year after Zn incorporation into an Oxisol

Abstract: Zinc (Zn) toxicity and its critical levels in soil and soybean leaves remain poorly understood under field conditions, particularly in corrective fertilization systems in which the micronutrient is incorporated into clayey Oxisols with a high adsorption capacity. Understanding soybean responses to excessive Zn and defining toxicity thresholds in soil and plant tissues are essential for the safe management of this micronutrient. Therefore, this study aimed to evaluate the residual effects of Zn application incorporated into a clayey Oxisol on the nutritional status, physiological and biochemical parameters, and yield of soybean. The experiment was conducted in a randomized complete block design with five Zn rates (0, 12, 24, 48, and 96 kg ha^{-1}) and four replicates. The Zn rates were applied and incorporated into the soil before maize cultivation, and their residual effects were subsequently evaluated in soybean. Zinc application linearly increased the available Zn concentration in the soil and its concentration in the leaves without affecting the nutritional status of the other nutrients. High Zn rates intensified oxidative stress and partially activated the antioxidant defense system, as evidenced by increased superoxide dismutase activity and ascorbic acid concentration. However, other relevant antioxidant compounds, including carotenoids, phenols, flavonoids, and anthocyanins, did not contribute to this response. This antioxidant response was insufficient to prevent the damage caused by excess Zn, which reduced photosystem II photochemical efficiency, photosynthetic rate, sucrose concentration, and soybean yield. The critical Zn toxicity levels in the soil and leaves were 13 mg dm^{-3} and 76 mg kg^{-1}, respectively. The results indicate that the photosynthetic damage caused by Zn toxicity was primarily associated with oxidative stress and an insufficient antioxidant response rather than nutritional antagonism or alterations in amino acid metabolism. This study proposes initial criteria for interpreting Zn concentrations in soil and leaves, thereby contributing to the safe management of corrective Zn fertilization in tropical soils and to a better understanding of soybean response mechanisms to Zn toxicity.

Keywords: Zn rates, leaf diagnosis, plant physiology, plant nutrition, soil fertility.

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de zinco (Zn) é uma das principais limitações nutricionais à produção agrícola mundial, especialmente em regiões tropicais caracterizadas por solos altamente intemperizados, como os Latossolos (Fageria, 2000), que apresentam elevada acidez, baixo teor de matéria orgânica e alta capacidade de adsorção de Zn aos óxidos de ferro e alumínio (Alloway, 2009; Raij, 2001). Nessas condições, a disponibilidade de Zn pode ser insuficiente para atender à demanda das culturas, limitando a produtividade agrícola, particularmente em culturas sensíveis, como a soja (Prado, 2021), em razão do papel essencial desse micronutriente na ativação enzimática, na defesa antioxidante e nos processos de trocas gasosas (Kaur; Garg, 2021). Assim, a adubação com Zn via solo, especialmente por meio da aplicação a lanço seguida de incorporação, representa uma estratégia eficiente devido ao seu efeito residual, decorrente da liberação gradual do Zn ao longo dos ciclos de cultivo. Esse efeito residual permite que o Zn permaneça disponível para culturas subsequentes, contribuindo para o aumento da produtividade (Inocêncio, 2012; Leite et al., 2020).

Em sistemas de adubação corretiva, as doses de Zn aplicadas ao solo, particularmente por meio da aplicação a lanço seguida de incorporação, tendem a ser elevadas em razão da forte adsorção desse micronutriente aos coloides do solo, processo intensificado em solos tropicais após a calagem. O aumento do teor de argila e do pH do solo favorece a retenção de Zn pelos óxidos de ferro e alumínio em Latossolos, reduzindo sua disponibilidade às plantas (Abreu et al., 2007). Nessas condições, os Latossolos argilosos impõem maiores desafios ao manejo do Zn, exigindo estratégias que assegurem o suprimento adequado desse micronutriente, sem causar efeitos tóxicos. A disponibilidade excessiva de Zn pode comprometer a homeostase nutricional e reduzir tanto a eficiência do fotossistema II quanto a assimilação de CO_2 (Cakmak, 2000).

Embora estudos anteriores tenham avaliado os efeitos imediatos da aplicação de Zn em culturas como o milho (Galrão, 1996; Ritchey et al., 1986), ainda são escassas as informações sobre seus efeitos residuais em sistemas de sucessão de culturas, especialmente para a soja, uma das culturas agrícolas mais importantes das regiões tropicais. Além disso, os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na planta permanecem pouco compreendidos para a soja em condições de campo. Os estudos

existentes foram conduzidos, em sua maioria, em casa de vegetação ou em vasos (Borkert et al., 1998; Fageria, 2000), nos quais as avaliações se restringem aos estádios iniciais de desenvolvimento e o crescimento radicular é limitado, não representando adequadamente as condições reais de cultivo. Essa lacuna de conhecimento dificulta a interpretação das análises de solo e foliares, bem como o estabelecimento de recomendações de adubação com Zn mais eficientes e seguras para os sistemas de produção de soja.

Para a soja, a faixa adequada de concentração de Zn na folha diagnóstica em cultivos conduzidos em condições tropicais de campo é de 20 a 50 mg kg^{-1} (Ambrosano et al., 1997), permanecendo inalterada há mais de 25 anos (Quaggio et al., 2022), o que evidencia o limitado avanço das pesquisas sobre nutrição com Zn nessa cultura. Essa deficiência de conhecimento é ainda mais evidente em relação aos limiares de toxicidade de Zn, para os quais inexistem estudos conduzidos em condições de campo. As informações atualmente disponíveis restringem-se a relatos que sugerem concentrações foliares próximas de 72 mg kg^{-1} como excessivas para a soja; entretanto, esses valores não foram estabelecidos com base em validação experimental em condições de campo (Embrapa, 2011).

Há evidências de que concentrações excessivas de Zn nas plantas podem induzir estresse oxidativo e distúrbios fisiológicos capazes de comprometer o aparato fotossintético (Kaur; Garg, 2021). Entretanto, pouco se conhece sobre as respostas do sistema antioxidante e da homeostase nutricional da soja cultivada em condições de campo. Estudos conduzidos em vasos indicam que o excesso de Zn pode provocar interações antagônicas com outros nutrientes, principalmente com o Fe (de Oliveira et al., 2023), resultando em importantes deficiências nutricionais. No entanto, em condições de campo, especialmente em Latossolos naturalmente ricos em Fe e onde as plantas desenvolvem um sistema radicular mais extenso, esses efeitos adversos podem ser atenuados. A ausência dessas informações, aliada à falta de níveis críticos de toxicidade de Zn bem estabelecidos para o solo e para a planta, dificulta a interpretação das análises de solo e foliares e limita o desenvolvimento de recomendações de manejo do Zn mais seguras e eficientes.

Dessa forma, foram estabelecidas as seguintes hipóteses: (i) o Zn residual no solo, proveniente da adubação corretiva, pode alterar a absorção de Zn, a aquisição de outros nutrientes, o desempenho fisiológico e a produtividade de grãos da soja cultivada em sucessão; e (ii) elevadas concentrações de Zn no solo e nas folhas

podem comprometer os processos fisiológicos, especialmente a taxa fotossintética, principalmente em decorrência do estresse oxidativo associado a um sistema de defesa antioxidante insuficiente, e não em razão de desequilíbrios nutricionais envolvendo nutrientes distintos do Zn. Assim, este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação de Zn incorporado em um Latossolo argiloso sobre o estado nutricional, os parâmetros fisiológicos e bioquímicos e a produtividade de grãos da soja, visando elucidar as respostas dessa cultura à toxicidade de Zn em condições de campo e estabelecer níveis críticos de toxicidade no solo e na planta.

A compreensão dos mecanismos de resposta da cultura da soja sob toxicidade de Zn em campo será valiosa para aferir como essa espécie lida com eventual estresse oxidativo que compromete a cultura e isso deve orientar estratégias futuras para aumentar a tolerância desta espécie a toxicidade de Zn melhorando a sustentabilidade. E ainda sendo conhecido os limiares críticos de toxicidade de Zn será possível interpretar análise de solo e folha para realizar diagnósticos precisos para a cultura da soja e ao mesmo tempo orientar sistemas de manejo deste micronutriente mais seguros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Deliamento Experimental

O experimento foi realizado em condições de campo na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), localizada no município de Jaboticabal (-21º 15’ 3.13”; 48º 17’ 8.88”; 546 m de altitude média), no Estado de São Paulo, O zinco foi incorporado ao solo em 18 de dezembro de 2023. No primeiro cultivo após a aplicação do micronutriente, foi cultivado milho, no qual foram avaliados os efeitos imediatos da adubação com Zn. Após a colheita do milho, a soja, cultivar TMG 7063 IPRO, foi cultivada na mesma área durante a safra 2024/2025, entre 17 de novembro de 2024 e 8 de março de 2025.

O clima predominante foi classificado como tropical chuvoso e seco no inverno (Aw), pelo critério de classificação climática de (Köppen, 1948). Foram registrados os dados pluviométricos em estação meteorológica instalada na área experimental e foi obtido o balanço hídrico, durante o período de cultivo atingindo precipitação pluvial de 663 mm (Figura 1) embora a cultura requer em média de 400 a 700 mm (Embrapa (2007).

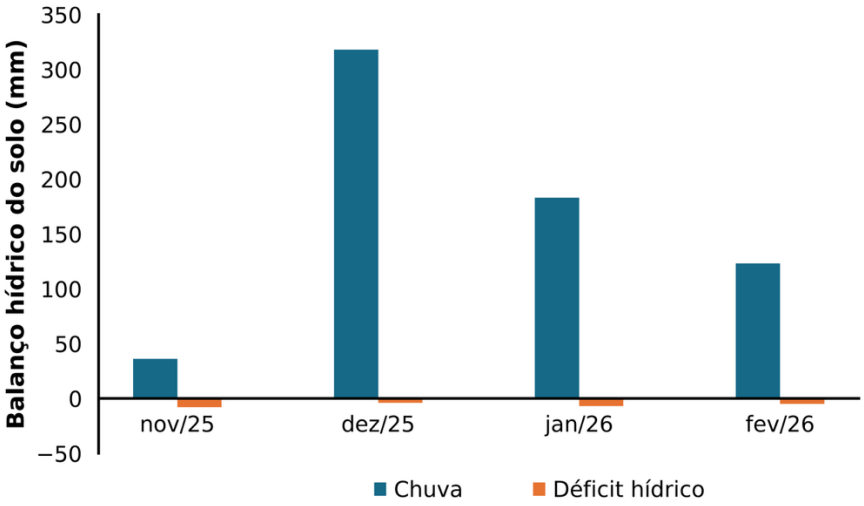


Figura 1. Balanço hídrico durante o período experimental.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, composto por cinco doses de Zn aplicadas ao solo (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1} de Zn) e quatro repetições. As doses foram definidas com base na recomendação do Boletim 100, que indica a aplicação de 6 kg ha^{-1} de Zn em solos com teor inferior a 0,6 mg dm^{-3}. Como o solo da área experimental já apresentava teor de Zn classificado como alto, estabeleceu-se como primeira dose 12 kg ha^{-1} de Zn, correspondente ao dobro da recomendação de referência. As doses subsequentes foram obtidas pelo aumento sucessivo em duas vezes (24, 48 e 96 kg ha^{-1} de Zn), visando proporcionar ampla variação na disponibilidade do micronutriente no solo e permitir a avaliação das respostas da cultura.

2.2 Preparo do solo e aplicação dos tratamentos

As doses crescentes de Zn foram aplicadas em 18 dezembro 2023, na forma de sulfato de zinco monoidratado (Zn = 33% e S = 18%), distribuídas a lanço sobre a superfície do solo e posteriormente incorporadas por meio de gradagem aradora pesada entre 0-20 cm profundidade, seguida de gradagem niveladora. Foi realizado equilíbrio do S entre os tratamentos, utilizando a fonte enxofre elementar.

A adubação de semeadura consistiu na aplicação de 350 kg ha^{-1} do fertilizante formulado NPK (08–28–16). Adicionalmente, 80 kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl) e 290 kg ha^{-1} de ureia foram aplicados em cobertura no estádio fenológico V4, de acordo com as exigências nutricionais da cultura, garantindo que os demais nutrientes fossem fornecidos em quantidades adequadas e que a dose de Zn fosse o único fator variado.

As análises químicas para avaliação da fertilidade do solo e a análise granulométrica foram realizadas de acordo com os métodos descritos por Raij et al. (2001) e Camargo et al. (1986), respectivamente, nas camadas de 0 - 20 e 20 - 40 cm de profundidade (Tabela 1). O solo da área é um Latossolo Vermelho Eutoférrico classificado conforme (Santos et al., 2018) que corresponde Oxisol (USDA Soil Taxonomy) tendo teores de Zn classificados como alto (> 1,2 mg dm^{-3} em DTPA) para as diferentes espécies (Raij et al., 1997; Boaretto et al., 2022).

Tabela 1. Análise químicas e granulométrica do solo da área experimental, Jaboticabal, São Paulo.

Camada	**B**	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**Argila**	**Silte**	**Areia**
cm			mg dm^{-3}			------	%	-----
0-20	0,42	0,60	13	28,2	2,7	54	21	24
20-40	0,52	0,3	7	30,1	1,2	57	20	23

	pH	**M.O.**	**P**	**S**	**Ca**	**Mg**	**Na**	**K**	**Al**	**H+Al**	**SB**	**CTC**	**V**	**m**
	$CaCl_2$	g dm^{-3}	mgdm^{-3}		----------mmol$_c$ dm^{-3}----------									-%-
0-20	6,1	22	33	6	32	13	-	3,3	0	25	48,8	73,5	66	0
20-40	6,0	16	17	17	30	13	-	2,7	0	25	46,0	71,7	64	0

M.O.= Matéria orgânica CTC: capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; m=saturação por alumínio; SB:soma de bases.

2.3 Análise química do Zn no Solo

Após a colheita da soja, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–20 cm. Em cada parcela experimental, 15 amostras simples foram coletadas aleatoriamente na área útil e combinadas para formar uma amostra composta representativa da parcela. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira com malha de 2 mm para a obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA).

O Zn disponível foi determinado pelo método de extração com ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA), conforme Lindsay e Norvell (1978). A solução extratora foi composta por DTPA a 0,005 mol L^{-1}, $CaCl_2$ a 0,01 mol L^{-1} e trietanolamina (TEA) a 0,1 mol L^{-1}, com pH ajustado para 7,3. Utilizou-se a proporção solo:extrator de 1:2, e a suspensão foi agitada durante 2 h antes da filtração em papel-filtro quantitativo. As concentrações de Zn nos extratos foram determinadas por espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS), e os resultados foram expressos em mg dm^{-3}.

2.4 Análise nutricional na folha diagnose, planta inteira e grãos

Na fase de florescimento pleno (R2), foram coletadas, em cada parcela, 15 terceiras folhas trifolioladas completamente desenvolvidas, contadas a partir do ápice da haste principal, para a diagnose nutricional da cultura da soja, conforme a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). Na mesma ocasião, foram coletadas 15 plantas inteiras por parcela para a determinação da produção de massa seca e do acúmulo de nutrientes na parte aérea. Por ocasião da colheita, foram coletados os grãos para a determinação dos teores e da exportação de nutrientes pela cultura da soja.

O material coletado foi lavado com água deionizada contendo solução 0,1% de detergente neutro, seguida por imersão em solução a 0,3% de HCl e enxague final com água deionizada. Em seguida, foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C ± 5, até a atingir a massa seca constante. Posteriormente, essas amostras moídas e analisadas para determinar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), cobre (Cu), ferro (Fe) e Zn foram determinados conforme métodos descritos por Bataglia et al., (1983).

2.5 A eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) e pigmentos fotossintéticos

A eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) foi determinada na folha diagnóstica entre 7:00 e 9:00 h utilizando um fluorômetro portátil (OS30P+, Opti-Sciences Inc., EUA), conforme metodologia descrita por (Lichtenthaler et al., 2005), no estádio reprodutivo R2. O conteúdo de carotenoides e feofitinas foi determinado a partir de discos foliares submetidos à extração em acetona a 80%, com leituras espectrofotométricas conforme metodologia de Lichtenthaler (1987).

2.6 Índice de flavonóides e antocianinas

Cinquenta e um dia após a semeadura, no estádio reprodutivo R2, o índice de flavonoides e antocianinas foi avaliado no terço médio da terceira folha totalmente madura, utilizando o Multi-Pigment Meter (MPM-100, OPTI-SCIENCES, EUA).

2.7 Fenóis totais

Os compostos fenólicos totais foram quantificados utilizando discos foliares frescos coletados 51 dias após a semeadura. A determinação foi realizada por meio de reação colorimétrica empregando o reagente de Folin–Ciocalteu e solução de Na_2CO_3 a 20%, conforme metodologia descrita por Singleton e Rossi, (1965). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (modelo DU640, Beckman, EUA) a

765 nm, e os resultados expressos com base em curva padrão apropriada.

2.8 Teor de Malondialdeído (MDA)

Aos sessenta dias após a semeadura, no estádio R2, amostras de tecido fresco (0,4 g) foram congeladas em nitrogênio líquido (−80 °C), maceradas com polivinilpirrolidona (PVPP) a 20% (m/v) e ácido tricloroacético (TCA) a 0,1% em gelo, e posteriormente centrifugadas a 15.000 rpm, 4°C, por 30 minutos. Ao sobrenadante, adicionou-se ácido tiobarbitúrico (TBA) a 0,5% em TCA a 20%, incubando-se a mistura por 30 minutos a 95°C. Em seguida, as amostras foram resfriadas em gelo por 10 minutos e novamente centrifugadas a 15.000 rpm, 4°C, por 10 minutos. As leituras foram realizadas a 535 e 600 nm, e o teor de malondialdeído (MDA) foi calculado utilizando o coeficiente de extinção molar $\varepsilon = 1{,}55 \times 10^5\ M^{-1}\ cm^{-1}$ (Gratão et al., 2012).

2.9 Extração e análise da atividade da superóxido dismutase

A extração de enzimas de folhas seguiu Bradford (1976). Os tecidos foram homogeneizados em um almofariz refrigerado com pistilo usando um tampão de extração (tampão fosfato de potássio 100 mM, pH 7,5, EDTA 1 mM, DL-ditiotreitol 3 mM e polivinilpolipirrolidona insolúvel 5% p/v) na proporção de 3:1 para folhas e frutos e 2:1 para raízes. O homogeneizado foi centrifugado a 10.000 xg por 30 min, e o sobrenadante foi armazenado a −80°C para posteriores análises de superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1).

A concentração de proteína foi determinada pelo método de Bradford, (1976) utilizando albumina sérica bovina como padrão. A atividade da SOD foi medida utilizando o protocolo de Giannopolitis e Ries (1977), com uma mistura de ensaio composta por tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,8), metionina 50 mM, EDTA 10 mM, cloreto de nitroblue tetrazólio 1 mM e riboflavina 0,1 mM, incubada sob lâmpada fluorescente a 25°C por 5 min. A absorbância foi registrada a 560 nm e os resultados foram expressos em $U\ mg^{-1}$ de proteína.

2.10 Ácido Ascórbico (AsA)

No estádio de florescimento pleno (R2), foram coletadas folhas completamente desenvolvidas do terço superior das plantas de soja, em cada parcela experimental. Imediatamente após a coleta, o material vegetal foi acondicionado em nitrogênio líquido e armazenado em ultrafreezer a −80 °C até a realização das análises bioquímicas. O teor de ácido ascórbico (AsA) foi determinado por titulação com solução de 2,6-diclorofenol-indofenol a 0,02%, após a extração do material vegetal em

solução de ácido oxálico a 0,5%, conforme a metodologia descrita por Kampfenkel et al. (1995).

2.11 Trocas gasosas

Na folha diagnóstica foram avaliadas a taxa fotossintética líquida (A), a taxa de transpiração (E), a condutância estomática (Gs) e a concentração interna de CO_2 (Ci), medidas por meio de um analisador de gás infravermelho em sistema aberto (LcPro-SD, ADC BioScientific Ltd., Reino Unido), aos 60 dias após a semeadura. As medições foram realizadas em uma câmara IRGA configurada com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de 1500 μmol m^{-2} s^{-1}, concentração de CO_2 de 400 ppm e temperatura interna de 30 °C. A leitura realizada no período entre 9 e 11 horas da manhã.

2.12 Produtividade

A produtividade foi estimada a partir da amostragem de 3 linhas centrais na área útil da parcela. O teor de umidade dos grãos foi determinado e corrigido para 14% para obter a produção de grãos convertidos em kg ha^{-1}.

2.13 Acúmulo de nutrientes

O acúmulo de nutrientes (kg ha^{-1}) foi calculado pela multiplicação da massa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) e o teor do nutriente (g kg^{-1}), dividido por 1000.

2.14 Determinação de níveis críticos

Os níveis críticos de suficiência e de toxicidade de Zn no solo e nas folhas, bem como as respectivas doses aplicadas, foram determinados a partir das curvas de resposta da produção, ajustadas por regressão polinomial de segundo grau, conforme a metodologia descrita por Prado (2021). O nível crítico de suficiência foi definido como o teor de Zn associado a 100% da produção relativa, enquanto o nível crítico de toxicidade correspondeu ao teor relacionado à redução da produção relativa para 95% do valor máximo. Inicialmente, ajustaram-se modelos quadráticos relacionando: (i) doses de Zn e produtividade; (ii) teor de Zn no solo e produtividade; e (iii) teor foliar de Zn e produtividade. Os níveis tóxicos foram baseados em 5% de redução da produção relativa, após atingir o nível máximo.

2.15 Análise de dados

Os dados foram inicialmente avaliados quanto aos pressupostos estatísticos. A normalidade da distribuição foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk ($p > 0,05$), enquanto a homogeneidade de variâncias foi examinada pelo teste de Levene ($p > 0,05$). Atendidos esses pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA). Para variáveis com efeitos significativos ($p < 0,05$), foram ajustados modelos de

regressão polinomial para a avaliação das respostas às doses de Zn.

3. RESULTADOS

A aplicação de Zn no solo promoveu incremento linear nos teores disponíveis (em DTPA) desse micronutriente no solo ($Y = 0,1372x + 1,518$; $R^2 = 0,98$; $F = 60,51$; $p < 0,01$), indicando aumento de 0,1372 mg dm^{-3} de Zn para cada kg ha^{-1} aplicado.

A aplicação de Zn no solo não influenciou o acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, B, Mn e Cu na parte aérea da soja, mas promoveu incremento quadrático no acúmulo de Zn (Fig. 2a) e redução linear no acúmulo de Fe (Figura 2h).

