

INTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

ESTUDO AVALIATIVO SOBRE A APLICAÇÃO DE  
BIOESTIMULANTES NA CULTURA DO MILHO

Autor: Jacyr Lora  
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares

RIO VERDE - GO  
Junho – 2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –  
CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
AGRONOMIA

**ESTUDO AVALIATIVO SOBRE A APLICAÇÃO DE  
BIOESTIMULANTES NA CULTURA DO MILHO**

Autor: Jacyr Lora  
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares  
Coorientador: Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

RIO VERDE - GO  
Junho – 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano -  
SIBi**

Lora, Jacyr

L865e      Estudo avaliativo sobre a aplicação de bioestimulantes na cultura  
do milho / Jacyr Lora. Rio Verde 2025.

1f. il.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares.  
Coorientador: Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira.

Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 -  
Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde  
(Campus Rio Verde).

1. Ciências Agrárias. 2. Agronomia. I. 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,

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)      | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação)             | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Jacyr Lora

Matrícula:

2022102320140008

Título do trabalho:

EFEITO RESPONSIVO DA CULTURA DO MILHO PELA APLICAÇÃO DE COMPOSTOS MINERAIS

Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional |

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

[Redacted]

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 23 / 06 / 2025

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.

Rio Verde

28 / 10 / 2025

Local

Data

do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento 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.

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, CIÉNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 59/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**ATA N°/154**

**BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE**

Aos vinte e três dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h00, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: sob a presidência do primeiro, Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares (Presidente); Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno); Prof. Dr. Fernando Nobre da Cunha (Avaliador interno); Prof. Dr. Nelmício Furtado da Silva (Avaliador externo) e Prof. Dr. Wilker Alves Morais (Avaliador interno) em sessão pública realizada no IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de JACYR LORA , discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares (Presidente), que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida a autora da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora. Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares (Presidente) Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno) Prof. Dr. Fernando Nobre da Cunha (Avaliador interno) Prof. Dr. Nelmício Furtado da Silva (Avaliador externo) Prof. Dr. Wilker Alves Morais (Avaliador interno)

Documento assinado eletronicamente por:

- Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCMDAGRO-R, em 01/07/2025 11:43:04.
- Wilker Alves Morais, PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO , em 01/07/2025 11:48:24.
- Frederico Antonio Loureiro Soares, PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO , em 01/07/2025 12:29:27.
- Fernando Nobre Cunha, Fernando Nobre Cunha - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 01/07/2025 12:52:31.
- Nelmício Furtado da Silva, Nelmício Furtado da Silva - 2345 - PROFESSORES NA ÁREA DE FORMAÇÃO PEDAGÓGICA DO ENSINO SUPERIOR - Universidade de Rio Verde (01815216000178), em 01/07/2025 23:46:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/06/2025. 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: 718881  
Código de Autenticação: 571ece94f6



## AGRADECIMENTOS

A Deus, que a tudo vê e a tudo decide.

Aos meus pais Egidio e Inês, *in memoriam*.

À minha irmã Elenita Maria Lora Gasparin, que esteve sempre presente, atenciosa e amiga, incentivando-me. Aos meus irmãos, Eng. Ivo João e Izelso, que mesmo à distância estiveram sempre comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares, pelo acolhimento e amizade, a quem tenho um especial apreço e uma gratidão infinita.

Ao Dr. Fernando Nobre da Cunha, por ter me sugerido e auxiliado a desenvolver o projeto que me permitiu o acesso ao título de doutor.

Ao Dr. Wilker Alves Morais, pela amizade, parceria e incentivo.

Ao Dr. Edson Cabral Filho pela colaboração prestada e amizade merecida.

Ao Dr. Aurélio Rubio Neto que sempre esteve me incentivando e me confortando nos momentos difíceis.

Aos demais docentes, meus professores, que guardarei na lembrança.

Ao Dr. Welmo que assim como Dr. Aurélio, esteve comigo, me acompanhando durante minha cirurgia.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Jacyr Lora, filho de Egidio Lora e Inês Antonieti Lora, nasceu no dia 20 de setembro de 1959, na cidade de Chapecó, Santa Catarina. Concluiu o ginásio no Colégio Estadual dos Subúrbios, no ano de 1974 e o ensino médio no Colégio Agrícola Ângelo Emílio Grando, em 1979, ambos na cidade de Erechim, Rio Grande do Sul. Em 1998, graduou-se em Agronomia, pela Universidade do Estado de Santa Catarina, na cidade de Chapecó, SC. Em 2008, estagiou por seis meses no IAC, Centro de Frutas de Jundiaí.

Em 2014, concluiu a Pós-Graduação em Proteção de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Em 2020, iniciou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias no Instituto Federal Goiano-Campus Rio Verde, Goiás, concluindo em março de 2022. Em março de 2022, foi selecionado para o curso de doutorado no mesmo Instituto, tendo concluído em junho de 2025.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
LISTA, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES .....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XII
INTRODUÇÃO .....	1
Referências bibliográficas.....	4
OBJETIVOS .....	8
Objetivo geral .....	8
Objetivos específicos .....	8
CAPÍTULO I .....	9
<b>POTENCIAL PRODUTIVO DA CULTURA DO MILHO SOB APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM LATOSSOLO VERMELHO DE CERRADO .....</b>	<b>9</b>
RESUMO .....	9
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS .....	12
RESULTADOS .....	16
DISCUSSÃO.....	27
CONCLUSÕES.....	35
AGRADECIMENTOS .....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
CAPÍTULO II .....	45
<b>DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTURA DO MILHO EM RESPOSTA ÀS ADUBAÇÃO COM ZINCO EM LATOSSOLO DE CERRADO .....</b>	<b>45</b>
RESUMO .....	45
INTRODUÇÃO.....	46
MATERIAL E MÉTODOS .....	47

<b>RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>
<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Capítulo I	
Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25 .....	13
Capítulo II	
Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento de milho, Rio Verde-GO, safra 2024/25.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Capítulo I</b>	
Figura 1. Dados meteorológicos: umidade relativa (UR), insolação, temperatura média, precipitação pluvial, ocorridas no período decorrente do experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25.....	13
Figura 2. A altura de planta (A) e o diâmetro de colmo (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	17
Figura 3. O comprimento de folha (A), largura de folha (B) e área foliar (C) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	18
Figura 4. O índice SPAD (A) e NDVI (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	20
Figura 5. A clorofila a (A) e a clorofila b (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	21
Figura 6. A índice Falker de clorofila total (A) e a clorofila a/b (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	22
Figura 7. A massa de folha (A) e a massa de colmo (B) do milho em função das doses de silício.....	23
Figura 8. A massa de palha (A), a massa de espiga (B) e a massa de sabugo (C) do milho em função das doses de silício.....	24
Figura 9. O comprimento de espiga (A) e o diâmetro do sabugo (B) do milho em função das doses de silício.....	25
Figura 10. O número de grão por fileira (A) e a massa de 50 grãos (B) do milho em função das doses de silício.....	26
Figura 11. A massa de 1000 grãos (A) e a produtividade de grãos (B) do milho em função das doses de silício.....	26
<b>Capítulo II</b>	
Figura 1. Dados meteorológicos: umidade relativa (UR), insolação, temperatura média, precipitação pluvial, ocorridas no período decorrente do experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25.....	48
Figura 2. A altura de planta (A) e o diâmetro de colmo (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). .....	51

Figura 3. O comprimento de folha (A), largura de folha (B) e área foliar (C) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).....	52
Figura 4. O índice SPAD (A) e NDVI (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).....	54
Figura 5. A clorofila a (A) e a clorofila b (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).....	55
Figura 6. A índice Falker de clorofila total (A) e a clorofila a/b (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).....	56
Figura 7. A massa de folha (A) e a massa de colmo (B) do milho em função das doses de zinco.....	57
Figura 8. A massa de palha (A) e a massa de espiga (B) do milho em função das doses de zinco.....	58
Figura 9. O comprimento de espiga (A) e o diâmetro de espiga (B) do milho em função das doses de zinco.....	58
Figura 10. O diâmetro de sabugo (A) e a massa de sabugo (B) do milho em função das doses de zinco.....	59
Figura 11. O número de grãos por fileira (A) e a massa de 50 grãos (B) do milho em função das doses de zinco.....	60
Figura 12. A massa de 1000 grãos (A) e a produtividade de grãos (B) do milho em função das doses de zinco.....	61

