BIANCA CAVALCANTE DA SILVA

ESTABELECIMENTO DA ADUBAÇÃO DE CORREÇÃO PARA ZINCO NA CULTURA DA SOJA: EFEITOS FISIOLÓGICOS E NÍVEIS CRÍTICOS NO SOLO E NA FOLHA

Relatório de Pós-doutorado realizado na Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Câmpus Jaboticabal, no Departamento de Ciência do Solo.

Supervisor: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

PROGRAMA DE PÓS-DOUTORADO DA UNESP

Jaboticabal-SP

2026

RESUMO

O zinco (Zn) é micronutriente cuja deficiência é frequente em Latossolos tropicais, afetando o metabolismo e a produtividade da soja. Objetivou-se estabelecer níveis críticos de suficiência e toxicidade de Zn no solo e na folha para a soja TMG 7063 IPRO, avaliando efeitos fisiológicos e bioquímicos. O experimento foi conduzido na FCAV/UNESP, Jaboticabal-SP, em Latossolo Vermelho Eutroférrico com teor inicial alto de Zn (2,7 mg dm^{-3} DTPA). Utilizou-se delineamento em blocos casualizados, com cinco doses residuais de Zn (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}) aplicadas em dezembro de 2023 como sulfato de zinco monoidratado (33% Zn), e quatro repetições. Após cultivo de milho, a soja foi cultivada na safra 2024/2025 (17/11/2024 a 08/03/2025, 663 mm de chuva). Avaliaram-se acúmulo de nutrientes, concentração foliar e nos grãos, trocas gasosas (A, Gs, Ci, E), eficiência do fotossistema II (Fv/Fm), pigmentos, índices de flavonoides/antocianinas, MDA, SOD, ácido ascórbico, fenóis, sacarose, açúcares e aminoácidos, além da produtividade para determinação dos níveis críticos. A produtividade apresentou resposta quadrática, com máxima de 3.666 kg ha^{-1} na dose de 46,3 kg ha^{-1} de Zn. Os níveis críticos no solo foram 8,24 mg dm^{-3} (ótimo) e 12,69 mg dm^{-3} (toxicidade - 95% da produção máxima). Na planta, 52,8 mg kg^{-1} (ótimo) e 76,4 mg kg^{-1} (toxicidade). O acúmulo de Zn na parte aérea foi quadrático, com estabilização a partir de 48 kg ha^{-1}, enquanto o Fe reduziu linearmente. Zn foliar e nos grãos aumentou linearmente (18 para 92 mg kg^{-1} na folha e 31 para 44 mg kg^{-1} nos grãos), aumento de aproximadamente 40% no teor de Zn dos grãos. MDA, SOD e ácido ascórbico aumentaram linearmente, indicando estresse oxidativo moderado nas maiores doses, com ativação do sistema antioxidante. Fenóis totais apresentaram máximo em 44,5 kg ha^{-1} e sacarose reduziu com as doses. A fotossíntese líquida apresentou máximo em 31,4 kg ha^{-1} (47,2 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), com redução nas maiores doses por limitação não estomática, com leve queda de Fv/Fm (0,81 para 0,79). Propõe-se como faixa adequada para manejo os teores de Zn no solo entre 3,80 e 8,24 mg dm^{-3} e na folha diagnóstica entre 29,2 e 52,8 mg kg^{-1} em R2, associada à dose residual de 13,9 a 46,3 kg ha^{-1} de Zn.

Palavras chave: Glycine max; micronutriente; zinco; nutrição mineral; estresse oxidativo; produtividade.

1. INTRODUÇÃO

O zinco é um micronutriente essencial que atua como cofator enzimático, participa da estabilidade estrutural de proteínas e membranas, da expressão gênica e do funcionamento do aparato fotossintético (Marschner, 2012; Jalal et al., 2024). No solo, sua disponibilidade é modulada por pH, textura, teor de matéria orgânica, mineralogia e por interações antagônicas com outros elementos, o que faz com que a resposta das culturas à fertilização seja altamente dependente do ambiente (Alloway, 2009; Stanton et al., 2022).

Revisões recentes indicam que a limitação de Zn pode reduzir em mais de 40% o potencial produtivo das culturas (Noulas et al., 2018). Além da perda de rendimento, o cultivo sob suprimento inadequado compromete a qualidade nutricional dos grãos para alimentação humana e animal (Cakmak & Kutman, 2018; Soares et al., 2019). Por isso, além da biofortificação agronômica, tem crescido o interesse na seleção de genótipos com maior eficiência no uso de Zn, ou seja, capazes de manter crescimento satisfatório mesmo em condição de deficiência (Jalal et al., 2024; Joshi-Saha et al., 2022).

A soja *[Glycine max (L.) Merrill]* ocupa cerca de 6% das terras aráveis do mundo e foi a cultura com maior expansão percentual de área nos últimos 50 anos (Hartman et al., 2011). Seu uso vai desde proteína e óleo vegetal até matéria-prima para a indústria. Entretanto, estresses bióticos e abióticos ainda limitam sua produtividade, o que impulsiona programas de melhoramento para tolerância (Rahman et al., 2023). Em solos tropicais, especialmente Latossolos, a dinâmica do Zn é crítica, pois processos de adsorção específica em óxidos de Fe e Al reduzem sua disponibilidade (Barrow, 1993), enquanto aplicações excessivas podem induzir desbalanço nutricional e reduzir o acúmulo de Fe (Oliveira et al., 2023).

A soja apresenta sensibilidade intermediária à deficiência de Zn, sendo mais exigente que trigo e ervilha, porém menos que milho e arroz (Noulas et al., 2018; Thapa et al., 2021). Estudos de campo demonstram que a fertilização zincada, via solo ou foliar, incrementa o rendimento de grãos (Thapa et al., 2021), mas a magnitude da resposta depende da condição inicial do solo e da estratégia de aplicação (Inocêncio et al., 2012; Martínez Cuesta et al., 2023). Em nível fisiológico, a deficiência severa manifesta-se por redução de biomassa, clorose internerval, epinastia e bronzeamento, associada à inibição da renovação da proteína D1 do PSII (Bailey et

al., 2002), redução da condutância estomática (Mattiello et al., 2015) e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (Cakmak, 2000; Chen et al., 2008; Hänsch & Mendel, 2009). Liao et al. (2022) ainda demonstram que a resposta molecular em leguminosas difere de Arabidopsis, sobretudo na regulação de fatores de transcrição bZIP.

Apesar do Boletim 100 estabelecer que teores acima de 1,2 mg dm^{-3} (DTPA) dispensam adubação para soja em São Paulo (Boaretto et al., 2022), a literatura reporta ampla variação entre faixas adequadas e tóxicas (Wallace et al., 1976; Kaur & Garg, 2021), indicando que esses limites podem estar defasados para cultivares modernas de alto potencial produtivo. A adubação corretiva incorporada ao solo é estratégica por apresentar efeito residual e atender cultivos subsequentes, mas requer a definição simultânea de doses de suficiência e toxicidade por meio de curvas de resposta (Prado, 2021).

Nesse contexto, o presente estudo foi desenvolvido para avaliar, em condição de efeito residual após cultivo de milho, a resposta da soja cultivar TMG 7063 IPRO à adubação corretiva de Zn, com ênfase na persistência do nutriente no solo, absorção e partição entre órgãos, respostas fisiológicas e bioquímicas (Fv/Fm, trocas gasosas, SOD, MDA, AsA) e estabelecimento dos níveis críticos de suficiência e toxicidade no solo e na folha para produtividade e biofortificação de grãos.

