

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –
CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO GLIFOSATO COM A APLICAÇÃO DE
MANGANÊS, ZINCO E COBRE

Autor: Daniel Pereira da Silva
Orientador: Dr. Hyrandir Cabral de Melo

Ceres - GO
2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –
CAMPUS CERES

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO GLIFOSATO COM A APLICAÇÃO DE
MANGANÊS, ZINCO E COBRE

Autor: Daniel Pereira da Silva

Orientador: Dr. Hyrandir Cabral de Melo

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO, ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres – Área de concentração: Irrigação.

Ceres - GO

2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

SSI586 m Silva, Daniel Pereira da
Mitigação dos efeitos do glifosato com a aplicação de manganês, zinco e cobre / Daniel Pereira da Silva; orientador Hyrandir Cabral de Melo. -- Ceres, 2024.
57 p.

Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em Irrigação no Cerrado) -- Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, 2024.

1. Zea mays. 2. adubação foliar. 3. herbicida. 4. estresse abiótico. 5. micronutrientes. I. Melo, Hyrandir Cabral de, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local / /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 5/2024 - CCMIC-CE/GPPI/CMPCE/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 29 dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte quatro, realizou-se a Defesa de Dissertação do acadêmico **Daniel Pereira da Silva** do Curso de Mestrado Profissional em Irrigação no Cerrado, número de defesa 064, matrícula 2021203330640003, RG 6173593 SSP GO, CPF: 025.485.751-52, cuja dissertação intitula-se "**Mitigação dos efeitos do glifosato em milho com a aplicação foliar de manganês, zinco e cobre.**" A defesa iniciou-se às 8 horas e 30 minutos, finalizando-se às 11 horas e 50 minutos, onde a banca examinadora considerou o trabalho aprovado, estando apta para fins de conclusão da Dissertação, devendo o acadêmico apresentar no prazo de sessenta (60) dias a versão final corrigida conforme considerações da banca no formato digital (PDF), acompanhado do termo de autorização para publicação eletrônica (devidamente assinado pelo autor), para posterior inserção no Sistema de Gerenciamento do Acervo e acesso ao usuário via internet. Os integrantes da banca examinadora assinam a presente ata.

Prof. Dr. Hyrandir Cabral de Melo

Presidente da banca

Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Cleiton Mateus Sousa

Avaliador Interno

IF Goiano - Campus Ceres

Prof. Dr. Francis Julio Fagundes Lopes

Avaliador Externo

Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Edson Ferreira Duarte

Avaliador Externo

Universidade Federal de Goiás

Documento assinado eletronicamente por:

- Edson Ferreira Duarte, 518.173.731-53 - Usuário Externo, em 11/03/2024 11:57:19.
- Francis Julio Fagundes Lopes, 035.707.376-24 - Usuário Externo, em 11/03/2024 11:57:04.
- Cleiton Mateus Sousa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/03/2024 11:55:57.
- Hyrandir Cabral de Melo, Hyrandir Cabral de Melo - Professor Colaborador - Universidade Federal de Goiás (01567601000143), em 11/03/2024 11:54:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/01/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 566663

Código de Autenticação: ef11d229fa



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Ceres

Rodovia GO-154, Km.03, Zona Rural, 03, Zona Rural, CERES / GO, CEP 76300-000

(62) 3307-7100

DEDICATÓRIAS

À minha esposa Raquel, pelo apoio, e aos meus pais, pelos ensinamentos que me trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por cada dia da minha vida, por ter me dado saúde, força nos momentos mais difíceis, permitindo que esse sonho fosse realizado.

Ao Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, pela estrutura e suporte oferecidos para o desenvolvimento do curso, e ao seu corpo docente, direção e administrativo, pela contribuição.

Ao meu orientador, Dr. Hyrandir Cabral de Melo, pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho, bem como pelas correções, compreensão e incentivos.

À minha esposa Raquel Rodrigues, pelo apoio durante toda a trajetória do mestrado e por ter encarado junto esse desafio.

Aos meus pais, Francisco Pereira e Doralice Luciano, por terem sempre acreditado em mim, me apoiando e me incentivando do início ao fim desse projeto

BIOGRAFIA DO AUTOR

DANIEL PEREIRA DA SILVA, nascido em 24 de junho de 1996, na cidade de Itapuranga – GO, filho de Francisco Pereira e Doralice Luciano, marido de Raquel Rodrigues. Em 2012, ingressou no curso Técnico em Agropecuária Integrado ao Ensino Médio, ofertado pelo Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, GO, obtendo o título de Técnico em Agropecuária em dezembro de 2014. Em 2015, ingressou no curso de Bacharelado em Agronomia pela mesma instituição, obtendo o título de Bacharel em Agronomia em março de 2020, em abril do mesmo ano ingressou na empresa Agroquima Produtos Agropecuários Ltda, na função de Representante Comercial na cidade Nova Crixás – GO e em agosto, ingressou no Curso de Pós-Graduação *latu sensu* em Proteção de Plantas pela Faculdade Associada de Uberaba – FAZU, obtendo título de especialista em outubro de 2021. Em outubro de 2021, ingressou no curso de Pós-Graduação *latu sensu* em Fisiologia, Desenvolvimento e Nutrição de Plantas, no programa de educação continuada do Sollo Agro. No mesmo, mês ingressou no curso de mestrado em Irrigação do Cerrado *stricto sensu* do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres. Em março de 2022, ingressou na empresa ICL América do Sul como Representante Técnico de Vendas, no Vale do Araguaia, GO.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis climáticas no dia das avaliações fisiológicas, radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2}$), déficit de pressão de vapor (DPV, kPa), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (UR, %)	16
Tabela 2. Análise química e de textura do solo após a coleta.....	17
Tabela 3. Efeitos da aplicação de micronutrientes e glifosato na fotossíntese líquida ($A \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiração ($E, \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de plantas de milho (<i>Zea mays</i>), híbrido Pioneer 3858 PWU, após aplicação do herbicida.....	22
Tabela 4. Efeitos de micronutrientes e glifosato na razão da fluorescência variável e máxima (F_v/F_m) e no índice SPAD em (<i>Zea mays</i>), híbrido Pioneer 3858 PWU, após aplicação do herbicida.....	23
Tabela 5. Efeitos de micronutrientes e glifosato na altura da planta (AP, cm), diâmetro do colmo (D, mm), massa seca da raiz (MSR, g), massa seca do colmo (MSC, g), massa seca das folhas (MSF, g) e área foliar (AF, cm^2)	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O glifosato atua inibindo a enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs) na via do chiquimato, bloqueando a produção de triptofano, fenilalanina ou tirosina.....	1
Figura 2. Fórmula estrutural do glifosato.....	7
Figura 3. Dados meteorológicos diários registrados às 12 h no período do experimento.....	16

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolos/siglas	Significado
A	Fotossíntese líquida
AF	Área Foliar
AIA	Ácido indolacético
AMPA	ácido aminometilfosfônico
AP	Altura da planta
B	Boro
Ca	Cálcio
CAT	Catalase
Cl	Cloro
cm	Centímetro
cmol _c dm ⁻³	Centimol carga por decímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
D	Diâmetro
DAAH	Dias após aplicação do herbicida
DAE	Dias após emergência
ΔP	Variação de peso da caixa
DPV	Déficit de pressão de vapor
<i>E</i>	Transpiração
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
EPSPs	5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfatossintase
EROs	Espécies reativas de oxigênio
ET ₀	Evapotranspiração de referência
Fe	Ferro
Fv/Fm	Fluorescência
g dm ⁻³	Gramas por decímetro cúbico
g ha ⁻¹	Gramas por hectare
g kg ⁻¹	Gramas por quilograma
gs	Condutância estomática
H	Horas
H ₂ O	Água
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
K	Potássio
Kc	Coefficiente da cultura
kg ha ⁻¹	Quilogramas por hectare
kPa	Quilopascal
LB	Lâmina Bruta

m	Metros
m ³	Metros cúbicos
Mg	Magnésio
mg dm ⁻³	Miligramma por decímetro cúbico
mg kg ⁻¹	Miligramma por quilograma
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MSC	Massa seca do colmo
MSF	Massa seca das folhas
MSR	Massa seca das raízes
N	Nitrogênio
NH ⁺ ₄	Amônio
Ni	Níquel
NO ⁻ ₃	Nitrato
O ₂	Oxigênio singlete
P	Fósforo
PAR	Radiação fotossintética ativa
pH	Potencial hidrogeniônico
PWU	Power Core Ultra
RR	Roundup Ready
RR2	Roundup Ready segunda geração
S	Enxofre
S (irrigação)	Área da caixa
SOD	Superóxido dismutase
SPAD	Soil Plant Analysis Development
t	Toneladas
Zn	Zinco
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Mecanismo de ação do Glifosato	4
2.2 Efeito do glifosato no crescimento, desenvolvimento e nutrição plantas glifosato-resistentes	5
2.3 Complexação e quelatação em mistura de tanque com glifosato e micronutrientes metálicos	6
2.3 Cobre (Cu).....	9
2.4 Manganês (Mn)	11
2.5 Zinco (Zn)	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Variáveis meteorológicas.....	16
3.2 Preparo do substrato e adubação	17
3.2 Instalação e condução da cultura	18
3.2.1 Pulverização foliar com os micronutrientes antes da aplicação do herbicida. 18	
3.2.2 Pulverização do herbicida	19
3.3 Manejo da irrigação.....	19
3.4 Variáveis analisadas.....	20
3.5 Tratamento estatístico.....	21
4. RESULTADOS	22
5. DISCUSSÃO	25
6. CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

RESUMO

SILVA, DANIEL PEREIRA DA. Instituto Federal Goiano – Campus Ceres/GO, fevereiro 2024. **Mitigação dos efeitos do glifosato com a aplicação de manganês, zinco e cobre.** Orientador: Dr. Hyrandir Cabral de Melo.

O milho (*Zea mays* L.) é um dos cereais mais importantes para a alimentação animal e humana. Os micronutrientes, além de sua função nutricional nas plantas, podem atuar como fator mitigador de efeitos dos estresses bióticos e abióticos. O glifosato, um dos herbicidas mais utilizados nos campos de cultivo agrícola, é um fator de estresse, mesmo para as plantas transgênicas tolerantes a ele. Seu mecanismo de ação é inibir a atividade da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfatossintase (EPSPs), a qual participa da rota do ácido chiquímico em plantas não tolerantes aos herbicidas. No entanto, percebe-se efeito tóxico do glifosato mesmo em plantas a ele tolerantes, evidenciado pelo amarelecimento e redução da fotossíntese, especialmente como resultado de sua ação quelante de micronutrientes metálicos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade de mitigação dos efeitos indesejáveis da aplicação de glifosato no milho tolerante ao glifosato RR2 pela aplicação foliar de Mn, Zn e Cu. O experimento foi conduzido em ambiente controlado, aplicando os três micronutrientes via foliar, de forma isolada ou combinada, 13 dias após a emergência e sete dias antes da aplicação do glifosato. As variáveis fisiológicas utilizando o IRGA, SPAD e Fluorpen foram a fotossíntese líquida (A), a transpiração (E), a condutância estomática (g_s), a razão de F_v/F_m e o índice SPAD, tendo as avaliações sido feitas aos 20 DAE, 27 DAE e aos 34 DAE, sendo que a primeira avaliação foi feita antes da aplicação do glifosato e as demais, com intervalo de sete dias após. As variáveis morfológicas avaliadas aos 43 DAE foram altura de planta (AP), diâmetro do colmo (D), massa seca das folhas (MSF), raiz (MSR) e colmo (MSC) e área foliar (AF). Verificou-se que sem a adubação foliar com os micronutrientes, isolados ou combinados, houve redução da MSR . Observou-se que a A , F_v/F_m e SPAD não foram afetados pelos tratamentos, apesar de haver influência do glifosato sobre a g_s . Algumas variações em algumas variáveis estudadas entre os dias de avaliação podem ter ocorrido tanto em função dos tratamentos quanto das condições ambientais. Conclui-se que os nutrientes utilizados, isolados ou combinados, são efetivos na mitigação de efeitos negativos do glifosato.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays*, adubação foliar, herbicida, estresse abiótico, micronutrientes

ABSTRACT

SILVA, DANIEL PEREIRA DA. Goiano Federal Institute, Ceres Campus, Goiás State (GO), Brazil, February 2024. **Mitigation of the glyphosate effects with the manganese, zinc, and copper application.** Advisor: Prof. Dr. Melo, Hyrandir Cabral de.

Corn (*Zea mays* L.) is one of the most important cereals for animal and human consumption. Micronutrients besides their nutritional function in plants can act as mitigating factors for biotic and abiotic stresses. Glyphosate, one of the most widely used herbicides in agricultural fields, is a stress factor even for glyphosate-tolerant transgenic plants. Its action mechanism is to inhibit the enzyme 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) activity, which takes part in the shikimic acid pathway in plants not tolerant to the herbicides. However, the glyphosate toxic effects are observed even in glyphosate-tolerant plants, highlighted by yellowing and reduced photosynthesis, especially because of its chelating action on metallic micronutrients. This paper aimed to evaluate the possibility to mitigate the undesirable effects of glyphosate application in glyphosate-tolerant corn cv. RR2 through foliar application of Mn, Zn, and Cu. The experiment took place in a controlled environment, applying the three micronutrients via foliar fertilization, either individually or in combination, in plants aged thirteen days after emergence and seven days before glyphosate application. The physiological variables with Infra-red gas analyser (IRGA), Soil Plant Analysis Development (SPAD), and Fluorpen were liquid photosynthesis (A), transpiration (E), stomatal conductance (gs), and the Fv/Fm ratio and the SPAD index, on the twentieth day after emergency (DAE), twenty-seventh DAE, and thirty-fourth DAE; the first assessment was carried out before applying glyphosate and others with an interval of seven days afterwards. The morphological variables evaluated on the forty-third DAE were plant height (PH), stem diameter (SD), leaf dry mass (LDM), root dry mass (RDM), stem dry mass (SDM), and leaf area (LA). It was found that there was a reduction in RDM without foliar fertilization with micronutrients, either individually or combined. It was observed that A, Fv/Fm, and SPAD were not affected by the treatments, although glyphosate influenced gs. Some variations in some studied variables among the evaluation days suggest that they occurred both due to the treatments and environmental conditions. It is concluded that the nutrients used, either individually or combined, are effective for mitigating the glyphosate negative effects.