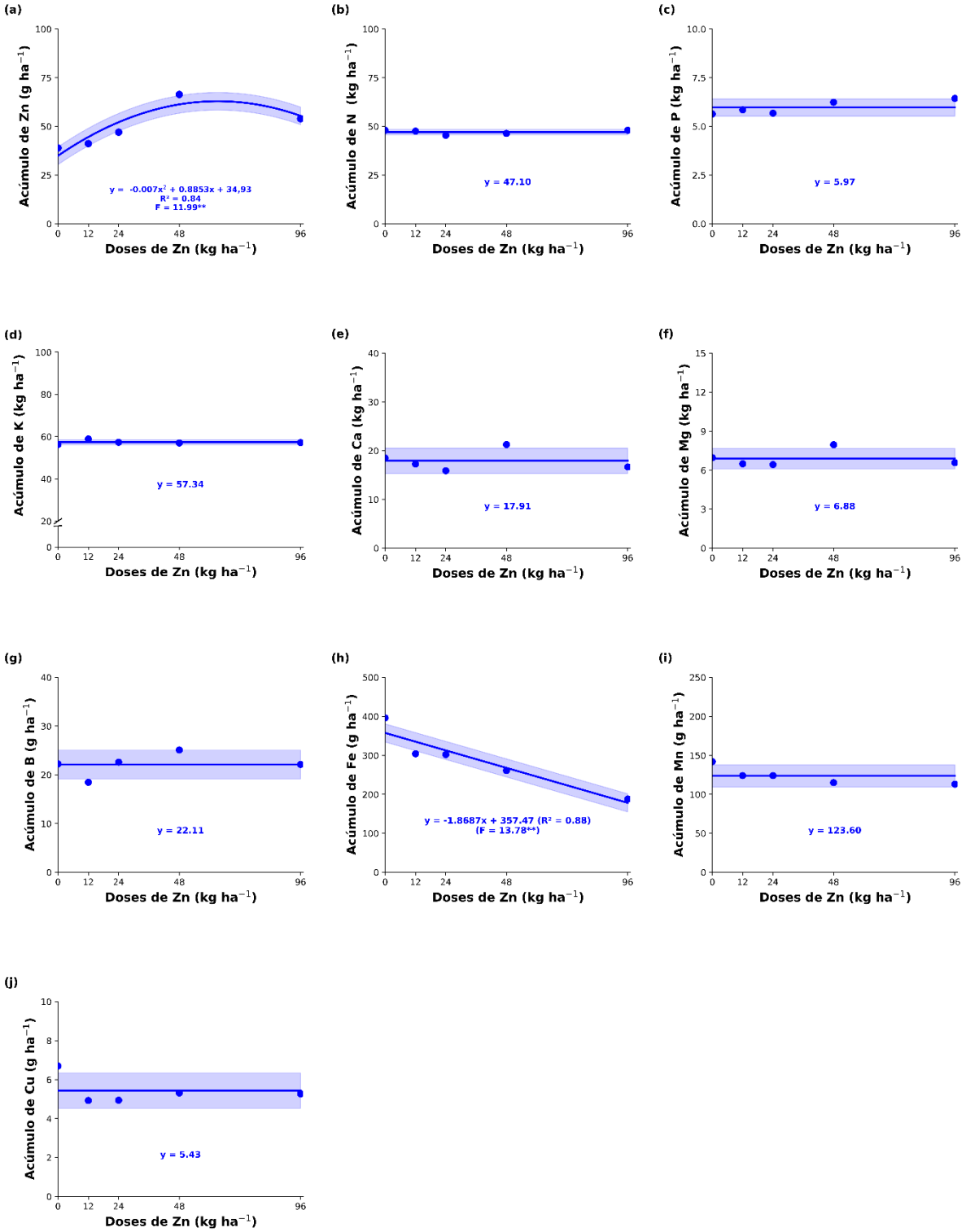


Figura 2. Acúmulo de nutrientes na cultura de soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j) em função à doses de Zn aplicadas a lanço e incorporada ao solo . **, * significativos a 1% e 5%, respectivamente, de probabilidade pelo teste F.

A aplicação de Zn via solo na cultura da soja não afetou os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn e Cu, mas promoveu incremento linear nos teores foliares de Zn, com aumento de 0,76 mg kg-1 para cada kg ha-1 de Zn aplicado a lanço e incorporado ao solo (Figura 3a).

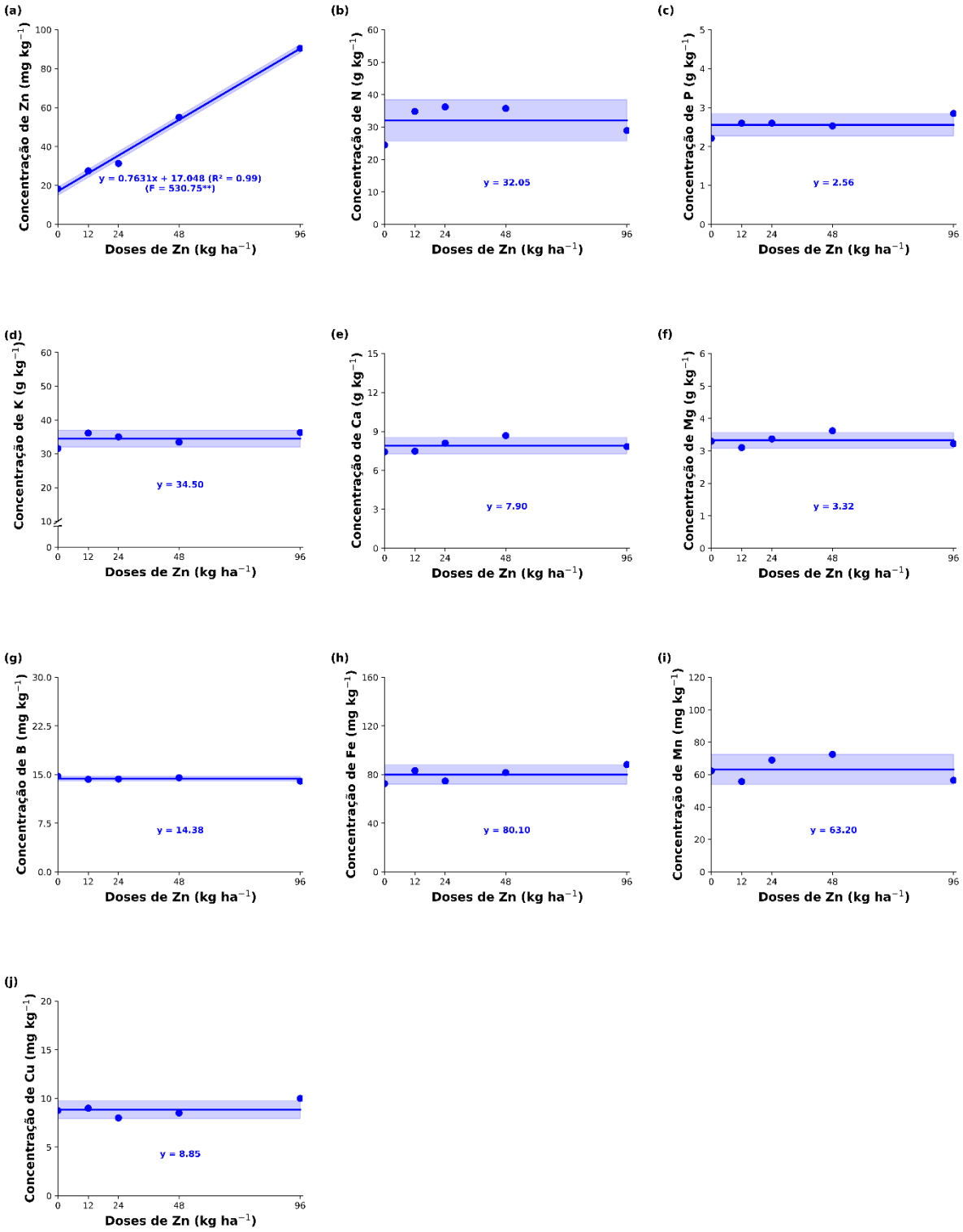


Figura 3. Concentração de nutrientes na folha diagnose da cultura de soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j) em função a aplicação de

doses de Zn. **,* Significativo a 1 e 5%, respectivamente, de probabilidade pelo teste F.

A concentração de Zn nos grãos aumentou linearmente com o incremento das doses de Zn aplicadas ao solo, enquanto as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Cu não foram significativamente afetadas pela fertilização com Zn (Figura 4).

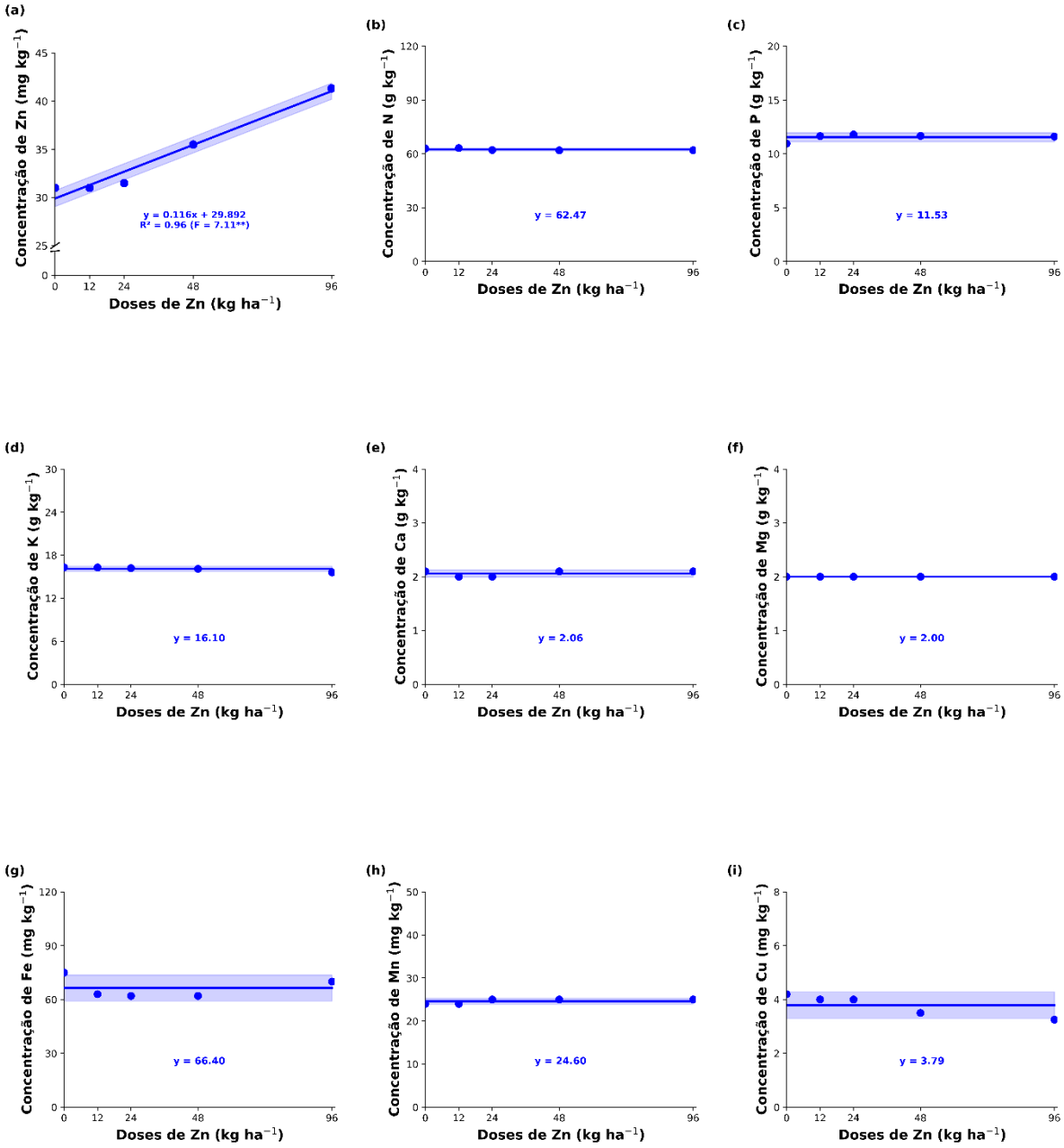


Figura 4. Concentração de nutrientes nos grãos de soja Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), Fe(g) , Mn (h) e Cu (i) em função a aplicação de doses (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha de Zn). **,* Significativo a 1 e 5%, respectivamente, de probabilidade pelo teste F.

A aplicação de Zn promoveu alterações importantes no metabolismo

antioxidante e no perfil de compostos orgânicos das plantas (Figura 5). Observou-se incremento linear nos teores de MDA, na atividade da SOD e na concentração de ácido ascórbico com o aumento das doses de Zn. Os compostos fenólicos totais apresentaram resposta quadrática em função das doses de Zn, com incremento até a dose de 75 kg ha^{-1}, obtendo 1,62 g de EAG. Em contraste, a sacarose apresentou comportamento quadrático decrescente, indicando redução progressiva em função da fertilização com Zn. Os açúcares solúveis totais e os aminoácidos livres totais não apresentaram resposta significativa às doses aplicadas, mantendo-se constantes entre os tratamentos.

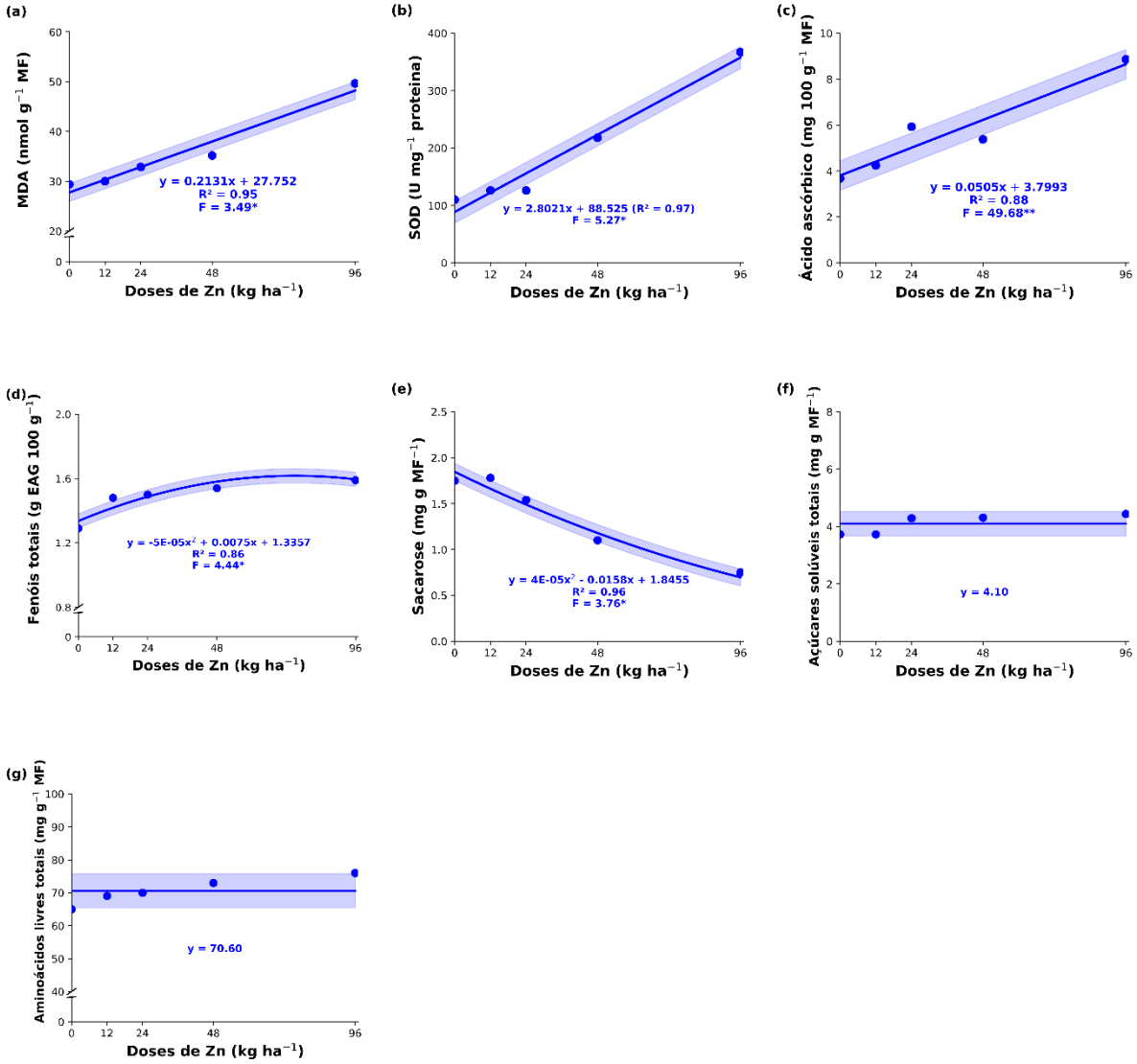


Figura 5. Teor de malondialdeído – MDA (a), atividade da superóxido dismutase – SOD (b), teor de ácido ascórbico (c), fenóis totais (d), teor de sacarose (e), teor de açúcares solúveis totais (f) e aminoácidos livres totais (g) em função à aplicação de

doses de Zn na cultura da soja. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A fertilização residual com Zn promoveu redução linear da eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), sem alterar os teores de feofitina a, feofitina b, carotenoides, índice de flavonoides e índice de antocianinas em plantas de soja (Figura 6).

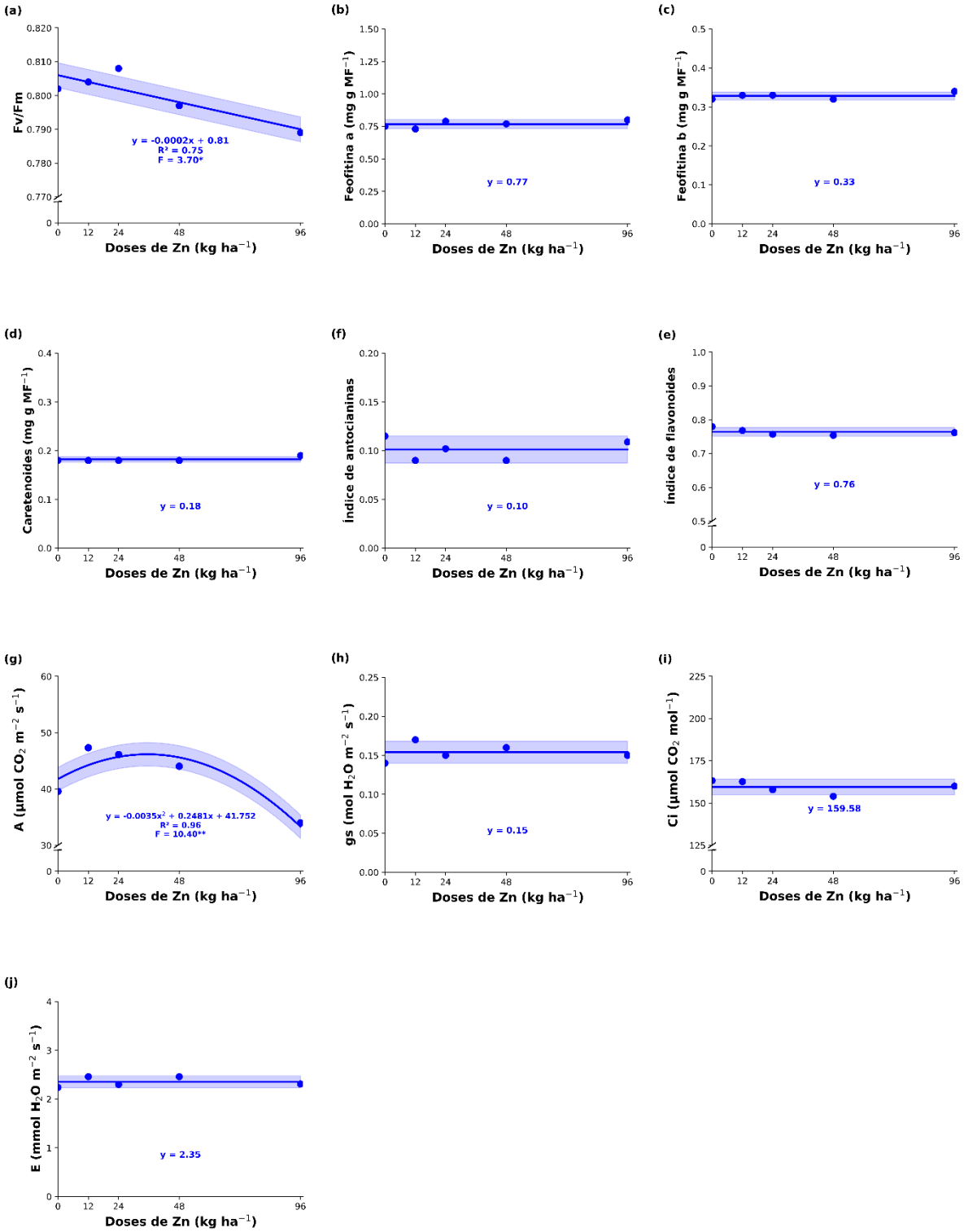


Figura 6. Eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm) (a), feofitina a (b), feofitina b (c), carotenoides (d), índice de flavonoides (e), índice de antocianinas (f), fotossíntese líquida (g), condutância estomática (h), concentração interna de CO_2 (i) e transpiração (j) em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A aplicação de Zn no solo promoveu efeito quadrático sobre a fotossíntese

líquida (A) com ponto máximo de 47,52 µmol de CO_2 m^{-2} s^{-1}, obtido na dose de 40,59 kg ha^{-1} de Zn e a taxa de transpiração (E), enquanto a condutância estomática (gs) e a concentração interna de CO_2 (Ci) não foram influenciadas pelas doses de Zn aplicadas (Figura 6).

A dose de Zn que proporcionou a máxima produtividade estimada da soja foi de 46 kg ha^{-1}, correspondente a uma produtividade de 3.666 kg ha^{-1} (Figura 7a). Essa produtividade esteve associada aos teores estimados de 8,24 mg dm^{-3} de Zn no solo (Figura 7b) e 53 mg kg^{-1} de Zn nas folhas (Figura 7c). O nível crítico de toxicidade, definido pela redução de 5% em relação à produtividade máxima, foi atingido com a aplicação de 78 kg ha^{-1} de Zn, associada aos teores de 13 mg dm^{-3} no solo e 76 mg kg^{-1} nas folhas.

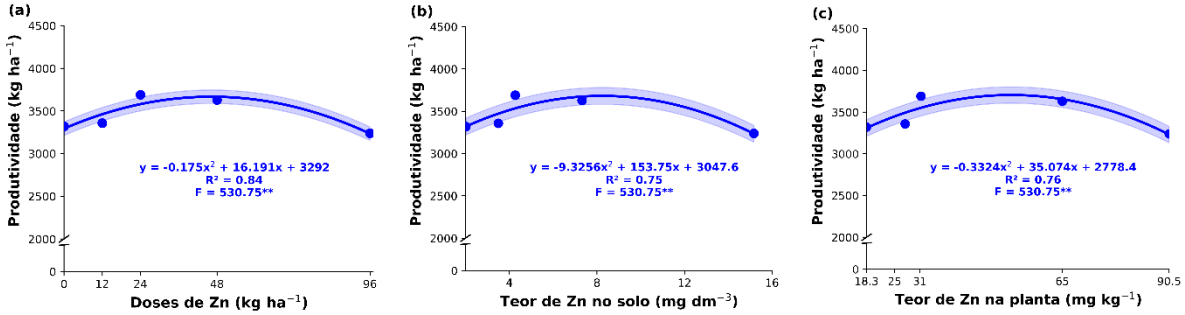


Figura 7. Relação entre a produtividade de grãos de soja e (a) as doses de Zn aplicadas ao solo, (b) o teor de Zn no solo e (c) o teor de Zn na folha diagnose em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

4. DISCUSSÃO

4.1 Efeitos do zinco incorporado ao solo no sistema solo-planta, nas interações do zinco com outros nutrientes, no estado nutricional e na concentração de nutrientes nos grãos da soja

A disponibilidade de Zn no solo é controlada por processos de adsorção, dessorção, precipitação e complexação, os quais são influenciados pelo pH, pela matéria orgânica e pela composição mineralógica e granulométrica do solo. Em Latossolos argilosos, a presença predominante de óxidos de Fe e Al e de caulinita favorece a retenção do Zn aplicado, reduzindo sua permanência na solução do solo. Nesse contexto, ainda são limitadas as informações sobre o comportamento residual de doses elevadas de Zn, próximas a 100 kg ha^{-1}, aplicadas na forma de uma fonte solúvel e incorporadas à camada de 0 - 20 cm, especialmente após cultivos sucessivos.

A aplicação de Zn promoveu incremento linear no teor disponível do micronutriente no solo, mesmo após os cultivos sucessivos de milho e soja. O coeficiente angular da regressão indicou aumento de 0,1372 mg dm^{-3} de Zn para cada quilograma de Zn aplicado por hectare. Portanto, para a dose de 96 kg ha^{-1} de Zn, estimou-se um incremento de 13,17 mg dm^{-3} em relação ao tratamento-controle (0,1372 × 96). Considerando o volume de 2.000.000 dm^3 de solo por hectare na camada de 0–20 cm, esse incremento correspondeu a 26,34 kg ha^{-1} de Zn disponível. A recuperação aparente pelo extrator DTPA foi, portanto, de 27,44% da quantidade aplicada [(26,34 ÷ 96) × 100]. Essa recuperação relativamente baixa pode decorrer da retenção do Zn em formas não extraídas pelo DTPA, especialmente por meio da adsorção aos óxidos de Fe e Al e da associação com outros constituintes da fase sólida do solo.