## LISTA, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/ sigla	Significado	Unidade
A	Taxa de assimilação fotossintética	-
Al	Alumínio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
B	Boro	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
Ca	Cálcio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de Cálcio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
CTC	Capacidade de troca de cátions	Meq/100 gramas
Cu	Cobre	mg/dm <sup>-3</sup>
DAS	Dias após semeadura	-
DCa	Diâmetro do Caule	-
Dco	Diâmetro da Copa	-
DTPA	Extrator químico	-
E	Taxa de Transpiração	-
Fe	Ferro	mg/dm <sup>-3</sup>
H	Hidrogênio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
K	Potássio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
MF	Massa fresca	-
MFfolhas	Massa fresca das folhas	-
Mg	Magnésio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
Mg/dm <sup>-3</sup>	Miligrama/decímetro cúbico	-
mmol/dm <sup>-3</sup>	Micromol/decímetro cúbico	-
Mn	Manganês	mg/dm <sup>-3</sup>
Mo	Molibnênio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
M.O.	Matéria Orgânica	%
MSFolhas	Massa seca das folhas	
N	Nitrogênio	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
NDVI	Índice de vegetação de diferença normalizada	-
NFolhas	Número de folhas	-
P	Fósforo	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
pH	Potencial hidrogênico	%
S	Enxofre	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>-3</sup>
SB	Saturação por Bases	%
Si	Silício	mg/dm <sup>-3</sup>
SPAD	Desenvolvimento de análise de plantas de solo	-
Zn	Zinco	mg/dm <sup>-3</sup>

## RESUMO

LORA, JACYR. **Estudo avaliativo sobre aplicação de bioestimulantes na cultura do milho.** Orientador: Frederico Antonio Loureiro Soares. Coorientador: Marconi Batista Teixeira. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, junho de 2025.

O uso de compostos minerais na agricultura tem se destacado como estratégia promissora para aumentar a produtividade e a sustentabilidade das culturas. Muitos compostos minerais, embora não sejam considerados fertilizantes, estimulam processos naturais por fornecerem nutrientes essenciais que vão participar dos diversos processos fisiológicos e de crescimento e até mesmo, melhorando a eficiência no uso da água, a tolerância a estresses abióticos e a qualidade das colheitas. Esta tese teve como objetivo avaliar os efeitos da adubação com silício e zinco sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento do milho (*Zea mays L.*, cultivado em Latossolo Vermelho do Cerrado. Foram conduzidos dois experimentos, a céu aberto, em vasos, utilizando delineamento em blocos ao acaso com cinco doses (0, 25, 50, 100 e 200 Kg/ ha<sup>-1</sup>) de silicato de potássio e de sulfato de zinco, respectivamente, e quatro repetições. As variáveis avaliadas incluíram parâmetros morfológicos, fisiológicos e produtivos, a saber, a altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, comprimento de folha, largura de folha, área foliar, massa de folha, massa de colmo, índice SPAD, índice NDVI, clorofila *a*, clorofila *b*, índice Falker de clorofila total e clorofila *a/b*. Os componentes produtivos avaliadas foram massa de palha, massa de espiga, massa de sabugo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, diâmetro de sabugo, número de fileiras de grãos da espiga, número de grãos por fileira e a massa de 50 grãos. No primeiro experimento, a aplicação de silício proporcionou incrementos significativos na altura de plantas, diâmetro de colmo, área foliar, teor de clorofila (índices SPAD e NDVI), massa de órgãos vegetativos e componentes da espiga, com destaque para a produtividade máxima de 5582,44 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 118,31%. A resposta foi predominantemente quadrática, indicando ponto ótimo de aplicação para a maioria das variáveis. No segundo experimento, o zinco também influenciou positivamente as variáveis estudadas, especialmente em doses intermediárias. Os melhores resultados ocorreram entre 100% e 140% da dose padrão, com produtividade máxima de 4946,30 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 135,56%. Ambos os compostos minerais demonstraram potencial para melhorar o desempenho agronômico do milho, sendo o silício mais efetivo em atributos estruturais e o zinco mais associado ao

metabolismo enzimático e pigmentação foliar. Os dados reforçam a importância do manejo nutricional racional e a necessidade de definir faixas tu adequadas de aplicação para maximizar os efeitos positivos e evitar perdas por excesso.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays L.*; componentes minerais; nutrição vegetal; silício; zinco; produtividade.

## ABSTRACT

LORA, JACYR. **Evaluation study on the application of biostimulants in corn crops.** Advisor: Frederico Antonio Loureiro Soares. Co-advisor: Marconi Batista Teixeira. 2025. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences - Agronomy) Goiano Federal Institute – Rio Verde Campus – GO, June 2025.

The use of mineral compounds in agriculture has emerged as a promising strategy to increase crop productivity and sustainability. Many mineral compounds, although not considered fertilizers, stimulate natural processes by providing essential nutrients that participate in various physiological and growth processes, and even improve water use efficiency, tolerance to abiotic stresses, and crop quality. This thesis aimed to evaluate the effects of silicon and zinc fertilization on growth, development, and yield of corn (*Zea mays L.*, grown in Cerrado Red Latosol). Two experiments were carried out in open-air pots using a randomized block design with five doses (0, 25, 50, 100, and 200 kg/ha<sup>-1</sup>) of potassium silicate and zinc sulfate, respectively, and four replicates. The variables evaluated included morphological, physiological, and productive parameters namely, plant height, stem diameter, number of leaves, leaf length, leaf width, leaf area, leaf mass, stem mass, SPAD index, NDVI index, chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and chlorophyll a/b. The productive components evaluated were straw mass, ear mass, cob mass, ear length, ear diameter, cob diameter, number of rows of grains in the ear, number of grains per row and the mass of 50 grains. In the first experiment, the silicon application provided significant increases in plant height, stem diameter, leaf area, chlorophyll content (SPAD and NDVI indices), mass of vegetative organs and ear components, with emphasis on the maximum productivity of 5582.44 kg ha<sup>-1</sup> at the dose of 118.31%. The response was predominantly quadratic, indicating an optimum application point for most variables. In the second experiment, zinc also positively influenced the variables studied, especially at intermediate doses. The best results occurred between 100% and 140% of the standard dose, with maximum productivity of 4946.30 kg ha<sup>-1</sup> at the dose of 135.56%. Both mineral compounds demonstrated potential to improve the agronomic performance of corn, with silicon being more effective in structural attributes and zinc being more associated with enzymatic metabolism and leaf pigmentation. The data reinforces the importance of rational nutritional management and the need to define adequate application ranges to maximize positive effects and avoid losses due to excess.

KEYWORDS: *Zea mays L.*; mineral compounds; plant nutrition; silicon; zinc; yield.

## INTRODUÇÃO

Em 1868, Charles Darwin mostrou interesse particular sobre a espécie *Zea mays*, deixando o registro de suas descobertas em seu livro “As variações de animais e plantas sob domesticação” (DÓRIA, 2021). O milho é uma gramínea anual, monoica, alógama, da família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Maydeae, gênero Zea, espécie *Zea mays* (SILOTO, 2002; MIGUEIS, 2022).

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é uma das mais importantes do mundo, desempenhando papel fundamental na alimentação humana e animal, além de ser matéria-prima para diversas indústrias, incluindo a de biocombustíveis (AMARAL et al., 2018; ANDRADE, 2025). A sua versatilidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas fazem do milho uma cultura amplamente cultivada. Segundo o IBGE (2022), o milho tem se destacado pela sua distribuição nas diversas regiões brasileiras.

No entanto, mesmo com medidas preventivas e boas práticas de manejo, a cultura do milho permanece vulnerável a adversidades climáticas, como períodos de seca, excesso de chuvas, variações bruscas de temperatura e outros estresses abióticos que podem resultar em significativas quedas na produção. Esses desafios climáticos afetam o metabolismo das plantas e, por consequência, reduzem a eficiência na assimilação de nutrientes e na fotossíntese.

O Brasil, é o terceiro maior produtor mundial (CONAB, 2024). Segundo o órgão, a estimativa de produção para a safra 2024/2025 é de 322,53 milhões de toneladas. No entanto, os desafios impostos pelas variações climáticas e pela demanda por aumento de produtividade têm levado a crescente busca por tecnologias que permitam a maximização do rendimento das lavouras sem comprometer os recursos naturais.

Alves e Bacha (2018) e Garcia Gasques et al (2022), sinalizaram que para atender a demanda global por alimentos, é preciso haver ganhos em produção e produtividade nas culturas de grãos e que isto se deve à pesquisa, levadas a cabo pelos centros de pesquisa, a exemplo da EMBRAPA.

Neste contexto, o uso de compostos minerais tem emergido como alternativa tecnológica promissora, para otimizar o desempenho das culturas agrícolas, em especial à cultura do milho. Os compostos minerais são substâncias que, quando aplicados às

plantas ou ao solo, estimulam processos naturais que melhoram a absorção de nutrientes, a eficiência no uso da água, a tolerância a estresses abióticos e a qualidade das colheitas (AHMAD, 2025). O uso de silicato de potássio e sulfato de zinco na cultura do milho apresenta diversas vantagens agronômicas, fisiológicas e produtivas, promovendo o desenvolvimento saudável das plantas e contribuindo para o aumento da produtividade.