KEYWORDS: *Zea mays*. Abiotic stress. Foliar fertilization. Herbicide. Micronutrients.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.), além de sua importância para alimentação animal e humana, é utilizado para produção de combustíveis, bebidas e polímeros (Langner *et al.*, 2019). Como alimento, há aumento de sua demanda em razão do crescente aumento populacional (Karnatam *et al.*, 2023; Revilla *et al.* 2022), requerendo, portanto, à ampliação de sua produtividade. No Brasil, a área de primeira e segunda safra tem capacidade de produção de 117.603,5 mil t⁻¹, com produtividade média de 5.720 kg ha⁻¹, correspondendo a segunda safra a 74% da produção (Conab, 2024).

A nutrição mineral das plantas é um fator limitante na produção agrícola, sendo os micronutrientes requeridos pelas plantas em quantidades muito pequenas, em comparação com os macronutrientes. Sua presença em quantidades apropriadas gera homeostase metabólica necessária a fenômenos como tráfego intracelular e armazenamento de substâncias, atuando ainda como fator mitigador de efeitos dos estresses bióticos e abióticos pelo seu envolvimento em processos antioxidantes (Hänsch & Mendel, 2009; Tavanti *et al.*, 2021).

Os efeitos de estresses nos estágios iniciais de crescimento das plantas causam rápida inibição do crescimento das raízes e do caule, resultado do fechamento estomático e da consequente redução da taxa de fixação de CO₂ necessário à fotossíntese (Neumann, 2008). Esse fenômeno é observado em plantas jovens submetidas à aplicação do glifosato, mesmo que geneticamente modificadas para tolerar esse herbicida (Zobiolo *et al.*, 2010), evidenciando, portanto, o efeito estressante dessa substância.

A aplicação de herbicidas em pós-emergência no milho é muito utilizada, uma vez que a cultura é sensível à matocompetição, podendo reduzir em até 32% a produtividade. A estratégia mais utilizada pelos produtores em grandes áreas de cultivo, em áreas com alta tecnologia, é o milho geneticamente modificado por transgenia com resistência ao glifosato, que é herbicida de amplo espectro de controle de plantas pela sua atuação inibitória da ação da enzima EPSPs (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfatossintase) na rota do ácido chiquímico (Escorial *et al.*, 2019).

O glifosato é um agente quelante que pode se ligar a macronutrientes e micronutrientes, especialmente os micronutrientes metálicos, podendo impactar a absorção e a disponibilidade de alguns nutrientes em plantas tratadas com esse

herbicida, mesmo que geneticamente modificadas para resistir à sua aplicação (Mertens *et al.*, 2018).

A interação entre o glifosato e os micronutrientes metálicos pode se tornar um fator limitante ao metabolismo e crescimento das plantas dependentes desses nutrientes. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade de mitigação dos efeitos da aplicação do glifosato no milho RR2 pela aplicação foliar de Mn, Zn e Cu.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O milho geneticamente modificado foi introduzido no Brasil em 2007 para solucionar os problemas de controle da principal praga da cultura, o lepidóptero *Spodoptera frugiperda* (lagarta-do-cartucho), tendo a empresa detentora da patente disponibilizado híbridos com resistência à lagarta e ao glifosato (Adegas *et al.*, 2022).

O glifosato é o herbicida com maior utilização em culturas de cereais em pré ou pós-emergência em razão da tecnologia de transgenia de sua resistência ao herbicida e a seu amplo espectro de controle. O milho pode apresentar até 32% de redução da produtividade como consequência da infestação de plantas daninhas, visto isso, em milho RR (Roundup Ready) ou RR2 (Roundup Ready 2), o herbicida com maior utilização é o glifosato (Escorial *et al.*, 2019).

Para a transgenia, inicialmente era inserido através da biobalística o gene de resistência originado de plantas de arroz, com semelhança de 99,3% a EPSPs, assim a expressão da enzima era reduzida em tecidos novos e flores, tendo sido criada a primeira geração de milho resistente ao glifosato, denominado milho RR (Roundup Ready). A segunda geração de milho resistente ao glifosato teve como objetivo melhorar a homologia através da bactéria *Agrobacterium tumefaciens*, elevando para 99,7% a semelhança a EPSPs, elevando a aceitação pelos produtores (Albrecht *et al.*, 2014).

Apesar de a segunda geração de transgenia conferir resistência ao glifosato, persistiram observações de amarelecimento após a aplicação deste herbicida. Inicialmente, acreditava-se que esses efeitos eram exclusivamente causados pela complexação do manganês (Mn), pois a adição ou aplicação deste nutriente após a detecção dos danos parecia mitigar os efeitos mais rapidamente. No entanto, relatos indicaram que o ácido aminometilfosfônico (AMPA) poderia ser o principal causador desses efeitos (Duke & Powles, 2008).

O metabolismo de degradação do glifosato pelas plantas segue duas rotas, uma que leva ao AMPA e outra que leva ao glioxilato, sendo uma parte exsudada pelas raízes como glifosato. Em plantas de milho, foi confirmado que a rota de degradação do glifosato acontece pela rota do AMPA (Nandula *et al.*, 2019). O AMPA afeta a fotossíntese pela degradação da clorofila, ocasionando amarelecimento temporário nas folhas, o que ocorre em função da formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Gomes *et al.*, 2016).

Para redução das EROs em níveis em que não ocorram danos à célula vegetal são necessárias enzimas antioxidantes para homeostase celular. Diversas dessas enzimas são ativadas por Cu, Mn ou Zn ou têm esses elementos na sua estrutura. A enzima superóxido dismutase (SOD) é a primeira da linha de defesa no sistema antioxidante, atuando na dismutação do oxigênio singlete (O_2^-) em peróxido de hidrogênio. Os cofatores metálicos nos cloroplastos são Cu/Zn-SOD e Mn-SOD. A segunda enzima é a catalase (CAT), que atua na conversão de H_2O_2 em H_2O (Tavanti *et al.*, 2021).

2.1 Mecanismo de ação do Glifosato

O glifosato (N-(fosfonometil)glicina), após a sua introdução na década de 1970, tornou-se um herbicida popular entre os agricultores pelo seu amplo espectro de controle de ervas daninhas, sendo utilizado em pós-emergência das plantas daninhas com ação sistêmica, que, no Brasil teve uso intensificado em razão dos cultivos de segunda safra, sendo utilizado como dessecante pré-plantio (Reddy *et al.*, 2008; Lopez Ovejero *et al.*, 2017; Kanissery *et al.*, 2019).

O glifosato é absorvido pelas folhas e translocado pelo floema seguindo o fluxo de carboidratos, chegando até os meristemas, folhas, raízes e órgãos de armazenamento. A velocidade e o tempo da completa absorção dependem de vários fatores, porém a presença de efeitos negativo na soja transgênica é encontrada a partir de cinco dias após a aplicação (Monquero *et al.*, 2004; Duke *et al.*, 2013; Gomes *et al.*, 2014). A ação após chegar ao órgão é inibindo a enzima EPSPs (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfatosintase) (Figura 1), que catalisa a reação chave na via do ácido chiquímico, que é uma via metabólica específica das plantas, essencial para a produção de compostos secundários, incluindo auxina e aminoácido aromáticos, Figura 1, essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Duke & Powles, 2008; Velini *et al.*, 2009).

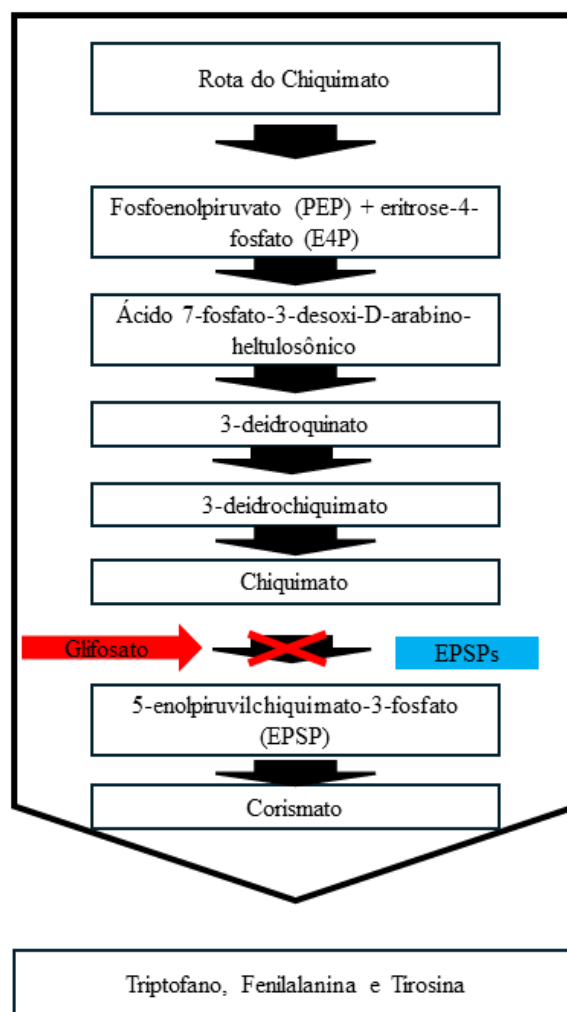


Figura 1. O glifosato inibe a enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs) - na via do chiquimato, bloqueando a produção de triptofano, fenilalanina ou tirosina. Fonte: Adaptado de Helander, Saloniemi e Saikkonen (2012).

A rota do ácido chiquímico está presente em plantas, fungos e bactérias, tendo como função converter precursores de carboidratos derivados da glicólise e da rota da pentose fosfato (em três aminoácidos aromáticos: fenilalanina, tirosina e triptofano). Essas rotas estão ligadas à produção de lignina, hormônios e compostos fenólicos (Helander, Saloniemi e Saikkonen, 2012).

2.2 Efeito do glifosato no crescimento, desenvolvimento e nutrição plantas glifosato-resistentes

Os efeitos de glifosato em plantas resistentes são amplamente estudados, buscando entendimento sobre a alteração de rendimento, deficiências nutricionais,

alteração microbiana na rizosfera e alterações fisiológicas nas plantas. Em plantas de soja, há resultados consistentes sobre a produção e o acúmulo do AMPA (ácido aminometilfosfônico), que é um produto da degradação do glifosato em plantas modificadas geneticamente (Cakmak *et al.*, 2009; Duke *et al.*, 2013; Gomes *et al.*, 2014; Krenchinski *et al.*, 2017; Kanissery *et al.*, 2019).

O efeito visual de amarelecimento em soja decorrente de sua exposição ao glifosato é conhecido como “*yellow flashing*”, com duração de até 28 dias, mas essa duração varia de acordo o estágio fenológico, o genótipo (RR ou RR2), o estado nutricional das plantas e do solo, o tipo de sal de glifosato e a dosagem utilizada (Albrecht *et al.*, 2014; Krenchinski *et al.*, 2017).

Em milho, o AMPA ou resíduos de glifosato para ocorrer acúmulo são necessárias doses altas, acima de 9000 g.a ha⁻¹ de glifosato, o que corresponde a seis vezes a dose recomendada para as plantas daninhas na cultura, quando se verifica presença do AMPA em baixas quantidades e baixa frequência nos experimentos (Bidoia *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023).

Reddy *et al.* (2018), ao analisarem plantas de milho resistentes ao glifosato e plantas não resistentes quanto ao teor nutricional foliar, observaram que dos 24 minerais analisados, foi observada redução no teor dos nutrientes Mn e Mg em áreas com histórico de aplicação de glifosato. Em relação aos teores de AMPA e glifosato nas folhas e nos grãos, foi detectada nas folhas presença dos dois compostos e nos grãos, ausência de ambos.

2.3 Complexação e quelatação em mistura de tanque com glifosato e micronutrientes metálicos

As pulverizações nas lavouras ao longo do ciclo têm como objetivo o manejo fitossanitário (aplicação de herbicida, inseticida e fungicida) e a aplicação de fertilizantes foliares. Com isso, devem ser utilizadas fontes de nutrientes que não se ligam aos produtos fitossanitários.

A adubação foliar deve ser utilizada como ferramenta capaz de agregar valor à atividade agrícola em razão dos baixos teores de micronutrientes no solo e do alto custo da aplicação em comparação com as fontes granuladas solúveis. Essa forma de adubação deve gerar incrementos na produtividade e possibilitar a biofortificação das culturas (Saha *et al.*, 2017).