A recuperação aparente de apenas 27,44% do Zn aplicado na fração disponível extraída por DTPA, associada à baixa recuperação do micronutriente pelas plantas, indica que grande parte do Zn adicionado permaneceu retida na fase sólida do solo ou foi convertida em formas de menor labilidade. Esse comportamento pode ser atribuído às características do Latossolo utilizado no estudo, especialmente ao elevado teor de argila e à predominância de óxidos de Fe e Al e de caulinita. Nesses constituintes, o Zn^{2+} pode ser adsorvido por meio da formação de complexos de esfera interna com grupos hidroxila presentes nas superfícies minerais, reduzindo sua atividade na solução do solo e, consequentemente, sua disponibilidade para a absorção pelas plantas (Lindsay, 1991; Fageria, 2000). Além da adsorção específica, parte do Zn pode ter sido associada a formas menos lábeis ou precipitada como hidróxidos, carbonatos e fosfatos de Zn, as quais apresentam menor capacidade de extração pelo DTPA (Nascimento et al., 2002). Esses processos ajudam a explicar por que, mesmo com a aplicação de doses elevadas, somente uma fração do Zn adicionado permaneceu disponível no solo e foi recuperada pelas culturas.

O aumento do teor de Zn no solo e de sua absorção pelas plantas reduziu apenas o acúmulo de Fe na parte aérea da soja (Figura 2h), sem alterar K, Ca e Mg. Esse resultado pode estar relacionado ao antagonismo entre Zn e Fe durante a absorção e o transporte, devido à competição por transportadores de baixa especificidade nas membranas celulares (Fontes; Cox, 1998; Wallace et al., 1976; Pawlowski et al., 2019). Por outro lado, a ausência de efeitos sobre K, Ca e Mg divergem de estudos que associaram o excesso de Zn à redução da absorção desses

nutrientes (Rout; Das, 2003). Essa diferença pode decorrer das condições de campo, da capacidade-tampão do Latossolo argiloso e do caráter residual do Zn aplicado, que podem ter reduzido sua atividade na solução do solo.

Entretanto, grande parte dos estudos que investigaram as interações entre o excesso de Zn e a absorção de nutrientes foi conduzida em condições controladas, não permitindo avaliar se essas alterações são suficientemente intensas para induzir deficiências nutricionais com relevância agronômica em sistemas de produção de campo. A resposta a essa questão foi elucidada no presente estudo, pois, mesmo com o expressivo incremento dos teores de Zn nas plantas de soja, não foram observadas alterações significativas nos teores foliares dos demais nutrientes, exceto do próprio Zn. Esses resultados indicam que o excesso de Zn não promoveu modificações relevantes no estado nutricional da cultura, evidenciando que os efeitos negativos observados não estiveram associados à indução de deficiência nutricional dos demais nutrientes avaliados.

Esses resultados reforçam a hipótese de que, em Latossolos tropicais argilosos, a elevada capacidade de adsorção de Zn reduz a importância agronômica das relações antagônicas entre esse micronutriente e outros nutrientes, mesmo sob condições de elevada disponibilidade de Zn no solo. Isso ocorre porque acredita-se que parte significativa do Zn aplicado interage com os coloides do solo, especialmente óxidos de Fe e Al, reduzindo sua disponibilidade imediata e promovendo sua liberação gradual para a solução do solo (Silveira et al., 2006). Além disso, em condições de campo, o maior desenvolvimento do sistema radicular e a maior exploração do volume de solo contribuem para a manutenção da absorção de nutrientes e da homeostase nutricional das plantas (Fan et al., 2021; Shanmugam et al., 2011).

A adubação com Zn aumentou sua concentração nos grãos de soja, demonstrando que parte do micronutriente disponível no solo foi absorvida e posteriormente redistribuída para os órgãos reprodutivos. Na dose de 46 kg ha^{-1} de Zn, que proporcionou a máxima produtividade, a concentração estimada nos grãos foi de 35 mg kg^{-1}. Embora esse valor seja nutricionalmente relevante, permaneceu abaixo da faixa-alvo de 40 a 50 mg kg^{-1} indicada para programas de biofortificação agronômica (Rehman et al., 2025). A concentração de aproximadamente 41 mg kg^{-1} foi alcançada somente na maior dose aplicada, de 96 kg ha^{-1}, entretanto nessa condição houve redução da produtividade em decorrência da toxicidade. Portanto, apesar de a aplicação de Zn favorecer o enriquecimento dos grãos, o aumento de sua

concentração ocorreu acompanhado de um comprometimento produtivo nas doses mais elevadas, evidenciando a necessidade de equilibrar os objetivos de produtividade e biofortificação.

No entanto, faltam informações sobre os teores de Zn na soja que podem ser tóxicos e diminuir a qualidade do grão. Do ponto de vista de segurança alimentar, mesmo a maior dose de Zn avaliada (96 kg ha^{-1}), que resultou em 41 mg kg^{-1} de Zn nos grãos, forneceria aproximadamente 8,2 mg de Zn considerando o consumo de 200 g de grãos que é relativamente um consumo humano muito alto. Esse valor permanece abaixo do Limite Superior Tolerável (UL) de 40 mg dia^{-1} Zn estabelecido para adultos (IOM, 2001). Esses resultados indicam que mesmo sob elevadas doses de adubação com Zn que induz toxicidade na planta de soja as concentrações de Zn nos grãos permaneceram em níveis considerados seguros para o consumo humano e ainda não diminuiu o valor nutricional dos demais nutrientes no grão. De forma geral, os resultados demonstram que a fertilização com Zn via solo aumenta substancialmente a concentração de Zn nos grãos, mantendo concentrações adequadas dos demais nutrientes e preservando padrões de segurança alimentar para consumo humano (Cakmak, 2008; Cakmak; Kutman, 2018) não havendo necessidade de complemento de aplicações foliares do elemento.

4.2 Resposta da soja submetida a toxicidade e os mecanismo de defesa induzidos antioxidantes e seus impactos fisiológicos

A maioria dos estudos sobre a toxicidade de Zn em soja foi conduzida em condições controladas, utilizando vasos na maioria dos experimentos. Esses trabalhos associaram os prejuízos ao crescimento das plantas ao excesso do micronutriente e ao seu antagonismo com outros nutrientes (Wallace et al., 1976; Loneragan; Webb, 1993; Fontes; Cox, 1998). Entretanto, no presente estudo, embora o aumento da disponibilidade de Zn tenha reduzido o teor foliar de Fe, os valores permaneceram dentro da faixa cons iderada adequada para a cultura da soja, de 50 a 350 mg kg^{-1} (Quaggio et al., 2022). Além disso, ainda são escassas as pesquisas que avaliam, nessas condições, as respostas antioxidantes (Yusefi et al., 2020) e as trocas gasosas (Andrejic et al., 2018) sob excesso de Zn. Assim, permanecem pouco conhecidos os mecanismos antioxidantes, enzimáticos e não enzimáticos, mais responsivos a esse estresse em soja, especialmente devido à elevada especificidade dessas respostas entre espécies. A compreensão desses mecanismos poderá subsidiar estratégias destinadas a aumentar a tolerância da cultura a ambientes com elevada

disponibilidade de Zn e a outras condições adversas.

A aplicação do Zn especialmente nas maiores doses de Zn promoveu alta absorção do elemento pela planta e intensificou o estresse oxidativo nas plantas de soja, evidenciado pelo aumento das concentrações de malondialdeído (MDA) (Figura 5a), indicando intensificação da peroxidação lipídica e danos às membranas celulares. O excesso de Zn é conhecido por estimular a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), causando danos oxidativos às estruturas celulares e comprometimento metabólico (Cakmak, 2000; Sharma et al., 2012). Em resposta, as plantas ativam mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. Entre eles, destaca-se a superóxido dismutase (SOD), que atua na primeira linha de defesa ao converter o radical superóxido em H_2O_2 e O_2, reduzindo o potencial oxidativo celular (Alscher et al., 2002). A atuação de suas diferentes isoformas, especialmente a Cu/Zn-SOD, contribui para a detoxificação das EROs geradas durante a fotossíntese (Gopavajhala et al., 2013).

Descobrimos que o estresse oxidativo induzido pelo excesso de Zn na cultura da soja ativou a primeira linha de defesa antioxidante enzimática pois houve aumento da atividade da SOD (Figura 5a), como mecanismo de proteção contra o acúmulo de EROs. Entretanto, apesar do aumento da atividade antioxidante, as elevadas concentrações de MDA na planta indicam que os mecanismos antioxidantes não foram suficientes para impedir completamente os danos oxidativos, sugerindo que a produção de EROs superou a capacidade de detoxificação celular (Broadley et al., 2007; Hasanuzzaman et al., 2020).

O sistema de defesa antioxidante não enzimático também desempenha papel importante na mitigação da toxicidade nas plantas, sendo constituído por diversos compostos antioxidantes (Prado, 2021). O achado deste estudo indicou que plantas de soja têm relativa dificuldade para fortalecer o sistema de defesa antioxidante não enzimático restrito a um composto. Isso ficou claro pelo fato que a cultura da soja sob estresse nutricional induziu aumento o teor foliar de apenas do ácido ascórbico (Figura 5c) que neutraliza espécies reativas de oxigênio atenuando os danos celulares (Gill; Tuteja, 2010). O ácido ascórbico atua no papel central na detoxificação de EROs por meio do ciclo ascorbato–glutationa, contribuindo para o equilíbrio redox celular e proteção das membranas sob condições de estresse (Pandey et al., 2017), representando uma estratégia adaptativa para mitigar os danos oxidativos (Noreen et al., 2021).

Nos demais compostos antioxidantes como fenóis apesar de ter tido aumento em doses moderadas de Zn, mas em doses tóxicas (>78 kg ha^{-1} de Zn) teve uma estabilidade na sua síntese não tendo uma contribuição efetiva embora esse composto seja efetivo para a neutralização de EROs (Marreiro et al., 2017; Sharma et al., 2019) e não teve efeito nos demais compostos antioxidantes avaliados (antocianina e flavonoide) (Figura 5d, 6e, 6f). É possível que em condições de maior toxicidade, a estabilização ou redução no acúmulo desses compostos antioxidantes pode indicar limitação metabólica da planta em sustentar elevadas taxas de biossíntese secundária devido ao comprometimento fisiológico e energético causado pelo excesso do micronutriente. Esse efeito reforça a hipótese de que, embora a planta de soja sob toxicidade de Zn induz alguns mecanismos antioxidantes, sua eficiência torna-se limitada em condições de estresse mais severo sendo necessário estratégias de melhoramento genético para aumento de expressão de genes com maior amplitude para sínteses de diferentes compostos antioxidantes.

A redução linear da eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) (Figura 6a) observada nas maiores doses de Zn indica comprometimento do aparato fotoquímico das plantas de soja. O Fv/Fm é considerado um dos principais indicadores da integridade funcional do fotossistema II, sendo reduções nessa variável associadas à fotoinibição e ao dano oxidativo nos tilacóides dos cloroplastos, comprometendo o transporte de elétrons fotossintéticos (Sagardoy et al., 2009). Isso reforça que o sistema antioxidante de defesa das plantas de soja sob toxicidade de Zn atuou parcialmente no combate ao estresse oxidativo fato que justifica a diminuição da fotossintética (A) (Fgura 6g), indicando que a lanta possivelmente sofreu danos estruturais e funcionais nos cloroplastos (Krupa; Baszyński, 1995; Moustakas et al., 2024). Em contrapartida, a condutância estomática (gs) (Figura 6h), a concentração interna de CO_2 (Ci) (Figura 6i) e a taxa transpiratória (E) (Figura 6j) não foram reduzidas mesmo sob elevados teores de Zn. Isso comprova que as limitações observadas na fotossíntese estiveram mais associadas a alterações bioquímicas e fotoquímicas do aparato fotossintético do que a restrições estomáticas (Solymosi et al., 2011; Dimario et al., 2017).

As alterações fisiológicas induzidas pelo excesso de Zn também afetaram o metabolismo primário, evidenciado pela redução das concentrações de sacarose (Figura 5e). A redução das concentrações de sacarose observada neste estudo está diretamente relacionada à menor assimilação fotossintética de carbono, uma vez que

a sacarose representa o principal carboidrato de transporte nas plantas e depende do suprimento de fotoassimilados produzidos pela fotossíntese (Taiz et al., 2017). Dessa forma, a redução da fotossíntese líquida (Figura 6g), decorrente do comprometimento fotoquímico do fotossistema II (Figura 6a) e do estresse oxidativo induzido pelo excesso de Zn, diminuiu a disponibilidade de fotoassimilados para a síntese de sacarose. Simultaneamente, a ativação dos mecanismos de defesa aumentou a demanda metabólica por carbono e energia, reduzindo a alocação de assimilados para os órgãos dreno. Como consequência, a menor disponibilidade de sacarose contribuiu para a redução da produtividade da soja (Figura 7a), evidenciando que a toxicidade de Zn compromete não apenas a fotossíntese, mas também o metabolismo do carbono e a formação do rendimento.

De forma geral, os resultados demonstram que o excesso de Zn desencadeia uma reprogramação metabólica em plantas de soja, caracterizada pela ativação de sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos que, embora atuem na mitigação do estresse oxidativo, não foram suficientes para evitar os danos fisiológicos causados pela toxicidade do micronutriente. Por outro lado, o excesso de Zn não comprometeu a homeostase nutricional dos demais nutrientes avaliados, mas diminuiu o desempenho fotossintético e da assimilação de carbono. Esses resultados reforçam o papel dual do Zn no metabolismo vegetal: essencial em concentrações moderadas, com respostas ótimas observadas próximas de 46 kg ha^{-1} de Zn, mas potencialmente tóxico quando presente em concentrações elevadas, próximas de 96.

4.3 Efeitos do Zn na produtividade e nos níveis críticos no solo e na folha

A produtividade de grãos representa o resultado da interação entre os efeitos benéficos do zinco em doses ótimas, como o aumento da atividade enzimática, integridade de membranas, eficiência fotossintética e os efeitos tóxicos decorrentes de doses elevadas que induzem estresse oxidativo e reduzem a assimilação de carbono (Hafeez, 2013). Portanto, é relevante conhecer os níveis críticos de toxicidade de Zn na cultura da soja para diagnósticos corretos no cultivo e orientar em bases científicas a recomendação de adubação corretiva adequada garantindo sistemas de produção sustentáveis.

No presente estudo, a dose de 46 kg ha^{-1} de Zn proporcionou o máximo rendimento de 3.666 kg ha^{-1} e corresponderam a teores ótimos de 8,2 mg dm^{-3} de Zn no solo e 53 mg kg^{-1} na folha. No entanto, existem dados que indicam teores altos de Zn no solo (em DTPA) (>1,2 mg dm^{-3}) (Boaretto et al., 2022) e na folha é adequado

com teores de Zn na faixa de 20-50mg kg^{-1} (Quaggio et al., 2022), teores maiores que esses não teriam resposta da cultura da soja a aplicação de Zn. Isso reforça que esses padrões precisam serem atualizados para Oxisols argilosos em regiões tropicais.

No presente estudo, o nível crítico de toxicidade de Zn no solo foi estabelecido em 13 mg dm^{-3}, sendo essa é a primeira pesquisa em campo que estabeleceu esse padrão para a cultura da soja. Embora existam estudos preliminares avaliando toxicidade de Zn em soja cultivada em vasos com maiores valores de até 34 mg kg^{-1} de Zn extraído por DTPA em Latossolo (Fageria, 2000), mas foi realizado em condições controladas que não pode representar as condições de cultivo em campo (Lončarić et al., 2024; Martínez et al., 2023). Além disso, os menores níveis críticos observados no presente estudo também estejam relacionados à elevada capacidade adsorção de Zn em Latossolo de textura argilosa (57%) (Jordão et al., 2010) demonstrando que os limites críticos de disponibilidade de Zn são fortemente dependentes dos atributos físico-químicos do solo, especialmente textura, mineralogia e capacidade de adsorção do micronutriente (Kumar et al., 2020).

Um outro achado desta pesquisa foi a definição do nível crítico foliares de toxicidade de Zn em cultivo de soja em campo que foi de 76 mg kg^{-1} e que estão acima dos teores foliares de Zn consideradas adequadas para a cultura em cultivos em campo (20-50 mg kg^{-1}) (Quaggio et al., 2022) e (48-63 mg kg^{-1}) (Souza et al., 2020) e abaixo das indicações consideradas tóxicas para a soja em início de crescimento considerando a parte aérea da planta cultivada em vasos de 140 mg kg^{-1}) (Borkert et al., 1998) e de 187 mg kg^{-1} (Fageria, 2000). Entretanto, esses teores tóxicos obtidos em experimentos conduzidos em vasos devem ser interpretados com cautela, uma vez que fatores como as condições de cultivo, o tecido vegetal amostrado (folha ou parte aérea) e a idade das plantas podem influenciar os resultados, impossibilitando o uso destes valores para condições de campo (Martínez et al., 2021).

Em geral, esta pesquisa demonstrou, de forma inédita, os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo (13 mg dm^{-3}) e na folha (76 mg kg^{-1}) para a cultura da soja cultivada em campo em um Oxisol de textura argilosa sob sistema de adubação corretiva. A relativa tolerância da cultura a essas elevadas concentrações de Zn pode ser atribuída a diferentes fatores. Primeiramente, a baixa recuperação do Zn pelas plantas, decorrente das propriedades químicas do Oxisol estudado, associada à incorporação do fertilizante na camada de 0 - 20 cm do solo, que deve ter favorecido a adsorção do micronutriente aos coloides do solo, reduzindo sua disponibilidade às

plantas, conforme discutido anteriormente. Além disso, os efeitos observados ocorreram sob condição residual de Zn, uma vez que o cultivo da soja foi sucedido por uma cultura de milho, o que provavelmente atenuou os efeitos imediatos da elevada disponibilidade de Zn sobre a oleaginosa. Um outro fator que pode ter contribuído foi o fato de que o Oxisol estudado, mesmo sob altas doses de Zn, não afetou o estado nutricional de Fe das plantas. Esse resultado é relevante, pois teores adequados ou elevados de Fe na planta podem prevenir o agravamento da toxicidade por Zn em soja (Fontes; Cox, 1998).

De forma geral, o achado dos níveis críticos de toxicidade de Zn deve aprimorar a diagnose foliar e subsidia um manejo mais racional do micronutriente, possibilitando maximizar a eficiência de uso e reduzir os riscos de fitotoxicidade em sistemas tropicais de alta produtividade. As perspectivas futuras sugerem que novos estudos sejam realizados em campo com a cultura da soja em diferentes solos dada alta capacidade de adsorção de Zn no solo para ampliar as informações científicas.

5. CONCLUSÃO

Doses elevadas de Zn causaram o estresse oxidativo e induziram sistema de defesa antioxidante parcialmente embora tenha aumentado sistema antioxidativo enzimático (SOD) e o teor de ácido ascórbico não tendo contribuição de compostos antioxidativos relevantes como carotenoides, fenóis, flavonoides, antocianinas e consequentemente diminuiu a eficiência do fotossistema II, a taxa fotossintética, teor de sacarose e a produtividade da cultura da soja.

Os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha foi de 13 mg dm^{-3} e 76 mg kg^{-1}, respectivamente. Descobrimos os níveis críticos de toxicidade de Zn na soja e ainda os danos associados que comprometeram a eficiência e a taxa fotossintética está mais associado a um sistema antioxidante embora parcial do que antagonismo nutricional ou distúrbio no metabolismo dos aminoácidos.

Essa pesquisa propõe primeiros critérios para intepretação dos teores de Zn no solo e na folha para o manejo da adubação corretiva com Zn incorporado em solos tropicais para a cultura da soja de forma segura e uma compreensão dos mecanismos de resposta da planta sob toxicidade.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES,

J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645–736.

AJEESH KRISHNA, T. P.; MAHARAJAN, T.; VICTOR ROCH, G.; IGNACIMUTHU, S.; ANTONY CEASAR, S. Structure, FUNCTION, REGULATION AND PHYLOGENETIC RELATIONSHIP OF ZIP FAMILY TRANSPORTERS OF PLANTS. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 11, 662, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00662. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00662.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009. DOI: 10.1007/s10653-009-9255-4. https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4.

ALSCHER, R. G.; ERTURK, N.; HEATH, L. S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 53, n. 372, p. 1331–1341, 2002. DOI: 10.1093/jexbot/53.372.1331. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1331.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 187–203.

ANDREJIĆ, G.; GAJIĆ, G.; PRICA, M.; DŽELETOVIĆ, Ž.; RAKIĆ, T. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus* × *giganteus* plants. **Photosynthetica**, [S. l.], v. 56, n. 4, p. 1249–1258, 2018. DOI: 10.1007/s11099-018-0827-3. https://doi.org/10.1007/s11099-018-0827-3.

ANDRESEN, E.; PEITER, E.; KÜPPER, H. Trace metal metabolism in plants. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 69, n. 5, p. 909–954, 2018. DOI: 10.1093/jxb/erx465. https://doi.org/10.1093/jxb/erx465.

ANISIMOV, V. S.; ANISIMOVA, L. N.; SANZHAROV, A. I. Zinc plant uptake as result of edaphic factors acting. **Plants**, [S. l.], v. 10, n. 11, 2496, 2021. DOI: 10.3390/plants10112496. https://doi.org/10.3390/plants10112496.

ASSUNÇÃO, A. G. L.; HERRERO, E.; LIN, Y.-F.; HUETTEL, B.; TALUKDAR, S.; SMACZNIAK, C.; IMMINK, R. G. H.; VAN ELDIK, M.; FIERS, M.; SCHAT, H.; AARTS, M. G. M. *Arabidopsis thaliana* transcription factors bZIP19 and bZIP23 regulate the adaptation to zinc deficiency. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], v. 107, n. 22, p. 10296–10301, 2010. DOI: 10.1073/pnas.1004788107. https://doi.org/10.1073/pnas.1004788107.

BARMAN, K. K.; GANESHAMURTHY, A. N.; TAKKAR, P. N. Zinc requirement of soybean (*Glycine max*) - wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in some swell-shrink soils. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 68, n. 12, p. 759–761, 1998.

BARRETO, M. S. C.; ELZINGA, E. J.; ROUFF, A. A.; SIEBECKER, M. G.; SPARKS, D. L.; ALLEONI, L. R. F. Zinc speciation in highly weathered tropical soils affected by large scale vegetable production. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 916,

170223, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170223. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170223.

BARROW, N. J. Mechanisms of reaction of zinc with soil and soil components. In: ROBSON, A. D. (ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 15–31. DOI: 10.1007/978-94-011-0878-2_2. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_2.

BARROW, N. J. Testing a mechanistic model. II. The effects of time and temperature on the reaction of zinc with a soil. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 277–286, 1986. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1986.tb00029.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00029.x.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. (Boletim técnico, 78).

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015. DOI: 10.2134/agronj14.0435. https://doi.org/10.2134/agronj14.0435.

BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; MELLIS, E. V.; CANTARELLA, H. Micronutrientes. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2022. p. 121–129.

BORKERT, C. M.; COX, F. R.; TUCKER, M. R. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice, and corn in soil mixtures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 29, n. 19–20, p. 2991–3005, 1998. DOI: 10.1080/00103629809370171. https://doi.org/10.1080/00103629809370171.

BOTOMAN, L.; NALIVATA, P. C.; CHIMUNGU, J. G.; BAILEY, E. H.; MUNTHALI, M. W.; ANDER, E. L.; MOSSA, A.-W.; LARK, R. M.; BROADLEY, M. R. Residual soil-applied zinc improves grain zinc nutritional quality of maize grown under contrasting soil types in Malawi. **Frontiers in Soil Science**, [S. l.], v. 5, 1656634, 2025. DOI: 10.3389/fsoil.2025.1656634. https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1656634.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [S. l.], v. 72, n. 1–2, p. 248–254, 1976. DOI: 10.1016/0003-2697(76)90527-3. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3.

BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P.; ZELKO, I.; LUX, A. Zinc in plants. **New Phytologist**, [S. l.], v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, [S. l.], v. 302, n. 1–2, p. 1–17, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9466-3. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3.

CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A. A.; AYDIN, N.; WANG, Y.; ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W. J. Biofortification and Localization of Zinc in Wheat Grain. **Journal of Agricultural and Food**

Chemistry, [S. l.], v. 58, n. 16, p. 9092–9102, 2010. DOI: 10.1021/jf101197h. https://doi.org/10.1021/jf101197h.