O silicato de potássio atua principalmente como uma fonte de silício solúvel e potássio, elementos que desempenham papéis importantes na fisiologia vegetal. O silício, embora não essencial, é considerado um elemento benéfico, especialmente em gramíneas como o milho, em que fortalece os tecidos vegetais, aumenta a rigidez das folhas e colmos, reduzindo o acamamento e conferindo maior resistência ao ataque de pragas e doenças (QUINTINA NETA et al, 2024). Além disso, o silício melhora a eficiência no uso da água, aumenta a atividade fotossintética e reduz os efeitos do estresse abiótico, como seca, salinidade e toxidez por metais pesados (LANNA et al, 2021).

O potássio, presente no silicato de potássio, é um macronutriente essencial, fundamental para a ativação de enzimas, regulação osmótica, transporte de açúcares e síntese de amido. Sua associação com o silício potencializa os efeitos benéficos na cultura do milho, favorecendo o crescimento e a produtividade dos grãos (MALAVOLTA, 2006).

Já o sulfato de zinco é uma fonte amplamente utilizada de zinco, um micronutriente essencial envolvido em diversos processos metabólicos. O zinco é cofator de enzimas, participa da síntese de auxinas, estabilização de membranas e metabolismo de proteínas e carboidratos. A deficiência de zinco prejudica o crescimento radicular, o desenvolvimento foliar e a formação dos grãos. A aplicação de sulfato de zinco melhora o enraizamento, favorece o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, aumenta a área foliar, o número de grãos por espiga e a massa de grãos. Além disso, o zinco está relacionado à tolerância ao estresse oxidativo, pois contribui na formação de enzimas antioxidantes (FAQUIN, 2005).

A associação do silicato de potássio e do sulfato de zinco, portanto, contribui de maneira sinérgica para melhorar a sanidade vegetal, a estrutura das plantas, a resistência a estresses e a eficiência fisiológica do milho. Os efeitos conjuntos incluem maior massa de colmo e espiga, maior diâmetro de colmo, aumento da massa de grãos e maior produtividade final. Esses benefícios tornam essas fontes nutricionais estratégicas no manejo moderno da

cultura do milho, especialmente em condições de alta exigência produtiva (GUEDES, 2019).

No caso do milho, o uso de compostos minerais pode ser particularmente vantajoso, dado o alto potencial da cultura em responder ao manejo intensivo e às inovações tecnológicas (SILVA et al., 2020). Estudos recentes indicam que o uso de compostos minerais pode contribuir para o aumento da produtividade de grãos, além de melhorar características como a resistência a condições adversas, como seca e salinidade (MATOS et al., 2021). Esses produtos atuam principalmente na fisiologia das plantas, promovendo maior eficiência na fotossíntese, desenvolvimento radicular mais robusto e maior tolerância ao estresse oxidativo.

Além disso, o interesse pelo uso de compostos minerais está alinhado com os princípios da agricultura sustentável, uma vez que possibilita a redução da dependência de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, ao mesmo tempo em que melhora a resiliência das plantas frente às mudanças climáticas (DUARTE; et al., 2022). A adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis é uma exigência crescente da sociedade, que busca equilibrar a produção de alimentos com a preservação ambiental (FAO, 2019).

No entanto, embora o potencial dos aditivos minerais na cultura do milho seja evidente, a variabilidade nos resultados ainda é um desafio. Fatores como a dosagem, o momento da aplicação e as condições ambientais podem influenciar significativamente a eficácia desses produtos (SANTOS et al., 2020). Por isso, a pesquisa nessa área tem se concentrado em identificar as melhores práticas para a aplicação de compostos minerais em diferentes cenários de cultivo, com o objetivo de garantir o máximo benefício tanto para o agricultor quanto para o meio ambiente.

Uma fonte aditiva utilizada neste experimento, provém da aplicação de silicato de potássio. Administrado via foliar e via solo, a eficiência do silício, presente no silicato, será avaliada neste experimento. Segundo os estudos que apontam, o silício pode fortalecer a estrutura das células vegetais, tornando-as menos suscetíveis a ataques de patógenos e insetos. Este elemento, pode ajudar as plantas a tolerarem estresses ambientais, como seca, salinidade e toxicidade por metais pesados, como também, pode facilitar a absorção de nutrientes, melhorando a eficiência do uso de fertilizantes (PAIXÃO, 2022; BUENO et al, 2025).

Em outro experimento, a aplicação de zinco foi também utilizada como fonte aditiva mineral na cultura do milho. Conforme já relatado por muitos autores, o zinco está

diretamente ligado à produção enzimática, nos processos de fixação do carbono. (ARAÚJO & SILVA, 2012). Essencial para as funções enzimáticas, metabolismo de carboidratos e biossíntese hormonal, a deficiência de zinco pode levar à redução na produtividade. (NAVI et al., 2024).

Diante desse cenário, este trabalho busca analisar o impacto do uso de aditivos minerais na cultura do milho, explorando suas implicações no crescimento, na produtividade e na qualidade dos grãos. Para tanto, serão discutidos os principais mecanismos de ação dos compostos minerais e os fatores que podem influenciar a eficiência na cultura do milho, com base em estudos recentes e dados experimentais.

## Referências bibliográficas

- ALVES, L. R. A.; BACHA, C. J. C. Panorama da agricultura brasileira: estrutura de mercado, comercialização, formação de preços, custos de produção e sistemas produtivos, 317 p, São Paulo: **Editora Alínea**, 2018.
- ALVES, C. R.; SILVA, E. C.; BARBARÁ, M. A.; ORTIN, S. M. A. Uso de estimulante e adubo foliar na cultura do milho. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação- REASE**, v.8, n 10, 2022. <https://doi.org/10.51891/rease.v8i10.7241>.
- AHMAD, I. Os bioestimulantes afetam o crescimento, a produção e a qualidade de *eustoma grandiflorum* l. e *matthiola incana* l. University of Agriculture, Faisalabad-Punjab, Pakistan. **Scielo, Ornam. Hortic.** 31, 2025. <https://orcid.org/0000-0002-6427-2123>.

ANDRADE, V. C. S. **Política nacional de biocombustíveis: da criação à implementação do renovabio no município de Uberaba/MG.** Tese de Doutorado. Instituto de Geografia – IGUFU – Universidade Federal de Uberlândia, 2025. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.5028>.

ARAÚJO, E. O.; SILVA, M. A. C.; Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, p.720-727, 2012. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7isa1848>

BUENO, M. L. M.; ANDRADE, P. P.; DA SILVA. P. P. Doses *Azospirillum brasiliense* na produtividade do milho safrinha. **Revista Delos**, 18(66) e4644, 2025. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n66-052>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2023/2024.** Brasília, 2023.

DÓRIA, C. A. O milho na alimentação brasileira. **Alameda Casa Editorial**, 168 pg, 2021.

DUARTE, M. F.; LOPES, J. A.; ROSSI, A. Agricultura sustentável e bioestimulantes: impactos no crescimento vegetal. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 15, n. 2, p. 58-70, 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of food and agriculture 2019: moving forward on food loss and waste reduction.** Rome, 2019.

FAQUIN, V. Nutrição mineral de plantas. UFV – Universidade Federal de Lavras, Lavras: UFLA / FAEPE, 2005. - Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente.

GARCIA GASQUES, J., BASTOS, E. T., BACCHI, M. R. P., & VIEIRA FILHO, J. E. R. Produtividade total dos fatores na agricultura: Brasil e países selecionados (Texto Para

Discussão, N. 2764, pp. 1-20). Rio de Janeiro: **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, 2022. <https://doi.org/10.38116/td2764>.

LANNA, A.C.; FERREIRA, C. M.; DE FILIPPI, M. C. C. Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro. Comunicado Técnico - EMBRAPA Arroz e feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, 2021.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MATOS, P. et al. Effects of biostimulants on maize (*Zea mays* L.) growth and yield under stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, p. 1120-1135, 2021.

MIGUEIS, A. **Mapeamento de QTLs associados ao acamamento em milho**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista - UNESP, Jaboticabal, 2022.

MOREIRA,M.; SILLMANN, T. A.; DA SILVA, A. L. Uso do extrato de algas como potencializador da eficiência do cultivo de grãos. **Revista Foco- Interdisciplinary studies**, 2024. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n10-007>.

NAVI, H. L.; SUSHMA, H. A.; ARAGANJI, S.; SHANTHANAGOWDA, G. M.; CHANDRA, H. Agronomic Effectiveness of Zinc Sources as Micronutrient Fertilizers: A Comprehensive Review'. **International Journal of Plant and Soil**, vol. 36, Iss: 8, pp 167-176, 2024. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i84847>.