A disponibilidade de alguns micronutrientes no solo é influenciada pelo seu pH, sendo que nos solos do cerrado é imprescindível a elevação do pH para reduzir os teores de alumínio tóxico, o que torna os micronutrientes indisponíveis para as plantas (Malavolta, 2006). Considerando as vantagens da fertilização foliar, fica claro que o fornecimento de elementos nutrientes pela adubação foliar é uma boa estratégia, com maior eficácia a adubação do solo, sendo mais orientada para objetivos específicos e com menor dano ao ambiente (Niu *et al.*, 2021).

Os íons metálicos mais comuns na fertilização são o Mn e o Zn. O glifosato junto com o Mn pode formar complexos de baixa solubilidade com íons Mn^{2+} livres em um pH variando de 2,5 a 5. Com isso, é necessário o uso de quelatos mais fortes que o glifosato, evitando a formação de complexos insolúveis entre glifosato e Mn (Mertens *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2020).

Ao adicionar produto à base de Mn junto ao glifosato em mistura de tanque, para a aplicação em plantas de eucalipto jovem, observou-se que a absorção e a translocação do glifosato pelas plantas foram reduzidas, indicando formação de complexo entre os nutrientes e o glifosato, afetando diretamente o controle das plantas daninhas (Adriano *et al.*, 2021).

A formação de complexo entre o glifosato e íons metálicos é causada pela sua característica de um ácido orgânico polar, solúvel em água (dado em ácido equivalentes a.e.). É um potente quelante em razão de suas duas cargas negativas, do grupamento fosfanato e da carboxila (Figura 2), que se liga facilmente a cátions, como, por exemplo, Cu^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+} , formando complexos estáveis indisponíveis para absorções foliares (Mertens *et al.*, 2018).

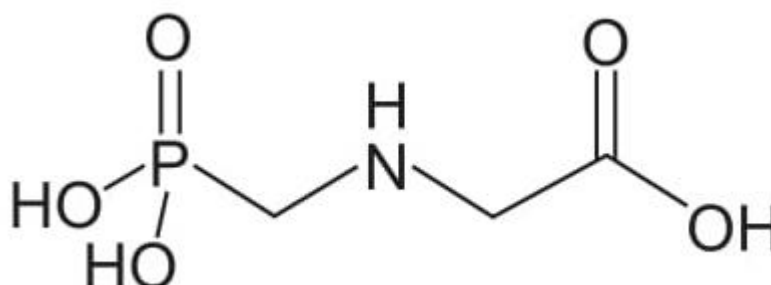


Figura 2. Fórmula estrutural do glifosato. Fonte: Amarante Junior *et al.* (2002)

A ação quelante do glifosato é forte com Zn e Cu, enquanto em outros nutrientes com Ca, Mn, Mg e Fe, forma complexos mais fracos, sendo que esse poder de quelatação do glifosato irá depender da quantidade de íons presentes na solução do solo, que tem relação mais complexa do que em misturas de caldas ou hidroponia. Os aspectos citados indicam que o glifosato é um quelante fraco em relação aos quelantes sintéticos, e estudos mostram que não seria capaz de quelatar micronutrientes no solo até um grau que possa expressar deficiência em culturas (Duke *et al.*, 2013).

O EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) é um agente quelante que forma o complexo íon metálico-EDTA, que é absorvido na forma quelatada e transportado nesta forma, apresentando elevada estabilidade em comparação com os ácidos orgânicos e com o herbicida glifosato (Doolette *et al.*, 2018).

Os íons metálicos quelatados com EDTA são absorvidos e seu transporte ocorre via apoplástica, sendo translocados mais facilmente do que substâncias com cargas positivas livres, que estão nas fontes de nutrientes como sulfatos, cloretos e nitratos. No transporte simplástico, a redistribuição para outros órgãos está relacionada à mobilidade no floema, tendo os nutrientes essenciais sido classificados como altamente móveis (N, P, K, Mg, S, Cl, Ni), intermediários (Fe, Zn, Cu, B, Mo) e imóveis (Ca, Mn) (Fernández & Brown, 2013).

Outro fator importante em relação aos micronutrientes metálicos é a solubilidade, sendo que óxidos e carbonatos metálicos são insolúveis e não penetram nas folhas ou penetram em baixas quantidades (Machado *et al.*, 2020; Gong *et al.*, 2019).

Em uma pesquisa que investigou a absorção de quelatos, nano-óxidos e sulfatos, observou-se que a velocidade e a quantidade absorvida podem ser afetadas pela manipulação da solubilidade em razão do tamanho das partículas. Notavelmente, mesmo com o tamanho de nanopartícula, as fontes de nano-óxidos mostraram baixa absorção (Gomes *et al.*, 2019).

Na adubação foliar de micronutrientes metálicos como Cu, Mn e Zn, em conjunto com a aplicação do herbicida glifosato, o sucesso irá depender da fonte (solúvel ou insolúvel), de qual complexo ou quelato utilizado, da concentração da calda, e a fonte com maior disponibilidade no mercado, que entrega essas características com custo baixo, corresponde aos nutrientes quelatados com EDTA (Migliavacca *et al.*, 2022).

Considerando que o glifosato ocasiona prejuízos ao metabolismo das plantas, especialmente à fotossíntese, os micronutrientes desempenham uma função vital ao se ligarem diretamente às enzimas antioxidantes. Por exemplo, o Cu atua como cofator em proteínas envolvidas em reações de transferência de elétrons, as quais são responsáveis pela manutenção da homeostase das espécies reativas de oxigênio (EROs). Da mesma forma, o manganês desempenha papel importante nos processos relacionados à desintoxicação das EROs nas plantas. Além disso, o zinco tem papel crucial na integridade e estabilização das membranas, contribuindo para a mitigação do estresse oxidativo.

2.3 Cobre (Cu)

O cobre é um micronutriente essencial, que é absorvido a partir do solo ou for disponibilizado por adubação foliar. Sua absorção irá depender da forma como está disponível. A necessidade de Cu é menor do que a de outros micronutrientes como Fe, Zn e Mn, mas a deficiência de Cu ocorre frequentemente em plantas que crescem em solos com baixo teor desse micronutriente, ou seja, solos ricos em calcários e em solos com alto teor de matéria orgânica (Zheng *et al.*, 2012).

O manejo do solo e o material de origem afetarão a forma como o Cu se encontra no solo: reduzido na forma Cu^+ , formando composto com enxofre, e oxidado na forma Cu^{2+} , formando compostos com nitrogênio e oxigênio (Aftab & Hakeem, 2020).

O Cu na planta apresenta baixa mobilidade, e não ocorrendo sua redistribuição, as folhas mais velhas podem acumular altas concentrações do nutriente, não o disponibilizando aos órgãos mais jovens, ocorrendo a deficiência, fato evidenciado nos estádios reprodutivos (Malavolta, 2006).

O COPT1 é fortemente expresso em raízes e regulado positivamente pela deficiência de Cu. Está ligado principalmente ao transporte específico de Cu^+ através de agentes quelantes (ácido cítrico, tartárico, málico, oxálico, metalóforo, fenóis e EDTA) (Wairich *et al.*, 2022).

Os transportadores P-type ATPase estão ligados ao transporte de metais pesados dentro da célula vegetal, compreendendo vários transportadores transmembranas, com gasto de ATP para fazer o transporte. Eles são relacionados

principalmente com a desintoxicação do Cu, seja por efluxo a partir do citosol (simplastos para o apoplasto) ou por compartimentalização no vacúolo. Esses transportadores também estão presentes nas membranas dos tilacoides do cloroplasto, com função específica de entregar Cu^{2+} à plastocianina (Wairich *et al.*, 2022; Lange *et al.*, 2017).

Os transportadores de proteínas ZIP são responsáveis pelo transporte de metais divalentes, essenciais para manter a homeostase entre íons metálicos através da membrana plasmática nas células vegetais, onde o Cu^{2+} tem absorção em maior quantidade (Mir *et al.*, 2021).

A alta concentração de Cu é tóxica para as plantas, causando efeitos negativos significativos, que vão desde o nível morfológico e fisiológico até o nível molecular, e são evidentes em todos os estágios do crescimento da planta (Wairich *et al.*, 2022; Adrees *et al.*, 2015).

Na germinação de sementes, o aumento das concentrações de Cu reduziu a germinação de sementes em diferentes espécies de plantas em até 46% (Adrees *et al.*, 2015). Em milho, o aumento das concentrações de Cu causou estresse, reduzindo o comprimento dos brotos, o comprimento das raízes e o número de raízes das plântulas em cultivo *in vitro* (Aly e Mohamed, 2012). Os efeitos sobre as raízes e as brotações laterais em monocotiledôneas foram mais afetados do que a parte aérea, com o aumento de concentração de Cu, causado pela superprodução de H_2O_2 , o que, eventualmente, enfraquece a extensibilidade da parede celular (Rather *et al.*, 2020).

Para a fotossíntese, é fundamental a presença do Cu para ativar a plastocianina (Printz *et al.*, 2016; Taiz *et al.*, 2017). Os efeitos tóxicos do cobre na biossíntese da clorofila foram relatados em várias plantas cultivadas. A clorose foliar é um sintoma primário da toxicidade do Cu, ocasionando danos à estrutura do PSII, reduzindo a fotossíntese, inibindo a eficiência fotoquímica no PSII (F_v/F_m) e os sistemas de antenas do complexo II de coleta de luz, ocasionado pela substituição dos íons Mg^{2+} nas clorofilas por Cu^{2+} , que não pode impulsionar a fotossíntese (Aly e Mohamed, 2012; Barbosa *et al.*, 2013; Metwali *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2017).

O Cu é um cofator em proteínas envolvidas em reações de transferência de elétrons, sendo responsável pela homeostase das espécies reativas de oxigênio (EROs) (Burkhead *et al.*, 2009). Tavanti *et al.* (2021) relataram que o Cu eleva a produção de enzimas antioxidantes, destaque para Superóxido Dismutase (SOD), que aumentou em 75% a catalase (CAT) em 85%. O Cu participa, além da SOD e da CAT, de outras

enzimas, incluindo ascorbato oxidase, polyfenol oxidase, citocromo C oxidase, plastocianina, Cu-metallothionei (metalotioneina), receptor de etileno e Mo-cofator (Hänsch e Mendel, 2009; Jun *et al.*, 2023).

Em relação aos efeitos sinérgicos entre Cu e N em arroz, o fornecimento de Cu melhorou a absorção de N pela regulação positiva dos níveis de expressão dos genes transportadores de NO_3^- e NH_4^+ , os NRTs e os AMTs. O fornecimento de Cu regulou significativamente os níveis de expressão dos genes primários de assimilação de amônio os GS1;2, os GS2 e os NADH-GOGAT, o que pode aumentar o nível metabólico de N nas plantas (Cui *et al.*, 2022).

A deficiência de Cu, pela sua participação nos metabolismos da fotossíntese e da lignina, pode causar lento crescimento vegetativo, baixa qualidade dos frutos, baixa formação de pigmentos responsáveis pela coloração e baixo potencial de armazenamento (Ahmed *et al.*, 2024).

O cobre tem sido usado na agricultura para controlar oomicetos, fungos e bactérias há séculos. Ele desempenha papel importante na gestão integrada de doenças, mas é essencial na agricultura orgânica, em que a gestão de doenças depende quase exclusivamente da sua utilização (Torre *et al.*, 2018).

2.4 Manganês (Mn)

O manganês (Mn) ocupa a posição de segundo micronutriente mais prevalente em solos tropicais, sendo superado apenas pelo ferro (Fe) (Silva e Berti, 2022). Sua relevância se destaca em várias funções vitais para as plantas, incluindo fotossíntese, respiração, neutralização de EROs e sinalização de hormônios (Alejandro *et al.*, 2020).

O Mn pode assumir estados de oxidação I, III, IV, VI e VII. Contudo, em sistemas biológicos, sua presença é predominante nos estados de oxidação 2^+ , 3^+ e 4^+ , sendo as formas Mn^{2+} e Mn^{4+} notavelmente estáveis, enquanto o Mn^{3+} é instável. No contexto das plantas, o Mn^{2+} destaca-se como a forma dominante, embora possa ser prontamente oxidado para Mn^{3+} e Mn^{4+} (Marschner, 2012).

No passado, a abordagem em relação ao Mn estava mais centrada na preocupação com sua toxicidade do que com seus benefícios, especialmente em solos ácidos. No entanto, com os avanços na agricultura e o lançamento da soja resistente ao glifosato, juntamente com o desenvolvimento de genótipos mais produtivos, a

deficiência desse nutriente vem ganhando mais atenção (Vendruscolo *et al.*, 2020).

De forma geral, o Mn atua como ativador enzimático e participa do sistema redox da planta. Além disso, desempenha função no complexo de evolução do O₂ na fotossíntese, importante para a fotoxidação da água. Também é importante na síntese de carboidratos, sendo componente da enzima superóxido dismutase (Martinez & Clemente, 2011).

Durante a etapa de fotoxidação da água, também conhecida como fotólise da água, um conjunto de quatro átomos de Mn se associa no centro evolutivo de oxigênio junto ao centro de reação do PSII. Este conjunto de Mn acumula quatro cargas positivas, as quais oxidam duas moléculas de água, resultando na liberação de uma molécula de O₂ e quatro prótons H⁺. Dessa maneira, esse elemento desempenha papel importante nas reações que possibilitam a transferência de elétrons para o fotossistema II (Marschner, 2012; Liu *et al.*, 2020; Prado, 2021; Silva & Berti, 2022).