2. OBJETIVO

Objetivou-se estabelecer a adubação corretiva de Zn para a soja, quantificando seus efeitos residuais sobre a produtividade, o estado nutricional e as respostas fisiológicas e antioxidantes, bem como definir os níveis críticos de suficiência e toxicidade no solo e na folha.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e condições experimentais

O experimento foi desenvolvido a campo, em área experimental pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Campus de Jaboticabal, SP (21°15'03"S, 48°17'08"W, 546 m de altitude). A incorporação do zinco ao solo ocorreu em 18 de dezembro de 2023. O milho foi implantado como primeira cultura após a correção com o micronutriente, para avaliação do efeito imediato. Posteriormente, na mesma área, foi cultivada a soja, cultivar TMG 7063 IPRO, na safra 2024/2025, no período de 17 de novembro de 2024 a 08 de março de 2025.

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é do tipo Aw, caracterizado como tropical com estação seca no inverno. Os dados meteorológicos foram obtidos em estação automática instalada na área experimental, com registro do balanço hídrico durante a condução da cultura. A precipitação acumulada no ciclo da soja totalizou 663 mm (Figura 1), volume compatível com a exigência hídrica da cultura, estimada entre 400 e 700 mm (Embrapa, 2007).

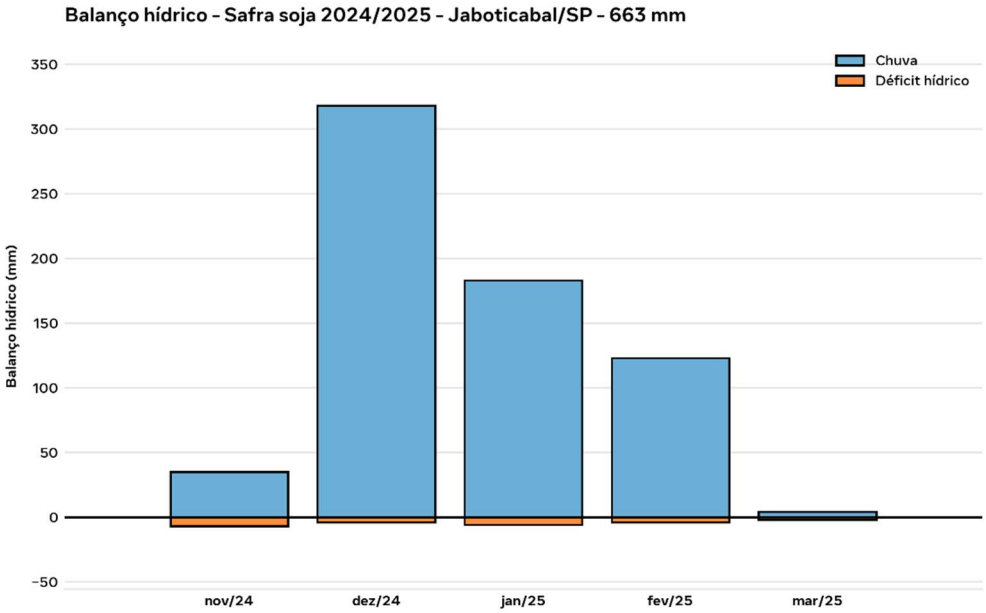


Figura 1. Balanço hídrico durante o período experimental.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso, com cinco níveis de Zn aplicados ao solo (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}) e quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. As doses foram estabelecidas tomando-se como base o Boletim 100, o qual preconiza 6 kg ha^{-1} de Zn para solos com teor abaixo de 0,6 mg dm^{-3} (DTPA). Considerando que a área apresentava inicialmente teores de Zn na faixa considerada alta (>1,2 mg dm^{-3}), adotou-se como dose inicial o dobro da recomendação oficial (12 kg ha^{-1}). As demais doses foram definidas a partir de progressão geométrica com razão 2, de modo a ampliar a amplitude de disponibilidade do nutriente e possibilitar a construção de curvas de resposta à suficiência e à toxicidade.

3.3 Caracterização do solo

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Eutroférrico (Santos et al., 2018), equivalente a Oxisol pelo Soil Taxonomy (USDA). Amostras para avaliação da fertilidade e granulometria foram obtidas nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, seguindo os procedimentos analíticos descritos por Raij et al. (2001) para análises químicas e por Camargo et al. (1986) para análise física. De acordo com Raij et al. (1997) e Boaretto et al. (2022), os teores originais de Zn, extraídos por DTPA, já se enquadravam como altos (Tabela 1).

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

Camada (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Zn (mg/dm3)	Argila	Silte	Areia (%)
0-20	0,42	0,60	13	28,2	2,7	54	21	24
20-40	0,52	0,30	7	30,1	1,2	57	20	23

Camada	pH CaCl2	M.O. g/dm3	P mg/dm3	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V %	m %
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.

Na análise de fertilidade, os valores de pH foram 6,1 e 6,0 em $CaCl_2$, com matéria orgânica de 22 e 16 g dm^{-3}, respectivamente, para as camadas de 0–20 e 20–40 cm. Esses dados caracterizam uma condição de solo com acidez corrigida e elevado teor inicial de Zn disponível, importante para interpretar a resposta residual observada na soja.

3.4 Histórico da área, aplicação dos tratamentos e manejo cultural

A incorporação das doses de Zn ocorreu em 18 de dezembro de 2023, utilizando-se sulfato de zinco monoidratado (33% de Zn e 18% de S) como fonte. O fertilizante foi distribuído manualmente a lanço e incorporado na camada de 0-20 cm por meio de gradagem pesada, complementada por gradagem niveladora. Para evitar desbalanceamento de enxofre entre tratamentos, efetuou-se compensação com enxofre elementar. Após a aplicação, cultivou-se milho como primeira cultura, visando avaliar o efeito imediato do micronutriente. Posteriormente, na mesma área, implantou-se a soja, cultivar TMG 7063 IPRO, na safra 2024/2025. Na semeadura da soja, aplicaram-se 350 kg ha^{-1} do formulado NPK 08-28-16. Em cobertura, no estádio

V4, foram fornecidos 80 kg ha^{-1} de cloreto de potássio e 290 kg ha^{-1} de ureia, de modo que apenas a dose de Zn constituísse fonte de variação. Os demais tratos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura na região.

3.5 Determinação do Zn disponível no solo

Após a colheita da soja, realizou-se amostragem de solo na camada de 0-20 cm. Em cada parcela, coletaram-se 15 subamostras ao acaso na área útil, compondo uma amostra composta por unidade experimental. O material foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA). O Zn disponível foi extraído com solução de DTPA 0,005 mol L^{-1} + $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1} + trietanolamina 0,1 mol L^{-1}, com pH ajustado para 7,3, conforme método proposto por Lindsay e Norvell (1978), na relação solo:extrator 1:2, sob agitação por 2 horas. Após filtragem, as concentrações foram quantificadas por espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS), com resultados expressos em mg dm^{-3}.

3.6 Diagnose nutricional, acúmulo de nutrientes e produtividade

No florescimento pleno (estádio R2), coletaram-se, por parcela, 15 folhas trifolioladas completamente expandidas, posicionadas como terceira folha a partir do ápice da haste principal, seguindo a indicação de Malavolta et al. (1997) para diagnose foliar da soja. Na mesma ocasião, amostraram-se 15 plantas inteiras por parcela para quantificação da massa seca da parte aérea e acúmulo de nutrientes. Por ocasião da colheita, foram obtidos grãos para avaliação dos teores e exportação.