PAIXÃO, J. P. A. **Caracterização morfológica, bioquímica e anatômica do dendêzeiro (*elaeis guineensis* jacq.) em função da disponibilidade hídrica e doses de silício**. Dissertação de mestrado, UNESP – Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022.

QUINTINO NETA, F. X.; DE ASSIS, V. C. S. S.; OLIVEIRA, C. de S. de; OLIVEIRA, J. A. de; OLIVEIRA, G. H. de; DE SÁ, A. A. S.; SILVA, R. P. da; BERTI, M. P. da S. Dinâmica do silício no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22 n. 9, 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n9-085>.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; SOUSA, C. C. M.; PEREIRA FILHO, J. V.; FREITAS, C. A. S. Desempenho de cultivares de girassol sob diferentes lâminas de irrigação no Vale do Curu, CE, **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.57-64, 2011.

SILOTO, R. C. **Danos biológicos de *Spodoptera frugiperda*** (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em genótipos de milho. Piracicaba, SP. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2002.

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

Avaliar o crescimento, desenvolvimento, componentes produtivos e rendimento do milho, adubado com silício e zinco, em Latossolo Vermelho do Cerrado.

### Objetivos específicos

- Identificar, a dose que proporcione melhor incremento nas variáveis biométricas do milho, caso houver.
- Determinar, se assim for, a melhor dose de silício e de zinco, que proporcione melhor crescimento, desenvolvimento e rendimento para a cultura.

## CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Pesquisa Agropecuária Tropical)

### POTENCIAL PRODUTIVO DA CULTURA DO MILHO SOB APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM LATOSOLO VERMELHO DE CERRADO

#### RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis para incrementar a produtividade do milho foi o objetivo deste estudo, isto é, avaliar o crescimento, desenvolvimento, os componentes produtivos e o rendimento do milho, adubado com silício em Latossolo Vermelho de Cerrado. O experimento foi conduzido em vasos plásticos, dispostos a céu aberto, na estação experimental do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho distroférreico (LVdf), fase cerrado, de textura argilosa. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, 5 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de silício (0, 25, 50, 100 e 200%). Utilizou-se  $250 \text{ kg ha}^{-1}$  para o tratamento de 100%, de modo que os demais tratamentos foram proporcionais à dose recomendada. As variáveis avaliadas foram a altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, comprimento de folha, largura de folha, área foliar, índice SPAD, índice NDVI, clorofila *a*, clorofila *b*, índice Falker de clorofila total, clorofila *a/b*, massa de folha, massa de colmo, massa de palha, massa de espiga, massa de sabugo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, diâmetro de sabugo, número de fileiras de grãos da espiga, número de grãos por fileira, a massa de 50 grãos, massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos.

A aplicação de silício influencia no crescimento e desenvolvimento da cultura do milho, promovendo incrementos na produtividade de grãos.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, nutrição mineral, silício, SPAD, clorofila.

## INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) é uma das culturas mais expressivas do setor agrícola mundial, desempenhando papel essencial na alimentação humana e animal, além de ser matéria-prima para biocombustíveis e produtos industriais. No cenário global, o Brasil figura como o terceiro maior produtor, com estimativas de produção que ultrapassam 322 milhões de toneladas na safra 2024/2025 (CONAB, 2025). Tal protagonismo resulta da integração entre condições edafoclimáticas favoráveis e o contínuo avanço tecnológico, impulsionado por centros de pesquisa e empresas do setor agroindustrial. Entretanto, manter e expandir esse desempenho exige estratégias agronômicas sustentáveis que ampliem a resiliência das lavouras frente aos desafios ambientais e nutricionais.

Nesse contexto, o uso de silício (Si) como insumo agrícola tem ganhado destaque nos últimos anos, principalmente em gramíneas acumuladoras como arroz, cana-de-açúcar, sorgo e milho (Li et al, 2022; Quintino Neta et al, 2024). Embora não classificado como essencial para todas as plantas, o silício é amplamente reconhecido como um elemento benéfico, cuja adição ao sistema produtivo pode gerar melhorias significativas no crescimento, no metabolismo e na produtividade das culturas. Plantas com maiores teores de silício geralmente apresentam maior tolerância ao estresse hídrico, resistência a doenças, redução da incidência de pragas e incremento no rendimento de biomassa e grãos ( Cooke & Leishman, 2016).

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, atrás apenas do oxigênio. Ele está amplamente distribuído em minerais primários e secundários, como quartzo e argilominerais, e pode ser encontrado em combinação com Al, Mg, Fe, Ca, K e Na, formando diversos tipos de silicatos (Quintino Neta et al, 2024; Branco, 2025).

Apesar dessa abundância, sua disponibilidade para as plantas é geralmente limitada, já que a maior parte do silício está presente em formas insolúveis. A forma absorvível é o ácido monosilícico ( $H_4SiO_4$ ), que ocorre em baixas concentrações na solução do solo e cuja dinâmica depende de fatores como textura, mineralogia, teor de matéria orgânica e pH (Exley, 2015).

Essa limitação é particularmente crítica em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos do Cerrado brasileiro. Tais solos apresentam elevada acidez, baixa saturação por bases, baixos teores de fósforo e silício disponível, além de alta concentração de alumínio trocável (Vendrame, 2024). Nessas condições, a adição de silício pode contribuir significativamente para a correção da acidez e a melhoria da disponibilidade de nutrientes, além de promover a formação de complexos com alumínio (hidroxialuminossilicatos), reduzindo a toxidez para as raízes (Rodrigues et al., 2011; Savant et al., 1997; Branco, 2025).

A aplicação de fertilizantes silicatados em sistemas agrícolas tem se mostrado uma estratégia eficiente tanto para correção química do solo quanto para melhoria do desempenho fisiológico das plantas. Reações entre os silicatos e os fosfatos presentes no solo resultam na liberação de fósforo previamente indisponível, por meio da formação de silicatos de cálcio, ferro e alumínio (Takahashi, 1995; Fernandes, 2024). Além disso, o silício pode favorecer a atividade de enzimas antioxidantes e a manutenção da turgescência celular, mecanismos que reforçam a tolerância das plantas ao estresse hídrico e térmico (Zhu et al., 2004; Leite, 2024).

Em espécies como o milho, o silício acumula-se nos tecidos epidérmicos das folhas e colmos, conferindo rigidez estrutural e maior resistência ao acamamento, condição que impacta diretamente a colheita e a produtividade (Tavares et al., 2014). A presença de sílica amorfa nas paredes celulares forma uma barreira física que dificulta a penetração de patógenos e a alimentação de insetos sugadores, contribuindo para a proteção mecânica e sanitária da planta (Datnoff et al., 2001; Epstein & Bloom, 2005; Porcino, 2022). Esse efeito é especialmente relevante em ambientes tropicais, em que a pressão de pragas e doenças é elevada e o estresse hídrico pode comprometer o desenvolvimento reprodutivo da cultura.

No Brasil, a relevância agronômica do silício foi reconhecida oficialmente a partir do Decreto nº 4.954/2004, que regulamenta a utilização como fertilizante e corretivo (Planalto.gov.br, 2004). Desde então, diversos estudos têm buscado avaliar os efeitos da suplementação silicatada sobre atributos fisiológicos, morfoestruturais e produtivos em

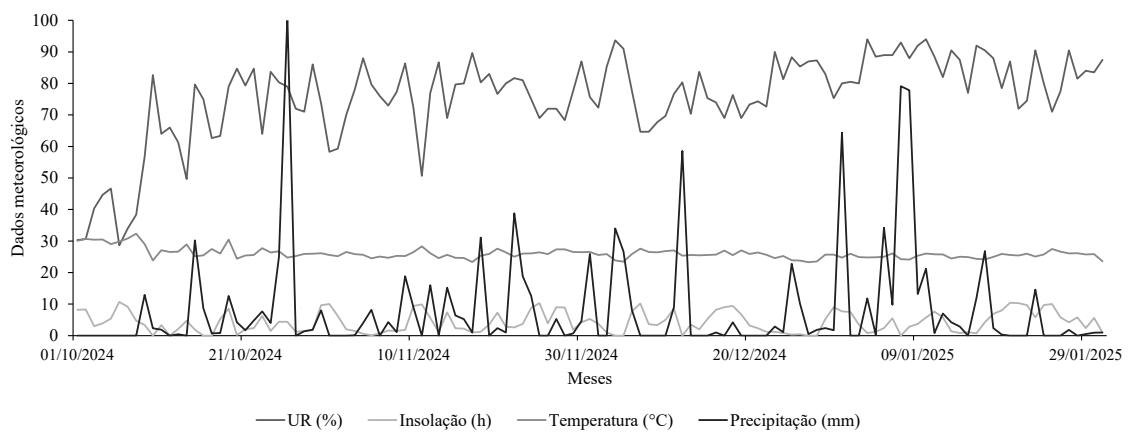
diferentes culturas. Contudo, ainda são escassos os trabalhos que quantificam, de forma integrada, os impactos do silício sobre o crescimento, a fisiologia fotossintética e o rendimento do milho cultivado em Latossolos típicos do Cerrado.