Como cofator de enzimas, o Mn atua ativando mais de 30 enzimas vegetais, entre elas, descarboxilases, desidrogenases, oxidases (Alejandro *et al.*, 2020) e a nitrito redutase (Prado, 2021). Salienta-se também que em leguminosas noduladas, como a soja, que transportam principalmente o nitrogênio na forma de alantoína e alantoato para a parte aérea, a degradação dessas ureias nas folhas e na casca da semente é catalisada pela enzima alantoato amidohidrolase, que tem necessidade absoluta de Mn (Marschner, 2012).

O manganês também é importante nos processos relacionados à desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas plantas (Silva & Berti, 2022). O Mn atua em sistemas antioxidantes, ajudando a neutralizar e a eliminar as espécies reativas de oxigênio, contribuindo, assim, para a proteção das células contra danos oxidativos. Além disso, o manganês participa de várias enzimas envolvidas em processos redox, que também desempenham um papel na gestão do estresse oxidativo nas plantas (Oliveira *et al.*, 2019)

O Mn chega às raízes por meio de mecanismos de difusão e de interceptação radicular, caracterizados pela movimentação da solução do solo a curtas distâncias, influenciada pela diferença de gradiente de concentração e pelo crescimento da raiz em direção ao elemento, respectivamente. O transporte do Mn das raízes para a parte aérea ocorre na forma do íon Mn²⁺ (Martinez & Clemente, 2011) através do xilema, uma vez que o quelato de Mn com ácido cítrico tem baixa constante de estabilidade e se dissocia facilmente.

Salienta-se que o Mn é um elemento com baixa redistribuição nas plantas, o qual, estando presente nas folhas, mostra pouca mobilidade (Marschner, 2012). Em contraste, o nutriente nas raízes e nos caules pode ser redistribuído, embora a importância desse processo no fornecimento do elemento possa variar de acordo com a espécie.

O manganês apresenta baixa mobilidade no floema, e os primeiros sinais de sua deficiência se manifestam nas folhas mais jovens. A falta desse nutriente resulta em clorose, evidenciada por tons amarelo-esverdeados nas folhas mais novas, especialmente entre as nervuras, que permanecem na tonalidade verde-escura. Em termos metabólicos, a carência de Mn provoca danos nos cloroplastos, impactando a fotólise da água no fotossistema II, comprometendo, assim, o fornecimento de elétrons essenciais para a fotossíntese (Fernando & Lynch, 2015).

Segundo Martinez e Clemente (2011) e Liu et al. (2020), os sintomas de toxidez de Mn são mais comuns que os de deficiência, sendo os principais: inibição da taxa de crescimento de brotos e raízes; manchas marrons nas folhas; redução do metabolismo e do crescimento das plantas; e queda de produtividade (peso de grãos, por exemplo).

2.5 Zinco (Zn)

O zinco (Zn) é o segundo metal de transição mais prevalente em organismos vivos, sucedendo o Ferro (Fe). A concentração média total de Zn nos solos cultivados gira em torno de 65 mg kg⁻¹. A absorção predominante do Zn ocorre na forma de cátion divalente (Zn²⁺), havendo, em condições de pH elevado, suposição de que também seja absorvido como cátion monovalente (ZnOH⁺) (Marschner, 2012).

De forma geral, o Zn desempenha funções relacionadas às propriedades de cátion bivalente com forte tendência a formar complexos tetraédricos. Age como componente metálico de enzimas ou como cofator em grande número delas. Álcool, lactato, malato e glutamato desidrogenase, superóxido dismutase, anidrase carbônica e RNA-polimerase são enzimas que contêm Zn. Como ativador enzimático, ele participa do metabolismo de carboidratos, de proteínas, de triptofano e de ácido indolacético (Beutler *et al.*, 2014; Martinez & Clemente, 2011; Marschner, 2012).

Salienta-se que o Zn é frequentemente encontrado em níveis inadequados em

solos agrícolas ao redor do mundo, sendo que cerca de metade dos solos destinados à produção de cereais apresenta deficiência deste nutriente (Beutler *et al.*, 2014).

O Zn desempenha a função de cofator em mais de 300 enzimas, com a maioria delas pertencendo a categorias como proteínas com dedos de zinco (Zinc-finger proteins), RNA polimerases e DNA polimerases. É o único metal presente em todas as seis classes de enzimas, compreendendo oxidoredutases, transferases, hidrolases, liases, isomerases e ligases (Gupta *et al.*, 2016).

O Zn controla as atividades, a estabilização conformacional e o processo de dobramento de diversas proteínas, incluindo enzimas. Adicionalmente, desempenha papel crucial na integridade e estabilização de membranas, na mitigação do estresse oxidativo (Marschner, 2012) e age como mensageiro secundário intracelular (Yamasaki *et al.*, 2007). Também está envolvido em diversos processos fisiológicos nas plantas, como a regulação hormonal (por exemplo, síntese de triptofano, precursor do AIA), transdução de sinais através de cinases de proteínas ativadas por mitógenos, processos de reparo do complexo PSII durante a fotoinibição e na manutenção da concentração de CO₂ no mesofilo (Tryfon *et al.*, 2023).

No transporte de longa distância pelo xilema, o Zn está associado a ácidos orgânicos ou ocorre com cátion divalente livre. Na seiva do floema, as concentrações de Zn são relativamente elevadas, sugerindo a possibilidade de complexação do Zn com solutos orgânicos de baixo peso molecular (Marschner, 2012).

O Zn atinge as raízes por meio de mecanismos de difusão, caracterizados pelo deslocamento da solução do solo em curtas distâncias, influenciado pela diferença de potencial. Em geral, a mobilidade desse nutriente no floema é limitada (Marschner, 2012; Tito *et al.*, 2016), resultando em concentrações mais elevadas de zinco nas raízes em comparação com a parte aérea, especialmente quando as plantas estão crescendo em solos ricos em Zn.

Os sintomas de deficiência de Zn são caracterizados pelo aparecimento de regiões cloróticas, em seguida, ficam necrosadas, folhas pequenas, redução do crescimento, formação de rosetas e encurtamento dos entrenós (Martinez e Clemente, 2011). Salienta-se que a redução do tamanho das folhas é corriqueira nas folhas jovens em razão da baixa mobilidade deste nutriente no floema (Mascarenhas *et al.*, 2013).

A toxidez por Zn é caracterizada pela pigmentação vermelha no pecíolo das folhas e nas nervuras e também pela clorose resultante da deficiência de Fe induzida. O

Zn impede a redução do Fe e seu transporte para o interior das plantas (Martinez & Clemente, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido no município de Nova Crixás – GO, do dia 15 de maio de 2023 ao dia 04 de julho de 2023. O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen-Geiger, é do tipo Aw, clima tropical com estação seca no inverno (Cardoso *et al.*, 2014).

O genótipo de milho utilizado foi o Pionner 3858 PWU com a transgenia RR2, planta de porte alto, tipo de cariopse amarelo-alaranjado, ciclo precoce, e a densidade de semeadura adotada foi de 70.000 plantas ha⁻¹. Cada unidade experimental consistia em uma caixa plástica com dimensões de 0,51 m de comprimento, 0,31 m de largura e 0,285 m de profundidade, capacidade de 0,045 m³, com quatro plantas em cada, totalizando 20 unidades experimentais, com 16 plantas analisadas por tratamento.

O delineamento utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados, com quatro repetições e cinco tratamentos, compreendendo glifosato + Cu-EDTA, glifosato + Zn-EDTA, glifosato + Mn-EDTA, glifosato + Cu-EDTA + Mn-EDTA + Zn-EDTA e somente glifosato. As doses utilizadas foram 9,66 g ha⁻¹ de Cu-EDTA, 73,5 g ha⁻¹ de Zn-EDTA, 62,5 g ha⁻¹ de Mn-EDTA e 1920 g ha⁻¹ de glifosato. As doses foram baseadas na bula dos produtos comerciais utilizados.

O ambiente foi protegido com filme plástico transparente de 100 micras, com altura do pé direito de 2,5 metros, com borda de um metro para cada uma das extremidades do ambiente protegido. A proteção foi para evitar chuva sobre as plantas.

3.1 Variáveis meteorológicas

Os dados meteorológicos do projeto foram registrados por um termohigrômetro instalado no interior da área coberta, com leituras diárias às 12:00 h, com coleta de informações de temperatura e de umidade relativa (Figura 3).

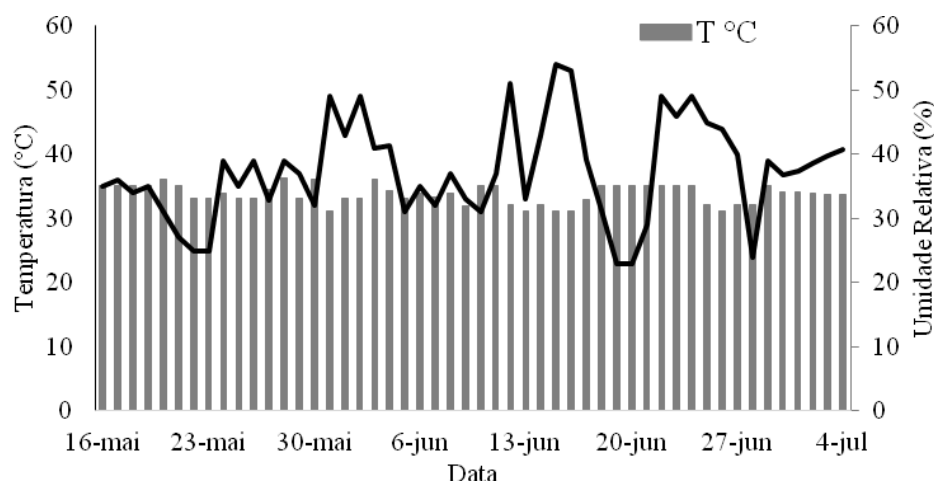


Figura 3. Dados meteorológicos diários registrados às 12 h no período do experimento.

No dia das avaliações fisiológicas (20, 27 e 34 dias após a emergência - DAE = 0 dia ante, 7 dias e 14 dias após a aplicação do Glifosato), foram avaliados a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e o déficit de pressão de vapor (DPV). Os dados obtidos com IRGA constam na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis climáticas no dia das avaliações fisiológicas, radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2}$), déficit de pressão de vapor (DPV, kPa), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (UR, %).

Variáveis	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
PAR	818,85	742,55	620,97
DPV	2,88	2,21	3,69
Temperatura	35,2	32,9	35,2
UR	31	39,15	49

DAAH: Dias após a aplicação do herbicida. Dados coletados no período das 8 h até as 11 horas nos dias de avaliação com IRGA.

3.2 Preparo do substrato e adubação

Foram coletadas amostras de solo na região de Nova Crixás – GO, na profundidade de 20 a 60 cm, predominando o latossolo. De acordo com a análise de solo, foram feitas calagem, gessagem e adubação para correção de fósforo e potássio para o nível crítico da cultura, segundo critérios definidos por Sousa e Lobato (2004), utilizando o formulado 05-25-15. Posteriormente, foi distribuído o adubo de base, utilizando Phusion NP 10-50-00, com 0,3% de Cu, 0,3% de Zn, 0,3% de Mn e 0,3% de B. A adubação de base foi feita segundo a análise química de solo, Tabela 2, em

concordância com as recomendações, utilizando 20 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 100 kg ha⁻¹ de fósforo (Sousa & Lobato, 2004).

Tabela 2. Análise química e de textura do solo após a coleta.

CaCl ₂	g dm ⁻³	-----cmolc dm ⁻³ -----					---mg dm ⁻³ ---	%	%	
pH	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	K	P	V	m
4,7	17	0,34	0,17	0,04	2,1	2,6	10	0,71	20,2	6,9
Micronutrientes (mg dm ⁻³)										
B		Cu		Mn		Fe		Zn		
0,08		0,37		1,9		17		0,16		
Textura (g kg ⁻¹)										
Areia				Silte				Argila		
497				20				483		

3.2 Instalação e condução da cultura

As sementes de milho RR2 foram adquiridas diretamente dos produtores da região.

As sementes do milho tinham tratamento industrial padrão com o inseticida Cropstar® (Imidacloprido+Tiodicarbe) na dose de 350 mL/60000 sementes para o manejo da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) e da lagarta elasm (*Elasmopalpus lignosellus*). Foi utilizado o fungicida Derosal Plus® (carbendazim +tiram) na dose de 60 ml/60000 semente para o manejo da podridão do colmo (*Fusarium moniliforme*), podridão-dos-grãos armazenados (*Aspergillus flavus*), helmintosporiose (*Helminthosporium maydis*) e olho-azul (*Penicillium oxalicum*).

A semeadura foi feita diretamente na caixa, com sulco de 10 cm para aplicação da adubação de plantio e sulco de três centímetros para semeadura.

3.2.1 Pulverização foliar com os micronutrientes antes da aplicação do herbicida

A pulverização foliar dos tratamentos foi ajustada com o volume da aplicação com água, visando a cobrir toda a área foliar da planta. Para isso, antes das aplicações, foram feitas calibrações com o auxílio de um pulverizador manual com Dosador Universal de Líquidos, da marca Guarany, quantificando o volume necessário para

borrifar as soluções nas plantas. As aplicações dos tratamentos com micronutrientes foram feitas aos 13 DAE, com início da aplicação às 8 horas da manhã.