CAKMAK, I. Tansley Review No. 111: possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, [S. l.], v. 146, n. 2, p. 185–205, 2000. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x.

CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018. DOI: 10.1111/ejss.12437. https://doi.org/10.1111/ejss.12437.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. (Boletim técnico, 106).

CHAHAL, S. K.; HETTIARACHCHI, G. M.; NELSON, N.; GUTTIERI, M. Chemical speciation of zinc in fertilized neutral soils governs zinc mobility and phytoavailability. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 90, n. 1, e70176, 2026. DOI: 10.1002/saj2.70176. https://doi.org/10.1002/saj2.70176.

CHAO, Z. F.; CHAO, D. Y. Barriers and carriers for transition metal homeostasis in plants. **Plant Communications**, [S. l.], v. 6, n. 2, 101235, 2025. DOI: 10.1016/j.xplc.2024.101235. https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101235.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrences and uses. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. DOI: 10.1002/3527602097. https://doi.org/10.1002/3527602097.

CURIE, C.; CASSIN, G.; COUCH, D.; DIVOL, F.; HIGUCHI, K.; LE JEAN, M.; MISSON, J.; SCHIKORA, A.; CZERNIC, P.; MARI, S. Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. **Annals of Botany**, [S. l.], v. 103, n. 1, p. 1–11, 2009. DOI: 10.1093/aob/mcn207. https://doi.org/10.1093/aob/mcn207.

DEGRYSE, F.; VOEGELIN, A.; JACQUAT, O.; KRETZSCHMAR, R.; SMOLDERS, E. Characterization of zinc in contaminated soils: complementary insights from isotopic exchange, batch extractions and XAFS spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 62, n. 2, p. 318–330, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2010.01332.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01332.x.

DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; MCLAUGHLIN, M. J. Diffusion and solubility control of fertilizer-applied zinc: chemical assessment and visualization. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 386, n. 1–2, p. 195–204, 2015. DOI: 10.1007/s11104-014-2266-7. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2266-7.

DIMARIO, R. J.; CLAYTON, H.; MUKHERJEE, A.; LUDWIG, M.; MORONEY, J. V. Plant Carbonic Anhydrases: Structures, Locations, Evolution, and Physiological Roles. **Molecular Plant**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 30–46, 2017. DOI: 10.1016/j.molp.2016.09.001. https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.09.001.

DOBRIKOVA, A.; APOSTOLOVA, E.; HANĆ, A.; YOTSOVA, E.; BORISOVA, P.; SPERDOULI, I.; ADAMAKIS, I.-D. S.; MOUSTAKAS, M. Tolerance Mechanisms of the Aromatic and Medicinal Plant *Salvia sclarea* L. to Excess Zinc. **Plants**, [S. l.], v. 10, n. 2, 194, 2021. DOI: 10.3390/plants10020194. https://doi.org/10.3390/plants10020194.

DONNER, E.; MCLAUGHLIN, M. J.; HODSON, M. E.; HEEMSBERGEN, D.; WARNE, M. S. J.; NORTCLIFF, S.; BROOS, K. Ageing of zinc in highly-weathered iron-rich soils. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 361, n. 1–2, p. 83–95, 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1247-y. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1247-y.

DONNER, E.; BROOS, K.; HEEMSBERGEN, D.; WARNE, M. S. J.; MCLAUGHLIN, M. J.; HODSON, M. E.; NORTCLIFF, S. Biological and chemical assessments of zinc ageing in field soils. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 158, n. 1, p. 339–345, 2010. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.06.034. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.034.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p. (Sistemas de produção, 15). https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/904487.

ESCUDERO-ALMANZA, D. J.; OJEDA-BARRIOS, D. L.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, O. A.; SÁNCHEZ CHÁVEZ, E.; RUÍZ-ANCHONDO, T.; SIDA-ARREOLA, J. P. Carbonic Anhydrase and Zinc in Plant Physiology. **Chilean Journal of Agricultural Research**, [S. l.], v. 72, n. 1, p. 140–146, 2012. DOI: 10.4067/s0718-58392012000100022. https://doi.org/10.4067/s0718-58392012000100022.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 390–395, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000300014. https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300014.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, [S. l.], v. 77, p. 185–268, 2002. DOI: 10.1016/s0065-2113(02)77015-6. https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)77015-6.

FAN, X.; ZHOU, X.; CHEN, H.; TANG, M.; XIE, X. Cross-Talks Between Macro- and Micronutrient Uptake and Signaling in Plants. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 12, 663477, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.663477. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663477.

FONTES, M. P. F.; MATOS, A. T. de; COSTA, L. M. da; NEVES, J. C. L. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper, and lead in three highly-weathered Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 31, n. 17–18, p. 2939–2958, 2000. DOI: 10.1080/00103620009370640. https://doi.org/10.1080/00103620009370640.

FONTES, M. P. F.; GOMES, P. C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. **Applied Geochemistry**, [S. l.], v. 18, n. 6, p. 795–804, 2003. DOI: 10.1016/s0883-2927(02)00188-9. https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00188-9.

FONTES, R. L. F.; COX, F. R. Iron deficiency and zinc toxicity in soybean grown in nutrient solution with different levels of sulfur. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 21, n. 8, p. 1715–1722, 1998. DOI: 10.1080/01904169809365516. https://doi.org/10.1080/01904169809365516.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 283–289, 1996.

GALRÃO, E. Z. Métodos de correção da deficiência de zinco para o cultivo do milho num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso sob Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 229–233, 1994.

GASPAR, A. P.; LABOSKI, C. A. M.; NAEVE, S. L.; CONLEY, S. P. Secondary and Micronutrient Uptake, Partitioning, and Removal across a Wide Range of Soybean Seed Yield Levels. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 110, n. 4, p. 1328–1338, 2018. DOI: 10.2134/agronj2017.12.0699. https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0699.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 59, n. 2, p. 315–318, 1977. DOI: 10.1104/pp.59.2.315. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.315.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.08.016. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016.

GOPAVAJHULA, V. R.; CHAITANYA, K. V.; KHAN, P. A. A.; SHAIK, J. P.; REDDY, P. N.; ALANAZI, M. Modeling and analysis of soybean (*Glycine max*. L) Cu/Zn, Mn and Fe superoxide dismutases. **Genetics and Molecular Biology**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 225–236, 2013. DOI: 10.1590/s1415-47572013005000023. https://doi.org/10.1590/s1415-47572013005000023.

GRATÃO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; PIOTTO, F. A.; PERES, L. E. P.; AZEVEDO, R. A. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 56, p. 79–96, 2012. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.04.009. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009.

GROTZ, N.; FOX, T.; CONNOLLY, E.; PARK, W.; GUERINOT, M. L.; EIDE, D. Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], v. 95, n. 12, p. 7220–7224, 1998. DOI: 10.1073/pnas.95.12.7220. https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.7220.

GROTZ, N.; GUERINOT, M. L. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research**, [S. l.], v. 1763, n. 7, p. 595–608, 2006. DOI: 10.1016/j.bbamcr.2006.05.014. https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2006.05.014.

HACISALIHOGLU, G. Unraveling the Mechanisms of Zinc Efficiency in Crop Plants: From Lab to Field Applications. **Plants**, [S. l.], v. 11, n. 2, 177, 2022. DOI: 10.3390/plants11020177. https://doi.org/10.3390/plants11020177.

HACISALIHOGLU, G.; KOCHIAN, L. V. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. **New Phytologist**, [S. l.], v. 159, n. 2, p. 341–350, 2003. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00826.x. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00826.x.

HAFEEZ, B.; KHANIF, Y. M.; SALEEM, M. Role of Zinc in Plant Nutrition- A Review. **American Journal of Experimental Agriculture**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 374–391, 2013. DOI: 10.9734/ajea/2013/2746. https://doi.org/10.9734/ajea/2013/2746.

HAN, Y. S.; PARK, J. H.; AHN, J. S. Aging effects on fractionation and speciation of redox-sensitive metals in artificially contaminated soil. **Chemosphere**, [S. l.], v. 263, 127931, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127931. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127931.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S.; MAHMUD, J.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. **Antioxidants**, [S. l.], v. 9, n. 8, 681, 2020. DOI: 10.3390/antiox9080681. https://doi.org/10.3390/antiox9080681.

HAYDON, M. J.; KAWACHI, M.; WIRTZ, M.; HILLMER, S.; HELL, R.; KRÄMER, U. Vacuolar Nicotianamine Has Critical and Distinct Roles under Iron Deficiency and for Zinc Sequestration in *Arabidopsis*. **The Plant Cell**, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 724–737, 2012. DOI: 10.1105/tpc.111.095042. https://doi.org/10.1105/tpc.111.095042.

HAYDON, M. J.; COBBETT, C. S. A Novel Major Facilitator Superfamily Protein at the Tonoplast Influences Zinc Tolerance and Accumulation in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 143, n. 4, p. 1705–1719, 2007. DOI: 10.1104/pp.106.092015. https://doi.org/10.1104/pp.106.092015.

INOCÊNCIO, M. F.; RESENDE, Á. V. de; FURTINI NETO, A. E.; VELOSO, M. P.; FERRAZ, F. M.; HICKMANN, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 47, n. 10, p. 1550–1554, 2012. DOI: 10.1590/s0100-204x2012001000020. https://doi.org/10.1590/s0100-204x2012001000020.

INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc**. Washington, DC: National Academies Press, 2001. DOI: 10.17226/10026. https://doi.org/10.17226/10026.

JORDÃO, C. P.; CARARI, D. M.; PEREIRA, W. L.; ALMEIDA, R. M.; FONTES, M. P. F.; FONTES, R. L. F.; FERNANDES, R. B. A. Adsorption of Zn(II) in Oxisols as affected by selective removal of soil fractions. **International Journal of Environmental Studies**, [S. l.], v. 67, n. 6, p. 879–897, 2010. DOI: 10.1080/00207233.2010.527123. https://doi.org/10.1080/00207233.2010.527123.

KAMPFENKEL, K.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D. Extraction and Determination of Ascorbate and Dehydroascorbate from Plant Tissue. **Analytical Biochemistry**, [S. l.], v. 225, n. 1, p. 165–167, 1995. DOI: 10.1006/abio.1995.1127. https://doi.org/10.1006/abio.1995.1127.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, [S. l.], v. 253, n. 6, 129, 2021. DOI: 10.1007/s00425-021-03642-z. https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z.

KIHARA, J.; SILESHI, G. W.; BOLO, P.; MUTAMBU, D.; SENTHILKUMAR, K.; SILA, A.; DEVKOTA, M.; SAITO, K. Maize-grain zinc and iron concentrations as influenced by agronomic management and biophysical factors: a meta-analysis. **Food Security**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 1147–1173, 2024. DOI: 10.1007/s12571-024-01478-5. https://doi.org/10.1007/s12571-024-01478-5.

KÖPPEN, W. **Climatología**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

KRUPA, Z.; BASZYŃSKI, T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus: direct and indirect effects on light and dark reactions. **Acta Physiologiae Plantarum**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 177–190, 1995.

KUMAR, K.; DEBNATH, P.; SINGH, S.; KUMAR, N. An Overview of Plant Phenolics and Their Involvement in Abiotic Stress Tolerance. **Stresses**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 570–585, 2023. DOI: 10.3390/stresses3030040. https://doi.org/10.3390/stresses3030040.

LEITE, C. M. de C.; MURAOKA, T.; COLZATO, M.; ALLEONI, L. R. F. Soil-applied Zn effect on soil fractions. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 77, n. 2, e20180124, 2020. DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0124. https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0124.

LI, S.; ZHOU, X.; HUANG, Y.; ZHU, L.; ZHANG, S.; ZHAO, Y.; GUO, J.; CHEN, J.; CHEN, R. Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. **BMC Plant Biology**, [S. l.], v. 13, n. 1, 114, 2013. DOI: 10.1186/1471-2229-13-114. https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-114.

LIANG, B.; HAN, G.; ZHAO, Y. Zinc isotopic signature in tropical soils: A review. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 820, 153303, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153303. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153303.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, [S. l.], v. 148, p. 350–382, 1987. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, [S. l.], v. 43, n. 3, p. 379–393, 2005. DOI: 10.1007/s11099-005-0062-6. https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6.

LILAY, G. H.; THIÉBAUT, N.; DU MEE, D.; ASSUNÇÃO, A. G. L.; SCHJOERRING, J. K.; HUSTED, S.; PERSSON, D. P. Linking the key physiological functions of essential micronutrients to their deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, [S. l.], v. 242, n. 3, p. 881–902, 2024. DOI: 10.1111/nph.19645. https://doi.org/10.1111/nph.19645.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979. 449 p.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 421–428, 1978. DOI: 10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

LIU, D.-Y.; ZHANG, W.; LIU, Y.-M.; CHEN, X.-P.; ZOU, C.-Q. Soil Application of Zinc Fertilizer Increases Maize Yield by Enhancing the Kernel Number and Kernel Weight of Inferior Grains. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 11, 188, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00188. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00188.

LOCK, K.; JANSSEN, C. R. Influence of ageing on zinc bioavailability in soils. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 126, n. 3, p. 371–374, 2003. DOI: 10.1016/s0269-7491(03)00232-x. https://doi.org/10.1016/s0269-7491(03)00232-x.

LONČARIĆ, Z.; VARGA, I.; NEMET, F.; PERIĆ, K.; JOVIĆ, J.; ZEBEC, V.; IVEZIĆ, V.; ILJKIĆ, D.; GALIĆ, L.; SUDARIĆ, A. Efficiency of Biofortification with Zn and Se in Soybean: Yield and Overall Mineral Content in Plant. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 14, n. 23, 11349, 2024. DOI: 10.3390/app142311349. https://doi.org/10.3390/app142311349.

LONERAGAN, J. F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: ROBSON, A. D. (ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 119–134. DOI: 10.1007/978-94-011-0878-2_9. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_9.

LU, Y.; HALL, D. A.; LAST, R. L. A Small Zinc Finger Thylakoid Protein Plays a Role in Maintenance of Photosystem II in *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Cell**, [S. l.], v. 23, n. 5, p. 1861–1875, 2011. DOI: 10.1105/tpc.111.085456. https://doi.org/10.1105/tpc.111.085456.

MA, Y. B.; UREN, N. C. Effect of aging on the availability of zinc added to a calcareous clay soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S. l.], v. 76, n. 1, p. 11–18, 2006. DOI: 10.1007/s10705-006-9036-8. https://doi.org/10.1007/s10705-006-9036-8.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARREIRO, D.; CRUZ, K.; MORAIS, J.; BESERRA, J.; SEVERO, J.; DE OLIVEIRA, A. Zinc and Oxidative Stress: Current Mechanisms. **Antioxidants**, [S. l.], v. 6, n. 2, 24, 2017. DOI: 10.3390/antiox6020024. https://doi.org/10.3390/antiox6020024.

MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. DOI: 10.1016/c2009-0-63043-9. https://doi.org/10.1016/c2009-0-63043-9.

MARTÍNEZ-CUESTA, N.; CARCIOCHI, W.; SAINZ-ROZAS, H.; SALVAGIOTTI, F.; COLAZO, J. C.; WYNGAARD, N.; EYHERABIDE, M.; FERRARIS, G.; BARBIERI, P. Effect of zinc application strategies on maize grain yield and zinc concentration in mollisols. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 44, n. 4, p. 486–497, 2021. DOI: 10.1080/01904167.2020.1844754.

MARTÍNEZ CUESTA, N.; CARCIOCHI, W.; WYNGAARD, N.; SAINZ ROZAS, H.; SILVA, S.; SALVAGIOTTI, F.; BARBIERI, P. Zinc fertilization strategies in soybean: plant uptake, yield, and seed concentration. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 46, n. 6, p. 1134–1144, 2023. DOI: 10.1080/01904167.2022.2067059. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067059.

MATTIELLO, E. M.; CANCELLIER, E. L.; DA SILVA, R. C.; DEGRYSE, F.; BAIRD, R.; MCLAUGHLIN, M. J. Efficiency of soil-applied 67Zn-enriched fertiliser across three consecutive crops. **Pedosphere**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 531–537, 2021. DOI: 10.1016/s1002-0160(20)60044-3. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(20)60044-3.

MENEZES, A. A.; DIAS, L. E.; NEVES, J. C. L.; SILVA, J. V. O. da. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DPTA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

[S. l.], v. 34, n. 2, p. 417–424, 2010. DOI: 10.1590/s0100-06832010000200015. https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000200015.

MORAIS, E. G.; SILVA, C. A.; JINDO, K. Humic Acid Improves Zn Fertilization in Oxisols Successively Cultivated with Maize–Brachiaria. **Molecules**, [S. l.], v. 26, n. 15, 4588, 2021. DOI: 10.3390/molecules26154588. https://doi.org/10.3390/molecules26154588.

MOSSA, A.-W.; GASHU, D.; BROADLEY, M. R.; DUNHAM, S. J.; MCGRATH, S. P.; BAILEY, E. H.; YOUNG, S. D. The effect of soil properties on zinc lability and solubility in soils of Ethiopia – an isotopic dilution study. **SOIL**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 255–268, 2021. DOI: 10.5194/soil-7-255-2021. https://doi.org/10.5194/soil-7-255-2021.

MOUSTAKAS, M.; DOBRIKOVA, A.; SPERDOULI, I.; HANĆ, A.; MOUSTAKA, J.; ADAMAKIS, I.-D. S.; APOSTOLOVA, E. Photosystem II Tolerance to Excess Zinc Exposure and High Light Stress in *Salvia sclarea* L. **Agronomy**, [S. l.], v. 14, n. 3, 589, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14030589. https://doi.org/10.3390/agronomy14030589.

MUTAMBU, D.; KIHARA, J.; MUCHERU-MUNA, M.; BOLO, P.; KINYUA, M. Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis. **Heliyon**, [S. l.], v. 9, n. 5, e16040, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16040. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16040.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L.; MELÍCIO, A. C. F. D. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 599–606, 2002. DOI: 10.1590/s0100-06832002000300004. https://doi.org/10.1590/s0100-06832002000300004.

NAYAK, S.; SINGH SHIVAY, Y.; MANDI, S.; NAYAK, P.; BISWAKARMA, N.; GAWDIYA, S.; BARAL, K.; REDDY, K. S.; BORATE, R. B. Zinc Accumulation, Translocation and Remobilization in Biofortified Wheat Variety as Influenced by Zn Fertilization Strategies. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 8121–8134, 2025. DOI: 10.1007/s42729-025-02659-7. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02659-7.

NOREEN, S.; SULTAN, M.; AKHTER, M. S.; SHAH, K. H.; UMMARA, U.; MANZOOR, H.; ULFAT, M.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 158, p. 244–254, 2021. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.007. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.007.

OLIVEIRA, N. T. de; NAMORATO, F. A.; RAO, S.; CARDOSO, A. A. de S.; REZENDE, P. M. de; GUILHERME, L. R. G.; LIU, J.; LI, L. Iron counteracts zinc-induced toxicity in soybeans. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 194, p. 335–344, 2023. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.11.024. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.024.

OLSEN, L. I.; PALMGREN, M. G. Many rivers to cross: the journey of zinc from soil to seed. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 5, 30, 2014. DOI: 10.3389/fpls.2014.00030. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00030.

PANDEY, S.; FARTYAL, D.; AGARWAL, A.; SHUKLA, T.; JAMES, D.; KAUL, T.; NEGI, Y. K.; ARORA, S.; REDDY, M. K. Abiotic Stress Tolerance in Plants: Myriad Roles of

Ascorbate Peroxidase. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 8, 581, 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.00581. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00581.

PAWLOWSKI, M. L.; HELFENSTEIN, J.; FROSSARD, E.; HARTMAN, G. L. Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 42, n. 6, p. 634–649, 2019. DOI: 10.1080/01904167.2019.1567782. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567782.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F.; MENDONÇA, E. de S.; GEBRIM, F. de O.; MOREIRA, F. F. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 30, n. 5, p. 859–868, 2006. DOI: 10.1590/s0100-06832006000500012. https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000500012.

PRADO, R. de M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-71262-4. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4.

PRASK, J. A.; PLOCKE, D. J. A Role for Zinc in the Structural Integrity of the Cytoplasmic Ribosomes of *Euglena gracilis*. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 48, n. 2, p. 150–155, 1971. DOI: 10.1104/pp.48.2.150. https://doi.org/10.1104/pp.48.2.150.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Introdução. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 1–6.

RAIJ, B. van. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p. 5–39.

REHMAN, A.; FAROOQ, M.; OZTURK, L.; ASIF, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 422, n. 1–2, p. 283–315, 2018. DOI: 10.1007/s11104-017-3507-3. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3.

REHMAN, R.; LATIF, M. M.; KHAN, M. A.; AHMED, Z. Agronomic Biofortification of Crops with Zinc: A Comprehensive Overview. In: GOVINDARAJ, M.; GOVINDAN, V.; PALACIOS, N. (ed.). **Breeding Zinc Crops for Better Human Health**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 153–184. DOI: 10.1007/978-3-031-84342-6_8. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84342-6_8.

RICACHENEVSKY, F. K.; MENGUER, P. K.; SPEROTTO, R. A.; WILLIAMS, L. E.; FETT, J. P. Roles of plant metal tolerance proteins (MTP) in metal storage and potential use in biofortification strategies. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 4, 144, 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00144. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00144.

RITCHEY, K. D.; COX, F. R.; GALRÃO, E. Z.; YOST, R. S. Zinc availability for corn, sorghum and soybean in a clayey dark-red latosol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 3, p. 215–225, 1986. https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14705.

ROBERTS, D. R.; FORD, R. G.; SPARKS, D. L. Kinetics and mechanisms of Zn complexation on metal oxides using EXAFS spectroscopy. **Journal of Colloid and**

Interface Science, [S. l.], v. 263, n. 2, p. 364–376, 2003. DOI: 10.1016/s0021-9797(03)00281-9. https://doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00281-9.

ROUT, G. R.; DAS, P. Effect of Metal Toxicity on Plant Growth and Metabolism: I. Zinc. **Agronomie**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 3–11, 2003. DOI: 10.1051/agro:2002073. https://doi.org/10.1051/agro:2002073.

SAGARDOY, R.; MORALES, F.; LÓPEZ-MILLÁN, A.-F.; ABADÍA, A.; ABADÍA, J. Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. **Plant Biology**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 339–350, 2009. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x. https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x.

SALEEM, M. H.; USMAN, K.; RIZWAN, M.; AL JABRI, H.; ALSAFRAN, M. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 1033092, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1033092. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092.

SANGNAK, S.; VEERADITTAKIT, J.; PROM-U-THAI, C. Comparative impacts of nitrogen, sulfur, and zinc fertilization on grain yield, protein content, antioxidant capacity and its loss during polishing process among rice varieties. **Frontiers in Agronomy**, [S. l.], v. 7, 1725441, 2026. DOI: 10.3389/fagro.2025.1725441. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1725441.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SHANMUGAM, V.; LO, J.-C.; WU, C.-L.; WANG, S.-L.; LAI, C.-C.; CONNOLLY, E. L.; HUANG, J.-L.; YEH, K.-C. Differential expression and regulation of iron-regulated metal transporters in *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis thaliana* – the role in zinc tolerance. **New Phytologist**, [S. l.], v. 190, n. 1, p. 125–137, 2011. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03606.x. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03606.x.

SHARMA, A.; SHAHZAD, B.; REHMAN, A.; BHARDWAJ, R.; LANDI, M.; ZHENG, B. Response of Phenylpropanoid Pathway and the Role of Polyphenols in Plants under Abiotic Stress. **Molecules**, [S. l.], v. 24, n. 13, 2452, 2019. DOI: 10.3390/molecules24132452. https://doi.org/10.3390/molecules24132452.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, [S. l.], v. 2012, p. 1–26, 2012. DOI: 10.1155/2012/217037. https://doi.org/10.1155/2012/217037.

SILVA, A. B. P.; BORGES, L. F. S.; LUCINI, F.; SILVA, G. N.; SANTOS, E. F. Technologies in Agronomic Biofortification with Zinc in Brazil: A Review. **Plants**, [S. l.], v. 14, n. 12, 1828, 2025. DOI: 10.3390/plants14121828. https://doi.org/10.3390/plants14121828.