Diante disso, torna-se necessário aprofundar o conhecimento sobre o papel do silício em ambientes com baixa disponibilidade natural desse elemento, considerando as interações com os atributos do solo e os processos fisiológicos das plantas. Avaliar o desempenho agronômico do milho em resposta à aplicação de silício nesse contexto é fundamental para embasar estratégias de manejo nutricional mais eficientes e sustentáveis.

Assim, objetivou-se com o presente estudo avaliar os efeitos da aplicação de doses crescentes de silício sobre o crescimento, o desempenho fisiológico e a produtividade do milho híbrido LG 36799 cultivado em Latossolo Vermelho distrófico típico do bioma Cerrado, buscando identificar níveis adequados de suplementação para maximizar o potencial produtivo da cultura.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos plásticos, dispostos a céu aberto, no período de outubro de 2024 a janeiro de 2025, na estação experimental do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. As coordenadas geográficas do local de instalação são 17°48'28" S e 50°53'57" O, com altitude média de 720 m ao nível do mar. O clima da região é classificado conforme Köppen & Geiger (1928), como Aw (tropical), com chuva nos meses de outubro a maio, e com seca nos meses de junho a setembro. A temperatura média anual varia de 20 a 35 °C e as precipitações variam de 1.500 a 1.800 mm anuais e o relevo é suave ondulado (6% de declividade) (Figura 1).



Fonte: Estação Normal INMET – Rio Verde-GO

Figura 1. Dados meteorológicos: umidade relativa (UR), insolação, temperatura média, precipitação pluvial, ocorridas no período decorrente do experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25

O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, coletado junto ao IFGoiano (LVdf), fase cerrado, de textura argilosa (EMBRAPA, 2013), cujas características químicas desse solo encontram-se na (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25

Camada <sup>1</sup>	Al	H + Al	M.O	CTC	SB	pH
M	---cmolc dm <sup>-3</sup> ---		g dm <sup>-3</sup>	-	%	CaCl <sub>2</sub>
0,00-0,20	0,00	3,30	16,00	5,13	35,73	5,20
0,20-0,40	0,00	2,60	18,00	4,71	44,77	5,50
Camada	N	P	K	Ca	Mg	S
M	%	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	---cmolc dm <sup>-3</sup> ---	mg dm <sup>-3</sup>	
0,00-0,20	0,09	0,80	87,00	1,20	0,40	7,10
0,20-0,40	0,10	3,70	78,00	1,30	0,60	9,50
Camada	Si	Zn	B	Cu	Fe	Mn
M	mg kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>
0,00-0,20	4,75	2,50	0,19	4,70	36,00	17,40
0,20-0,40	4,60	1,20	0,17	3,30	34,30	17,00

<sup>1</sup>P, K, Ca e Mg: Resina; S: Fosfato de cálcio 0,01 mol L<sup>-1</sup>; Al: KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al: SMP; B: água quente; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA; M.O - Matéria Orgânica; pH - em CaCl<sub>2</sub>; CTC - Capacidade de troca de cátions; SB - Saturação da CTC por bases

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, 5 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de silício (0, 25, 50, 100 e 200%), sendo a aplicação via solo. Utilizou-se 2,5 kg ha<sup>-1</sup> para o tratamento de 100%, de modo que os demais tratamentos foram proporcionais à dose recomendada ( SOUZA et al, 2004).

Todos os tratamentos foram adubados no sulco de plantio com nitrogênio na forma de ureia N (30 kg ha<sup>-1</sup>), fósforo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (100 kg ha<sup>-1</sup>), na forma de superfosfato triplo, potássio K<sub>2</sub>O (60 kg ha<sup>-1</sup>), na forma de cloreto de potássio. A adubação nitrogenada foi parcelada sendo que a segunda dose foi aplicada aos 50 DAP. As recomendações de silicato de potássio e sulfato de zinco foram feitas conforme resultados das análises de solo e recomendação de Sousa e Lobato (2004).

Os vasos utilizados tinham capacidade para 10 kg, porém foram devidamente preenchidos com 8 kg de solo (Latossolo Vermelho distroférreo), para evitar o escoamento superficial. Em cada vaso foi adicionado 2 kg de esterco curtido.

O milho foi semeado dia 11 de outubro. O cultivar escolhido para o experimento foi o LG 36799, tecnologia Vip3. As principais características da variedade são: alta produtividade e estabilidade, excelente sanidade foliar, qualidade de colmo e raiz, bom empalhamento e qualidade de grãos, tolerância aos enfezamentos.

Em cada vaso foram colocadas cinco sementes. Aos 20 DAP, foi feito o desbaste, deixando apenas uma planta por vaso. O milho não sofreu ataque de pragas visto que no estágio do embonecamento, as espigas foram ensacadas, preventivamente, com sacos plásticos. Aos 30 DAP, foi realizada a adubação de cobertura, com ureia na proporção de 30 ha<sup>-1</sup> e foram feitas as primeiras análises. Aos 60 DAP, foram coletados novos dados. A colheita foi realizada em 24 de janeiro, quando então foram coletados os demais dados.

As variáveis de crescimento e desenvolvimento avaliadas foram a altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, comprimento de folha, largura de folha, área foliar, massa de folha, massa de colmo, índice SPAD, índice NDVI, clorofila *a*, clorofila *b*, índice Falker de clorofila total e clorofila *a/b*. Os componentes produtivos avaliados foram massa de palha, massa de espiga, massa de sabugo, comprimento de

espiga, diâmetro de espiga, diâmetro de sabugo, número de fileiras de grãos da espiga, número de grãos por fileira e a massa de 50 grãos.

A altura de plantas (AP) foi avaliada utilizando fita métrica, na medida da superfície do solo até o colarinho da folha +1; o diâmetro de colmo (DC), foi determinado com auxílio de um paquímetro na base da planta, rente à superfície do solo; o número de folhas (NF) foi determinado pela contagem das folhas totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde conforme Benincasa (2003).

A área foliar foi obtida pela relação entre o comprimento e a largura da folha, com mais de 50% de área verde, de acordo com metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999), conforme equação 1:

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N+2) \quad (1)$$

Em que:

C - Comprimento da folha (cm);

L - Largura da folha (cm);

N – Número de folhas totalmente abertas;

0,75 - Fator de correção para área foliar da cultura.

Os teores de clorofilas foram avaliados com base no Índice de Clorofilas Falker (ICF) aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). A mensuração foi efetuada através da leitura de duas folhas por parcela, quantificando-se: Clorofila *a* (CLRa); Clorofila *b* (CLRb); Índice Falker de clorofila total (CLRt) e, a relação clorofila *a*/clorofila *b* (CLRa/b), utilizando-se o aparelho Falker ClorofiLOG® modelo CFL 1030.

O índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o índice SPAD foram avaliados aos 30 e 60 DAP. O índice NDVI foi mensurado utilizando-se um sensor de laboura portátil GreenSeeker® (Trimble). As leituras foram realizadas, numa altura de 50 cm. O SPAD (SPAD) foi obtido com auxílio do aparelho Minolta SPAD® 502, efetuado a leitura de duas folhas por parcela.

O diâmetro de espiga e diâmetro de sabugo foram determinados com auxílio de um paquímetro. O comprimento de espiga, foi medido com o auxílio de uma régua graduada. O número de fileiras de grãos da espiga e o número de grãos por fileira foram determinados por meio da contagem do número fileiras/grãos e grãos/fileira de cada espiga, por ocasião da colheita.

Na colheita todas as partes de cada planta foram acondicionadas em sacos de papel para pesagem. As partes da planta foram levadas para estufa de secagem com circulação e renovação de ar por 72 horas a temperatura de 65°C e, posteriormente pesadas. Pesos foram obtidos em balança com precisão de 0,01 g para obtenção da massa e para pesagem das partes das plantas. Assim, foram obtidos a massa de folha (MF), massa de colmo (MC), massa de palha (MP), massa de espiga (ME), massa de sabugo (MS), massa de 50 grãos (M50) e a massa de 1000 grãos (M1000).

A produtividade de grãos (PG) do milho foi determinada a partir da pesagem dos grãos, após a secagem, trilha e limpeza. Para a obtenção do peso dos grãos foi utilizado uma balança com precisão de 0,01 g. A produtividade de grãos foi estimada em kg ha<sup>-1</sup>, após a correção da umidade padrão para 13%.