3.2.2 Pulverização do herbicida

A pulverização de glifosato foi feita aos 20 DAE, ocorrendo sete dias após a aplicação dos tratamentos com os micronutrientes. As pulverizações seguiram o padrão de taxa de aplicação de 316,5 litros ha⁻¹, convertidos para área do recipiente utilizado.

A adubação de cobertura foi feita com adubo granulado ureia agrícola comum, dividido em duas vezes: a metade da dose na primeira fase do estágio de desenvolvimento V1 aos 7 DAE, quando as plantas apresentavam uma folha completamente expandidas; e a outra metade da dose, na segunda cobertura no estágio V4 e aos 12 DAE. As adubações foram feitas manualmente, distribuindo o adubo via fertirrigação na caixa plástica.

3.3 Manejo da irrigação

Inicialmente, foi feito o teste de capacidade volumétrica das caixas plásticas. O teste foi feito com três caixas plásticas com 45 kg de substrato cada. As caixas foram mantidas em uma caixa d'água com água com 2/3 de altura da caixa plástica por 24 h. Posteriormente, foram pesadas até a massa ficar constante, a cada 12 horas. Após, foi definido que cada caixa plástica com 45 kg de substrato atingisse a capacidade de campo, tendo sido necessários 23 litros de água.

Para determinação da evapotranspiração de referência (ET₀), foi utilizando o lisímetro de pesagem mecânica, que consistia na pesagem direta de uma caixa plástica por tratamento diariamente, utilizando uma balança digital com precisão de 0,1 kg. O método é descrito por Bernardo et al. (2019) na Equação 1.

Equação 1:

$$ET_0 = \frac{\Delta P}{S}$$

em que:

ET₀- Evapotranspiração de referência em mm dia⁻¹;

ΔP – variação do peso da caixa em kg; e

S – área da caixa, em m^2 .

A lâmina bruta (LB) aplicada na cultura foi calculada pela equação 2, considerando a eficiência da irrigação em 100%, pois a quantificação de água aplicada por caixa foi feita utilizando proveta para mensurar a quantidade, sempre no final da tarde (17 horas), tendo os turnos de rega sido diários.

Equação 2:

$$LB = ET_o * K_c$$

O coeficiente de cultura (K_c) para os cálculos de lâmina de água considerou que a cultura seria colhida no estágio de V8 a V10, que corresponde até a fase I e II, valores utilizados de acordo com Albuquerque (2010): fase I foi de 23 dias, com valores de 0,3 a 0,5, e fase II foi dos 23 dias aos 42 dias, com variação de 0,8 a 0,85.

3.4 Variáveis analisadas

As variáveis fisiológicas (fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_v/F_m)) foram avaliadas aos 20, 27 e 34 DAE, durante o período vegetativo. Aos 20 DAE, foram sete dias após aplicação dos micronutrientes e antes da pulverização do glifosato, sendo que as 27 e 34 DAE foram feitas observações de efeito e recuperação da planta aos danos causados pelo herbicida.

Essas avaliações foram feitas entre 8 h e 11 h em duas plantas escolhidas ao acaso, na última folha totalmente expandida, em cada unidade experimental, utilizando o analisador de gases infravermelho, IRGA, portátil, modelo CID-340.

Os dados foram extraídos após a estabilização das variáveis em análise. A análise de fluorescência foi feita utilizando o fluorômetro modelo FluorPen FP 110/D, Drásov, Czech Republic, em duas folhas maduras completamente expandidas, da base para o ápice da planta, de plantas escolhidas ao acaso, que não estivessem sombreadas. As folhas foram aclimatadas durante 20 minutos no escuro e depois saturadas com luz actínica de $3000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

O teor relativo de clorofila e/ou índice de SPAD foi determinado utilizando o clorofilômetro MODEL SPAD 502, Konica Minolta, Japan. Foi feita a mensuração do índice SPAD, às 11 horas, após fazer as análises pelo fluorômetro e IRGA, utilizando as mesmas plantas e folhas.

As análises morfométricas na planta ocorreram aos 43 DAE, colhendo as quatro plantas por repetição, que foram analisadas quanto ao diâmetro do colmo na altura do colo da planta (DC), altura da planta (AP), utilizando uma fita métrica e paquímetro. Também foi mensurada a área foliar (AF) total das plantas de acordo com a metodologia de Garcia et al. (2008). As quatro plantas analisadas foram separadas em folha, colmo e raiz, picadas em pequenos fragmentos e secas em estufa de circulação forçada por 72 horas e pesadas, obtendo massa seca da raiz, colmo e folha.

3.5 Tratamento estatístico

De posse dos dados, eles foram submetidos à análise de variância e separados em classes distintas, utilizando o teste de Tukey a nível de 5%. Foi utilizado o programa estatístico Sistema de Análise de Variância (SISVAR).

4. RESULTADOS

A Tabela 3 contém os dados do efeito do período pré e pós-aplicação de glifosato sobre as variáveis fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) com os diferentes tratamentos com micronutrientes.

A (A) não diferiu entre os dias de avaliação, aos: 0 DAAH, 7 DAAH e 14 DAAH (Dias após aplicação do herbicida), mas diferiu entre os tratamentos aos 14 DAAH, uma vez que foi maior nas plantas tratadas com todos os micronutrientes combinados.

A (E) aos 0 DAAH não diferiu entre tratamentos. Aos 7 DAAH, houve aumento nas plantas tratadas com Cu isolado, com valor 27,40% maior que os demais tratamentos. O menor valor foi observado para tratamento com Mn isolado, com valor 8,85% menor do que os tratamentos de Zn, três micronutrientes associados e glifosato. Contudo, no 0 DAAH e 14 DAAH, não houve influência da adubação com nenhum dos micronutrientes utilizados, ou de combinações dos três, associados à aplicação de glifosato.

Em relação às avaliações de E entre os diferentes dias: ao 0 DAAH, todos os tratamentos apresentaram a maior E ; aos 7 DAAH, o tratamento com o Mn isolado teve o menor valor de E ; e aos 14 DAAH, o tratamento com Mn aumentou em 28,18%, em relação à avaliação anterior.

A variável g_s , ao 0 DAAH, não diferiu entre os tratamentos. Aos 7 DAAH, é possível observar menor g_s , cujo efeito foi mitigado apenas pelo tratamento com Cu isolado, apresentando-se 34,85% maior que a média dos demais tratamentos. Aos 14 DAAH, não havia mais diferenças entre os tratamentos.

Entre os dias de avaliações, todos os tratamentos apresentaram o maior valor de g_s ao 0 DAAH. Aos 7 DAAH, apenas os tratamentos com Cu, isolado ou em associação, não apresentaram redução dos valores de g_s . E para os 14 DAAH, os tratamentos de Zn isolado e glifosato isolado apresentaram os menores valores de g_s .

Tabela 3. Efeitos da aplicação de micronutrientes e glifosato na fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (gs , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de plantas de milho (*Zea mays*), híbrido Pioneer 3858 PWU, após aplicação do herbicida.

Tratamentos	A		
	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
Cu + Glifosato	25,40aA	26,65aA	15,12aB
Mn + Glifosato	27,68aA	23,04aA	19,58aB
Zn + Glifosato	27,79aA	22,95aA	13,70aB
Cu, Mn e Zn + Glifosato	23,70aA	26,05aA	20,24aA
Glifosato	25,36aA	25,48aA	15,03aB
CV (%)	31,78		
Tratamentos	E		
	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
Cu + Glifosato	4,55aA	3,38aB	2,87aB
Mn + Glifosato	4,88aA	2,37bC	3,30aB
Zn + Glifosato	4,77aA	2,59abB	2,83aB
Cu, Mn e Zn + Glifosato	4,13aA	2,56abB	2,54aB
Glifosato	4,95aA	2,66abB	2,93aB
CV (%)	22,23		
Tratamentos	gs		
	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
Cu + Glifosato	165,10aA	175,60aA	78,04aB
Mn + Glifosato	185,92aA	101,66bB	91,26aB
Zn + Glifosato	169,60aA	114,57bB	76,40aC
Cu, Mn e Zn + Glifosato	142,70aA	124,51bA	75,31aB
Glifosato	187,44aA	116,88bB	77,79aC
CV (%)	23,58		

Entre os tratamentos, as médias seguidas de mesma letra, minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$), e as médias seguidas de mesma letra, maiúsculas em linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$). CV: coeficiente de variação.

A Tabela 4 apresenta os dados da razão F_v/F_m e o índice SPAD. Não houve alteração em função dos tratamentos estudados. No entanto, ocorreu influência na razão de F_v/F_m e no índice SPAD entre os dias avaliados.

Aos 14 DAAH, houve redução na razão F_v/F_m nas plantas tratadas apenas com o glifosato, comparativamente aos demais dias avaliados. Não ocorreu variação dessa variável, entre os dias de avaliação, nas plantas dos demais tratamentos.

O índice SPAD apresentou alteração entre os dias avaliados nos tratamentos com Mn isolado e glifosato isolado com menores valores.

O padrão de comportamento foi consistente em ambos os tratamentos. Nos 0 DAAH, foram registrados os valores mais baixos. Houve aumento de 55,74% para o Mn isolado e de 48,93% para o glifosato isolado aos 7 DAAH, seguido por uma redução aos 14 DAAH. Para o Mn isolado, a redução foi de 14,17%, enquanto para o glifosato isolado, foi de 38,94%.

Tabela 4. Efeitos de micronutrientes e glifosato na razão da fluorescência variável e máxima (Fv/Fm) e índice SPAD em (*Zea mays*), híbrido Pioneer 3858 PWU, após aplicação do herbicida.

Tratamentos	Fv/Fm		
	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
Cu + Glifosato	0,765aA	0,785aA	0,778aA
Mn + Glifosato	0,780aA	0,793aA	0,770aA
Zn + Glifosato	0,770aA	0,798aA	0,778aA
Cu, Mn e Zn + Glifosato	0,770aA	0,798aA	0,768aA
Glifosato	0,773aAB	0,793aA	0,753aB
CV (%)	31,78		
Tratamentos	SPAD		
	0 DAAH	7 DAAH	14 DAAH
Cu + Glifosato	36,70aA	56,60aA	42,86aA
Mn + Glifosato	30,72aB	55,01aA	48,18aAB
Zn + Glifosato	52,04aA	60,13aA	44,92aA
Cu, Mn e Zn + Glifosato	41,96aA	51,94aA	49,17aA
Glifosato	28,95aAB	59,07aA	36,67aB
CV (%)	22,23		

Entre os tratamentos, as médias seguidas de mesma letra, minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$), e as médias seguidas de mesma letra, maiúsculas em linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$). CV: coeficiente de variação.

A Tabela 5 contém os dados das análises morfológicas. As variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (D), massa seca do colmo (MSC), massa seca das folhas (MSF) e a área foliar (AF) não tiveram influência da adubação com nenhum dos micronutrientes utilizados, ou com a combinação dos três, associados à aplicação do glifosato. Entretanto, a massa seca da raiz (MSR) se reduziu quando da aplicação somente de glifosato e quando da aplicação do micronutriente isolado ou em conjunto, ela obteve a maior MSR.

Tabela 5. Efeitos de micronutrientes e glifosato na altura da planta (AP, cm), diâmetro do colmo (D, mm), massa seca da raiz (MSR, g), massa seca do colmo (MSC, g), massa seca das folhas (MSF, g) e área foliar (AF, cm²).

Tratamentos	AP (cm)	D (mm)	MSR (g)	MSC (g)	MSF (g)	AF (cm ²)
Cu + Gli	47,031a	18,578a	11,956a	9,356a	22,675a	2926,415a
Mn + Gli	48,075a	17,891a	12,648a	10,458a	23,069a	3322,437a
Zn + Gli	48,031a	18,758a	11,681a	11,254a	21,582a	2937,311a
Cu, Mn e Zn + Gli	49,937a	18,865a	11,700a	9,899a	20,150a	2991,802a
Glifosato	45,538a	17,726a	9,275b	9,300a	21,231a	2788,928a
CV%	19,40	11,60	16,03	28,83	15,14	21,01

Entre os tratamentos, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$). CV: coeficiente de variação.

5. DISCUSSÃO

O glifosato é um herbicida que inibe a atividade da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), que tem ação-chave na rota do chiquimato (Wang *et al.*, 2024). Assim sendo, afeta a síntese de substâncias que dependem do funcionamento dessa rota, a exemplo da lignina, de alguns metabólitos secundários de defesa e de aminoácidos aromáticos (Cooley e Foy, 1992; Zobiolo *et al.*, 2010; Mondal *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2022; Bortolheiro *et al.*, 2023) e, por consequência, afeta também os eventos que dependem dessas biomoléculas. Embora esses sejam efeitos esperados em plantas não resistentes ao glifosato, percebe-se que plantas transgênicas tolerantes a esse herbicida não morrem pela sua exposição, elas continuam tendo seu desenvolvimento negativamente afetado pela menor produção de compostos reconhecidamente dependentes da rota do chiquimato (Zobiolo *et al.*, 2010; Bedin *et al.*, 2020; Smedbol *et al.*, 2020; Einhardt *et al.*, 2022) ou por aspectos não diretamente relacionados a essa rota, a exemplo da redução no conteúdo de clorofilas e de taxas fotossintéticas (Zobiolo *et al.*, 2010; Einhardt *et al.*, 2020; Braz *et al.*, 2022). O que sugere que a influência do glifosato nas plantas não se restringe a seus efeitos diretos sobre a EPSPS.