SILVEIRA, M. L.; ALLEONI, L. R. F.; O'CONNOR, G. A.; CHANG, A. C. Heavy metal sequential extraction methods—A modification for tropical soils. **Chemosphere**, [S. l.], v. 64, n. 11, p. 1929–1938, 2006. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.01.018. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.018.

SINCLAIR, S. A.; KRÄMER, U. The zinc homeostasis network of land plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research**, [S. l.], v. 1823, n. 9, p. 1553–1567, 2012. DOI: 10.1016/j.bbamcr.2012.05.016. https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.05.016.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965. DOI: 10.5344/ajev.1965.16.3.144. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144.

SOLYMOSI, K.; BERTRAND, M. Soil metals, chloroplasts, and secure crop production: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 245–272, 2012. DOI: 10.1007/s13593-011-0019-z. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0019-z.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/555355.

SOUZA, H. A. de; VIEIRA, P. F. de M. J.; ROZANE, D. E.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA, A. C. M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 44, e0190125, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcs20190125. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190125.

STANTON, C.; SANDERS, D.; KRÄMER, U.; PODAR, D. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. **Molecular Plant**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 65–85, 2022. DOI: 10.1016/j.molp.2021.12.008. https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development**. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M.; PATEL, P. M. Zinc induced iron deficiency in soybeans. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 37–41, 1976. DOI: 10.1080/00103627609366609. https://doi.org/10.1080/00103627609366609.

WAYCHUNAS, G. A.; FULLER, C. C.; DAVIS, J. A. Surface complexation and precipitate geometry for aqueous Zn(II) sorption on ferrihydrite I: X-ray absorption extended fine structure spectroscopy analysis. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [S. l.], v. 66, n. 7, p. 1119–1137, 2002. DOI: 10.1016/s0016-7037(01)00853-5. https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00853-5.

XIA, H.; WANG, L.; QIAO, Y.; KONG, W.; XUE, Y.; WANG, Z.; KONG, L.; XUE, Y.; SIZMUR, T. Elucidating the source–sink relationships of zinc biofortification in wheat grains: A review. **Food and Energy Security**, [S. l.], v. 9, n. 4, e243, 2020. DOI: 10.1002/fes3.243. https://doi.org/10.1002/fes3.243.

YUSEFI-TANHA, E.; FALLAH, S.; ROSTAMNEJADI, A.; POKHREL, L. R. Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: Influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 738, 140240, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140240. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140240.

ZAGOSKINA, N. V.; ZUBOVA, M. Y.; NECHAEVA, T. L.; KAZANTSEVA, V. V.; GONCHARUK, E. A.; KATANSKAYA, V. M.; BARANOVA, E. N.; AKSENOVA, M. A.

Polyphenols in Plants: Structure, Biosynthesis, Abiotic Stress Regulation, and Practical Applications (Review). **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 24, n. 18, 13874, 2023. DOI: 10.3390/ijms241813874. https://doi.org/10.3390/ijms241813874.

ZENG, H.; WU, H.; YAN, F.; YI, K.; ZHU, Y. Molecular regulation of zinc deficiency responses in plants. **Journal of Plant Physiology**, [S. l.], v. 261, 153419, 2021. DOI: 10.1016/j.jplph.2021.153419. https://doi.org/10.1016/j.jp

CAPÍTULO 3 - Níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e na folha e implicações fisiológicas e nutricionais na cultura da soja após dois anos da incorporação do Zn em Latossolo

RESUMO - A adubação corretiva com zinco (Zn) é amplamente utilizada em solos tropicais para suprir a deficiência desse micronutriente; entretanto, informações sobre seu efeito residual e seus níveis críticos de toxicidade em condições de campo ainda são limitadas. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos residuais da adubação corretiva com Zn sobre a disponibilidade do micronutriente no solo, o estado nutricional, as respostas fisiológicas, o sistema antioxidante e a produtividade da soja cultivada em Latossolo argiloso durante duas safras consecutivas, bem como estabelecer os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e nas folhas. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com cinco doses de Zn (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}), aplicadas e incorporadas ao solo antes do cultivo do milho, sendo seus efeitos residuais posteriormente avaliados em dois cultivos sucessivos de soja. O aumento das doses promoveu incremento linear dos teores de Zn disponível no solo e das concentrações do micronutriente nas folhas e nos grãos, sem alterar o estado nutricional dos demais nutrientes. Em contrapartida, concentrações residuais elevadas de Zn intensificaram o estresse oxidativo, aumentando a atividade da superóxido dismutase e o teor de ácido ascórbico. Contudo, esses mecanismos de defesa foram insuficientes para evitar os danos oxidativos, que reduziram a eficiência fotoquímica do fotossistema II, a taxa fotossintética, a concentração de sacarose e a produtividade de grãos. A produtividade máxima estimada foi de 3.726 kg ha^{-1}, obtida com a aplicação de 44,6 kg ha^{-1} de Zn, correspondente aos teores de 8,72 mg dm^{-3} de Zn disponível no solo e de 51,21 mg kg^{-1} de Zn nas folhas. Considerando uma redução de 5% da produtividade máxima, a dose crítica de toxicidade foi estimada em 72,8 kg ha^{-1} de Zn, associada aos níveis críticos de 13,09 mg dm^{-3} no solo e de 70,00 mg kg^{-1} nas folhas. Esses resultados fornecem critérios iniciais de toxicidade de Zn para a cultura da soja em condições de campo e contribuem para o aprimoramento das recomendações de adubação corretiva e da interpretação das análises de solo e foliar em solos tropicais.

Palavras-chave: Glycine max; zinco; toxicidade; efeito residual; estresse oxidativo; níveis críticos.

Critical Zn toxicity levels in soil and leaves and their physiological and nutritional implications for soybean two years after Zn incorporation into an Oxisol

ABSTRACT: Corrective zinc (Zn) fertilization is widely used in tropical soils to alleviate micronutrient deficiency; however, information on its residual effects and critical toxicity levels under field conditions remains limited. This study aimed to evaluate the residual effects of corrective Zn fertilization on soil Zn availability, plant nutritional status, physiological responses, the antioxidant defense system, and soybean yield in two consecutive growing seasons in a clayey Oxisol, as well as to establish critical Zn toxicity levels in the soil and leaves. The experiment was conducted in a randomized complete block design with five Zn rates (0, 12, 24, 48, and 96 kg ha^{-1}). The treatments were applied and incorporated into the soil before maize cultivation, and their residual effects were subsequently evaluated in two successive soybean crops. Increasing Zn rates linearly increased soil-available Zn and Zn concentrations in the leaves and grains without affecting the nutritional status of the other nutrients. Conversely, high residual Zn concentrations intensified oxidative stress, increasing superoxide dismutase activity and ascorbic acid concentration. However, these defense mechanisms were insufficient to prevent oxidative damage, which reduced photosystem II photochemical efficiency, photosynthetic rate, sucrose concentration, and grain yield. The estimated maximum yield was 3,726 kg ha^{-1}, obtained with the application of 44.6 kg ha^{-1} Zn, corresponding to an available soil Zn concentration of 8.72 mg dm^{-3} and a leaf Zn concentration of 51.21 mg kg^{-1}. Considering a 5% reduction in maximum yield, the critical toxicity rate was estimated at 72.8 kg ha^{-1} Zn, associated with critical Zn levels of 13.09 mg dm^{-3} in the soil and 70.00 mg kg^{-1} in the leaves. These results provide initial criteria for assessing Zn toxicity in field-grown soybean and contribute to improving corrective fertilization recommendations and the interpretation of soil and leaf analyses in tropical soils.

Keywords: Glycine max; zinc; residual effect; toxicity; oxidative stress; critical thresholds.

1. INTRODUCÃO

A adubação corretiva com zinco (Zn) consolidou-se como uma das principais estratégias para superar a deficiência desse micronutriente em solos tropicais altamente intemperizados (Galrão, 2004). Diferentemente dos macronutrientes móveis no perfil do solo, o Zn apresenta elevada afinidade pelos coloides minerais, especialmente pelos óxidos de ferro e alumínio predominantes em Latossolos e Argissolos, o que reduz suas perdas por lixiviação e confere efeito residual prolongado após sua aplicação (Alloway, 2009; Nascimento; Fontes, 2004; Raij, 2001). Sob o ponto de vista agronômico, essa característica representa uma importante vantagem, pois uma única aplicação corretiva pode beneficiar não apenas a cultura que recebe diretamente o fertilizante, mas também as culturas cultivadas em sucessão, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes e aumentando a eficiência do manejo desse micronutriente (Inocêncio et al., 2012; Leite et al., 2020).

Entretanto, a mesma persistência que torna a adubação corretiva uma estratégia eficiente também levanta uma importante questão agronômica. À medida que o Zn permanece acumulado na camada arável do solo ao longo dos sucessivos ciclos de cultivo, o efeito residual pode deixar de representar apenas um benefício nutricional e passar a constituir um fator limitante ao desenvolvimento das plantas (Cakmak, 2000; Kaur; Garg, 2021). Assim, compreender até que ponto o efeito residual da adubação corretiva atende a demanda nutricional das plantas e a partir de quais concentrações passa a induzir respostas de toxicidade, é um dos principais desafios para o manejo sustentável e racional do Zn em sistemas de alta produção agrícolas tropicais.

Esse desafio é particularmente relevante em Latossolos argilosos, onde a elevada capacidade tampão para Zn exige a utilização de doses corretivas superiores à demanda imediata das culturas (Abreu et al., 2007). Após sua incorporação ao solo, grande parte do Zn aplicado passa a integrar diferentes frações químicas associadas aos óxidos de ferro e alumínio, aos minerais da fração argila e à matéria orgânica, estabelecendo um equilíbrio dinâmico entre formas lábeis e não lábeis (Lindsay, 1991; Oliveira et al., 1999). Dessa forma, a disponibilidade desse micronutriente deixa de depender exclusivamente da dose aplicada e passa a ser controlada pelos processos de adsorção, dessorção e redistribuição entre as frações do solo ao longo do tempo, tornando complexa a previsão da duração de seu efeito residual (Nascimento & Fontes, 2004).

A soja (*Glycine max* L.) ocupa posição estratégica nos sistemas agrícolas brasileiros, sendo cultivada predominantemente em sucessão às culturas que recebem a adubação corretiva com Zn, como o milho (Galrão, 1996; Ritchey et al., 1986). Em grande parte das áreas agrícolas, a soja é estabelecida sob efeito residual desse micronutriente, e não em resposta direta à sua aplicação (Chrysargyris et al., 2022). Essa condição torna-se particularmente relevante porque o Zn desempenha funções estruturais, catalíticas e regulatórias indispensáveis ao metabolismo vegetal (Prado, 2021). O micronutriente participa da ativação de centenas de enzimas, da síntese de proteínas e pigmentos fotossintéticos, da manutenção da integridade estrutural e funcional do fotossistema II, trocas gasosas, formação de compostos ricos em energia e da regulação do sistema antioxidante, processos essenciais para a manutenção da atividade fotossintética, do crescimento e da produtividade da cultura (Marschner, 2012; Prado, 2021).

Apesar da reconhecida importância agronômica do efeito residual da adubação corretiva, a maior parte dos estudos concentrou-se na resposta imediata da cultura que recebeu diretamente a aplicação do fertilizante, enquanto poucos trabalhos investigaram o comportamento das culturas subsequentes ao longo de sucessivos ciclos agrícolas (Ritchey et al., 1986; Galrão, 1996; Fageria, 2000). Essa lacuna é ainda mais evidente para a soja cultivada em condições de campo, sobretudo quando se considera a persistência do Zn no solo após vários anos da aplicação corretiva, já que os poucos estudos disponíveis sobre toxicidade foram conduzidos em vasos, restritos aos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas (Borkert et al., 1998; Fageria, 2000; Siatwiinda et al., 2024). Nessa situação, permanece pouco compreendido se o efeito residual continua atendendo as demandas nutricionais ou se passa a representar um fator limitante ao desempenho fisiológico e queda de produtividade da cultura.

Além da escassez de informações sobre a persistência do efeito residual, ainda existem importantes incertezas quanto aos mecanismos envolvidos na toxicidade de Zn em condições de campo. Estudos conduzidos em vasos e soluções nutritivas demonstram que concentrações elevadas desse micronutriente podem promover degradação de pigmentos fotossintéticos, redução da eficiência fotoquímica do fotossistema II, aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, intensificação do estresse oxidativo e redução da assimilação de carbono (Moustakas et al., 2024; Sagardoy et al., 2009; Solymosi; Bertrand, 2012). Entretanto, essas condições

experimentais diferem substancialmente daquelas observadas em campo, onde o sistema radicular explora maior volume de solo, a disponibilidade de Zn é continuamente regulada pelas frações do solo e as interações entre solo, planta e ambiente tornam-se significativamente mais complexas (Siatwiinda et al., 2024).

Outro aspecto que permanece pouco esclarecido refere-se aos limiares de toxicidade do Zn no solo e na planta ao longo da persistência do efeito residual. As recomendações atualmente utilizadas concentram-se, principalmente, na definição de faixas de suficiência para diagnose foliar, situada entre 20 e 50 mg kg^{-1} e praticamente inalterada há mais de 25 anos (Ambrosano et al., 1997; Quaggio et al., 2022) e de disponibilidade do micronutriente no solo, enquanto informações referentes aos níveis críticos de toxicidade obtidos em condições de campo ainda são extremamente limitadas, restringindo-se a valores de referência (próximos a 72 mg kg^{-1} na folha) obtidos sem validação experimental em campo (Embrapa, 2011). Essa deficiência de conhecimento dificulta a interpretação das análises de solo e de tecido vegetal, reduzindo a precisão das recomendações de adubação corretiva e aumentando a incerteza sobre o momento em que o efeito residual deixa de representar um benefício agronômico e passa a comprometer o desempenho da cultura (Chaney, 1993).

Diante desse contexto, levantou-se a hipótese de que a persistência do efeito residual da adubação corretiva com Zn modifica a disponibilidade desse micronutriente no solo, altera sua absorção pela soja e influencia o estado nutricional, os processos fisiológicos, os mecanismos bioquímicos de defesa antioxidante e a produtividade da cultura. Adicionalmente, hipotetizou-se que os efeitos negativos do excesso de Zn estejam relacionados predominantemente ao aumento do estresse oxidativo e à limitação da atividade fotossintética, e não necessariamente a desequilíbrios nutricionais envolvendo outros elementos minerais.

Objetivou-sex avaliar o efeito residual de doses de Zn incorporadas em Latossolo argiloso sobre a disponibilidade do micronutriente no solo, o estado nutricional, as respostas fisiológicas e bioquímicas e a produtividade da soja no segundo ano de cultivo, em condições de campo. Buscou-se, ainda, determinar os níveis críticos de toxicidade de Zn no solo e nas folhas e investigar a relação entre o excesso desse micronutriente, o estresse oxidativo, os mecanismos de defesa antioxidante e a atividade fotossintética da cultura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Deliamento experimental

O experimento foi conduzido em condições de campo na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), localizada no município de Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil (21°15′3,13″ S; 48°17′8,88″ W; altitude média de 546 m).

O Zn foi aplicado e incorporado ao solo em 18 de dezembro de 2023. Após a aplicação do micronutriente, foram realizados três cultivos sucessivos na mesma área experimental. O primeiro cultivo correspondeu ao milho, conduzido na safra 2023/2024, no qual foram avaliados os efeitos imediatos da aplicação de Zn. Após a colheita do milho, foi conduzido o primeiro cultivo de soja, com a cultivar TMG 7063 IPRO, durante a safra 2024/2025, para avaliação do efeito residual do micronutriente. O presente experimento correspondeu ao terceiro cultivo realizado após a aplicação de Zn e ao segundo cultivo consecutivo de soja, conduzido na safra 2025/2026, aproximadamente dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo.

Nesse terceiro cultivo, foi utilizada a cultivar de soja Olimpo IPRO, conduzida entre 27 de outubro de 2025 e 26 de março de 2026. Portanto, as respostas avaliadas neste estudo representam o efeito residual das doses de Zn após um cultivo de milho e um cultivo de soja.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, composto por cinco doses de Zn aplicadas ao solo (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1} de Zn) e quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída por nove linhas de soja, espaçadas em 0,45 m e com 18 m de comprimento. A área útil foi composta pelas cinco linhas centrais, excluindo-se 1 m de cada extremidade como bordadura. Para minimizar o risco de contaminação entre parcelas adjacentes, foi mantido um espaçamento de 4 m entre as unidades experimentais.

2.2 Preparo do solo e aplicação dos tratamentos

As doses de Zn foram aplicadas em 18 de dezembro de 2023, antes do primeiro cultivo, utilizando-se sulfato de zinco monoidratado como fonte (33% de Zn e 18% de S). O fertilizante foi distribuído a lanço sobre a superfície do solo e incorporado à camada de 0 - 20 cm por meio de gradagem aradora pesada, seguida de gradagem niveladora. Para evitar que o fornecimento de S variasse entre os tratamentos, as quantidades desse nutriente foram equilibradas mediante a aplicação de enxofre elementar.

As doses de Zn não foram reaplicadas nos cultivos subsequentes. Assim, os resultados obtidos na safra 2025/2026 representam exclusivamente o efeito residual

das doses inicialmente incorporadas ao solo em dezembro de 2023, após a condução de duas safras anteriores na mesma área experimental: uma de milho e outra de soja.

No terceiro cultivo, a adubação de semeadura foi realizada com 320 kg ha^{-1} do fertilizante formulado NPK 02-31-10, fornecendo 6,4 kg ha^{-1} de N, 99,2 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 32,0 kg ha^{-1} de K_2O. Em cobertura, no estádio vegetativo V4, foram aplicados 150 kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl).

Foram realizadas as análises químicas para avaliação da fertilidade do solo e granulométrica conforme métodos descritos por Raij (2001) e Camargo et al., (1986), respectivamente nas camadas de 0 - 20 e 20 - 40 cm de profundidade (Tabela 1). O solo da área é um Latossolo Vermelho Eutroférrico classificado conforme (Santos et al., 2018) que corresponde Oxisol (USDA Soil Taxonomy) tendo teores de Zn no solo classificados como alto (> 1,2 mg dm^{-3} em DTPA) para as diferentes espécies de acordo com (Raij et al., 1997) e (Boaretto et al., 2022).

Tabela 1. Análise químicas e granulométrica do solo da área experimental, Jaboticabal, São Paulo.

Camada	**B**	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**Argila**	**Silte**	**Areia**
cm			mg dm^{-3}			------	%	-----
0-20	0,42	0,60	13	28,2	2,7	54	21	24
20-40	0,52	0,3	7	30,1	1,2	57	20	23

	pH	**M.O.**	**P**	**S**	**Ca**	**Mg**	**Na**	**K**	**Al**	**H+Al**	**SB**	**CTC**	**V**	**m**
	$CaCl_2$	g dm^{-3}	mg dm^{-3}		----------$mmol_c$ dm^{-3}----------									-%-
0-20	6,1	22	33	6	32	13	-	3,3	0	25	48,8	73,5	66	0
20-40	6,0	16	17	17	30	13	-	2,7	0	25	46,0	71,7	64	0

M.O.= Matéria orgânica CTC: capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; m=saturação por alumínio; SB:soma de bases.

2.3 Análise química do Zn no Solo

Após a colheita da soja, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–20 cm. Em cada parcela experimental, 15 amostras simples foram coletadas aleatoriamente na área útil e combinadas para formar uma amostra composta representativa da parcela. As amostras foram secas ao ar, destorroadas suavemente e passadas por peneira com malha de 2 mm para a obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA).

O Zn disponível foi determinado pelo método de extração com ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA), conforme Lindsay e Norvell (1978). A solução extratora foi composta por DTPA a 0,005 mol L^{-1}, $CaCl_2$ a 0,01 mol L^{-1} e trietanolamina (TEA) a 0,1 mol L^{-1}, com pH ajustado para 7,3. Utilizou-se a proporção solo:extrator de 1:2, e a suspensão foi agitada durante 2 h antes da filtração em papel-filtro quantitativo. As concentrações de Zn nos extratos foram determinadas por espectrometria de absorção atômica com chama e os resultados foram expressos em mg dm^{-3}.

2.4 Clima

O clima predominante foi classificado como tropical chuvoso e seco no inverno (Aw), pelo critério de classificação climática de (Köppen, 1948). Foram registrados os dados pluviométricos em estação meteorológica instalada na área experimental e foi obtido o balanço hídrico, durante o período de cultivo atingindo precipitação pluvial de 663 mm embora a cultura requer em média de 400 a 700 mm (Embrapa, 2007).

2.5 Análise nutricional na folha diagnose, planta inteira e grãos

A amostragem foliar foi realizada no estádio de florescimento da soja, coletando-se quinze folhas por parcela sendo considerada a terceira folha recém madura, conforme indicação de Malavolta et al. (1997). Na época florescimento pleno (R2) coletado 15 plantas inteiras por parcela e na colheita foram obtidos os grãos. As plantas inteiras foram descontaminadas a partir da lavagem com água deionizada contendo solução a 0,1% de detergente neutro, seguida por imersão em solução a 0,3% de HCl e enxague final com água deionizada. Em seguida, as folhas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C ± 5, até a atingir a massa seca constante. Posteriormente essas amostras de tecido vegetal foram analisadas para determinar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) foram determinados conforme métodos descritos por Bataglia et al., (1983).

2.6 Determinação dos teores de Zn no solo

Após a colheita da soja, foram coletadas amostras de solo na camada de 0–20 cm de profundidade. Em cada parcela, realizaram-se 15 amostragens simples, distribuídas na área útil, as quais foram homogeneizadas para constituir uma amostra composta representativa da parcela. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Os teores disponíveis de Zn foram determinados pelo método de extração com DTPA

(ácido dietilenotriaminopentaacético), conforme proposto por Lindsay e Norvell (1978). Para a extração, utilizou-se solução contendo 0,005 mol L^{-1} de DTPA, 0,01 mol L^{-1} de $CaCl_2$ e 0,1 mol L^{-1} de trietanolamina (TEA), ajustada para pH 7,3. A suspensão solo: solução extratora (1:2) foi agitada por 2 horas e, posteriormente, filtrada em papel de filtro quantitativo. As concentrações de Zn no extrato foram determinadas por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS), sendo os resultados expressos em mg dm^{-3}.

2.7 Fluorescência da Clorofila a e pigmentos fotossintéticos

A eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) foi determinada na folha diagnóstica entre 7:00 e 9:00 h utilizando um fluorômetro portátil (OS30P+, Opti-Sciences Inc., EUA), conforme metodologia descrita por (Lichtenthaler et al., 2005). O conteúdo de carotenoides e feofitinas foi determinado a partir de discos foliares submetidos à extração em acetona a 80%, com leituras espectrofotométricas conforme metodologia de Lichtenthaler (1987).

2.8 Fenóis totais

Os compostos fenólicos totais foram quantificados utilizando discos foliares frescos coletados 60 dias após a semeadura. A determinação foi realizada por meio de reação colorimétrica empregando o reagente de Folin–Ciocalteu e solução de Na_2CO_3 a 20%, conforme metodologia descrita por(Singleton & Rossi, 1965). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (modelo DU640, Beckman, EUA) a 765 nm, e os resultados expressos com base em curva padrão apropriada.

2.9 Teor de Malondialdeído (MDA)

Aos sessenta e um dias após a semeadura, amostras de tecido fresco (0,4 g) foram congeladas em nitrogênio líquido (−80 °C), maceradas com Polivinilpirrolidona (PVPP) a 20% (m/v) e ácido tricloroacético (TCA) a 0,1% em gelo, e posteriormente centrifugadas a 11.000 g, 4 °C, por 10 minutos. Ao sobrenadante, adicionou-se ácido tiobarbitúrico (TBA) a 0,5% em TCA a 20%, incubando-se a mistura por 30 minutos a 95 °C. Em seguida, as amostras foram resfriadas em gelo por 10 minutos e novamente centrifugadas a 11.000 g, 4 °C, por 10 minutos. As leituras foram realizadas a 535 e 600 nm, e o teor de malondialdeído (MDA) foi calculado utilizando o coeficiente de extinção molar $\varepsilon = 1{,}55 \times 10^5\ M^{-1}\ cm^{-1}$ (Gratão et al., 2012).