Os dados foram coletados aos 50 DAP e ao final do ciclo submetidos à análise da variância pelo teste F ( $p<0,05$ ) e em casos de significância, foi realizada análise de regressão para os níveis de adubação com silício, utilizando o software estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2018).

## RESULTADOS

A dose de silício não foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, para o número de folhas do milho aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP), apresentando uma média de aproximadamente 7,75 e 9,90, respectivamente. O diâmetro de espiga e o número de fileiras de grãos da espiga do milho também não foram significativos para a adubação com silício, com média de aproximadamente 43,19 e 17,60 mm, respectivamente.

A altura de planta e o diâmetro de colmo do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 96,50 e 98,37%, respectivamente (Figura 2A e B).

A)

B)

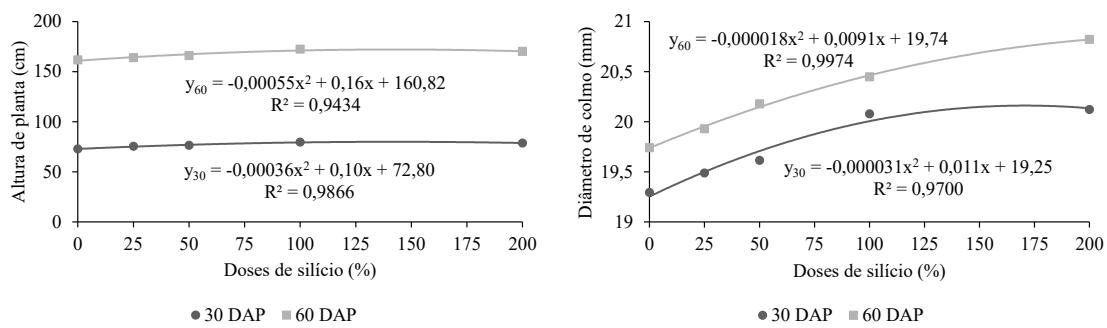


Figura 2. A altura de planta (A) e o diâmetro de colmo (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP), safra 2024/2025.

O acréscimo na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na altura de planta do milho até a dose de 140,04%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a altura de planta máxima de 79,86 cm. A altura de planta máxima verificada na dose de silício de 140,04%, foi aproximadamente 6,57; 4,48; 2,79; 0,60 e 1,02% maior que a altura de planta observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2A).

O aumento na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na altura de planta do milho até a dose de 143,44%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a altura de planta máxima de 172,14 cm. A altura de planta máxima verificada na dose de silício de 143,44%, foi aproximadamente 6,57; 4,48; 2,79; 0,60 e 1,02% maior que a altura de planta observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2A).

A elevação na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos no diâmetro de colmo do milho até a dose de 171,64%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o diâmetro de colmo máximo de 20,17 mm. O diâmetro de colmo máximo verificado na dose de silício de 171,64%, foi aproximadamente 4,53; 3,31; 2,27; 0,79 e 0,12% maior que o diâmetro de colmo observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2B).

O acréscimo na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos no diâmetro de colmo do milho até a dose de 200%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o diâmetro de colmo máximo de 20,84 mm. O diâmetro de colmo máximo verificado na dose de silício de 200%, foi aproximadamente 5,27; 4,23; 3,31 e 1,77% maior do que o diâmetro de colmo observado nas doses de silício de 0, 25, 50 e 100, respectivamente (Figura 2B).

O comprimento de folha, largura de folha e área foliar do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 94,81, 98,14 e 96,55%, respectivamente (Figura 3A, B e C).

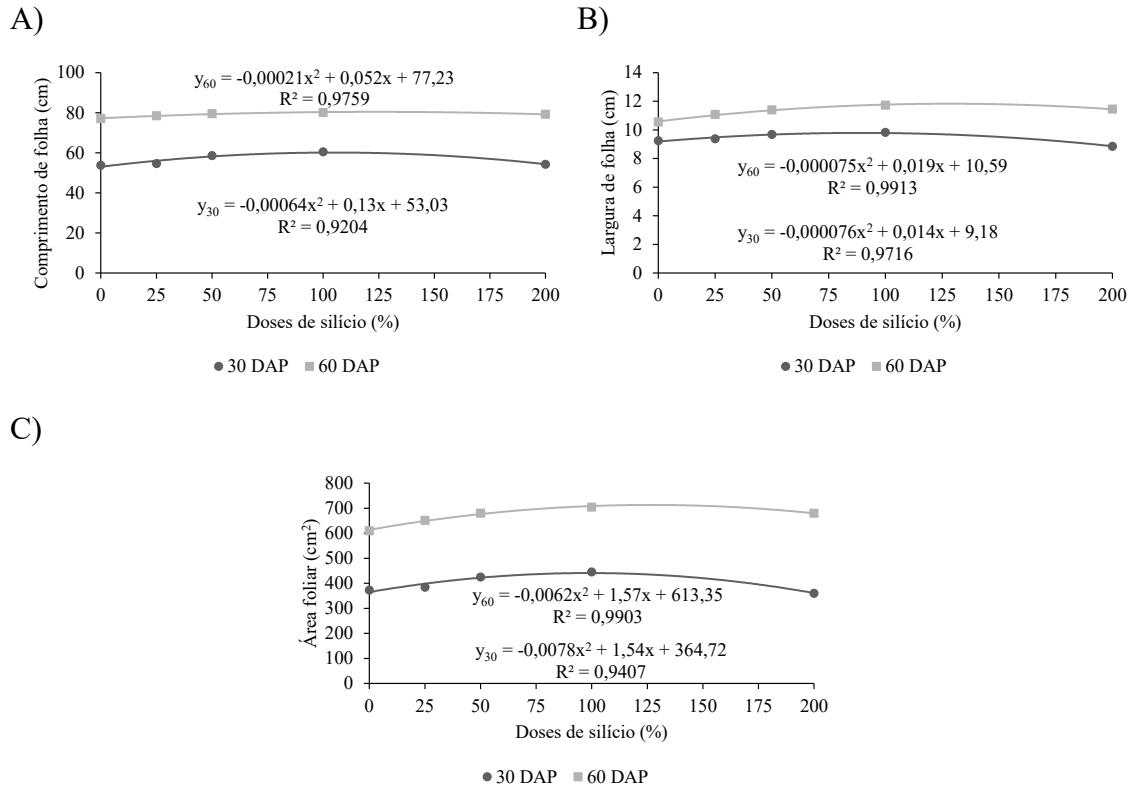


Figura 3. O comprimento de folha (A), largura de folha (B) e área foliar (C) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O aumento na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos no comprimento de folha do milho até a dose de 105,64%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o comprimento de folha máximo de 60,17 cm. O comprimento de folha máximo verificado na dose de silício de 105,64%, foi aproximadamente 11,87; 6,92; 3,29; 0,03 e 9,47% maior que o comprimento de folha observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3A).

O acréscimo na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos no comprimento de folha do milho até a dose de 123,48%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o comprimento de folha máximo de 80,43 cm. O comprimento de folha máximo verificado na dose de silício de 123,48%, foi aproximadamente 3,98; 2,53; 1,41; 0,14 e 1,53% maior que o comprimento de folha observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3A).

A elevação na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na largura de folha do milho até a dose de 89,35%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a largura de folha máximo de 9,79 cm. A largura de folha máxima verificada na dose de silício de 89,35%, foi aproximadamente 6,20; 3,21; 1,20; 0,09 e 9,50% maior do que a largura de folha observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3B).

O aumento na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na largura de folha do milho até a dose de 128,55%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a largura de folha máximo de 11,83 cm. A largura de folha máxima verificada na dose de silício de 128,55%, foi aproximadamente 10,47; 6,80; 3,91; 0,52 e 3,24% maior do que a largura de folha observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3B).

A elevação na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na área foliar do milho até a dose de 98,90%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a área foliar máximo de 441,02 cm<sup>2</sup>. A área foliar máxima verificada na dose de silício de 98,90%, foi aproximadamente 17,30; 9,66; 4,23; 0,002 e 18,08% maior do que a área foliar observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3C).

O acréscimo na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na área foliar do milho até a dose de 126,68%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a área foliar máxima de 712,84 cm<sup>2</sup>. A área foliar máxima verificada na dose de silício de 126,68%, foi aproximadamente 13,96; 8,99; 5,11; 0,62 e 4,68% maior que a área foliar observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3C).

O índice SPAD e NDVI do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com R<sup>2</sup> médio de 95,04 e 98,15%, respectivamente (Figura 4A e B).