Todo material vegetal foi lavado sequencialmente com água deionizada contendo detergente neutro a 0,1%, solução de HCl a 0,3% e enxágue final com água deionizada. Em seguida, o material foi seco em estufa de circulação forçada a 65 ± 5 °C até massa constante, moído e submetido às análises químicas. Segundo Bataglia et al. (1983), N foi determinado por Kjeldahl após digestão sulfúrica, e P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn após digestão nitro-perclórica, sendo P por colorimetria, K por fotometria de chama e os demais por absorção atômica. O acúmulo de nutrientes na parte aérea foi estimado multiplicando-se a produção de massa seca (kg ha^{-1}) pelo teor do elemento (g kg^{-1}), dividido por 1000. A produtividade foi determinada colhendo-se as três linhas centrais da área útil de cada parcela, com correção da umidade dos grãos para 14% e conversão para kg ha^{-1}.

3.7 Avaliações fisiológicas e bioquímicas

As avaliações fisiológicas foram realizadas no estádio R2, entre 51 e 60 dias após a semeadura:

a) Trocas gasosas: taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (Gs), concentração interna de CO_2 (Ci) e transpiração (E) foram mensuradas na folha diagnóstica com analisador de gases no infravermelho (IRGA LcPro-SD, ADC BioScientific Ltd., UK), entre 9h e 11h, sob radiação fotossinteticamente ativa de 1500 μmol m^{-2} s^{-1}, concentração de CO_2 de 400 ppm e temperatura da câmara de 30 °C.

b) Eficiência fotoquímica do fotossistema II: a razão Fv/Fm foi obtida entre 7h e 9h com fluorômetro portátil (OS30P+, Opti-Sciences Inc., EUA), conforme Lichtenthaler et al. (2005).

c) Pigmentos fotossintéticos: discos foliares foram submetidos à extração com acetona 80% e leituras espectrofotométricas para carotenoides e feofitinas, conforme Lichtenthaler (1987).

d) Índices de flavonoides e antocianinas: determinados no terço médio da terceira folha madura, aos 51 dias após a semeadura, com medidor multipigmentos MPM-100 (OPTI-SCIENCES, EUA).

e) Fenóis totais: quantificados a partir de discos foliares frescos coletados aos 51 DAS, por reação com reagente de Folin-Ciocalteu e Na_2CO_3 20%, segundo Singleton e Rossi (1965), com leitura a 765 nm em espectrofotômetro DU640 (Beckman, EUA).

f) Peroxidação lipídica (MDA): aos 60 DAS, 0,4 g de tecido fresco foi congelado em N_2 líquido (-80 °C), macerado com PVPP 20% (m/v) e TCA 0,1%, centrifugado a 15.000 rpm a 4 °C por 30 min. Ao sobrenadante adicionou-se TBA 0,5% em TCA 20%, incubação a 95 °C por 30 min, resfriamento em gelo e nova centrifugação. As absorbâncias a 535 e 600 nm foram utilizadas para cálculo do MDA, empregando coeficiente de extinção ε = 1,55 x 10^5 M^{-1} cm^{-1}, conforme Gratão et al. (2012).

g) Superóxido dismutase (SOD): a extração enzimática seguiu Bradford (1976). Os tecidos foram homogeneizados em tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5), EDTA 1 mM, DTT 3 mM e PVPP insolúvel 5% (m/v), na proporção 3:1 (folha). O

homogeneizado foi centrifugado a 10.000 x g por 30 min e o sobrenadante armazenado a -80 °C. A concentração proteica foi determinada por Bradford (1976) com albumina sérica bovina como padrão. A atividade da SOD (EC 1.15.1.1) foi mensurada pelo método de Giannopolitis e Ries (1977), com mistura contendo tampão fosfato de sódio 50 mM (pH 7,8), metionina 50 mM, EDTA 10 mM, NBT 1 mM e riboflavina 0,1 mM, sob iluminação fluorescente a 25 °C por 5 min e leitura a 560 nm. Resultados expressos em U mg^{-1} proteína.

h) Ácido ascórbico (AsA): folhas do terço superior foram coletadas em R2, congeladas em N_2 líquido e mantidas a -80 °C. O teor foi determinado após extração em ácido oxálico 0,5% e titulação com 2,6-diclorofenol-indofenol 0,02%, segundo Kampfenkel et al. (1995).

3.8 Determinação de níveis críticos de suficiência e toxicidade

Os níveis críticos de Zn no solo e na folha, bem como as doses correspondentes, foram obtidos a partir do ajuste de modelos quadráticos entre produtividade e, respectivamente, doses aplicadas, teor de Zn no solo (DTPA) e teor foliar, conforme procedimento descrito por Prado (2021). Considerou-se como nível crítico de suficiência o valor associado à máxima produtividade relativa (100%). Como nível crítico de toxicidade, adotou-se o valor relacionado à redução de 5% da produtividade máxima (95% da produção relativa), após o ponto de máximo.

3.9 Análise estatística

Inicialmente, verificou-se o atendimento aos pressupostos da análise de variância, avaliando-se a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e a homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene ($p > 0,05$). Atendidas as pressuposições, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando constatado efeito significativo das doses de Zn ($p < 0,05$), procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão polinomial, escolhendo-se o modelo significativo com maior coeficiente de determinação.

4. RESULTADOS

4.1 Acúmulo de nutrientes na parte aérea

As doses residuais de Zn promoveram efeito significativo apenas para o acúmulo de Zn e Fe na parte aérea da soja (Figura 2).