2.10 Extração e análise da atividade da superóxido dismutase

A extração de enzimas de folhas e raízes seguiu a metodologia descrita por Bradford (1976). Os tecidos foram homogeneizados em um almofariz refrigerado com

pistilo usando um tampão de extração (tampão fosfato de potássio 100 mM, pH 7,5, EDTA 1 mM, DL-ditiotreitol 3 mM e polivinilpolipirrolidona insolúvel 5% p/v) na proporção de 3:1 para folhas e frutos e 2:1 para raízes. O homogeneizado foi centrifugado a 10.000 xg por 30 min, e o sobrenadante foi armazenado a −80 °C para posteriores análises de superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1). A concentração de proteína foi determinada pelo método de (Bradford, 1976) utilizando albumina sérica bovina como padrão. A atividade da SOD foi medida utilizando o protocolo de (Giannopolitis & Ries, 1977), com uma mistura de ensaio composta por tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,8), metionina 50 mM, EDTA 10 mM, cloreto de nitroblue tetrazólio 1 mM e riboflavina 0,1 mM, incubada sob lâmpada fluorescente a 25 °C por 5 min. A absorbância foi registrada a 560 nm e os resultados foram expressos em U mg^{-1} de proteína.

2.11 Ácido Ascórbico (AsA)

O teor de ácido ascórbico foi determinado por titulação com 2,6-diclorofenol-indofenol (0,02%), após extração em ácido oxálico 0,5%, conforme metodologia descrita por (Kampfenkel et al., 1995).

2.12 Trocas gasosas

Nas folhas diagnósticas foram avaliadas a taxa fotossintética líquida (A), a taxa de transpiração (E), a condutância estomática (Gs) e a concentração interna de CO_2 (Ci), medidas por meio de um analisador de gás infravermelho em sistema aberto (LcPro-SD, ADC BioScientific Ltd., Reino Unido), aos 61 dias após a semeadura. As medições foram realizadas em uma câmara IRGA configurada com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de 1500 μmol m^{-2} s^{-1}, concentração de CO_2 de 400 ppm e temperatura interna de 30 °C. A leitura realizada no período entre 9 e 11 horas da manhã.

2.13 Produtividade

A produtividade foi estimada a partir da amostragem de 3 linhas centrais na área útil da parcela. Foram realizadas análise do teor de água dos grãos e corrigido para 14% para obter a produção de grãos convertidos em kg ha-1.

2.14 Acúmulo de nutrientes

O acúmulo de nutrientes (kg ha^{-1}) foi calculado pela multiplicação da massa seca da parte aérea (kg ha^{-1}) e o teor do nutriente (g kg^{-1}), dividido por 1000.

2.15 Determinação de níveis críticos.

Os níveis críticos de zinco (Zn) no solo, na folha e na dose aplicada foram determinados a partir das curvas de resposta estimadas por regressão polinomial de segundo grau, conforme metodologia descrita por Prado (2021). Inicialmente, ajustaram-se modelos quadráticos relacionando: (i) doses de Zn e produtividade; (ii) teor de Zn no solo e produtividade; e (iii) teor foliar de Zn e produtividade. Os níveis tóxicos foram baseados em 5% de redução da produção relativa, após atingir o nível máximo.

2.16 Análise de dados

Os dados foram inicialmente avaliados quanto aos pressupostos estatísticos. A normalidade da distribuição foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk ($p > 0,05$), enquanto a homogeneidade de variâncias foi examinada pelo teste de Levene ($p > 0,05$). Atendidos esses pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA). Para variáveis com efeitos significativos ($p < 0,05$), foram ajustados modelos de regressão polinomial para a avaliação das respostas às doses de Zn

3. RESULTADOS

A aplicação corretiva de Zn promoveu incremento linear nos teores disponíveis (em DTPA) desse micronutriente no solo ($Y = 0,1545x + 1,9025$; $F = 2011,16^{**}$ $R^2 = 0,99$), indicando aumento de 0,1545 mg dm^{-3} de Zn para cada kg ha^{-1} aplicado.

A aplicação residual de Zn no solo promoveu efeito quadrático sobre o acúmulo de Zn na parte aérea da soja, com acúmulo máximo estimado na dose de 44 kg ha^{-1} de Zn (Figura 1). Em contrapartida, o acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, B, Mn e Cu não foi influenciado pelas doses de Zn aplicadas.

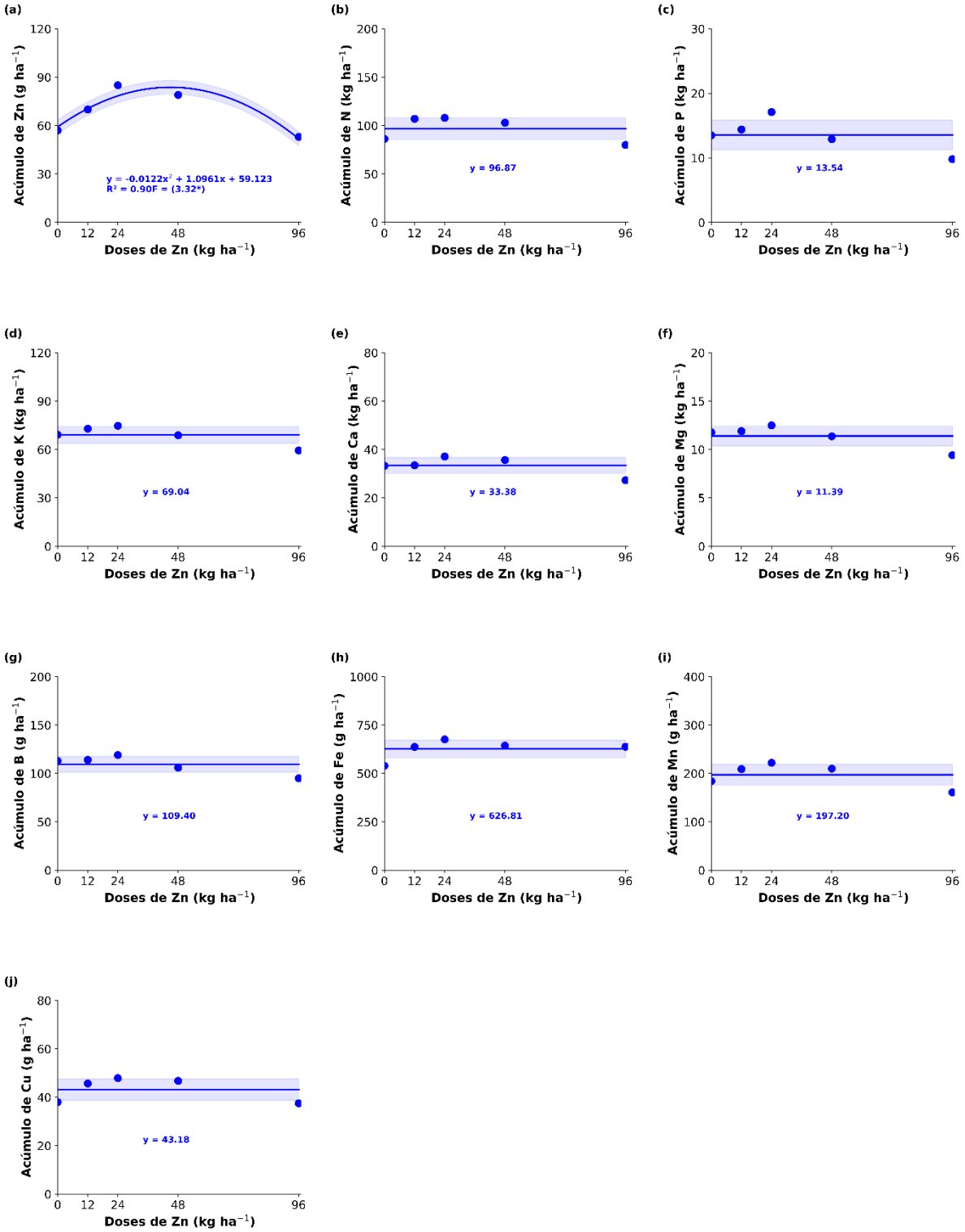


Figura 1. Acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j), em função das doses de Zn, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. ** e * indicam significância a 1% e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A aplicação de Zn via solo na cultura da soja não afetou os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn e Cu, mas promoveu incremento linear nos teores foliares de Zn (Figura 2).

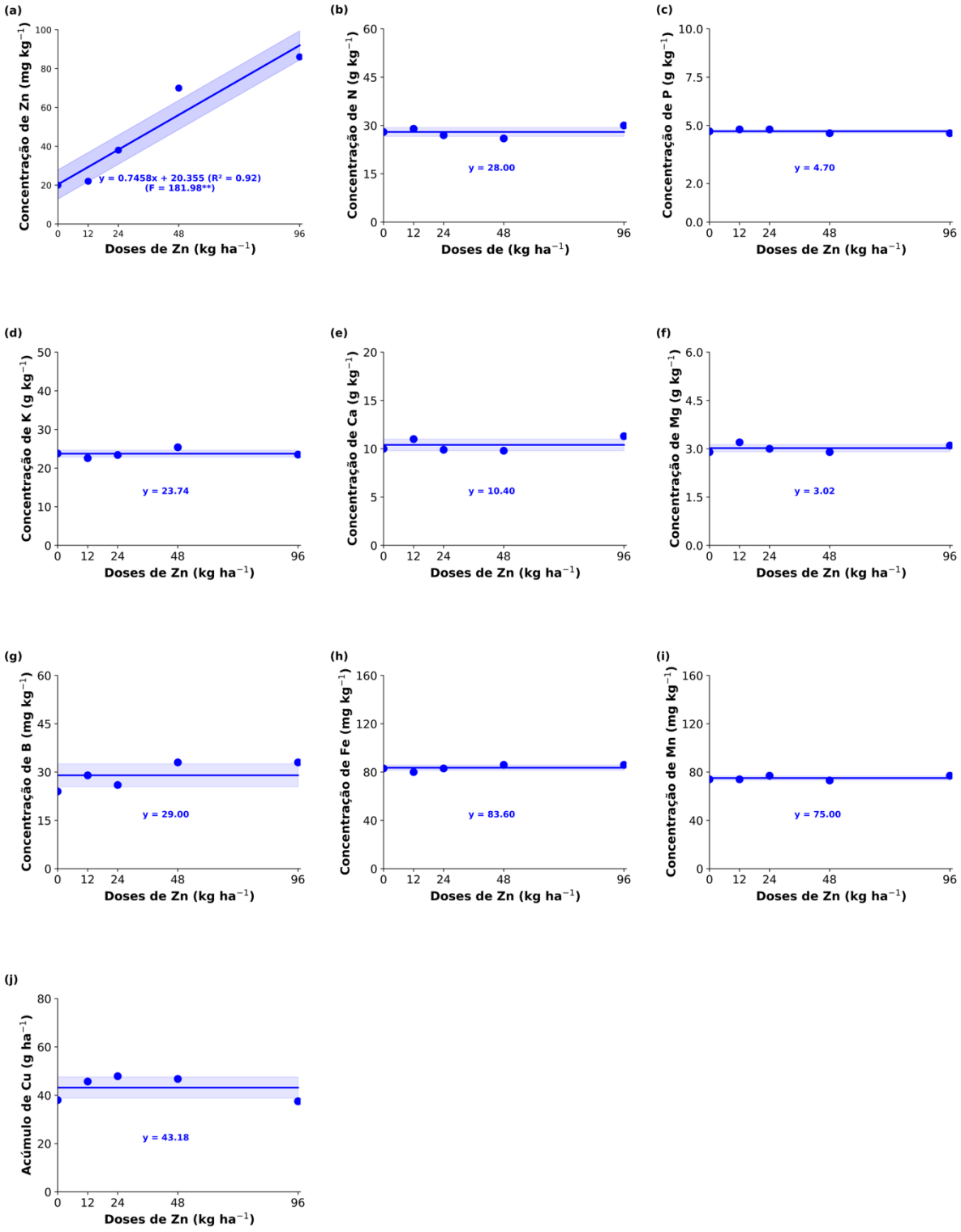


Figura 2. Concentração de nutrientes na folha diagnose da cultura de soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d) , Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j) em função a aplicação de doses de Zn, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. **,* Significativo a 1 e 5%, respectivamente, de probabilidade pelo teste F.

A concentração de Zn nos grãos aumentou linearmente com o incremento das doses de Zn aplicadas ao solo, enquanto as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Cu não foram significativamente afetadas pela fertilização com Zn (Figura 3).

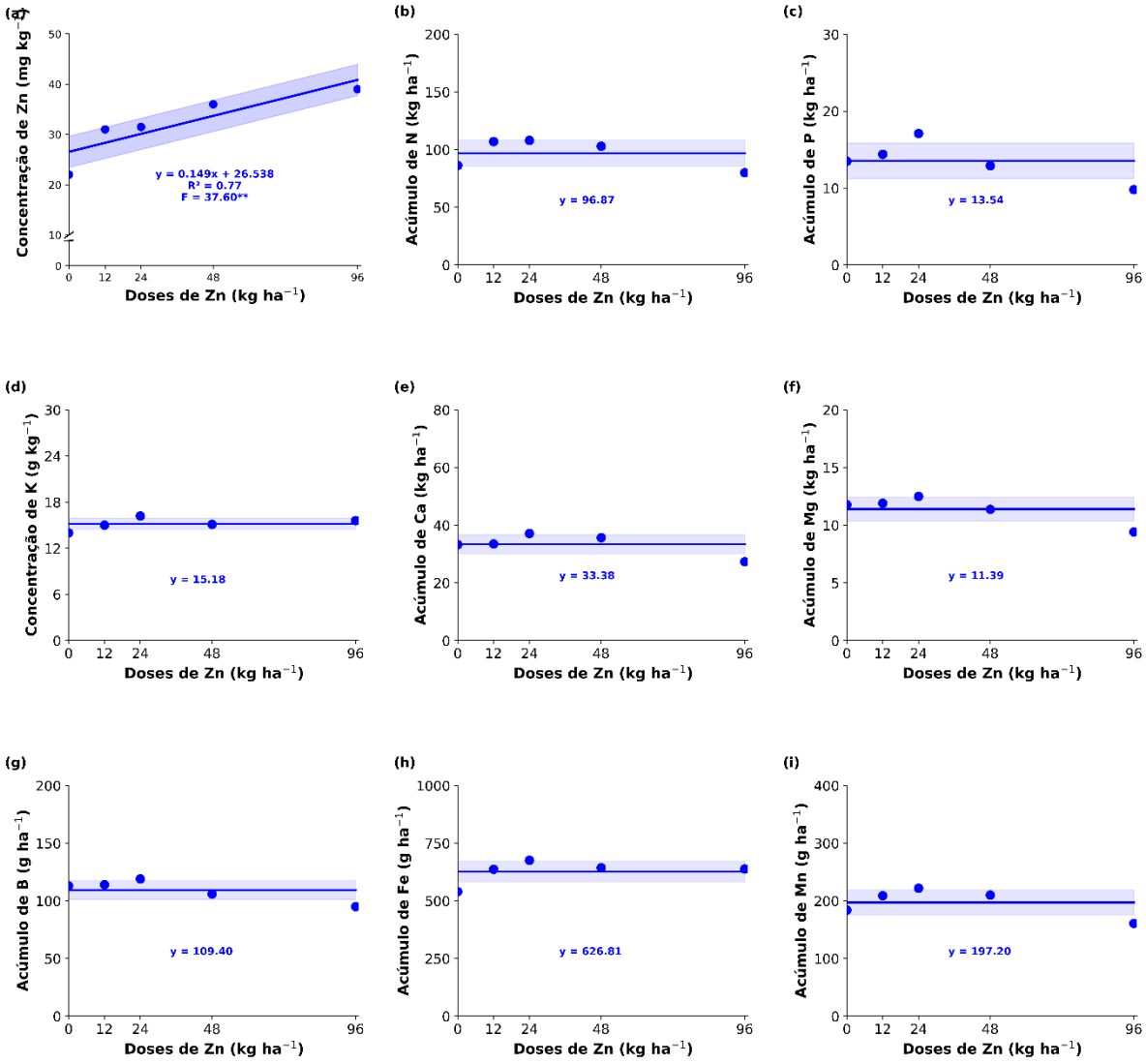


Figura 3. Concentração de nutrientes nos grãos de soja Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), Fe(g) , Mn (h) e Cu (i) em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A aplicação residual de Zn promoveu aumento quadrático nos teores de malondialdeído (MDA), na atividade da superóxido dismutase (SOD), no teor de ácido ascórbico e de compostos fenólicos totais (Figura 4). Da mesma forma, o teor de

aminoácidos livres totais apresentou resposta quadrática às doses de Zn. Em contrapartida, os teores de sacarose e de açúcares solúveis totais não foram influenciados pela aplicação de Zn ao solo.

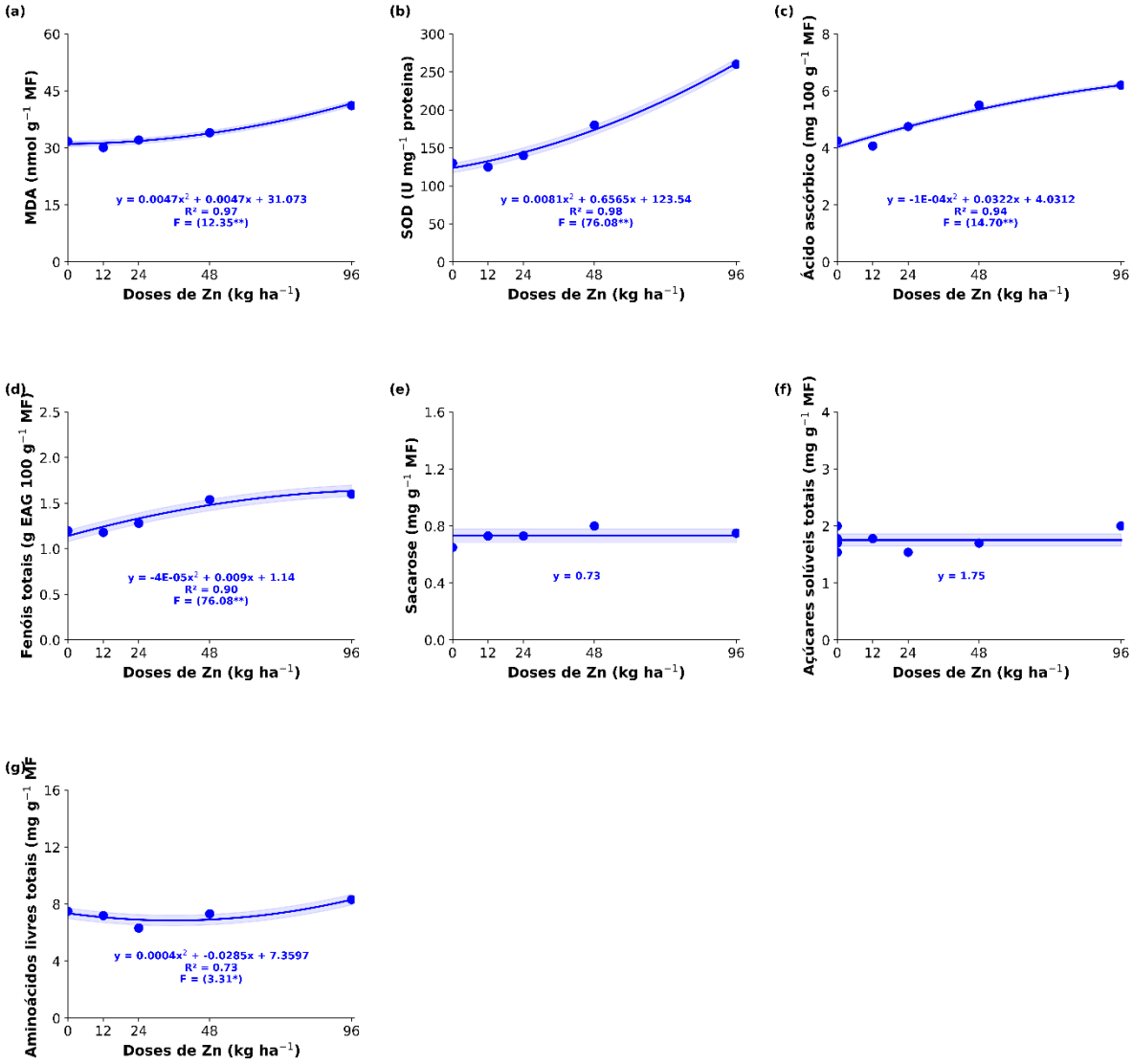


Figura 4. Teor de Malondialdeído – MDA (a), atividade da superóxido dismutase – SOD (b), Teor de ácido ascórbico (c), fenóis totais (d), Teor de sacarose (e), Teor de açúcares solúveis totais (f) e aminoácidos livres totais (g) em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm) apresentou resposta quadrática às doses residuais de Zn, atingindo o valor máximo estimado de 0,798 na dose de 50 kg ha^{-1} de Zn (Figura 5). A taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) apresentou resposta quadrática às doses residuais de Zn, atingindo o valor máximo

estimado de 26,50 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} na dose de 48,33 kg ha^{-1} de Zn (Figura 5e). Em contrapartida, os teores de feofitina a, feofitina b e carotenoides, bem como a condutância estomática (gs), a transpiração (E) e a concentração interna de CO_2 (Ci), não foram influenciados pelas doses residuais de Zn.

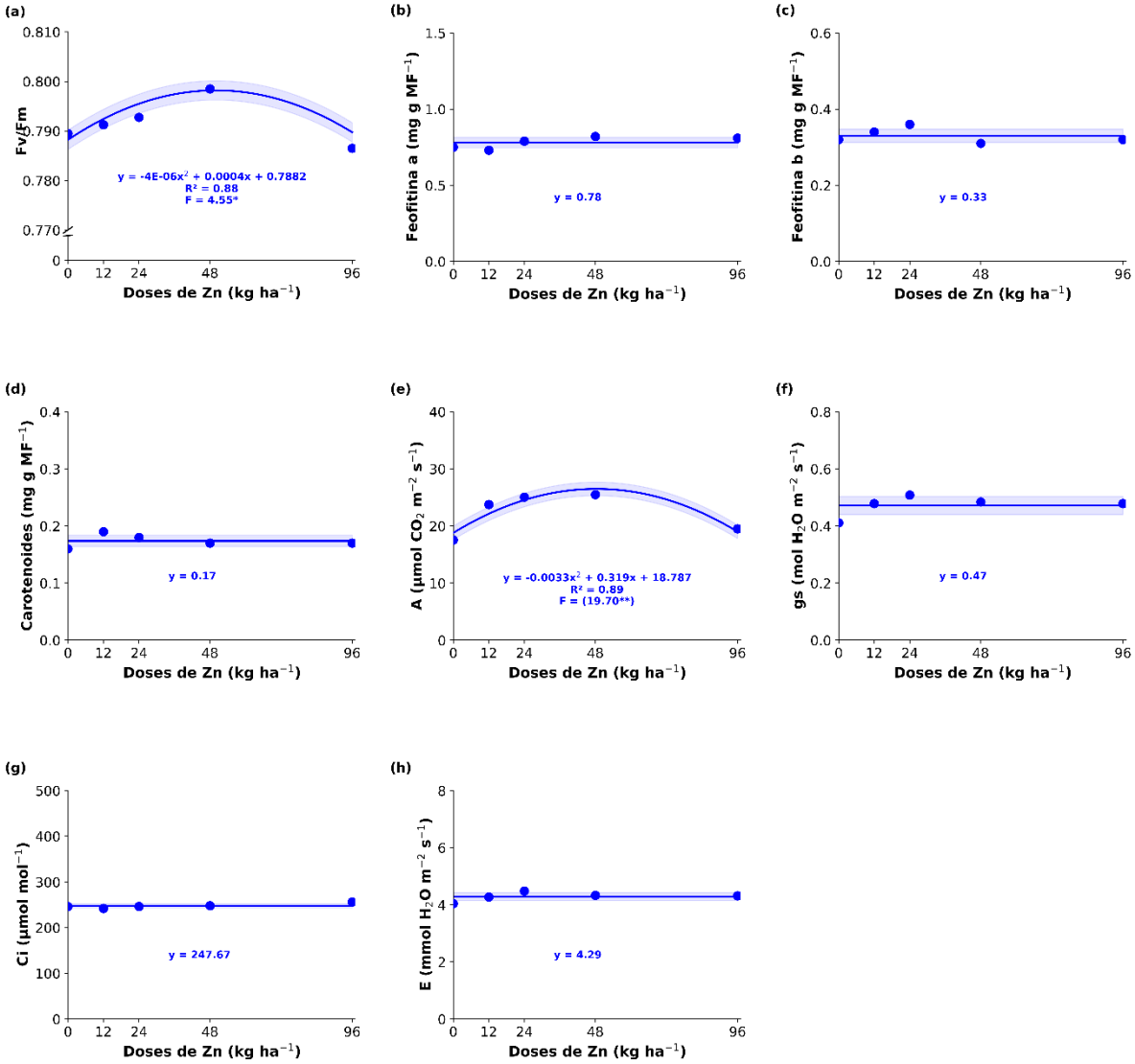


Figura 5. Eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm) (a), feofitina a (b), feofitina b (c), carotenoides (d), fotossíntese líquida (e), condutância estomática (f), concentração interna de CO_2 (g) e transpiração (h) em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

A máxima produtividade estimada da soja foi de 3.726 kg ha^{-1}, obtida com a aplicação de 44,6 kg ha^{-1} de Zn (Figura 6a), correspondendo aos teores de 8,72 mg dm^{-3} de Zn disponível no solo (Figura 6b) e de 51,21 mg kg^{-1} de Zn nas folhas (Figura 6c). Considerando uma redução de 5% da produtividade máxima, os níveis críticos de

toxicidade foram estimados em 72,8 kg ha^{-1} de Zn (Figura 7a), associados aos teores de 13,09 mg dm^{-3} de Zn no solo (Figura 7b) e de 70,00 mg kg^{-1} de Zn nas folhas (Figura 7c).