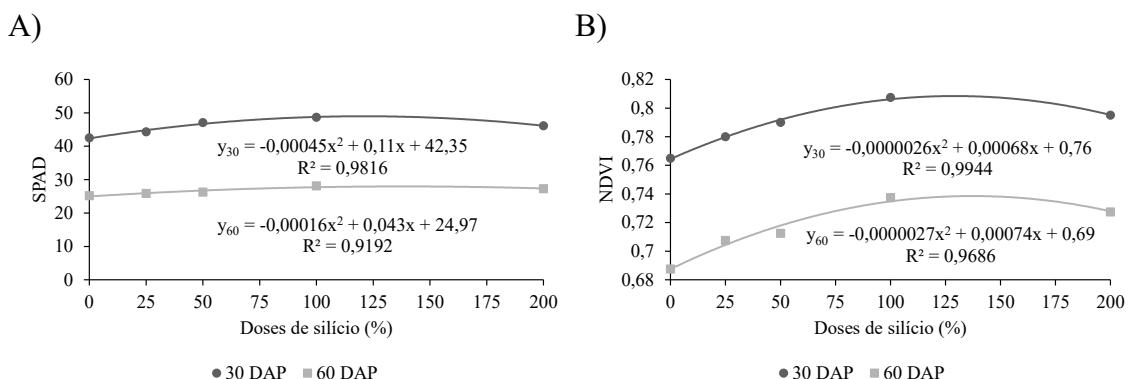


Figura 4. O índice SPAD (A) e NDVI (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos no índice SPAD do milho até a dose de 121,93%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice SPAD máximo de 49,04. O índice SPAD máximo verificado na dose de silício de 121,93%, foi aproximadamente 13,64; 8,62; 4,75; 0,44 e 5,59% maior do que o índice SPAD observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4A).

A elevação na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos no índice SPAD do milho até a dose de 135,44%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice SPAD máximo de 27,90. O índice SPAD máximo verificado na dose de silício de 135,44%, foi aproximadamente 10,52; 6,99; 4,18; 0,72 e 2,39% maior que o índice SPAD observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4A).

O acréscimo na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos no índice NDVI do milho até a dose de 130,96%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice NDVI máximo de 0,81. O índice NDVI máximo verificado na dose de silício de 130,96%, foi aproximadamente 5,51; 3,61; 2,11; 0,31 e 1,53% maior que o índice NDVI observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4B).

O aumento na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos no índice NDVI do milho até a dose de 137,76%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice NDVI máximo de 0,74. O índice NDVI máximo verificado na dose de silício de 137,76%, foi aproximadamente 6,94; 4,65; 2,81; 0,52 e 1,42% maior que o índice NDVI observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4B).

A clorofila *a* e *b* do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 96,76 e 96,72%, respectivamente (Figura 5A e B).

A)

B)

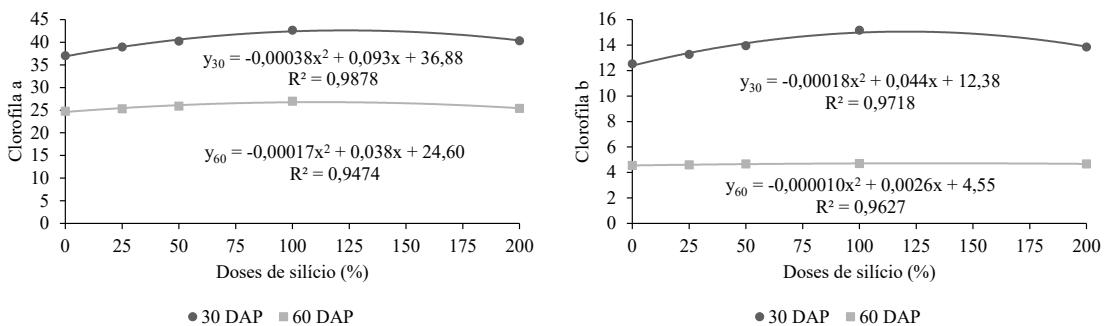


Figura 5. A clorofila a (A) e a clorofila b (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na clorofila *a* do milho até a dose de 122,35%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila *a* máxima de 42,57. A clorofila *a* máxima verificada na dose de silício de 122,35%, foi aproximadamente 13,36; 8,46; 4,67; 0,45 e 5,38% maior que a clorofila *a* observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5A).

A elevação na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na clorofila *a* do milho até a dose de 114,23%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila *a* máxima de 26,82. A clorofila *a* máxima verificada na dose de silício de 114,23%, foi aproximadamente 8,27; 5,05; 2,61; 0,13 e 4,66% maior que a clorofila *a* observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5A).

O aumento na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na clorofila *b* do milho até a dose de 120,24%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila *b* máxima de 15,06. A clorofila *b* máxima verificada na dose de silício de 120,24%, foi aproximadamente 17,76; 11,14; 6,06; 0,50 e 7,82% maior que a clorofila *b* observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5B).

A elevação na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na clorofila *b* do milho até a dose de 128,85%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila *b* máxima de 4,72. A clorofila *b* máxima verificada na dose de silício de 128,85%, foi aproximadamente 3,52; 2,29; 1,32; 0,18 e 1,07% maior que a clorofila *b* observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5B).

O índice Falker de clorofila total e *a/b* do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 97,03 e 87,58%, respectivamente (Figura 6A e B).

A)

B)

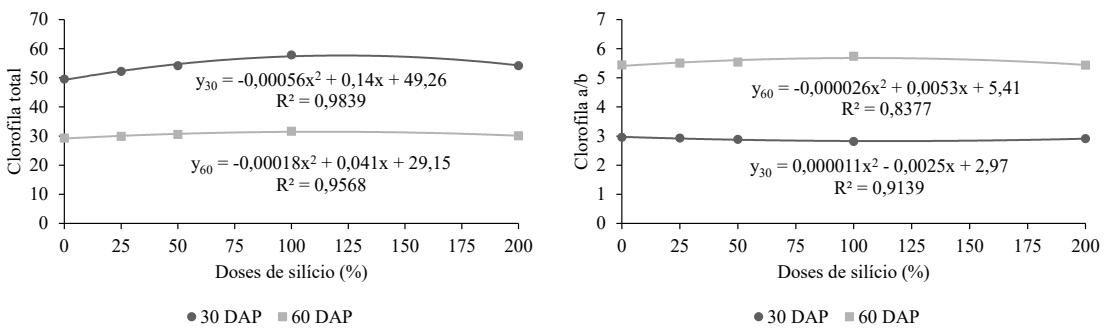


Figura 6. Índice Falker de índice Falker de clorofila total (A) e a clorofila a/b (B) do milho em função das doses de silício aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou incrementos na índice Falker de clorofila total do milho até a dose de 122,75%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice Falker de clorofila total máxima de 57,70. O índice Falker de clorofila total máxima verificado na dose de silício de 122,75%, foi aproximadamente 14,62; 9,27; 5,14; 0,50 e 5,79% maior que a índice Falker de clorofila total observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6A).

A elevação na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos no índice Falker de clorofila total do milho até a dose de 115,06%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o índice Falker de clorofila total máxima de 31,54. O índice Falker de clorofila total máxima verificada na dose de silício de 115,06%, foi aproximadamente 7,55; 4,63; 2,41; 0,13 e 4,12% maior do que o índice Falker de clorofila total observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6A).

O aumento na dose de silício aos 30 DAP, proporcionou diminuição na clorofila a/b do milho até a dose de 116,04%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila a/b mínima de 2,82. A clorofila a/b mínima verificada na dose de silício de 116,04%, foi aproximadamente 4,98; 3,13; 1,67; 0,10 e 2,67% menor que a clorofila a/b observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6B).

O acréscimo na dose de silício aos 60 DAP, proporcionou incrementos na clorofila a/b do milho até a dose de 101,61%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a clorofila a/b máxima de 5,68. A clorofila a/b máxima verificada na dose de silício de 101,61%, foi aproximadamente 4,73; 2,69; 1,22; 0,001 e 4,43% maior que a clorofila a/b observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6B).

A massa de folha e a massa de colmo do milho em função das doses de silício, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 93,71 e 98,59% (Figura 7A e B)

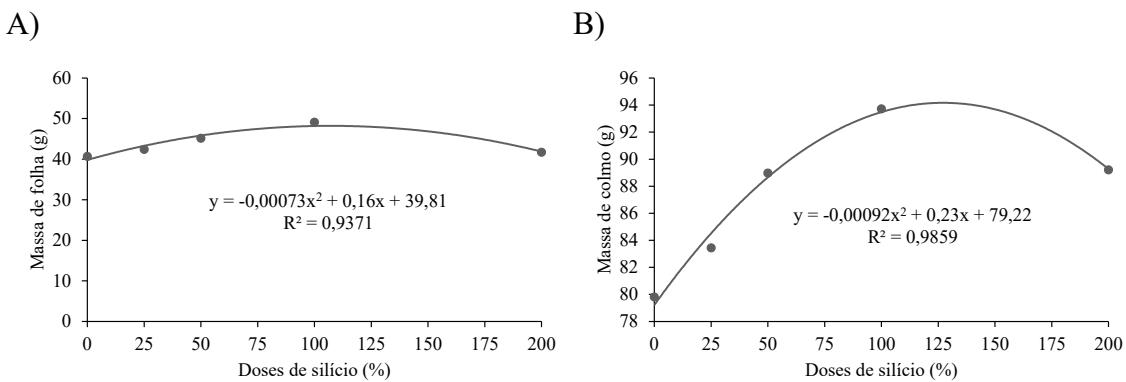


Figura 7. A massa de folha (A) e a massa de colmo (B) do milho em função das doses de silício.