Um dos efeitos conhecidos do glifosato, que tem potencial para influenciar o metabolismo das plantas de forma mais ampla, é sua capacidade de se quelatar com íons metálicos, portanto, com vários micronutrientes essenciais, ou mesmo com alguns macronutrientes, reduzindo sua disponibilidade à planta. Isso se deve à presença de ácidos aminofosfônicos em sua composição (Hasanuzzaman *et al.*, 2020; Mohy-Ud-Din *et al.*, 2023). Assim, o glifosato como substância quelante de nutrientes tem sido investigado como um dos principais motivos para ele causar danos muito variados, mesmo às plantas tolerantes, com se observa nos estudos de Zobiolo *et al.* (2010), Moreira *et al.* (2016), Codognoto *et al.* (2021) e Lanzarin *et al.* (2022). Esse largo espectro de danos possíveis, que afetam desde a fotossíntese à produção de órgãos reprodutivos, decorre da necessidade da disponibilidade dos vários micronutrientes metálicos participando de diferentes eventos relacionados ao metabolismo e ao desenvolvimento das plantas.

No presente trabalho, o resultado mais proeminente foi a menor quantidade de massa seca de raízes ter sido observada nas plantas do tratamento em que se utilizou apenas glifosato (Tabela 5), sendo que em todos os tratamentos em que se utilizou

adubação foliar de micronutrientes, independentemente do elemento, as plantas tiveram maior acúmulo de massa seca nas suas raízes, comparativamente às plantas não adubadas. Ou seja, a adubação foliar com micronutrientes mitigou o efeito negativo do glifosato sobre o crescimento radicular das plantas de milho, evidenciando que a provável quelatação de metais pelo glifosato era o fator que estava prejudicando o crescimento das raízes. Isso se justifica quando analisamos a importância desses micronutrientes sobre o crescimento radicular, cuja dependência de manganês é comprovada nos trabalhos de Ohki (1984), Sadana, Lata e Claassen (2002) e Gao et al. (2018). A dependência de zinco é observada nos trabalhos de Hacısalıhoğlu et al. (2004) e Mousavi, Galavi e Rezaei (2013) e a dependência de cobre é observada nos trabalhos de Khurana & Chatterjee (2007) e Perea-García et al. (2021). Além destes nutrientes citados, outros nutrientes metálicos que não foram utilizados no experimento do presente estudo também podem influenciar no crescimento de raiz, a exemplo do molibdênio (Imran *et al.*, 2021).

Como observado neste estudo, o glifosato é um herbicida comumente relacionado ao desencadeamento de eventos que levam à redução no desenvolvimento das raízes (Barbosa *et al.*, 2020; Bidoia *et al.*, 2023; Oliveira Neto *et al.*, 2023), o que, por consequência, pode levar à redução da aquisição de nutrientes pelas plantas. A redução da massa seca dos órgãos vegetativos, como raízes, pode ocorrer como consequência de baixa taxa fotossintética, fenômeno também afetado pela exposição das plantas, mesmo que tolerantes, ao glifosato (Zobiolo *et al.*, 2010; Zobiolo *et al.*, 2012; Martinelli *et al.*, 2022). No entanto, o fato de neste trabalho não terem sido observadas diferenças das taxas fotossintéticas entre as plantas dos diferentes tratamentos (Tabela 4), foi observada diferença no acúmulo de massa radicular (Tabela 3), reforçando a ideia de que este é um efeito decorrente da quelatação de nutrientes metálicos pelo glifosato, como discutido previamente. Nesse sentido, a interferência desses nutrientes sobre o crescimento das raízes pode ter decorrido de suas respectivas importâncias para uma adequada partição e ou alocação de fotoassimilados, como já observadas por Bernal & Krämer (2021) para o cobre, por Jhanji & Sadana (2018) para o manganês e por Jakhar, Yadav e Kumawat (2014) para o zinco.

Assim como as taxas de fotossíntese líquida não foram afetadas pelos tratamentos, não se observou neste trabalho nenhum fator que pudesse limitá-las, uma vez que não se observou variação nos índices SPAD que pudesse supor alterações significativas nos conteúdos de clorofila (Hu *et al.*, 2010), ao que se soma a não

existência de variação na razão F_v/F_m , que é um importante parâmetro de avaliação de integridade ou de danos ao aparato fotoquímico da fotossíntese (Sun & Wang, 2018). Um outro fator que poderia limitar a fotossíntese seria a condutância estomática, que, embora tenha sido influenciada pelos tratamentos, não resultou em limitação à fotossíntese.

Observa-se na avaliação feita aos sete dias após a aplicação do glifosato que o herbicida induziu menor condutância estomática (Tabela 3), cujo efeito foi mitigado apenas pelo tratamento com cobre. Quatorze dias após a aplicação do herbicida, seu efeito sobre a condutância estomática já havia sido superado, não havendo mais diferenças entre os tratamentos. Este resultado permite sugerir uma possível indisponibilidade de cobre, pela quelatação com o glifosato, apenas na data de avaliação mais próxima da aplicação do herbicida, a ponto de afetar o funcionamento dos estômatos. Embora de fundamento ainda não conhecido, sabe-se da existência de uma relação entre a disponibilidade de cobre e a condutância estomática (Hunter *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2015). Essa limitação da condutância estomática não foi suficiente para afetar as taxas de fotossíntese líquida, uma vez que ela só passa a limitar a fotossíntese após ultrapassar um limiar, comumente atingido em condições de restrição hídrica severa (Drake *et al.*, 2017), o que não foi o caso do experimento em questão, no qual as plantas não sofreram estresse por deficiência hídrica.

O efeito da condutância estomática, em função dos tratamentos, se refletiu parcialmente nas taxas de transpiração, em que se observa que nas plantas com maior condutância estomática, aos sete dias após a aplicação do herbicida, também ocorria a maior taxa de transpiração (Tabela 3), um efeito esperado por serem dois fenômenos dependentes de um mesmo aparato físico, a abertura dos estômatos (Sadok *et al.*, 2021). Muito embora as taxas de transpiração também possam sofrer influência do déficit de pressão de vapor (Grossiord *et al.*, 2020), esses fenômenos eram diferentes nos dias das avaliações (Tabela 5), cujo efeito é comprovado pelas taxas de transpiração em função do dia da avaliação (Tabela 3).

Ainda que não tenha havido influência dos tratamentos sobre as taxas de fotossíntese, houve efeito dos dias de avaliação. Nesse caso, diferentemente de uma redução moderada na condutância estomática de plantas de alguns tratamentos, aos 7 dias após da aplicação do herbicida, em comparação ao dia zero, não acompanhada pela redução das suas taxas fotossintéticas, percebe-se que houve redução mais drástica na condutância estomática aos 14 dias após a aplicação do herbicida, acompanhada pela

redução das taxas fotossintéticas em plantas de todos os tratamentos, com exceção daquelas que foram tratadas com a combinação dos três micronutrientes em estudo, as quais não tiveram redução de suas taxas fotossintéticas, o que, por sua vez, revela um efeito benéfico do uso combinado dos três nutrientes para o cultivo do milho em condição de campo.

O efeito do glifosato interferindo na condutância estomática é conhecido em várias espécies (Yanniccari *et al.*, 2012; Brillon, Moingt e Lucotte, 2023), no entanto seu fundamento ainda não é claramente elucidado, muito embora haja evidências da importância de um balanço de aminoácidos, incluindo os aromáticos, para o bom funcionamento dos estômatos (Thakur, Thakur e Rai, 1988; Sharma e Rai, 1989; Sakata *et al.*, 2023; Tsuruda e Yoshida, 2023), cujo balanço de aminoácidos nas células é alterado pelo glifosato. Também há acúmulo celular de produtos inibidores da abertura dos estômatos, como os quinatos (Orcaray *et al.*, 2010), que resultam da exposição das plantas a herbicidas. Ressalta-se também o próprio desbalanço hormonal promovido pelo glifosato, favorecendo a ação do ácido abscísico (Qin *et al.*, 2023), que pode resultar na indução do fechamento estomático. É importante salientar que a condutância estomática pode ser influenciada pelas diferenças de radiação entre os dias de avaliação, como ocorrido no experimento referente a este trabalho (Tabela 5).

Diante dos resultados observados, é importante ressaltar que não se descarta a possibilidade de que a aplicação dos nutrientes já quelatados ao EDTA, caso do experimento em questão, possa influenciar os efeitos quelantes do glifosato. Ao se pensar no efeito nutricional, é importante também ressaltar que o uso de nutrientes quelatados interfere na sua disponibilização para as plantas (Sekhon, 2003). Também é importante levar em consideração que o genótipo interfere na metabolização do glifosato, já tendo sido observado que milho tem menos acúmulo de ácido aminometilfosfônico (AMPA), produto mais direto da degradação do glifosato, do que outras espécies (Reddy *et al.*, 2018), e cuja substância tem sido relacionada diretamente a vários efeitos fisiológicos já abordados aqui em função da exposição das plantas ao glifosato, como sua influência na performance fotossintética e na produção de clorofila (Gomes *et al.* 2016; Gomes *et al.* 2022). Além disso, é importante atentar para os efeitos aqui observados relacionados à aplicação do glifosato, com base apenas na recomendação de bula, não sendo prudente extrapolar essas respostas para situações de subdosagem ou superdosagem.

6. CONCLUSÕES

A adubação foliar com micronutrientes mitigou o efeito negativo do glifosato sobre o crescimento radicular das plantas de milho, podendo ser utilizados Cu, Zn e Mn isolados ou em associação para mitigar os efeitos negativos concernentes ao crescimento radicular.

O glifosato causa alteração na condutância estomática, não tendo causado prejuízos à fotossíntese líquida da planta de milho.

O uso combinado de Cu, Mn e Zn induziu maior estabilidade nas taxas de fotossíntese líquida ao longo do tempo nas plantas de milho tratadas com glifosato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. E. P. de. (2010). Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo. Embrapa Milho e Sorgo (Circular Técnica, 136), 24.
- Adegas, F. S., Correia, N. M., da Silva, A. F., Concenço, G., Gazziero, D. L. P., & Dalazen, G. (2022). Glyphosate-resistant (GR) soybean and corn in Brazil: past, present, and future. *Advances in Weed Science*, 40(spe1), 1–12. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five004>
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Zia-ur-Rehman, M., Irshad, M. K., & Bharwana, S. A. (2015). The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11), 8148–8162. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4496-5>
- Adriano, R. C., Mendes, K. F., Alcántara-de la Cruz, R., do Nascimento, J. L. M., Ferreira, L. R., & Tornisielo, V. L. (2021). Effect of Fertiactyl® on the absorption and translocation of ¹⁴C-glyphosate in young eucalyptus plants. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 56(3), 235–240. <https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1872325>
- Aftab, T., & Hakeem, K. R. (2020). *Plant Micronutrients* (Springer C, Número 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-49856-6>
- Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., Hayat, F., Deng, L., Narejo, M. un N., Bozdar, B., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on Horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae*, 323(July 2023), 112512. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>
- Albrecht, A.J.P., Albrecht, L. P., Krenchinski, F. H., Placido, H. F., Lorenzetti, J. B., Victoria Filho, R., & Barroso, A. A. M. (2014). Behavior of RR soybeans subjected to different formulations and rates of glyphosate in the reproductive period. *Planta Daninha*, 32(4), 851–859. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582014000400020>
- Albrecht, Alfredo Junior Paiola, Albrecht, L. P., Barroso, A. A. M., & Victória Filho, R. (2014). O milho RR2 e o glyphosate: Uma revisão. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 13(1), 58. <https://doi.org/10.7824/rbh.v13i1.279>

- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11(March), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
- Aly, A. A., & Mohamed, A. A. (2012). The impact of copper ion on growth, thiol compounds and lipid peroxidation in two maize cultivars (*Zea mays* L.) grown in vitro. *Australian Journal of Crop Science*, 6(3), 541–549.
- Amarante Junior, O. P. de, Santos, T. C. R. dos, Brito, N. M., & Ribeiro, M. L. (2002). Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. *Química Nova*, 25(4), 589–593. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422002000400014>
- Barbosa, E. A., Silva, I. M. da, França, A. C., Silva, E. de B., & Matos, C. da C. de. (2020). Evaluation of leaf and root absorptions of glyphosate in the growth of coffee plants. *Arquivos do Instituto Biológico*, 87. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000762018>
- Barbosa, R. H., Tabaldi, L. A., Miyazaki, F. R., Pilecco, M., Kassab, S. O., & Bigaton, D. (2013). Absorção foliar de cobre por plantas de milho: Efeitos no crescimento e rendimento. *Ciência Rural*, 43(9), 1561–1568. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000900005>
- Bedin, E., Caverzan, A., Silveira, D. C., & Chavarria, G. (2020). Foliar fortification of Copper (Cu) in *Glycine max* L. for the protection against Asian Soybean Rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd. & P.Syd.). *Plant Science Today*, 7(4). <https://doi.org/10.14719/pst.2020.7.4.737>
- Bernal, M., & Krämer, U. (2021). Involvement of Arabidopsis Multi-Copper Oxidase-Encoding LACCASE12 in Root-to-Shoot Iron Partitioning: A Novel Example of Copper-Iron Crosstalk. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.688318>
- Bernardo, S., Mantovani, E. C., Silva, D. D., & Soares, A. A. (2019). *Manual de Irrigação* (9° ed.). Editora UFV
- Bernier Brillon, J., Moingt, M., & Lucotte, M. (2023). Influence of No-Till System with or without Cover Crops on Stomata Sensitivity of Glyphosate-Tolerant Soybeans to Vapor Pressure Deficit. *Physiologia*, 3(4), 531–541. <https://doi.org/10.3390/physiologia3040039>
- Beutler, A. N., Silva, V. N., Deak, E. A., Burg, G. M., Schmidt, M. R., & Toebe, M. (2014). Zinc doses, sources and application times: Seed physiological potential and flooded rice yield. *Australian Journal of Crop Science*, 8(11), 1517–1525.