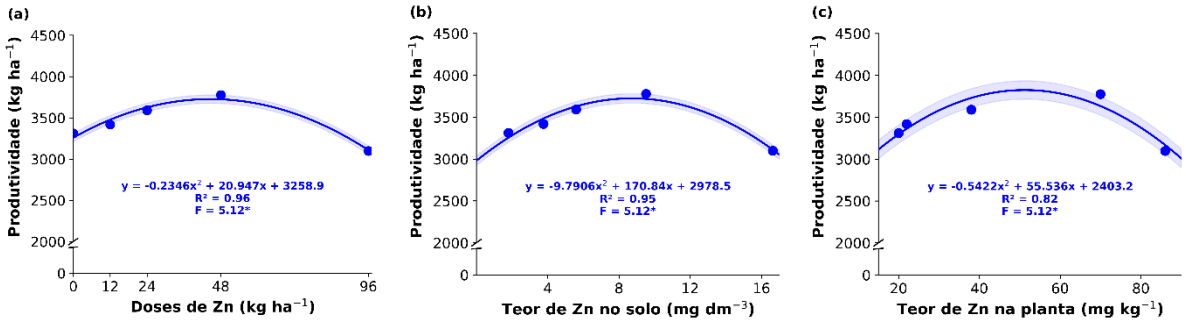


Figura 6. Relação entre a produtividade de grãos de soja e as doses de Zn aplicadas ao solo (a), o teor de Zn no solo (b) e o teor de Zn na folha diagnose (c) em função à aplicação de doses de Zn na cultura da soja, dois anos após a incorporação do micronutriente ao solo. **, * Significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste F.

4. DISCUSSÃO

4.1 Efeitos do zinco incorporado ao solo no sistema solo-planta, nas interações do zinco com outros nutrientes, no estado nutricional e na concentração de nutrientes nos grãos da soja

A persistência do efeito residual da adubação corretiva foi evidenciada pelo aumento linear dos teores de Zn disponível no solo mesmo após três ciclos consecutivos de cultivo, ou seja, três safras (2023/2024, 2024/2025, 2025/2026), corroborando observações semelhantes em outros sistemas de cultivo sob aplicações únicas de Zn ao solo (Botoman et al., 2025). Esse comportamento demonstra que, apesar da elevada capacidade de adsorção característica dos Oxisol argilosos, uma parte do Zn aplicado permanece em formas potencialmente disponíveis às plantas por vários anos após sua incorporação. A elevada afinidade do Zn^{2+} pelas superfícies reativas dos óxidos de ferro e alumínio, bem como pelos minerais da fração argila, reduz sua mobilidade no perfil do solo e estabelece um equilíbrio dinâmico entre as frações adsorvidas e a solução do solo, prolongando o efeito residual da adubação corretiva (Abreu et al., 2007; Alloway, 2009). Sob essa perspectiva, os resultados confirmam que a aplicação corretiva de Zn representa uma estratégia eficiente para sistemas agrícolas tropicais conduzidos em sucessão de culturas, uma vez que uma única aplicação é capaz de manter o suprimento desse micronutriente por múltiplos ciclos agrícolas.

A aplicação residual de Zn promoveu incremento linear nos teores disponíveis desse micronutriente no solo, evidenciando a persistência do efeito residual da adubação corretiva mesmo após três ciclos consecutivos de cultivo. O aumento de 0,1545 mg dm^{-3} de Zn extraído por DTPA para cada kg ha^{-1} de Zn aplicado indica que a aplicação da maior dose (96 kg ha^{-1}) resultou em incremento estimado de 14,83 mg dm^{-3} de Zn disponível no solo, equivalente a aproximadamente 29,66 kg ha^{-1} de Zn na camada de 0–20 cm. Esses valores correspondem a uma recuperação aparente de aproximadamente 30,9% pelo extrator DTPA, evidenciando que parte significativa do Zn aplicado permaneceu em formas potencialmente disponíveis às plantas, mesmo após três cultivos sucessivos. Resultados semelhantes foram relatados em outros solos utilizando o mesmo extrator, com recuperação variando de aproximadamente 20% (Oliveira et al., 1999) a 31% em Vertissolos argilosos (Barman et al., 1998).

A recuperação aparente de aproximadamente 31% pelo extrator DTPA evidencia que grande parte do Zn aplicado permaneceu associada às frações menos lábeis do solo. Esse comportamento é esperado em Latossolos altamente intemperizados, nos quais o Zn^{2+} apresenta elevada afinidade por grupos hidroxila superficiais presentes nos óxidos de Fe e Al e nos minerais da fração argila, formando predominantemente complexos de esfera interna de elevada estabilidade (Alloway, 2009; Lindsay, 1991). Além disso, parte do Zn pode precipitar na forma de hidróxidos, carbonatos e fosfatos de baixa solubilidade, reduzindo sua atividade na solução do solo e sua extração pelo DTPA ((Nascimento & Fontes, 2004). Dessa forma, embora apenas uma fração do Zn aplicado permaneça prontamente disponível, a elevada retenção do micronutriente constitui o principal mecanismo responsável pela persistência do efeito residual da adubação corretiva em solos tropicais.

A resposta linear dos teores de Zn disponível no solo demonstra que o efeito residual da adubação corretiva permaneceu ativo mesmo após três ciclos consecutivos de cultivo, resultados semelhantes encontrado por Liu et al., (2020). O incremento de 0,1545 mg dm^{-3} de Zn extraído por DTPA para cada quilograma de Zn aplicado evidencia que parte do micronutriente permaneceu em formas potencialmente disponíveis às plantas, apesar da elevada capacidade de retenção característica dos Latossolos argilosos. Na maior dose avaliada (96 kg ha^{-1}), o aumento estimado de 14,83 mg dm^{-3} de Zn disponível correspondeu a uma recuperação aparente de aproximadamente 30,9% do Zn aplicado. Esse comportamento está associado à elevada afinidade do Zn^{2+} pelas superfícies reativas

dos óxidos de ferro e alumínio e dos minerais da fração argila, que formam complexos de esfera interna (Nachtegaal & Sparks, 2004) e atuam como importantes reservatórios do micronutriente, regulando sua liberação gradual para a solução do solo (Lindsay & Norvell, 1978). Como consequência, apenas parte do Zn aplicado permanece prontamente extraível pelo DTPA, enquanto o restante integra frações de menor labilidade, contribuindo para prolongar o efeito residual da adubação corretiva.

Um dos principais questionamentos relacionados ao excesso de Zn refere-se ao seu potencial de comprometer a absorção de outros nutrientes por meio de interações antagônicas durante a absorção radicular. Entretanto, essa hipótese não foi confirmada nas condições deste estudo, uma vez que a adubação residual com Zn promoveu aumento apenas das concentrações e do acúmulo do próprio micronutriente, sem alterar o estado nutricional de N, P, K, Ca, Mg, B, Mn e Cu. Esses resultados indicam que, mesmo sob elevada disponibilidade residual de Zn, a soja manteve a homeostase nutricional, preservando a absorção, o transporte e a redistribuição dos demais nutrientes essenciais ao seu metabolismo.

Interações negativas entre Zn e outros elementos minerais têm sido frequentemente descritas em experimentos conduzidos em solução nutritiva e em vasos, nos quais elevadas concentrações de Zn podem competir por transportadores de membrana ou reduzir a absorção de nutrientes, principalmente Fe, Mn, Ca e Mg (Fontes & Cox, 1998; Pawlowski et al., 2019; Wallace et al., 1976). Contudo, essas respostas tendem a ser menos expressivas em condições de campo, onde o maior volume de solo explorado pelo sistema radicular e a elevada capacidade tampão dos Latossolos reduzem a concentração de Zn livre na solução do solo, atenuando possíveis efeitos antagônicos (Silveira et al., 2006)..

Embora tenha sido observada redução linear na concentração foliar de Fe, a magnitude dessa resposta não apresentou relevância agronômica, uma vez que os teores permaneceram entre 70 e 75 mg kg^{-1}, dentro da faixa de suficiência estabelecida para a cultura da soja (50–350 mg kg^{-1}) (Quaggio et al., 2022). Assim, mesmo sob elevadas doses de Zn, não houve evidências de deficiência induzida de Fe ou de comprometimento do equilíbrio nutricional da cultura. Esses resultados sugerem que a elevada capacidade de adsorção de Zn em Latossolos argilosos, associada aos mecanismos fisiológicos de regulação da absorção e redistribuição de nutrientes, limita a importância agronômica das interações antagônicas

frequentemente descritas em condições controladas, preservando a homeostase nutricional da soja mesmo sob efeito residual prolongado da adubação corretiva.

O aumento da concentração de Zn nos grãos demonstra que o efeito residual da adubação corretiva permaneceu suficiente para favorecer não apenas a absorção radicular do micronutriente, mas também sua redistribuição para os órgãos reprodutivos durante o enchimento dos grãos. Esse comportamento evidencia que parte do Zn acumulado na fase vegetativa permaneceu fisiologicamente ativa e foi remobilizada para os grãos, processo dependente da atuação coordenada de transportadores de Zn, especialmente das famílias ZIP, HMA e YSL, responsáveis pelo carregamento do micronutriente no floema e sua translocação para os tecidos reprodutivos (Cakmak & Kutman, 2018; Palmgren et al., 2008).

Do ponto de vista agronômico, esse resultado reforça que a adubação corretiva com Zn proporciona benefícios que vão além da produtividade, promovendo incremento da qualidade nutricional dos grãos produzidos. A biofortificação agronômica tem sido considerada uma das estratégias mais eficientes para reduzir a deficiência de Zn na alimentação humana, especialmente em regiões onde a dieta é baseada predominantemente em cereais e leguminosas (Cakmak, 2008; Cakmak & Kutman, 2018; Silva et al., 2025). Embora a concentração de Zn obtida na dose associada à máxima produtividade tenha permanecido ligeiramente inferior à faixa de 40–50 mg kg^{-1} frequentemente proposta como meta para programas de biofortificação agronômica (Rehman et al., 2025), observou-se incremento expressivo em relação ao tratamento controle, evidenciando o potencial da adubação corretiva em aumentar o valor nutricional da produção.

Sob a perspectiva da segurança alimentar, mesmo na maior dose de Zn aplicada ao solo, a concentração do micronutriente nos grãos permaneceu em níveis considerados seguros para o consumo humano. A ingestão estimada de Zn a partir do consumo de 200 g de grãos permaneceu substancialmente inferior ao Limite Superior Tolerável (UL) de 40 mg de Zn por dia estabelecido para adultos (IOM, 2001), demonstrando que o enriquecimento nutricional promovido pela adubação corretiva não representa risco de consumo excessivo. Assim, a persistência do efeito residual da adubação com Zn possibilita aumentar a qualidade nutricional dos grãos produzidos, preservando simultaneamente a segurança alimentar e dispensando aplicações complementares de Zn via foliar.

4.2 Resposta da soja submetida toxicidade e os mecanismo de defesa induzidos antioxidantes e seus impactos fisiológicos

A maior parte das pesquisas sobre a toxicidade de Zn em plantas de soja foi conduzida em condições controladas, utilizando solução nutritiva ou experimentos em vasos, nos quais os efeitos do excesso desse micronutriente têm sido atribuídos principalmente às interações antagônicas com outros nutrientes, especialmente o Fe (Fontes & Cox, 1998; Loneragan & Webb, 1993; Wallace et al., 1976). Em contraste, poucos estudos investigaram como o excesso de Zn afeta o metabolismo antioxidante e as respostas fisiológicas da soja em condições de campo (Andrejić et al., 2018; Yusefi-Tanha et al., 2020). Nesses ambientes, a elevada capacidade tampão dos Latossolos, a adsorção do Zn aos coloides do solo e o maior desenvolvimento do sistema radicular modificam substancialmente a disponibilidade do micronutriente e sua interação com a planta, tornando inadequada a extrapolação direta dos resultados obtidos em condições controladas (Silveira et al., 2006). Dessa forma, os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na tolerância da soja à toxicidade de Zn em campo permanecem pouco compreendidos, especialmente aqueles relacionados à ativação do sistema antioxidante e à manutenção do desempenho fotossintético (Hacisalihoglu, 2022).

Apesar dos avanços na compreensão da toxicidade de Zn em condições controladas, ainda permanece incerto quais mecanismos efetivamente determinam a tolerância da soja quando cultivada em solos tropicais, onde a disponibilidade do micronutriente é regulada pela elevada capacidade tampão do solo. Essa lacuna limita a compreensão sobre quais componentes do sistema antioxidante são prioritariamente recrutados para preservar a integridade fisiológica da planta e, consequentemente, restringe o desenvolvimento de estratégias de manejo ou de programas de melhoramento voltados ao aumento da tolerância da soja à toxicidade por Zn.

A persistência do efeito residual da adubação corretiva com Zn foi suficiente para intensificar o estresse oxidativo nas plantas de soja, evidenciado pelo aumento das concentrações de malondialdeído (MDA) (Figura 4a), marcador da peroxidação lipídica e da perda de integridade das membranas celulares (Santos et al., 2026). Esse resultado demonstra que, mesmo após três ciclos consecutivos de cultivo, a disponibilidade residual de Zn permaneceu elevada o suficiente para promover alterações no equilíbrio redox celular. Embora o Zn não participe diretamente de

reações do tipo Fenton, concentrações elevadas desse micronutriente comprometem a homeostase celular ao estimular a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), causando danos oxidativos a membranas, proteínas e ao aparato fotossintético (Li et al., 2013).

Como resposta ao aumento da produção de EROs, observou-se incremento na atividade da superóxido dismutase (SOD) (Figura 4b), evidenciando a ativação do sistema antioxidante enzimático. A SOD constitui a primeira linha de defesa contra o estresse oxidativo, catalisando a dismutação do radical superóxido ($O_2^{\bullet -}$) em H_2O_2 e O_2, reduzindo o potencial oxidativo intracelular (Alscher, 2002). Em plantas, a isoforma Cu/Zn-SOD apresenta papel particularmente importante na proteção dos cloroplastos, onde limita o acúmulo de EROs geradas durante o transporte de elétrons da fotossíntese (Ramana Gopavajhula et al., 2013). Assim, o aumento da atividade da SOD observado neste estudo indica que a soja reconheceu o estresse imposto pelo excesso residual de Zn e ativou rapidamente mecanismos de defesa visando preservar a homeostase redox e minimizar os danos oxidativos.

Embora a atividade da superóxido dismutase (SOD) tenha aumentado em resposta ao excesso residual de Zn, a elevação simultânea das concentrações de malondialdeído (MDA) demonstra que a ativação do sistema antioxidante enzimático não foi suficiente para impedir completamente os danos oxidativos. Esse comportamento indica que a taxa de produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) superou a capacidade de detoxificação celular, mantendo um estado de estresse oxidativo mesmo após a indução dos mecanismos de defesa (R. Liu et al., 2026). A SOD constitui a primeira linha de defesa antioxidante das plantas ao catalisar a dismutação do radical superóxido ($O_2^{\bullet -}$) em H_2O_2 e O_2 molecular, reduzindo o potencial oxidativo intracelular (Alscher, 2002). Assim, o aumento da atividade dessa enzima evidencia que a soja reconheceu rapidamente o estresse imposto pelo excesso residual de Zn e ativou mecanismos de defesa para preservar a homeostase redox. Entretanto, a persistência dos elevados teores de MDA demonstra que essa resposta foi insuficiente para neutralizar completamente os danos causados pelo excesso do micronutriente (Santos et al., 2026).

Além da resposta enzimática, a soja ativou os mecanismos antioxidantes não enzimáticos, evidenciamos principalmente por meio do aumento do teor de ácido ascórbico (AsA) (Figura 4c). Esse composto desempenha papel central na manutenção da homeostase redox ao atuar como substrato do ciclo ascorbato-

glutationa, favorecendo a remoção do H_2O_2 produzido após a ação da SOD e protegendo proteínas, membranas celulares e o aparato fotossintético contra os danos oxidativos (Gill & Tuteja, 2010; Pandey et al., 2017). No entanto, o sistema de defesa antioxidativo não enzimático é bem mais eficiente para mitigar a toxicidade (Prado, 2021) tendo muitos compostos antioxidantes nesta linha de defesa da planta. Embora tenha ocorrido aumento na concentração de compostos fenólicos (Figura 4d), sua síntese estabilizou nas maiores doses de Zn, sugerindo limitação da resposta antioxidante não enzimática sob maior intensidade de estresse. Ainda assim, esses metabólitos provavelmente contribuíram para a neutralização parcial das espécies reativas de oxigênio e para a proteção celular (Kumar et al., 2023; Zagoskina et al., 2023).

Esse comportamento sugere que, sob condições de maior intensidade de estresse, a capacidade biossintética desses metabólitos secundários torna-se limitada pelo elevado custo energético imposto à planta, reduzindo sua contribuição para a neutralização das EROs (Fernandez et al., 2016). Dessa forma, a predominância da resposta da SOD e do ácido ascórbico indica que a tolerância da soja ao excesso residual de Zn depende principalmente desses dois componentes do sistema antioxidante, enquanto a participação dos demais antioxidantes mostrou-se relativamente limitada para impedir a progressão do estresse oxidativo.

A resposta quadrática da eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) (Figura 5a) demonstra que a menor perda da eficiência fotoquímica foi estimada na dose de aproximadamente 50 kg ha^{-1} de Zn, evidenciando que, até esse nível de disponibilidade do micronutriente, a integridade funcional do fotossistema II foi preservada. Em doses superiores, observou-se redução progressiva do Fv/Fm, indicando comprometimento parcial do aparato fotoquímico em decorrência da toxicidade do Zn. Embora essa redução não tenha caracterizado danos irreversíveis ao fotossistema II, ela representa um indicativo precoce de fotoinibição, uma vez que o Fv/Fm é um dos parâmetros mais sensíveis para avaliar a eficiência fotoquímica e a integridade dos centros de reação do PSII. Reduções nessa variável estão frequentemente associadas à degradação da proteína D1, à desorganização dos tilacóides e à menor eficiência do transporte de elétrons fotossintéticos, processos intensificados pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (Moustakas et al., 2022, 2024; Sagardoy et al., 2009).

O estresse oxidativo induzido pelo excesso de Zn afetou diretamente as trocas gasosas das plantas (Figura 4e). A resposta quadrática da taxa fotossintética líquida demonstra que o maior desempenho fotossintético foi estimado na dose de aproximadamente 48 kg ha^{-1} de Zn, coincidindo com a faixa que proporcionou a maior eficiência fotoquímica do PSII e a máxima produtividade da cultura. Entretanto, doses superiores reduziram progressivamente a assimilação de CO_2, indicando que o excesso residual de Zn comprometeu a capacidade fotossintética das plantas. Essa redução provavelmente decorreu do comprometimento do aparato fotoquímico evidenciado pela diminuição do Fv/Fm e pelo aumento do estresse oxidativo, afetando a geração de ATP e NADPH e, consequentemente, a eficiência das reações bioquímicas responsáveis pela fixação de carbono (Krupa & Baszynski, 1995; Paunov et al., 2018).

Em contraste, a condutância estomática (gs) (Figura 5f), a concentração interna de CO_2 (Ci) (Figura 5g) e a taxa transpiratória (E) (Figura 5h) não foram influenciadas pelas doses de Zn, demonstrando que a redução da fotossíntese não esteve associada ao fechamento estomático. A manutenção dessas variáveis, combinada à diminuição da assimilação de CO_2, indica que a limitação fotossintética foi predominantemente não estomática, decorrente de alterações fotoquímicas e bioquímicas relacionadas ao funcionamento dos cloroplastos. Esse comportamento sugere comprometimento da atividade da Rubisco, da regeneração de ribulose-1,5-bifosfato e da eficiência do transporte de elétrons, processos altamente sensíveis ao estresse oxidativo induzido pelo excesso de Zn (Solymosi & Bertrand, 2012; Song et al., 2019). Assim, os resultados demonstram que a redução da produtividade da soja nas maiores doses de Zn decorreu principalmente da limitação metabólica da fotossíntese, e não de restrições difusivas impostas pelos estômatos.

Além da redução da assimilação de CO_2, o excesso residual de Zn promoveu alterações no metabolismo primário da soja, evidenciadas pela diminuição da concentração de sacarose (Figura 4e) e pelo aumento dos aminoácidos livres totais (Figura 4g), enquanto os teores de açúcares solúveis totais permaneceram inalterados (Figura 4f). A redução da sacarose está diretamente relacionada à menor assimilação de carbono observada nas maiores doses de Zn, uma vez que esse dissacarídeo representa a principal forma de transporte dos fotoassimilados entre os órgãos fonte e dreno da planta. Dessa forma, o comprometimento da atividade fotossintética provavelmente limitou sua síntese e disponibilidade, reduzindo o suprimento de

carbono e energia necessários para o crescimento vegetal e o enchimento dos grãos (Aluko et al., 2021; Taiz et al., 2017). Em contrapartida, a estabilidade dos açúcares solúveis totais sugere que o conteúdo global de carboidratos foi mantido, possivelmente em decorrência da conversão da sacarose em açúcares de menor peso molecular, como glicose e frutose. Essa resposta pode representar um mecanismo adaptativo para sustentar o equilíbrio osmótico e suprir a elevada demanda energética imposta pelos processos de manutenção celular durante o estresse oxidativo (Couée et al., 2006).

O aumento dos aminoácidos livres totais reforça que o excesso residual de Zn desencadeou uma reprogramação do metabolismo vegetal. Além de refletir maior degradação proteica induzida pelo estresse oxidativo, o acúmulo desses compostos fornece precursores para a síntese de antioxidantes, metabólitos secundários e osmólitos envolvidos na proteção celular (Hildebrandt, 2018; Kang et al., 2015). Esse comportamento demonstra que o metabolismo do nitrogênio foi parcialmente redirecionado para processos relacionados à manutenção da homeostase celular em detrimento do crescimento (Sharma & Dietz, 2006). Em conjunto, a redução da sacarose, a manutenção dos açúcares solúveis totais e o aumento dos aminoácidos livres evidenciam que a toxicidade residual de Zn promoveu uma reorganização coordenada do metabolismo do carbono e do nitrogênio, permitindo que a soja priorizasse mecanismos de sobrevivência e defesa antioxidante frente ao estresse imposto pelo excesso do micronutriente.