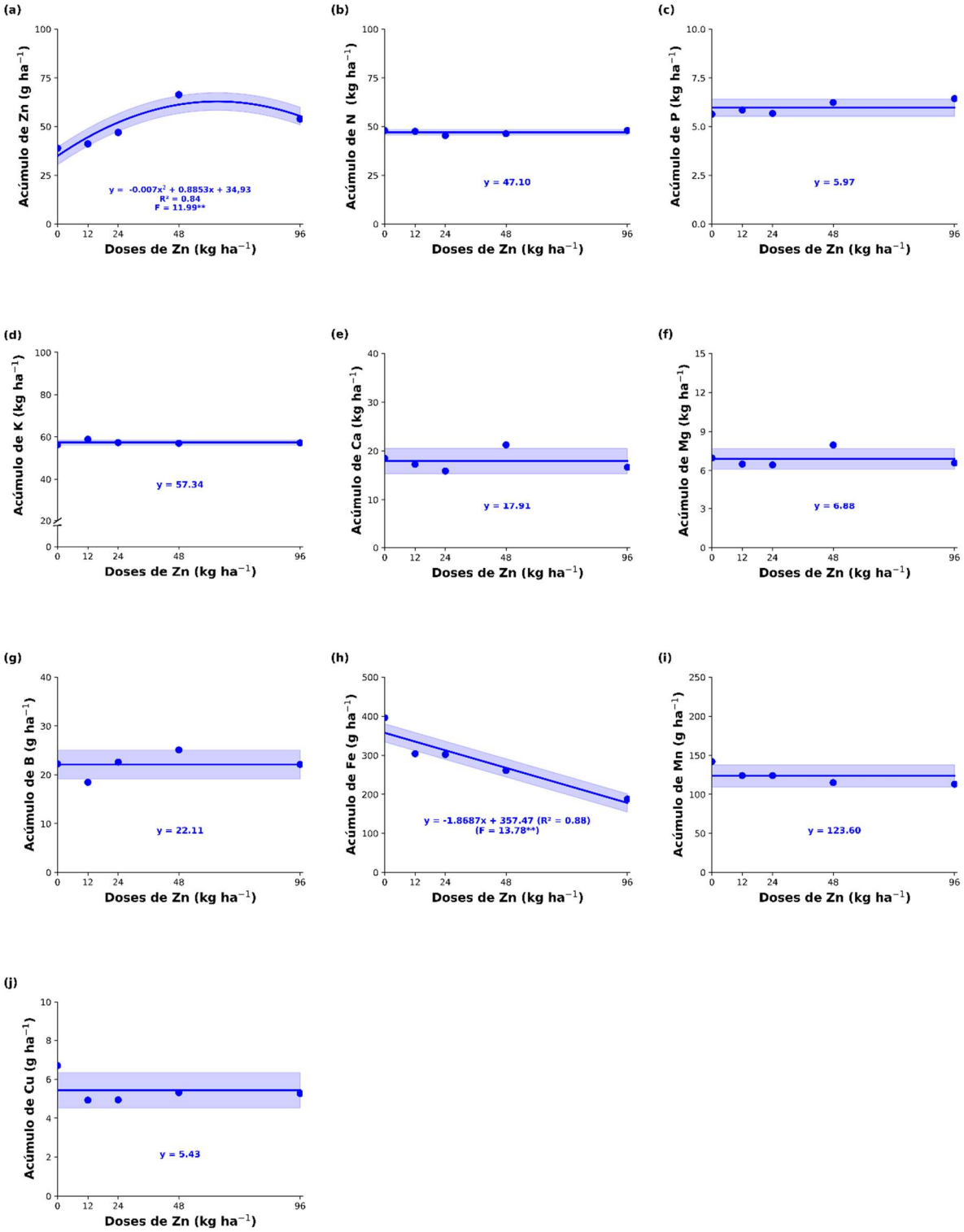


Figura 2. Acúmulo de nutrientes na cultura da soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j) em resposta às doses de Zn aplicadas a lanço e incorporadas ao solo. ** e * significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste *F.*

O acúmulo de Zn apresentou ajuste quadrático, com incremento de 38,9 kg ha⁻¹ (testemunha) para 67,5 kg ha⁻¹ na dose de 48 kg ha⁻¹, estabilizando-se nas

maiores doses, evidenciando efeito de saturação na absorção. Para os demais macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes B, Mn e Cu, os valores permaneceram constantes, com médias de 47,20; 3,97; 57,34; 41,84; 6,49 kg ha^{-1} e 23,11; 123,00; 9,43 g ha^{-1}, respectivamente (Figura 2b-g, i, j). O acúmulo de Fe decresceu linearmente com o aumento das doses de Zn, reduzindo de aproximadamente 360 para 175 g ha^{-1} entre 0 e 96 kg ha^{-1} de Zn, indicando interação antagônica Zn-Fe na partição de biomassa (Figura 2h).

4.2 Concentração de nutrientes na folha diagnóstica (R2)

Na folha diagnóstica, apenas a concentração de Zn foi influenciada pelas doses aplicadas (Figura 3).

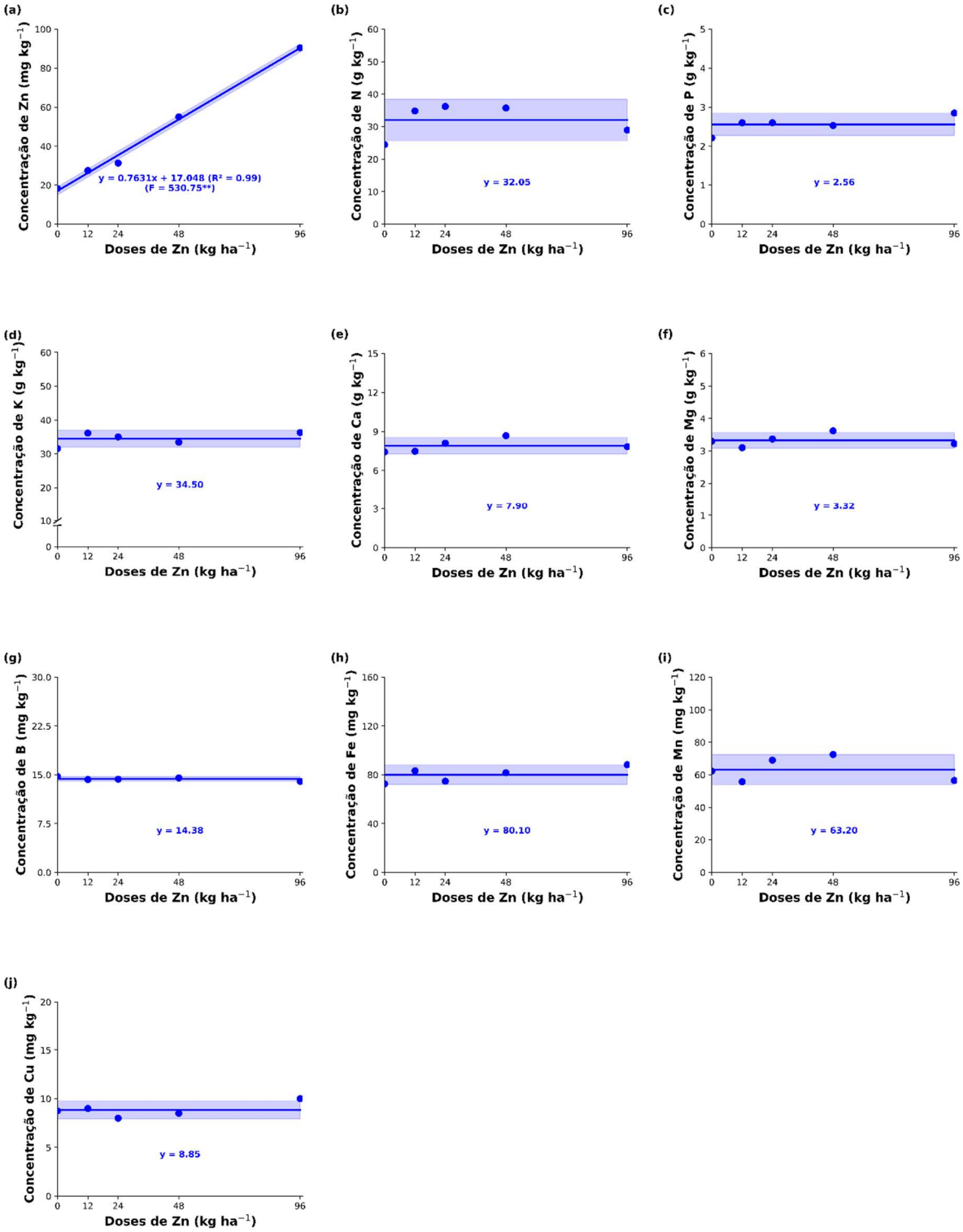


Figura 3. Concentração de nutrientes na folha diagnóstica da cultura da soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), B (g), Fe (h), Mn (i) e Cu (j), em resposta às doses de Zn. ** e * significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste *F*.**

Verificou-se aumento linear, com teores variando de 18,2 mg kg^{-1} (0 kg ha^{-1}) a 92,4 mg kg^{-1} (96 kg ha^{-1}), demonstrando alta sensibilidade da folha diagnóstica como

indicador do status de Zn. As concentrações de N (32,69 g kg^{-1}), P (2,06 g kg^{-1}), K (34,90 g kg^{-1}), Ca (7,99 g kg^{-1}), Mg (4,44 g kg^{-1}), B (14,28 mg kg^{-1}), Fe (80,10 mg kg^{-1}), Mn (83,20 mg kg^{-1}) e Cu (9,85 mg kg^{-1}) não apresentaram ajuste de regressão, permanecendo dentro da faixa de suficiência descrita para a cultura.