- Bidóia, V. S., Neto, J. C. dos S., Maciel, C. D. de G., Tropaldi, L., Carbonari, C. A., Duke, S. O., & Carvalho, L. B. de. (2023). Lack of Significant Effects of Glyphosate on Glyphosate-Resistant Maize in Different Field Locations. *Agronomy*, *13*(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041071>
- Braz, G. B. P., Freire, E. S., Pereira, B. C. S., Farnese, F. dos S., Souza, M. de F., Loram-Lourenço, L., & Sousa, L. F. de. (2022). Agronomic Performance of RR® Soybean Submitted to Glyphosate Application Associated with a Product Based on *Bacillus subtilis*. *Agronomy*, *12*(12), 2940. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122940>
- Burkhead, J. L., Gogolin Reynolds, K. A., Abdel-Ghany, S. E., Cohu, C. M., & Pilon, M. (2009). Copper homeostasis. *New Phytologist*, *182*(4), 799–816. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02846.x>
- Cakmak, I., Yazici, A., Tutus, Y., & Ozturk, L. (2009). Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. *European Journal of Agronomy*, *31*(3), 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.07.001>
- Cardoso, M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. (2014). CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN-GEIGER PARA O ESTADO DE GOIÁS E O DISTRITO FEDERAL. *Acta Geográfica*, *8*(16), 40–55. <https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016>
- Codognoto, L. da C., Conde, T. T., Maltoni, K. L., Faria, G. A., & Cavali, J. (2021). Effects of glyphosate plus foliar manganese application on the production and quality of marandu grass. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, *43*, e52796. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v43i1.52796>
- Cooley, W. E., & Foy, C. L. (1992). Effects of Sc-0224 and Glyphosate On Free Amino Acids, Soluble Protein, and Protein Synthesis in Inflated Duckweed (*Lemna gibba*). *Weed Science*, *40*(3), 345–350. <https://doi.org/10.1017/S0043174500051729>
- Cui, X., He, H., Hu, S., Zhang, B., & Cai, H. (2022). Synergistic Interaction between Copper and Nitrogen-Uptake, Translocation, and Distribution in Rice Plant. *Plants*, *11*(19), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants11192612>
- de Almeida Machado, B., Feresin Gomes, M. H., de Almeida, E., Otto, R., Yassuo Kamogawa, M., & Pereira de Carvalho, H. W. (2020). Understanding the chemistry of manganese fertilizers and glyphosate mixtures by using synchrotron X-ray spectrometry. *SN Applied Sciences*, *2*(11), 1–12.

- <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03632-y>
- de Oliveira Neto, S. S., Bossolani, J. W., de Freitas, S. E., Gazola, B., Gonçalves, A. S. F., Zoz, T., & Calonego, J. C. (2023). Impact of glyphosate on morphophysiological traits of RR corn plants under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *45*(2), 28. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03508-1>
- de Oliveira, R. L. L., de Mello Prado, R., Felisberto, G., Checchio, M. V., & Gratão, P. L. (2019). Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *19*(3), 524–534. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00051-w>
- Doolette, C. L., Read, T. L., Li, C., Scheckel, K. G., Donner, E., Kopittke, P. M., Schjoerring, J. K., & Lombi, E. (2018). Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: Differences in mobility, distribution, and speciation. *Journal of Experimental Botany*, *69*(18), 4469–4481. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery236>
- Drake, J. E., Power, S. A., Duursma, R. A., Medlyn, B. E., Aspinwall, M. J., Choat, B., Creek, D., Eamus, D., Maier, C., Pfautsch, S., Smith, R. A., Tjoelker, M. G., & Tissue, D. T. (2017). Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis for four tree species under drought: A comparison of model formulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, *247*, 454–466. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.026>
- Duke, S. O., Lydon, J., Koskinen, W. C., Moorman, T. B., Chaney, R. L., & Hammerschmidt, R. (2013). Glyphosate Effects on Plant Mineral Nutrition, Crop Rhizosphere Microbiota, and Plant Disease in Glyphosate-Resistant Crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(51), 12745–12745. <https://doi.org/10.1021/jf405497g>
- Einhardt, A. M., Ferreira, S., Oliveira, L. M., Ribeiro, D. M., & Rodrigues, F. Á. (2020). Glyphosate and nickel differently affect photosynthesis and ethylene in glyphosate resistant soybean plants infected by *Phakopsora pachyrhizi*. *Physiologia Plantarum*, *170*(4), 592–606. <https://doi.org/10.1111/ppl.13195>
- Einhardt, A. M., Oliveira, L. M., Ferreira, S., Araújo, W. L., Medeiros, D. B., Fernie, A. R., & Rodrigues, F. Á. (2022). Defense responses and oxidative metabolism of glyphosate-resistant soybean plants infected by *Phakopsora pachyrhizi* modulated by glyphosate and nickel. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *118*,

101817. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101817>
- Escorial, M. C., Chueca, M. C., Pérez-Fernández, A., & Loureiro, I. (2019). Glyphosate sensitivity of selected weed species commonly found in maize fields. *Weed Science*, *67*(6), 633–641. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.54>
- Fernández, V., & Brown, P. H. (2013). From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science*, *4*(JUL), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>
- Fernando, D. R., & Lynch, J. P. (2015). Manganese phytotoxicity: New light on an old problem. *Annals of Botany*, *116*(3), 313–319. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv111>
- Gao, H., Xie, W., Yang, C., Xu, J., Li, J., Wang, H., Chen, X., & Huang, C. (2018). NRAMP2, a trans Golgi network localized manganese transporter, is required for Arabidopsis root growth under manganese deficiency. *New Phytologist*, *217*(1), 179–193. <https://doi.org/10.1111/nph.14783>
- Garcia, A., Bouhid, A. R. G., Galbiatti, J. A., & Tannous, S. (2008). Análise de crescimento de uma cultura de milho submetida a diferentes regimes hídricos. *Nucleus*, *5*(1), 239–251. <https://doi.org/10.3738/1982-227860>
- Gomes, M. H. F., Machado, B. A., Rodrigues, E. S., Montanha, G. S., Rossi, M. L., Otto, R., Linhares, F. S., & Hudson, H. W. (2019). In Vivo Evaluation of Zn Foliar Uptake and Transport in Soybean Using X-ray Absorption and Fluorescence Spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(44), 12172–12181. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04977>
- Gomes, Marcelo P., Smedbol, E., Chalifour, A., Hénault-Ethier, L., Labrecque, M., Lepage, L., Lucotte, M., & Juneau, P. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: An overview. *Journal of Experimental Botany*, *65*(17), 4691–4703. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru269>
- Gomes, Marcelo Pedrosa, Freitas, P. L., Kitamura, R. S. A., Pereira, E. G., & Juneau, P. (2022). How aminomethylphosphonic acid (AMPA), the main glyphosate metabolite, interferes with chlorophyll biosynthesis? *Environmental and Experimental Botany*, *203*, 105039. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105039>
- Gomes, Marcelo Pedrosa, Le Manac'h, S. G., Maccario, S., Labrecque, M., Lucotte, M., & Juneau, P. (2016). Differential effects of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) on photosynthesis and chlorophyll metabolism in willow plants. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *130*, 65–70.

- <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.11.010>
- Gong, Q., Wang, L., Dai, T., Zhou, J., Kang, Q., Chen, H., Li, K., & Li, Z. (2019). Effects of copper on the growth, antioxidant enzymes and photosynthesis of spinach seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171(January), 771–780. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.016>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(1), 89–109. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9390-1>
- Hacisalihoglu, G., Ozturk, L., Cakmak, I., Welch, R. M., & Kochian, L. (2004). Genotypic variation in common bean in response to zinc deficiency in calcareous soil. *Plant and Soil*, 259(1/2), 71–83. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000020941.90028.2c>
- Hänsch, R., & Mendel, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>
- Hasanuzzaman, M., Mohsin, S. M., Bhuyan, M. H. M. B., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Masud, A. A. C., & Nahar, K. (2020). Phytotoxicity, environmental and health hazards of herbicides: challenges and ways forward. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (p. 55–99). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00003-9>
- Helander, M., Saloniemi, I., & Saikkonen, K. (2012). Glyphosate in northern ecosystems. *Trends in Plant Science*, 17(10), 569–574. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.05.008>
- Hu, H., Liu, H., Zhang, H., Zhu, J., Yao, X., Zhang, X., & Zheng, K. (2010). Assessment of Chlorophyll Content Based on Image Color Analysis, Comparison with SPAD-502. *2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICIECS.2010.5678413>
- Hunter, C., Ware, M. A., Gleason, S. M., Pilon-Smits, E., & Pilon, M. (2022). Recovery after deficiency: systemic copper prioritization and partitioning in the leaves and

- stems of hybrid poplar. *Tree Physiology*, 42(9), 1776–1785.
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpac038>
- Imran, M., Sun, X., Hussain, S., Rana, M. S., Saleem, M. H., Riaz, M., Tang, X., Khan, I., & Hu, C. (2021). Molybdenum supply increases root system growth of winter wheat by enhancing nitric oxide accumulation and expression of NRT genes. *Plant and Soil*, 459(1–2), 235–248. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04765-0>
- Jakhar, R. K., Yadav, B. L., & Kumawat, A. (2014). Response of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) to different RSC waters and zinc fertilization. *Agricultural Science Digest - A Research Journal*, 34(1), 67. <https://doi.org/10.5958/j.0976-0547.34.1.015>
- Jhanji, S., & Sadana, U. (2018). Unraveling the Effect of Differentially Applied Manganese on Root Dynamics and Efficiency of Diverse Rice Genotypes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(18), 2357–2368. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1499770>
- Jun, S. E., Shim, J. S., & Park, H. J. (2023). Beyond NPK: Mineral Nutrient-Mediated Modulation in Orchestrating Flowering Time. *Plants*, 12(18), 1–27. <https://doi.org/10.3390/plants12183299>
- Kanissery, R., Gairhe, B., Kadyampakeni, D., Batuman, O., & Alferez, F. (2019). Glyphosate: Its environmental persistence and impact on crop health and nutrition. *Plants*, 8(11), 1–11. <https://doi.org/10.3390/plants8110499>
- Karnatam, K. S., Mythri, B., Un Nisa, W., Sharma, H., Meena, T. K., Rana, P., Vikal, Y., Gowda, M., Dhillon, B. S., & Sandhu, S. (2023). Silage maize as a potent candidate for sustainable animal husbandry development—perspectives and strategies for genetic enhancement. *Frontiers in Genetics*, 14(May), 1–24. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1150132>
- Krenchinski, F. H., Albrecht, L. P., Albrecht, A. J. P., Cesco, V. J. S., Rodrigues, D. M., Portz, R. L., & Zobiolo, L. H. S. (2017). Glyphosate affects chlorophyll, photosynthesis and water use of four Intacta RR2 soybean cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(2). <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2358-0>
- Lange, B., van der Ent, A., Baker, A. J. M., Echevarria, G., Mahy, G., Malaisse, F., Meerts, P., Pourret, O., Verbruggen, N., & Faucon, M. P. (2017). Copper and cobalt accumulation in plants: a critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist*, 213(2), 537–551. <https://doi.org/10.1111/nph.14175>
- Langner, J. A., Zanon, A. J., Streck, N. A., Reiniger, L. R. S., Kaufmann, M. P., &

- Alves, A. F. (2019). Maize: Key agricultural crop in food security and sovereignty in a future with water scarcity. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(9), 648–654. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p648-654>
- Lanzarin, G. A. B., Venâncio, C. A. S., Félix, L. M., & Monteiro, S. M. (2022). Evaluation of the developmental effects of a glyphosate-based herbicide complexed with copper, zinc, and manganese metals in zebrafish. *Chemosphere*, 308, 136430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136430>
- Li, S., Li, P., Li, X., Wen, N., Wang, Y., Lu, W., Lin, M., & Lang, Z. (2023). In maize, co-expression of GAT and GR79-EPSPS provides high glyphosate resistance, along with low glyphosate residues. *aBIOTECH, Nbsc 2021*. <https://doi.org/10.1007/s42994-023-00114-8>
- Liu, Y., Xue, Y., Xie, B., Zhu, S., Lu, X., Liang, C., & Tian, J. (2020). Complex gene regulation between young and old soybean leaves in responses to manganese toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 155(July), 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.002>
- Lopez Ovejero, R. F., Takano, H. K., Nicolai, M., Ferreira, A., Melo, M. S. C., Cavenaghi, A. L., Christoffoleti, P. J., & Oliveira, R. S. (2017). Frequency and Dispersal of Glyphosate-Resistant Sourgrass (*Digitaria insularis*) Populations across Brazilian Agricultural Production Areas. *Weed Science*, 65(2), 285–294. <https://doi.org/10.1017/wsc.2016.31>
- Malavolta, E. (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. *Agrônoma Ceres*, 631.
- Martinelli, R., Rufino, L. R., Alcántara-de la Cruz, R., da Conceição, P. M., Monquero, P. A., & de Azevedo, F. A. (2022). Glyphosate Excessive Use Affects Citrus Growth and Yield: The Vicious (and Unsustainable) Circle in Brazilian Orchards. *Agronomy*, 12(2), 453. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020453>
- Mascarenhas, H. A. A., Esteves, J. A. de F., Wutke, E. B., Reco, P. C., & Leão, P. C. da L. (2013). Disability and Toxicity of Nutrients in Visual Soybeans. *Nucleus*, 10(2), 281–306. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.974>
- Mertens, M., Höss, S., Neumann, G., Afzal, J., & Reichenbercher, W. (2018). Glyphosate, a chelating agent—relevant for ecological risk assessment? *Real-Time Imaging VII*, 25, 5298–5317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1080-1>
- Metwali, E. M. R., Gowayed, S. M. H., Al-Maghrabi, O. A., & Mosleh, Y. Y. (2013). Evaluation of toxic effect of copper and cadmium on growth, physiological traits