De forma geral, os resultados demonstram que a toxicidade residual de Zn em soja cultivada em Latossolo argiloso está associada predominantemente ao estresse oxidativo e às alterações fisiológicas, e não a desequilíbrios nutricionais. Embora a ativação dos sistemas antioxidantes tenha atenuado parcialmente os danos celulares, ela não foi suficiente para preservar completamente a eficiência fotoquímica e a assimilação de carbono nas maiores doses de Zn. Esses resultados reforçam o caráter dual do Zn no metabolismo vegetal, promovendo respostas fisiológicas máximas entre 45 e 50 kg ha^{-1}, mas tornando-se potencialmente tóxico quando sua disponibilidade ultrapassa o nível crítico de toxicidade.

4.3 Efeitos do Zn na produtividade e nos níveis críticos no solo e na folha

A produtividade da soja refletiu o equilíbrio entre os efeitos benéficos e tóxicos do Zn residual no solo. Em teores moderados no solo e na planta, o micronutriente favoreceu processos fisiológicos essenciais, como a manutenção da eficiência

fotoquímica do fotossistema II, da assimilação de carbono e do sistema antioxidante, resultando em maior desempenho produtivo. Entretanto, o aumento dos teores de Zn acima da capacidade de tolerância da cultura intensificou o estresse oxidativo, comprometendo a assimilação de carbono e, consequentemente, o rendimento de grãos (Hafeez et al., 2013). A máxima produtividade estimada (3.726 kg ha^{-1}) foi obtida com a aplicação de aproximadamente 45 kg ha^{-1} de Zn (Figura 6a), evidenciando que o efeito residual da adubação corretiva permaneceu suficiente para sustentar elevado desempenho produtivo mesmo após três ciclos consecutivos de cultivo. Considerando uma redução de 5% da produtividade máxima, foram estabelecidos como níveis críticos de toxicidade 13,09 mg dm^{-3} de Zn no solo (Figura 6b) e 70,0 mg kg^{-1} de Zn na folha (Figura 6c), valores que representam importantes referências para a interpretação da fertilidade do solo e da diagnose foliar em sistemas de produção de soja sob condições tropicais.

Embora os teores iniciais de Zn no solo já fossem classificados como altos (>1,2 mg dm^{-3}) para a cultura da soja segundo Boaretto et al. (2022), a cultura ainda apresentou resposta significativa à adubação corretiva com Zn. Esse resultado demonstra que a classificação baseada exclusivamente nos teores extraídos por métodos convencionais nem sempre representa a disponibilidade efetiva do micronutriente em Latossolos altamente intemperizados, onde a elevada capacidade tampão e a forte adsorção aos óxidos de Fe e Al reduzem a atividade do Zn na solução do solo. Assim, os resultados obtidos reforçam a necessidade de reavaliar e regionalizar as faixas críticas atualmente utilizadas para interpretação da disponibilidade de Zn em solos tropicais, incorporando características mineralógicas e a capacidade de retenção do micronutriente para tornar as recomendações de adubação mais precisas e eficientes.

Os níveis críticos estabelecidos neste estudo diferem substancialmente daqueles atualmente utilizados para interpretação da disponibilidade de Zn na cultura da soja, evidenciando a necessidade de atualização das recomendações para sistemas tropicais de produção. Fageria (2000), em experimento conduzido em vasos com Latossolo, estabeleceu níveis adequados de Zn no solo de 0,8 mg kg^{-1} (Mehlich-1) e 0,3 mg kg^{-1} (DTPA), enquanto os níveis críticos de toxicidade foram de 53 mg kg^{-1} (Mehlich-1) e 33 mg kg^{-1} (DTPA). Para a planta, os teores adequado e tóxico foram de 20 e 187 mg kg^{-1}, respectivamente. De forma semelhante, Borkert et al.,

(1998) estimaram nível crítico de toxicidade de 70 mg dm^{-3} de Zn extraível por Mehlich-3 em condições de casa de vegetação, enquanto Galrão (2004) e Inocêncio et al., (2012) referenciam aproximadamente 1,0 mg dm^{-3} de Zn no solo para cultivos em Latossolos.

Entretanto, a comparação direta desses valores com os obtidos neste estudo deve ser realizada com cautela, uma vez que diferenças no extrator utilizado, na classe de solo, na textura, na capacidade tampão, no estádio de desenvolvimento das plantas (folha diagnose ou planta inteira) e, principalmente, nas condições experimentais influenciam diretamente a disponibilidade e o comportamento do Zn no sistema solo-planta (Alloway, 2009). Nesse contexto, os níveis críticos determinados neste trabalho apresentam elevada relevância agronômica por terem sido obtidos em condições reais de campo, sob efeito residual da adubação corretiva e após sucessivos ciclos de cultivo, representando de forma mais fiel a dinâmica do Zn em sistemas de produção de soja em Latossolos tropicais.

Os resultados obtidos neste estudo reforçam que a interpretação da disponibilidade de Zn em sistemas agrícolas tropicais não pode basear-se exclusivamente nos teores extraídos por métodos químicos convencionais. Em condições de campo, a resposta da soja à adubação com Zn é fortemente influenciada pela textura do solo, pela mineralogia, pela capacidade tampão e pela forma de aplicação do fertilizante, fatores que modificam a atividade do Zn na solução do solo e sua disponibilidade para absorção pelas plantas. Dessa forma, culturas podem responder à adubação mesmo em solos classificados como adequados para Zn, enquanto, em outros ambientes, a ausência de resposta pode ocorrer mesmo sob baixos teores disponíveis (Inocêncio et al., 2012; Van Eynde et al., 2023). Esses resultados evidenciam que os níveis críticos atualmente utilizados devem ser interpretados com cautela, sobretudo para Latossolos altamente intemperizados.

Nesse contexto, este estudo estabeleceu, em condições de campo e sob efeito residual da adubação corretiva, níveis críticos de toxicidade de 13,09 mg dm^{-3} de Zn no solo e 70,0 mg kg^{-1} de Zn na folha, associados a uma dose de aproximadamente 73 kg ha^{-1} de Zn. Esses valores evidenciam a elevada capacidade de tolerância da soja ao excesso de Zn em Latossolos argilosos, resultado que pode ser atribuído à forte adsorção do micronutriente pelos coloides do solo, à liberação gradual do Zn ao longo dos ciclos de cultivo e à manutenção da homeostase nutricional da cultura, mesmo sob elevada disponibilidade residual do elemento. Em conjunto, esses

resultados fornecem referências inéditas para a diagnose de toxicidade de Zn em soja cultivada sob condições tropicais e representam importante avanço para o aprimoramento das recomendações de adubação corretiva, permitindo maior precisão no manejo desse micronutriente em sistemas de alta produtividade.

5. CONCLUSÃO

A adubação corretiva com Zn apresentou efeito residual suficiente para influenciar a nutrição mineral, a fisiologia e a produtividade da soja cultivada em Latossolo argiloso. O aumento da disponibilidade de Zn elevou seus teores no solo, na folha e nos grãos, sem comprometer a homeostase nutricional dos demais elementos, evidenciando que a toxicidade do Zn em condições de campo está associada predominantemente ao estresse oxidativo e às alterações fisiológicas, e não a desequilíbrios nutricionais. O excesso de Zn reduziu a eficiência fotoquímica, a assimilação de carbono e promoveu reprogramação metabólica da planta, resultando em menor produtividade nas maiores doses do micronutriente.

A máxima produtividade foi obtida com a dose de aproximadamente 44,6 kg ha^{-1} de Zn, correspondente a 8,72 mg dm^{-3} de Zn no solo e 51,21 mg kg^{-1} de Zn na folha. Considerando uma redução de 5% da produtividade, os níveis críticos de toxicidade foram estabelecidos em 13,09 mg dm^{-3} de Zn no solo e 70,00 mg kg^{-1} de Zn na folha. Esses valores são superiores aos atualmente utilizados como referência para a cultura da soja, demonstrando a necessidade de recalibração dos níveis críticos para Latossolos tropicais. Dessa forma, este estudo fornece subsídios para aprimorar a interpretação das análises de solo e foliar e contribuir para recomendações de adubação com Zn mais precisas, eficientes e seguras em sistemas de produção de soja sob condições tropicais.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645–736.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009. DOI: 10.1007/s10653-009-9255-4. https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4.

ALSCHER, R. G.; ERTURK, N.; HEATH, L. S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 53, n. 372, p. 1331–1341, 2002. DOI: 10.1093/jexbot/53.372.1331. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1331.

ALUKO, O. O.; LI, C.; WANG, Q.; LIU, H. Sucrose utilization for improved crop yields: a review article. **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 22, n. 9, art. 4704, 2021. DOI: 10.3390/ijms22094704. https://doi.org/10.3390/ijms22094704.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 187–203.

ANDREJIĆ, G.; GAJIĆ, G.; PRICA, M.; DŽELETOVIĆ, Ž.; RAKIĆ, T. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus* × *giganteus* plants. **Photosynthetica**, [S. l.], v. 56, n. 4, p. 1249–1258, 2018. DOI: 10.1007/s11099-018-0827-3. https://doi.org/10.1007/s11099-018-0827-3.

BARMAN, K. K.; GANESHAMURTHY, A. N.; TAKKAR, P. N. Zinc requirement of soybean (*Glycine max*) - wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in some swell-shrink soils. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 68, n. 12, p. 759–761, 1998.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. (Boletim técnico, 78).

BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; MELLIS, E. V.; CANTARELLA, H. Micronutrientes. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2022. p. 121–129.

BORKERT, C. M.; COX, F. R.; TUCKER, M. R. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice, and corn in soil mixtures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 29, n. 19–20, p. 2991–3005, 1998. DOI: 10.1080/00103629809370171. https://doi.org/10.1080/00103629809370171.

BOTOMAN, L.; NALIVATA, P. C.; CHIMUNGU, J. G.; BAILEY, E. H.; MUNTHALI, M. W.; ANDER, E. L.; MOSSA, A.-W.; LARK, R. M.; BROADLEY, M. R. Residual soil-applied zinc improves grain zinc nutritional quality of maize grown under contrasting soil types in Malawi. **Frontiers in Soil Science**, [S. l.], v. 5, 1656634, 2025. DOI: 10.3389/fsoil.2025.1656634. https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1656634.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [S. l.], v. 72, n. 1–2, p. 248–254, 1976. DOI: 10.1016/0003-2697(76)90527-3. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, [S. l.], v. 302, n. 1–2, p. 1–17, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9466-3. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3.

CAKMAK, I. Tansley Review No. 111: possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, [S. l.], v. 146, n. 2, p. 185–205, 2000. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x.

CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018. DOI: 10.1111/ejss.12437. https://doi.org/10.1111/ejss.12437.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. (Boletim técnico, 106).

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 43–71. (Boletim técnico, 100).

CHANEY, R. L. Zinc phytotoxicity. In: ROBSON, A. D. (ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 135–150. DOI: 10.1007/978-94-011-0878-2_10. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_10.

CHRYSARGYRIS, A.; HÖFTE, M.; TZORTZAKIS, N.; PETROPOULOS, S. A.; DI GIOIA, F. Editorial: Micronutrients: The Borderline Between Their Beneficial Role and Toxicity in Plants. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 840624, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.840624. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.840624.

COUÉE, I.; SULMON, C.; GOUESBET, G.; EL AMRANI, A. Involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 449–459, 2006. DOI: 10.1093/jxb/erj027. https://doi.org/10.1093/jxb/erj027.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p. (Sistemas de produção, 15). https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/904487.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 390–395, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000300014. https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300014.

FERNANDEZ, C.; MONNIER, Y.; SANTONJA, M.; GALLET, C.; WESTON, L. A.; PRÉVOSTO, B.; SAUNIER, A.; BALDY, V.; BOUSQUET-MÉLOU, A. The impact of competition and allelopathy on the trade-off between plant defense and growth in two contrasting tree species. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 7, art. 594, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.00594. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00594.

FONTES, R. L. F.; COX, F. R. Iron deficiency and zinc toxicity in soybean grown in nutrient solution with different levels of sulfur. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 21, n. 8, p. 1715–1722, 1998. DOI: 10.1080/01904169809365516. https://doi.org/10.1080/01904169809365516.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 283–289, 1996.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 185–226.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 59, n. 2, p. 315–318, 1977. DOI: 10.1104/pp.59.2.315. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.315.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.08.016. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016.

GOPAVAJHULA, V. R.; CHAITANYA, K. V.; KHAN, P. A. A.; SHAIK, J. P.; REDDY, P. N.; ALANAZI, M. Modeling and analysis of soybean (*Glycine max*. L) Cu/Zn, Mn and Fe superoxide dismutases. **Genetics and Molecular Biology**, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 225–236, 2013. DOI: 10.1590/s1415-47572013005000023. https://doi.org/10.1590/s1415-47572013005000023.

GRATÃO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; PIOTTO, F. A.; PERES, L. E.; AZEVEDO, R. A. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 56, p. 79–96, 2012. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.04.009. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009.

HACISALIHOGLU, G. Unraveling the Mechanisms of Zinc Efficiency in Crop Plants: From Lab to Field Applications. **Plants**, [S. l.], v. 11, n. 2, 177, 2022. DOI: 10.3390/plants11020177. https://doi.org/10.3390/plants11020177.

HAFEEZ, B.; KHANIF, Y. M.; SALEEM, M. Role of Zinc in Plant Nutrition- A Review. **American Journal of Experimental Agriculture**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 374–391, 2013. DOI: 10.9734/ajea/2013/2746. https://doi.org/10.9734/ajea/2013/2746.

HILDEBRANDT, T. M. Synthesis versus degradation: directions of amino acid metabolism during *Arabidopsis* abiotic stress response. **Plant Molecular Biology**, [S.

l.], v. 98, n. 1–2, p. 121–135, 2018. DOI: 10.1007/s11103-018-0767-0. https://doi.org/10.1007/s11103-018-0767-0.

INOCÊNCIO, M. F.; RESENDE, Á. V. de; FURTINI NETO, A. E.; VELOSO, M. P.; FERRAZ, F. M.; HICKMANN, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 47, n. 10, p. 1550–1554, 2012. DOI: 10.1590/s0100-204x2012001000020. https://doi.org/10.1590/s0100-204x2012001000020.

INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc**. Washington, DC: National Academies Press, 2001. DOI: 10.17226/10026. https://doi.org/10.17226/10026.

KAMPFENKEL, K.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D. Extraction and Determination of Ascorbate and Dehydroascorbate from Plant Tissue. **Analytical Biochemistry**, [S. l.], v. 225, n. 1, p. 165–167, 1995. DOI: 10.1006/abio.1995.1127. https://doi.org/10.1006/abio.1995.1127.

KANG, S.-M.; RADHAKRISHNAN, R.; YOU, Y.-H.; KHAN, A.-L.; LEE, K.-E.; LEE, J.-D.; LEE, I.-J. *Enterobacter asburiae* KE17 association regulates physiological changes and mitigates the toxic effects of heavy metals in soybean. **Plant Biology**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 1013–1022, 2015. DOI: 10.1111/plb.12341. https://doi.org/10.1111/plb.12341.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, [S. l.], v. 253, n. 6, 129, 2021. DOI: 10.1007/s00425-021-03642-z. https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z.

KÖPPEN, W. **Climatología**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

KRUPA, Z.; BASZYŃSKI, T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus: direct and indirect effects on light and dark reactions. **Acta Physiologiae Plantarum**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 177–190, 1995.

KUMAR, K.; DEBNATH, P.; SINGH, S.; KUMAR, N. An Overview of Plant Phenolics and Their Involvement in Abiotic Stress Tolerance. **Stresses**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 570–585, 2023. DOI: 10.3390/stresses3030040. https://doi.org/10.3390/stresses3030040.

LEITE, C. M. de C.; MURAOKA, T.; COLZATO, M.; ALLEONI, L. R. F. Soil-applied Zn effect on soil fractions. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 77, n. 2, e20180124, 2020. DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0124. https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0124.

LI, X.; YANG, Y.; JIA, L.; CHEN, H.; WEI, X. Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [S. l.], v. 89, p. 150–157, 2013. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.11.025. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.11.025.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, [S. l.], v. 148, p. 350–382, 1987. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, [S. l.], v.

43, n. 3, p. 379–393, 2005. DOI: 10.1007/s11099-005-0062-6. https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979. 449 p.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 421–428, 1978. DOI: 10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

LIU, R.; WANG, S.; SONG, J. New progress in the production, oxidative damage, and scavenging mechanisms of reactive oxygen species in plants under abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 17, 1774033, 2026. DOI: 10.3389/fpls.2026.1774033. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1774033.

LIU, Y.-M.; LIU, D.-Y.; ZHAO, Q.-Y.; ZHANG, W.; CHEN, X.-X.; XU, S.-J.; ZOU, C.-Q. Zinc fractions in soils and uptake in winter wheat as affected by repeated applications of zinc fertilizer. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 200, 104612, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.104612. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104612.

LONERAGAN, J. F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: ROBSON, A. D. (ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 119–134. DOI: 10.1007/978-94-011-0878-2_9. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_9.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. DOI: 10.1016/c2009-0-63043-9. https://doi.org/10.1016/c2009-0-63043-9.

MOUSTAKAS, M.; DOBRIKOVA, A.; SPERDOULI, I.; HANĆ, A.; ADAMAKIS, I.-D. S.; MOUSTAKA, J.; APOSTOLOVA, E. A Hormetic Spatiotemporal Photosystem II Response Mechanism of Salvia to Excess Zinc Exposure. **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 23, n. 19, 11232, 2022. DOI: 10.3390/ijms231911232. https://doi.org/10.3390/ijms231911232.

MOUSTAKAS, M.; DOBRIKOVA, A.; SPERDOULI, I.; HANĆ, A.; MOUSTAKA, J.; ADAMAKIS, I.-D. S.; APOSTOLOVA, E. Photosystem II Tolerance to Excess Zinc Exposure and High Light Stress in *Salvia sclarea* L. **Agronomy**, [S. l.], v. 14, n. 3, 589, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14030589. https://doi.org/10.3390/agronomy14030589.

NACHTEGAAL, M.; SPARKS, D. L. Effect of iron oxide coatings on zinc sorption mechanisms at the clay-mineral/water interface. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S. l.], v. 276, n. 1, p. 13–23, 2004. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.03.031. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.031.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 28, n. 6, p. 965–971, 2004. DOI: 10.1590/s0100-06832004000600004. https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000600004.

OLIVEIRA, M. F. G.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; VASCONCELLOS, C. A.; ALVES, V. M. C. Relação entre o zinco "disponível", por diferentes extratores, e as frações de zinco em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 827–836, 1999. DOI: 10.1590/s0100-06831999000400009. https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000400009.

PALMGREN, M. G.; CLEMENS, S.; WILLIAMS, L. E.; KRÄMER, U.; BORG, S.; SCHJØRRING, J. K.; SANDERS, D. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. **Trends in Plant Science**, [S. l.], v. 13, n. 9, p. 464–473, 2008. DOI: 10.1016/j.tplants.2008.06.005. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.005.

PANDEY, S.; FARTYAL, D.; AGARWAL, A.; SHUKLA, T.; JAMES, D.; KAUL, T.; NEGI, Y. K.; ARORA, S.; REDDY, M. K. Abiotic Stress Tolerance in Plants: Myriad Roles of Ascorbate Peroxidase. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 8, 581, 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.00581. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00581.

PAUNOV, M.; KOLEVA, L.; VASSILEV, A.; VANGRONSVELD, J.; GOLTSEV, V. Effects of Different Metals on Photosynthesis: Cadmium and Zinc Affect Chlorophyll Fluorescence in Durum Wheat. **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 19, n. 3, 787, 2018. DOI: 10.3390/ijms19030787. https://doi.org/10.3390/ijms19030787.

PAWLOWSKI, M. L.; HELFENSTEIN, J.; FROSSARD, E.; HARTMAN, G. L. Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 42, n. 6, p. 634–649, 2019. DOI: 10.1080/01904167.2019.1567782. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567782.

PRADO, R. de M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-71262-4. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4.

QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ROSOLEM, C. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Soja (*Glycine max*). In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (ed.). **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2022. p. 263–281.

RAIJ, B. van. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p. 5–39.

REHMAN, R.; LATIF, M. M.; KHAN, M. A.; AHMED, Z. Agronomic Biofortification of Crops with Zinc: A Comprehensive Overview. In: GOVINDARAJ, M.; GOVINDAN, V.; PALACIOS, N. (ed.). **Breeding Zinc Crops for Better Human Health**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 153–184. DOI: 10.1007/978-3-031-84342-6_8. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84342-6_8.

RITCHEY, K. D.; COX, F. R.; GALRÃO, E. Z.; YOST, R. S. Zinc availability for corn, sorghum and soybean in a clayey dark-red latosol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 3, p. 215–225, 1986. https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14705.

SAGARDOY, R.; MORALES, F.; LÓPEZ-MILLÁN, A.-F.; ABADÍA, A.; ABADÍA, J. Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. **Plant Biology**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 339–350, 2009. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x. https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. V. da S.; PRADO, R. de M.; ROCHA, A. M. S.; CAMPOS, C. N. da; COTRIM, M. F. **Unraveling zinc toxicity thresholds in soil and leaves of field-grown soybean and their impacts on the antioxidant defense system, nutritional status, and physiological performance**. [S. l.]: Research Square, 2026. Preprint, versão 1. DOI: 10.21203/rs.3.rs-9963385/v1. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9963385/v1.

SHARMA, S. S.; DIETZ, K. J. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 57, n. 4, p. 711–726, 2006. DOI: 10.1093/jxb/erj073. https://doi.org/10.1093/jxb/erj073.

SIATWIINDA, S. M.; ROS, G. H.; YEROKUN, O. A.; DE VRIES, W. Options to reduce ranges in critical soil nutrient levels used in fertilizer recommendations by accounting for site conditions and methodology: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [S. l.], v. 44, n. 1, 9, 2024. DOI: 10.1007/s13593-023-00943-3. https://doi.org/10.1007/s13593-023-00943-3.

SILVA, A. B. P.; BORGES, L. F. S.; LUCINI, F.; SILVA, G. N.; SANTOS, E. F. Technologies in Agronomic Biofortification with Zinc in Brazil: A Review. **Plants**, [S. l.], v. 14, n. 12, 1828, 2025. DOI: 10.3390/plants14121828. https://doi.org/10.3390/plants14121828.

SILVEIRA, M. L.; ALLEONI, L. R. F.; O'CONNOR, G. A.; CHANG, A. C. Heavy metal sequential extraction methods—A modification for tropical soils. **Chemosphere**, [S. l.], v. 64, n. 11, p. 1929–1938, 2006. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.01.018. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.018.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965. DOI: 10.5344/ajev.1965.16.3.144. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144.

SOLYMOSI, K.; BERTRAND, M. Soil metals, chloroplasts, and secure crop production: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 245–272, 2012. DOI: 10.1007/s13593-011-0019-z. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0019-z.

SONG, X.; YUE, X.; CHEN, W.; JIANG, H.; HAN, Y.; LI, X. Detection of Cadmium Risk to the Photosynthetic Performance of Hybrid Pennisetum. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 10, 798, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00798. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00798.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development**. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2017.

VAN EYNDE, E.; BREURE, M. S.; CHIKOWO, R.; NJOROGE, S.; COMANS, R. N. J.; HOFFLAND, E. Soil zinc fertilisation does not increase maize yields in 17 out of 19 sites in Sub-Saharan Africa but improves nutritional maize quality in most sites. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 490, n. 1–2, p. 67–91, 2023. DOI: 10.1007/s11104-023-06050-2. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06050-2.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M.; PATEL, P. M. Zinc induced iron deficiency in soybeans. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 37–41, 1976. DOI: 10.1080/00103627609366609. https://doi.org/10.1080/00103627609366609.

YUSEFI-TANHA, E.; FALLAH, S.; ROSTAMNEJADI, A.; POKHREL, L. R. Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: Influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 738, 140240, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140240. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140240.

ZAGOSKINA, N. V.; ZUBOVA, M. Y.; NECHAEVA, T. L.; KAZANTSEVA, V. V.; GONCHARUK, E. A.; KATANSKAYA, V. M.; BARANOVA, E. N.; AKSENOVA, M. A. Polyphenols in Plants: Structure, Biosynthesis, Abiotic Stress Regulation, and Practical Applications (Review). **International Journal of Molecular Sciences**, [S. l.], v. 24, n. 18, 13874, 2023. DOI: 10.3390/ijms241813874. https://doi.org/10.3390/ijms241813874.