4.3 Concentração de nutrientes nos grãos – biofortificação

Nos grãos, o mesmo padrão foi observado (Figura 4).

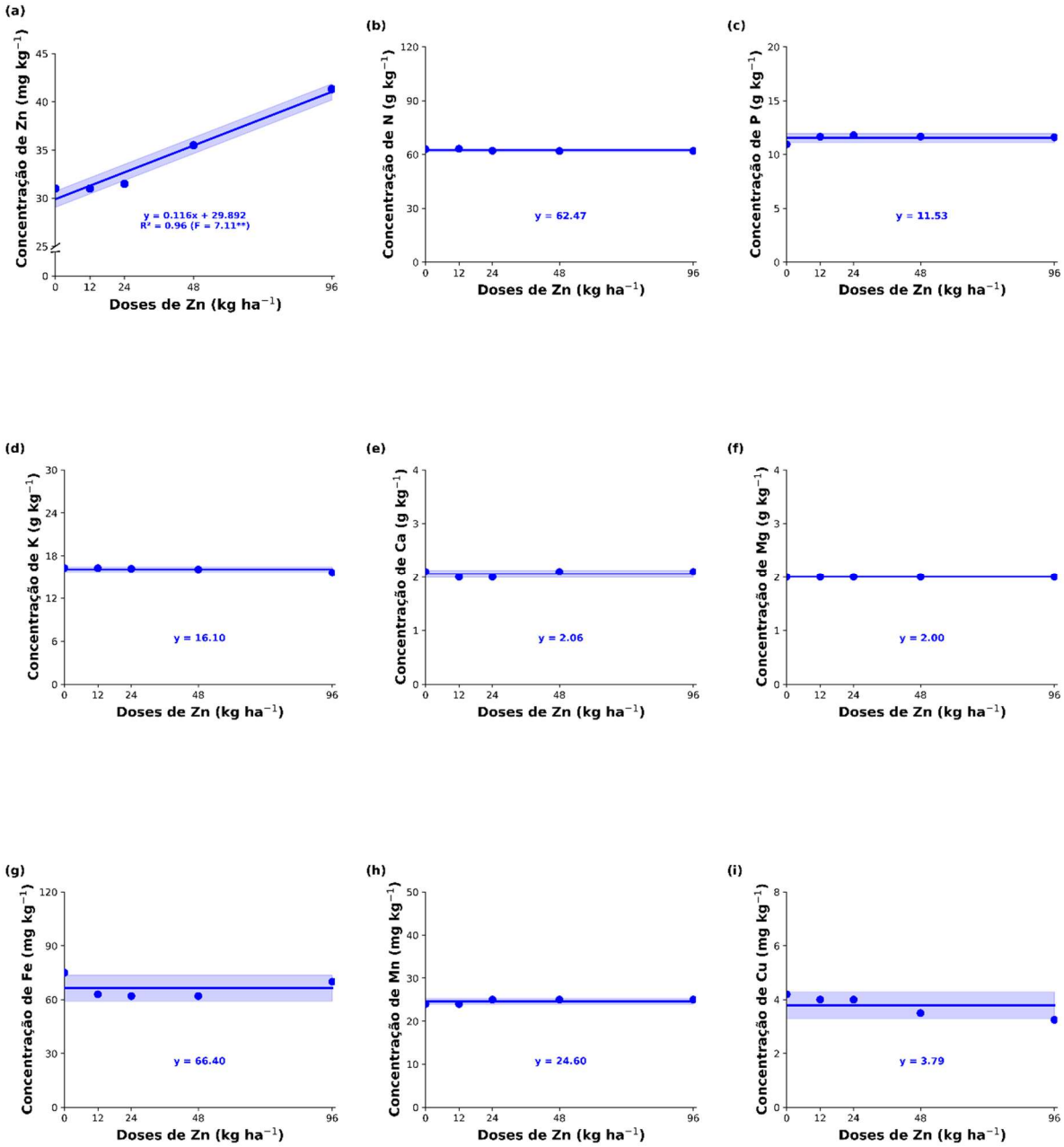


Figura 4. Concentração de nutrientes nos grãos de soja: Zn (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), Fe (g), Mn (h) e Cu (i), em resposta às doses de Zn (0, 12, 24, 48 e 96 kg ha^{-1}). ** e * significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste *F*.**

A concentração de Zn aumentou linearmente, passando de 31,2 mg kg^{-1} na testemunha para 43,8 mg kg^{-1} na dose de 96 kg ha^{-1}, o que representa incremento de 40,4% e caracteriza biofortificação agronômica. Os demais nutrientes permaneceram inalterados: N (62,47 g kg^{-1}), P (11,55 g kg^{-1}), K (16,10 g kg^{-1}), Ca (2,06 g kg^{-1}), Mg (2,00 g kg^{-1}), Fe (66,40 mg kg^{-1}), Mn (24,60 mg kg^{-1}) e Cu (3,79 mg kg^{-1}).

4.4 Indicadores bioquímicos de estresse oxidativo e metabolismo

As doses de Zn afetaram significativamente os indicadores de estresse oxidativo (Figura 5).