- and protein profile of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *World Applied Sciences Journal*, 21(3), 301–314. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.3.2835>
- Migliavacca, R. A., Ferraz-Almeida, R., Gomes, M. H. F., de Almeida, E., de Carvalho, H. W. P., & Otto, R. (2022). Efficiency of soluble and insoluble sources of manganese for soybean nutrition in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2022.V57.01721>
- Mir, A. R., Pichtel, J., & Hayat, S. (2021). Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *BioMetals*, 34(4), 737–759. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z>
- Mohy-Ud-Din, W., Bashir, S., Akhtar, M. J., Asghar, H. M. N., Ghafoor, U., Hussain, M. M., Niazi, N. K., Chen, F., & Ali, Q. (2023). Glyphosate in the environment: interactions and fate in complex soil and water settings, and (phyto) remediation strategies. *International Journal of Phytoremediation*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2282720>
- Mondal, S., Kumar, M., Haque, S., & Kundu, D. (2017). Phytotoxicity of glyphosate in the germination of *Pisum sativum* and its effect on germinated seedlings. *Environmental Health and Toxicology*, 32, e2017011. <https://doi.org/10.5620/eht.e2017011>
- Monquero, P. A., Christoffoleti, P. J., Osuna, M. D., & De Prado, R. A. (2004). Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. *Planta Daninha*, 22(3), 445–451. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582004000300015>
- Moreira, A., Moraes, L. A. C., Furlan, T., Cerezini, P., & Bruno, I. P. (2016). Interaction of Glyphosate with Zinc for the Yield, Photosynthesis, Soil Fertility and Nutritional Status of Soybean. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(6), 706–719. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1146747>
- Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2013). Zinc (Zn) importance for crop production - A review. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(1), 64–68. <http://www.ijappjournal.com>
- Nandula, V. K., Riechers, D. E., Ferhatoglu, Y., Barrett, M., Duke, S. O., Dayan, F. E., Goldberg-Cavalleri, A., Tétard-Jones, C., Wortley, D. J., Onkokesung, N., Brazier-Hicks, M., Edwards, R., Gaines, T., Iwakami, S., Jugulam, M., & Ma, R. (2019). Herbicide Metabolism: Crop Selectivity, Bioactivation, Weed Resistance, and

- Regulation. *Weed Science*, 67(2), 149–175. <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.88>
- Neena Khurana Neena Khurana, & Chatterjee, C. (2007). Changes in metabolism, root quality and nutritive characters of carrot under copper stress. *Indian Journal of Horticulture*, 64(3), 335–339.
- Neumann, P. M. (2008). Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany*, 101(7), 901–907. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn018>
- Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2021). Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 104–118. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>
- O Duke, S., & B Powles, S. (2008). Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest management science*, 63(11), 1100–1106. <https://doi.org/10.1002/ps>
- Ohki, K. (1984). Manganese Deficiency and Toxicity Effects on Growth, Development, and Nutrient Composition in Wheat 1. *Agronomy Journal*, 76(2), 213–218. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020011x>
- Orcaray, L., Igal, M., Marino, D., Zabalza, A., & Royuela, M. (2010). The possible role of quinate in the mode of action of glyphosate and acetolactate synthase inhibitors. *Pest Management Science*, 66(3), 262–269. <https://doi.org/10.1002/ps.1868>
- Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro, F., Brunelli-Nascentes, M. C., Carbonari, C. A., Domingues Velini, E., & de Almeida Silva, M. (2023). Low doses of glyphosate do not damage the secondary metabolism of common bean. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 58(5), 465–476. <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2226586>
- Perea-García, A., Andrés-Bordería, A., Huijser, P., & Peñarrubia, L. (2021). The Copper-microRNA Pathway Is Integrated with Developmental and Environmental Stress Responses in *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17), 9547. <https://doi.org/10.3390/ijms22179547>
- Qin, G., Zhao, N., Wang, W., Wang, M., Zhu, J., Yang, J., Lin, F., Huang, X., Zhang, Y., Min, L., Chen, G., & Kong, J. (2023). Glyphosate-Induced Abscisic Acid Accumulation Causes Male Sterility in Sea Island Cotton. *Plants*, 12(5), 1058. <https://doi.org/10.3390/plants12051058>
- Rather, B. A., Masood, A., Sehar, Z., Majid, A., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2020). Mechanisms and Role of Nitric Oxide in Phytotoxicity-Mitigation of Copper. *Frontiers in Plant Science*, 11(May). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00675>

- Reddy, K. N., Cizdziel, J. V., Williams, M. M., Maul, J. E., Rimando, A. M., & Duke, S. O. (2018). Glyphosate Resistance Technology Has Minimal or no Effect on Maize Mineral Content and Yield. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(39), 10139–10146. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01655>
- Reddy, K. N., Rimando, A. M., Duke, S. O., & Nandula, V. K. (2008). Aminomethylphosphonic acid accumulation in plant species treated with glyphosate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(6), 2125–2130. <https://doi.org/10.1021/jf072954f>
- Revilla, P., Alves, M. L., Anđelković, V., Balconi, C., Dinis, I., Mendes-Moreira, P., Redaelli, R., Ruiz de Galarreta, J. I., Vaz Patto, M. C., Žilić, S., & Malvar, R. A. (2022). Traditional Foods From Maize (*Zea mays* L.) in Europe. *Frontiers in Nutrition*, 8(January). <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.683399>
- Sadana, U. S., Lata, K., & Claassen, N. (2002). MANGANESE EFFICIENCY OF WHEAT CULTIVARS AS RELATED TO ROOT GROWTH AND INTERNAL MANGANESE REQUIREMENT. *Journal of Plant Nutrition*, 25(12), 2677–2688. <https://doi.org/10.1081/PLN-120015531>
- Sadok, W., Lopez, J. R., & Smith, K. P. (2021). Transpiration increases under high temperature stress: Potential mechanisms, trade offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2102–2116. <https://doi.org/10.1111/pce.13970>
- Saha, S., Chakraborty, M., Padhan, D., Saha, B., Murmu, S., Batabyal, K., Seth, A., Hazra, G. C., Mandal, B., & Bell, R. W. (2017). Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability. *Field Crops Research*, 210(January), 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.023>
- Sakata, N., Ino, T., Hayashi, C., Ishiga, T., & Ishiga, Y. (2023). Controlling stomatal aperture, a potential strategy for managing plant bacterial disease. *Plant Science*, 327, 111534. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111534>
- Sekhon, B. S. (2003). Chelates for micronutrient nutrition among crops. *Resonance*, 8(7), 46–53. <https://doi.org/10.1007/BF02834402>
- Sharma, P., Sirhindi, G., Singh, A. K., Kaur, H., & Mushtaq, R. (2017). Consequences of copper treatment on pigeon pea photosynthesis, osmolytes and antioxidants defense. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(4), 809–816. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0461-8>

- Sharma, U. D., & Rai, V. K. (1989). Modulation of Osmotic Closure of Stomata, Stomatal Resistance and K⁺ Fluxes by Exogenous Amino Acids in *Vicia faba* L. Leaves. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 185(5–6), 369–376.
[https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(89\)80057-5](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(89)80057-5)
- Silva, L. M. da, & Berti, M. P. da S. (2022). Manganês no solo e nas plantas: uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, 15(3).
<https://doi.org/10.36560/15320221512>
- Smedbol, É., Lucotte, M., Tremblay, G., Moingt, M., Paquet, S., Bernier Brillon, J., & Samson Brais, É. (2020). Weed management strategies effect on glyphosate tolerant maize and soybean yields and quality. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/agg2.20088>
- Sousa, D. M. G., & Lobato, E. (2004). *Cerrado: Correção do solo e adubação* (2° ed) Embrapa Cerrado.
- Sun, D., & Wang, Q. (2018). Linear Relationships between Photosynthetic Rate and Photochemical Energy Expressed by $\Delta F/F_m$ and F_v/F_m . *American Journal of Plant Sciences*, 09(02), 125–138. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.92011>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal* (6° ed). Artmed.
- Tavanti, T. R., Melo, A. A. R. de, Moreira, L. D. K., Sanchez, D. E. J., Silva, R. dos S., Silva, R. M. da, & Reis, A. R. dos. (2021). Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160(October 2020), 386–396.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
- Thakur, P. S., Thakur, A., & Rai, V. K. (1988). Reversal of Stomatal Closure in *Commelina communis* L. by Exogenous Amino Acids and Their Interaction with Stress and Abscisic Acid. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 183(1), 37–43.
[https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(88\)80066-0](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(88)80066-0)
- Tito, G. A., Chaves, L. H. G., & Vasconcelos, A. C. F. de. (2016). Acúmulo e translocação de cobre e zinco em plantas de *Crambe abyssinica*. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 11(4), 12.
<https://doi.org/10.18378/rvads.v11i4.4539>
- Torre, A. La, Iovino, V., & Caradonia, F. (2018). Copper in plant protection: current situation and prospects. *Phytopathologia Mediterranea*, 57(2), 201–236.

- https://doi.org/https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-23407
- Tryfon, P., Sperdouli, I., Adamakis, I.-D. S., Mourdikoudis, S., Moustakas, M., & Dendrinou-Samara, C. (2023). Impact of Coated Zinc Oxide Nanoparticles on Photosystem II of Tomato Plants. *Materials*, *16*(17), 5846. <https://doi.org/10.3390/ma16175846>
- Tsuruda, T., & Yoshida, R. (2023). l-Glutamate activates salicylic acid signaling to promote stomatal closure and PR1 expression in Arabidopsis. *Physiologia Plantarum*, *175*(1). <https://doi.org/10.1111/ppl.13858>
- Velini, E. D., Meschede, D. K., Carbonari, C. A., & Trindade, M. L. B. (2009). GLYPHOSATE. In *FEPAF*. ???
- Vendruscolo, B. E., Raimundo, C. B., & Schoninger, E. L. (2020). Revista de Ciências Agroambientais. *Revista de Ciências Agroambientais*, *18*(2). <https://doi.org/10.30681/rcaa.v18i2.4622>
- Wairich, A., De Conti, L., Lamb, T. I., Keil, R., Neves, L. O., Brunetto, G., Sperotto, R. A., & Ricachenevsky, F. K. (2022). Throwing Copper Around: How Plants Control Uptake, Distribution, and Accumulation of Copper. *Agronomy*, *12*(5), 1–29. <https://doi.org/10.3390/agronomy12050994>
- Wang, C., Li, J., Li, S., & Lin, S. (2024). Effects and mechanisms of glyphosate as phosphorus nutrient on element stoichiometry and metabolism in the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Applied and Environmental Microbiology*, *90*(2). <https://doi.org/10.1128/aem.02131-23>
- Yamasaki, S., Sakata-Sogawa, K., Hasegawa, A., Suzuki, T., Kabu, K., Sato, E., Kurosaki, T., Yamashita, S., Tokunaga, M., Nishida, K., & Hirano, T. (2007). Zinc is a novel intracellular second messenger. *Journal of Cell Biology*, *177*(4), 637–645. <https://doi.org/10.1083/jcb.200702081>
- Yanniccari, M., Tambussi, E., Istilart, C., & Castro, A. M. (2012). Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity. *Plant Physiology and Biochemistry*, *57*, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.027>
- Zhang, H., Zhao, X., Li, J., Cai, H., Deng, X. W., & Li, L. (2015). MicroRNA408 Is Critical for the HY5-SPL7 Gene Network That Mediates the Coordinated Response to Light and Copper. *The Plant Cell*, *26*(12), 4933–4953. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.127340>
- Zheng, L., Yamaji, N., Yokosho, K., & Ma, J. F. (2012). YSL16 is a phloem-localized

transporter of the copper-nicotianamine complex that is responsible for copper distribution in rice. *Plant Cell*, 24(9), 3767–3782.

<https://doi.org/10.1105/tpc.112.103820>

Zobiolo, Luiz H. S., Oliveira, R. S., Visentainer, J. V., Kremer, R. J., Bellaloui, N., & Yamada, T. (2010). Glyphosate Affects Seed Composition in Glyphosate-Resistant Soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4517–4522.

<https://doi.org/10.1021/jf904342t>

Zobiolo, Luiz Henrique Saes, Bonini, E. A., de Oliveira, R. S., Kremer, R. J., & Ferrarese-Filho, O. (2010). Glyphosate affects lignin content and amino acid production in glyphosate-resistant soybean. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32(5), 831–837. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0467-0>

Zobiolo, Luiz Henrique Saes, Kremer, R. J., de Oliveira Jr., R. S., & Constantin, J. (2012). Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and nodulation in glyphosateresistant soybean. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(2), 319–330. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000434>