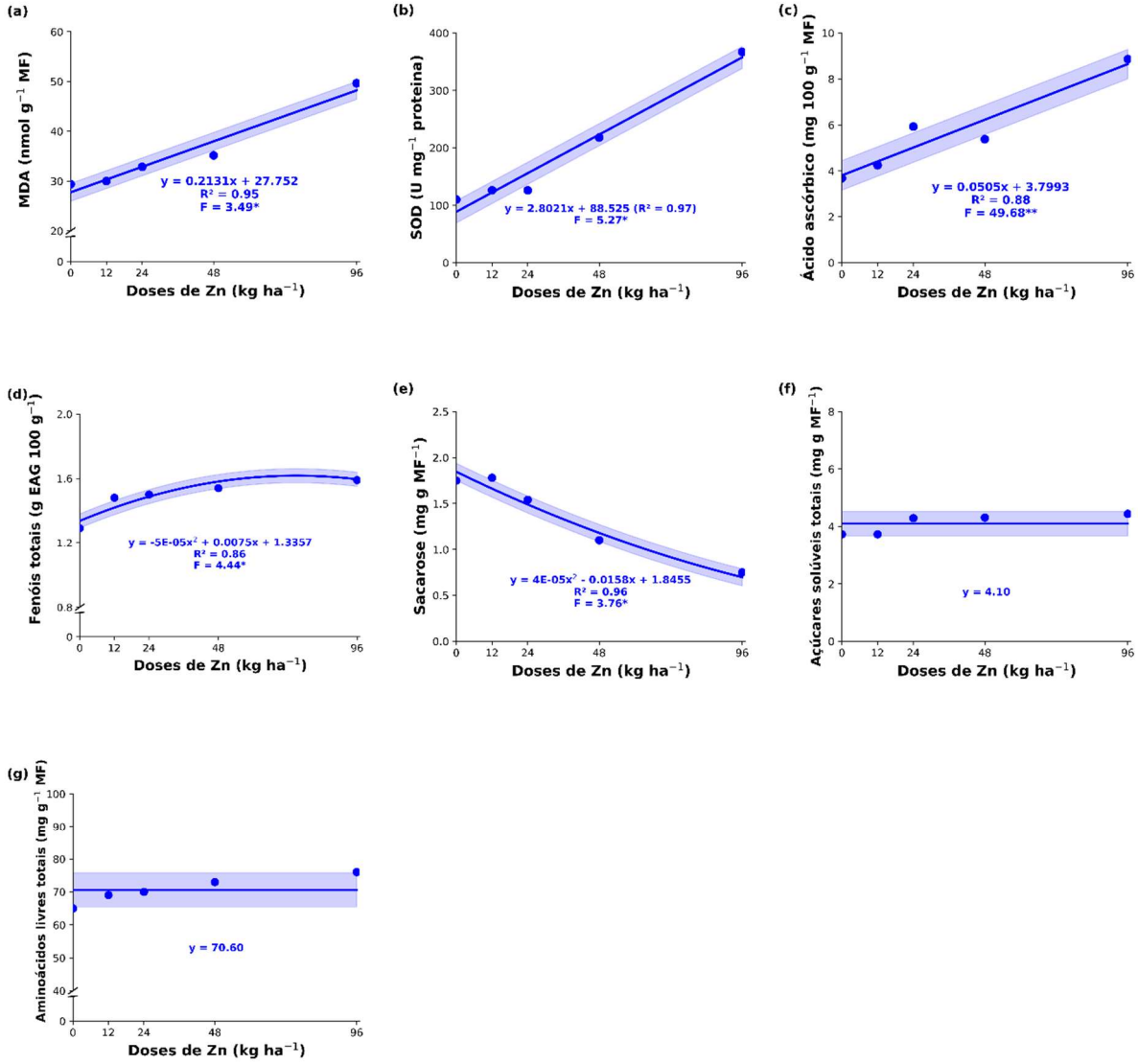


Figura 5. Teor de malondialdeído (MDA) (a), atividade da superóxido dismutase (SOD) (b), teor de ácido ascórbico (c), fenóis totais (d), teor de sacarose (e), teor de açúcares solúveis totais (f) e aminoácidos livres totais (g), em resposta às doses de

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

O teor de malondialdeído (MDA), marcador de peroxidação lipídica, aumentou linearmente de 28,4 para 48,1 nmol g^{-1} MF entre 0 e 96 kg ha^{-1}, indicando maior dano oxidativo nas maiores doses. Em contrapartida, o sistema antioxidante foi ativado: a atividade da superóxido dismutase (SOD) elevou-se linearmente de 85 para 275 U mg^{-1} proteína, e o ácido ascórbico (AsA) também aumentou de 3,9 para 9,2 mg 100 g^{-1} MF. Os fenóis totais apresentaram resposta quadrática com ponto de máxima estimado em 44,5 kg ha^{-1} de Zn e valor de 1,72 g EAG 100 g^{-1} MF, decrescendo nas doses superiores. A concentração de sacarose reduziu de forma potencial de 2,1 para 1,2 mg g^{-1} MF, redução da sacarose pode estar associada a alterações na utilização e/ou translocação de fotoassimilados em resposta às maiores doses de Zn. Açúcares solúveis totais (6,10 mg g^{-1}) e aminoácidos livres totais (70,80 mg g^{-1}) não foram alterados.

4.5 Respostas fisiológicas e fotossintéticas

A eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) apresentou leve redução linear variando de 0,81 para 0,79, valores ainda dentro da faixa de plantas não estressadas (>0,75), indicando alteração discreta na eficiência fotoquímica do fotossistema II nas maiores doses de Zn (Figura 6a).

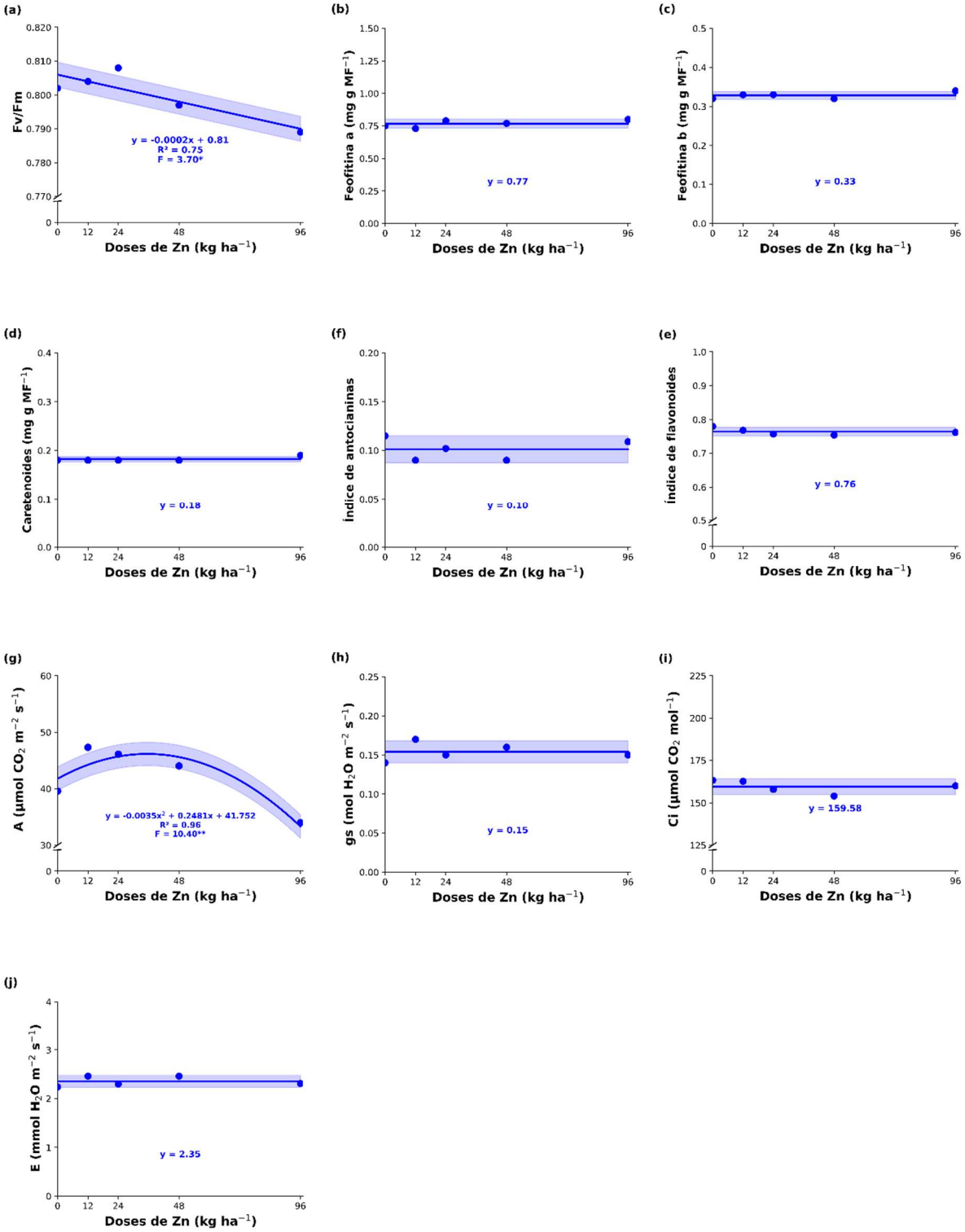
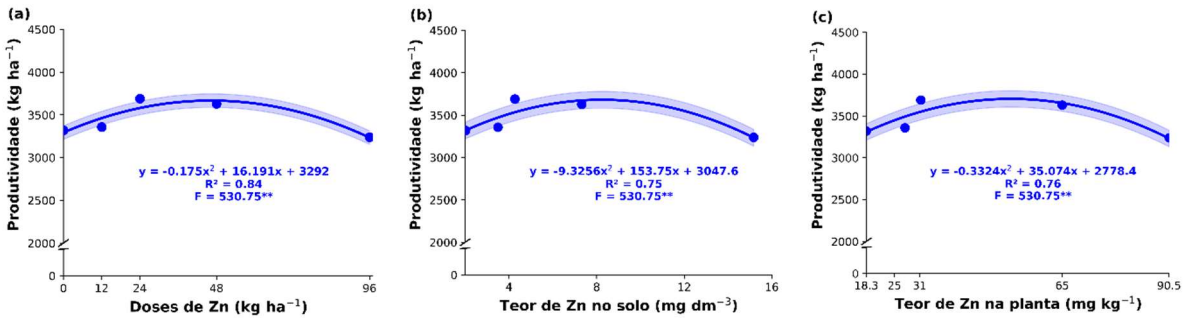


Figura 6. Eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm) (a), feofitina a (b), feofitina b (c), carotenoides (d), índice de flavonoides (e), índice de antocianinas (f), taxa fotossintética líquida (g), condutância estomática (h), concentração interna de CO_2 (i) e taxa de transpiração (j) em plantas de soja em resposta às doses residuais de Zn. ** e * significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste *F*.**

Feofitina a (0,77 mg g^{-1}), feofitina b (0,23 mg g^{-1}), carotenoides (0,18 mg g^{-1}), índice de antocianinas (0,49) e índice de flavonoides (0,78) não foram influenciados. A taxa fotossintética líquida (A) apresentou resposta quadrática com ponto de máxima em 31,4 kg ha^{-1} de Zn (47,2 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), reduzindo para 38,5 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} na dose de 96 kg ha^{-1}. Condutância estomática (Gs = 0,13 mol H_2O m^{-2} s^{-1}), concentração interna de CO_2 (Ci = 159,58 µmol CO_2 mol^{-1}) e transpiração (E = 2,35 mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) permaneceram estáveis (Figura 6h-j), indicando que a queda de A em altas doses não foi de origem estomática.

4.6 Produtividade e níveis críticos

A produtividade de grãos de soja apresentou resposta quadrática às doses de Zn, com produção máxima de 3.666 kg ha^{-1} estimada na dose de 46,3 kg ha^{-1} de Zn (Figura 7a). Considerando o nível de 95% da produção máxima como limiar de toxicidade, a dose correspondente ao nível crítico de toxicidade foi de 78,6 kg ha^{-1} de Zn, enquanto o limite inferior de suficiência foi de 13,9 kg ha^{-1} de Zn.



Quando relacionada ao teor de Zn no solo (DTPA), a produtividade também apresentou resposta quadrática, com teor ótimo de 8,24 mg dm^{-3} e produção máxima de 3.681 kg ha^{-1} (Figura 7b). O limite inferior de suficiência de Zn no solo foi de 3,80 mg dm^{-3}, enquanto o nível crítico de toxicidade, correspondente a 95% da produção máxima, foi de 12,69 mg dm^{-3}.

Para o teor de Zn na folha diagnóstica, o ajuste quadrático indicou teor ótimo de 52,8 mg kg^{-1}, associado à produção máxima de 3.704 kg ha^{-1} (Figura 7c). O limite inferior de suficiência de Zn na folha foi de 29,2 mg kg^{-1}, enquanto o nível crítico de toxicidade foi de 76,4 mg kg^{-1}.

5. DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam que o Zn aplicado em doses elevadas permanece disponível no solo após cultivo de milho e é absorvido eficientemente pela soja subsequente, como demonstrado pelo aumento linear de Zn na folha diagnóstica e nos grãos e pelo acúmulo quadrático na parte aérea. Esse comportamento é coerente com a natureza de baixa mobilidade do Zn no solo e com seu efeito residual prolongado, especialmente em Latossolos argilosos com pH próximo a 6,1, onde a fração DTPA ainda reflete o Zn lábil. O modelo quadrático para acúmulo total, com estabilização a partir de 48 kg ha^{-1}, sugere mecanismo de regulação da absorção e possível compartimentalização vacuolar em condição de luxo, como descrito por Broadley et al. (2007) e Cakmak & Kutman (2018).

A redução linear do acúmulo de Fe na parte aérea, sem alteração da concentração foliar de Fe, indica efeito de diluição e antagonismo indireto Zn-Fe na translocação. redução do acúmulo de Fe na parte aérea, sem alteração de sua concentração foliar, pode estar associada a efeitos de diluição e a interações antagônicas entre Zn e Fe, incluindo possíveis alterações nos mecanismos de transporte e homeostase desses micronutrientes. No entanto, como as concentrações foliares de Fe mantiveram-se entre 75 e 85 mg kg^{-1}, acima do nível crítico (50 mg kg^{-1}), não houve deficiência induzida, apenas menor partição para a biomassa total. Esse resultado diverge de estudos em solos com baixo Fe, onde altas doses de Zn provocam clorose férrica (Mattiello et al., 2015), e reforça que em solos eutroférricos com 13 mg dm^{-3} de Fe, a interação é menos prejudicial.

O incremento linear de MDA, mesmo com ativação paralela de SOD e AsA, revela que o Zn em excesso atua como pró-oxidante. Embora o Zn não seja metal redox-ativo, em concentrações supra-ótimas ele desloca Fe e Mn de sítios ativos, favorece a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e desestabiliza membranas, conforme revisado por Hänsch & Mendel (2009) e Jalal et al. (2024). O aumento da atividade da SOD indica ativação do sistema antioxidante em resposta às maiores doses de Zn. O aumento concomitante de ácido ascórbico, que atua no ciclo ascorbato-glutationa detoxificando H_2O_2 via APX, demonstra coordenação do sistema antioxidante, padrão também observado por Chen et al. (2008) em soja sob excesso de Zn. Apesar dessa ativação, o MDA continuou elevado, indicando que o sistema

antioxidante foi insuficiente para conter totalmente a peroxidação lipídica nas doses de 48 e 96 kg ha^{-1}, caracterizando estresse oxidativo moderado.

Os fenóis totais, metabólitos secundários com ação antioxidante não enzimática, aumentaram até 44,5 kg ha^{-1} e declinaram após, comportamento típico de hormese. Em doses moderadas, Zn estimula a via fenilpropanoide e acúmulo de fenóis como estratégia de quelação e scavenging de EROs, mas em toxicidade ocorre inibição enzimática da PAL, como relatado por Soares et al. (2019) em milho e Thapa et al. (2021) em soja. A redução de sacarose, sem alteração nos açúcares solúveis totais, sugere maior consumo de sacarose para respiração de manutenção, síntese de compostos antioxidantes e exportação para drenos reprodutivos, mantendo a homeostase de açúcares redutores.

Do ponto de vista fotossintético, a curva quadrática de A, com ótimo em 31,4 kg ha^{-1}, coincide com a faixa onde SOD e fenóis ainda conferem proteção sem acúmulo excessivo de MDA. A queda de A nas maiores doses, associada à leve redução de Fv/Fm (0,81 para 0,79) e à estabilidade de Gs, Ci e E, sugerindo limitação predominantemente não estomática da fotossíntese. Excesso de Zn afeta a atividade da anidrase carbônica (enzima Zn-dependente), a estrutura do fotossistema II e a síntese de clorofila via substituição de Mg^{2+}, conforme Cakmak (2000) e Bailey et al. (2002). A manutenção de Gs e Ci indica que os estômatos permaneceram abertos, mas a fixação de CO_2 foi limitada internamente, explicando porque a produtividade máxima estimada em 46,3 kg ha^{-1} antecede a dose onde o estresse oxidativo se intensifica. A ausência de efeito sobre carotenoides, feofitinas, flavonoides e antocianinas sugere que os pigmentos acessórios não foram degradados, diferentemente do observado em estresse por Cd ou Al.

Do ponto de vista prático, três implicações emergem: (i) a folha diagnóstica em R2 é excelente indicador do status de Zn, com relação linear forte (R^2 = 0,99), permitindo calibrar níveis críticos; (ii) a biofortificação de grãos foi linear e eficiente (40% de aumento), relevante para programas de nutrição humana, uma vez que a soja é fonte de Zn, corroborando Liao et al. (2022); e (iii) doses acima de 48 kg ha^{-1}, embora elevem o teor foliar, desencadeiam custo metabólico, com aumento de MDA e queda de A, caracterizando início de toxidez fisiológica, mesmo sem sintomas visuais. Esse limite fisiológico coincide com o nível crítico de toxicidade de 95% da produtividade proposto por Prado (2021), indicando a necessidade de estudos

adicionais para avaliar a adequação dos atuais níveis de referência do Boletim 100 para cultivares modernas de soja.

6. Conclusão

A produtividade máxima de soja TMG 7063 IPRO foi de 3.666 kg ha^{-1} na dose residual de 46,3 kg ha^{-1} de Zn, com níveis críticos de toxicidade (95% da produção máxima) de 78,6 kg ha^{-1} de dose, 12,69 mg dm^{-3} de Zn no solo e 76,4 mg kg^{-1} na folha.

Os níveis críticos de suficiência foram 8,24 mg dm^{-3} no solo e 52,8 mg kg^{-1} na folha diagnóstica, valores que, nas condições deste estudo, foram superiores aos valores de referência utilizados, indicando a necessidade de estudos adicionais para avaliar sua adequação a cultivares modernas de soja.

O Zn promove biofortificação linear dos grãos (+40%), mas doses acima de 48 kg ha^{-1} induzem estresse oxidativo (MDA), ativação de SOD e AsA, redução de fenóis, sacarose e fotossíntese por limitação não estomática.

Recomenda-se como faixa de manejo os teores de Zn entre 3,80 e 8,24 mg dm^{-3} no solo e entre 29,2 e 52,8 mg kg^{-1} na folha diagnóstica, associados à dose residual de 13,9 a 46,3 kg ha^{-1} de Zn.

7. COMENTÁRIOS DO SUPERVISOR

A aluna executou a pesquisa com sucesso tendo resultados relevantes para a literatura e diante destes elementos recomendamos a aprovação do relatório.

8. REFERÊNCIAS

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

AJEESH KRISHNA, T. P. et al. Structure, Function, Regulation and Phylogenetic Relationship of ZIP Family Transporters of Plants. Frontiers in Plant Science, v. 11, p. 662, 2020.

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.

ANDREJIĆ, G. et al. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed Miscanthus × giganteus plants. Photosynthetica, v. 56, n. 4, p. 1249-1258, 2018.

BAILEY, S. et al. A critical role for the Var2 FtsH homologue in the photosystem II repair cycle. Journal of Biological Chemistry, v. 277, p. 2006-2011, 2002.

BATAGLIA, O. C. et al. Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico, Boletim Técnico 78, 1983. 48 p.

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.

BOARETTO, R. M. et al. Micronutrientes. In: CANTARELLA, H. et al. (Eds.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, 2022. p. 121-127.

BOTOMAN, L. et al. Residual soil-applied zinc improves grain zinc nutritional quality of maize. Frontiers in Soil Science, v. 5, p. 1656634, 2025.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of protein. Analytical Biochemistry, v. 72, p. 248-254, 1976.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. New Phytologist, v. 173, n. 4, p. 677-702, 2007.

CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. New Phytologist, v. 146, n. 2, p. 185-205, 2000.

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.

CAMARGO, O. A. et al. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas: IAC, Boletim Técnico 106, 1986.

CHEN, W. et al. Differential changes in photosynthetic capacity between Zn-efficient and Zn-inefficient rice genotypes under low zinc stress. Physiologia Plantarum, v. 132, p. 89-101, 2008.

OLIVEIRA, N. T. et al. Iron counteracts zinc-induced toxicity in soybeans. Plant Physiology and Biochemistry, v. 194, p. 335-344, 2023.

EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja - região central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases. Plant Physiology, v. 59, n. 2, p. 315-318, 1977.

GRATÃO, P. L. et al. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stress. Plant Physiology and Biochemistry, v. 56, p. 79-96, 2012.

HARTMAN, G. L.; WEST, E. D.; HERMAN, T. K. Crops that feed the world 2. Soybean. Food Security, v. 3, p. 5-17, 2011.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients. Current Opinion in Plant Biology, v. 12, n. 3, p. 259-266, 2009.

INOCÊNCIO, M. F. et al. 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.

JALAL, A. et al. Interaction of Zinc Mineral Nutrition and Plant Growth-Promoting Bacteria. Plants, v. 13, n. 5, p. 571, 2024.

JOSHI-SAHA, A. et al. Biofortified legumes: present scenario, possibilities and challenges. Field Crops Research, v. 279, p. 108467, 2022.

KAMPFENKEL, K.; VANMONTAGU, M.; INZE, D. Extraction and Determination of Ascorbate. Analytical Biochemistry, v. 225, n. 1, p. 165-167, 1995.

KAUR, H.; GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. Planta, v. 253, n. 6, p. 129, 2021.

KÖPPEN, W. Climatologia. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LIAO, F. et al. Regulation of the zinc deficiency response in Medicago truncatula. Frontiers in Plant Science, v. 13, p. 916168, 2022.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids. Methods in Enzymology, v. 148, p. 350-382, 1987.

LICHTENTHALER, H. K. et al. How to correctly determine chlorophyll fluorescence parameters. Photosynthetica, v. 43, n. 3, p. 379-393, 2005.

LILAY, G. H. et al. Linking the key physiological functions of micronutrients to deficiency symptoms. New Phytologist, v. 242, n. 3, p. 881-902, 2024.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, v. 42, n. 3, p. 421-428, 1978.

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

MARSCHNER, H. Mineral Nutrition of Higher Plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MARTÍNEZ CUESTA, N. et al. Zinc fertilization strategies in soybean. Journal of Plant Nutrition, v. 46, n. 6, p. 1134-1144, 2023.

MATTIELLO, E. M. et al. Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. Journal of Plant Physiology, v. 183, p. 138-143, 2015.

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

PRADO, R. M. Mineral nutrition of tropical plants. Cham: Springer, 2021.

RAHMAN, S. U. et al. Improvement of soybean; a way forward. Molecular Biotechnology, v. 65, p. 162-180, 2023.

RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: IAC, 2001.

RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, Boletim Técnico 100, 1997.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics. American Journal of Enology and Viticulture, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.

SOARES, J. C. et al. Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate. Plant and Soil, v. 443, p. 1-26, 2019.

STANTON, C. et al. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. Molecular Plant, v. 15, n. 1, p. 65-85, 2022.

THAPA, S. et al. Managing micronutrients for improving soil fertility, health and soybean yield. Sustainability, v. 13, p. 11766, 2021.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M.; PATEL, P. M. Zinc induced iron deficiency in soybeans. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 7, n. 1, p. 37-41, 1976.