O acréscimo na dose de silício proporcionou incrementos na massa de folha do milho até a dose de 107,39%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de folha máxima de 48,23 g. A massa de folha máxima verificada na dose de silício de 107,39%, foi aproximadamente 17,45; 10,27; 4,98; 0,08 e 12,98% maior do que a massa de folha observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 7A).

O aumento na dose de silício, proporcionou incrementos na massa de colmo do milho até a dose de 127,79%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de colmo máxima de 94,24 g. A massa de colmo máxima verificada na dose de silício de 127,79%, foi aproximadamente 15,94; 10,31; 5,91; 0,75 e 5,09% maior que a massa de colmo estimada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 7B).

A massa de palha, a massa de espiga e a massa de sabugo do milho em função das doses de silício, adequaram-se a modelos linear e quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 97,91, 93,35 e 95,60%, respectivamente (Figura 8A, B e C)



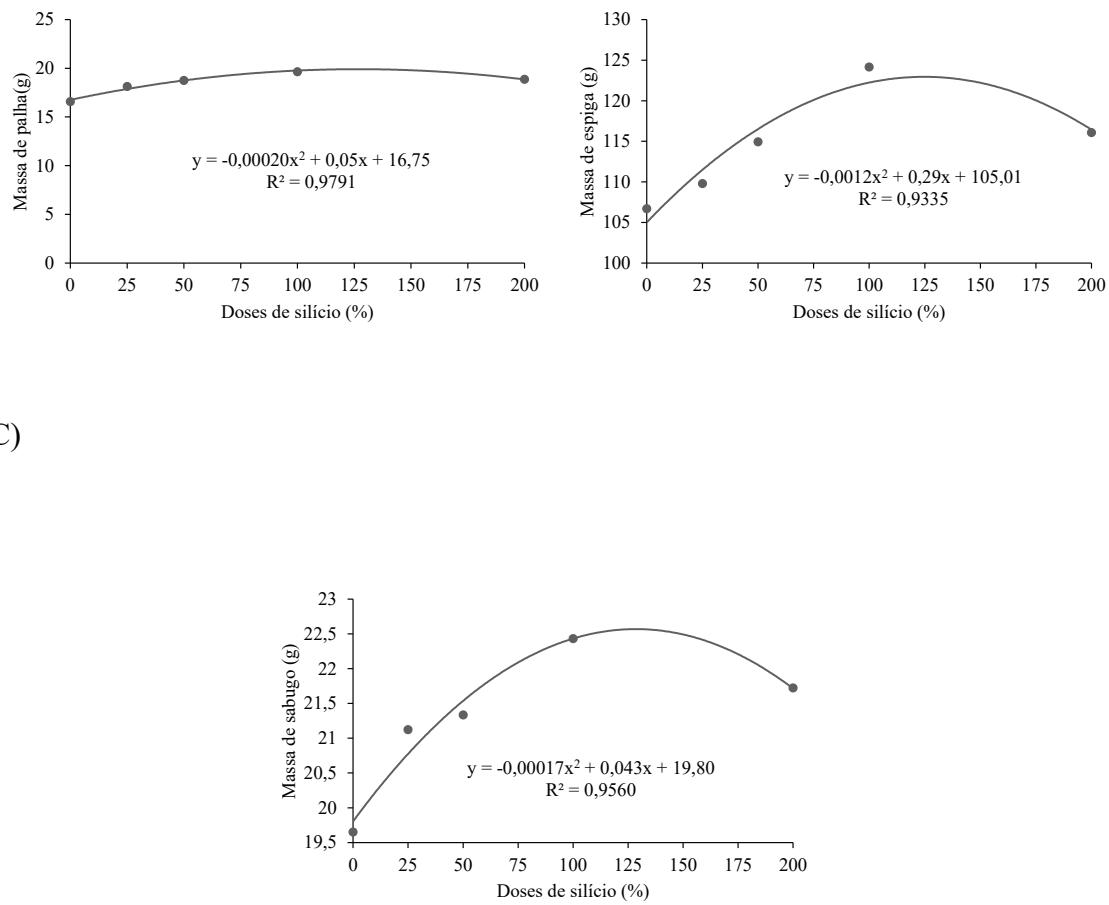


Figura 8. A massa de palha (A), a massa de espiga (B) e a massa de sabugo (C) do milho em função das doses de silício.

O aumento na dose de silício, proporcionou incrementos na massa de palha do milho até a dose de 124,45%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de palha máxima de 19,86 g. A massa de palha máxima verificada na dose de silício de 124,45%, foi aproximadamente 15,61; 9,97; 5,59; 060 e 5,74% maior que a massa de palha estimada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 8A).

O acréscimo na dose de silício proporcionou incrementos na massa de espiga do milho até a dose de 119,79%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de espiga máxima de 122,23 g. A massa de espiga máxima verificada na dose de silício de 119,79%, foi aproximadamente 14,09; 8,82; 4,78; 0,38 e 6,32% maior do que a massa de espiga observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 8B).

A elevação na dose de silício proporcionou incrementos na massa de sabugo do milho até a dose de 126,50%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de sabugo máxima de 22,52 g. A massa de sabugo máxima verificada na dose de silício

de 126,50%, foi aproximadamente 12,08; 7,77; 4,42; 0,53 e 4,08% maior que a massa de sabugo observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 8C).

O comprimento de espiga e o diâmetro do sabugo do milho em função das doses de silício, adequaram-se a modelos quadrático e linear, com  $R^2$  de aproximadamente 94,37 e 98,98%, respectivamente (Figura 9A e B).

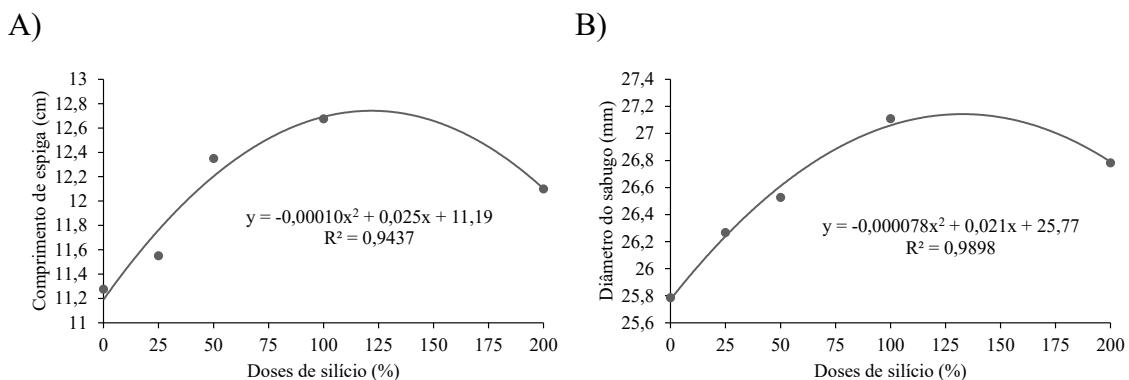


Figura 9. O comprimento de espiga (A) e o diâmetro do sabugo (B) do milho em função das doses de silício.

O acréscimo na dose de silício proporcionou incrementos no comprimento de espiga do milho até a dose de 127,40%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o comprimento de espiga máximo de 12,81 cm. O comprimento de espiga máximo verificado na dose de silício de 127,40%, foi aproximadamente 12,67; 8,18; 4,67; 0,59 e 4,11% maior que o comprimento de espiga observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 9A).

A elevação na dose de silício proporcionou incrementos no diâmetro do sabugo do milho até a dose de 132,47%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o diâmetro do sabugo máximo de 27,14 mm. O diâmetro do sabugo máximo verificado na dose de silício de 132,47%, foi aproximadamente 5,04; 3,32; 1,95; 0,30 e 1,31% maior que o diâmetro do sabugo estimado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 9B).

O número de grão por fileira e a massa de 50 grãos do milho em função das doses de silício, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 98,76 e 92,71%, respectivamente (Figura 10A e B).



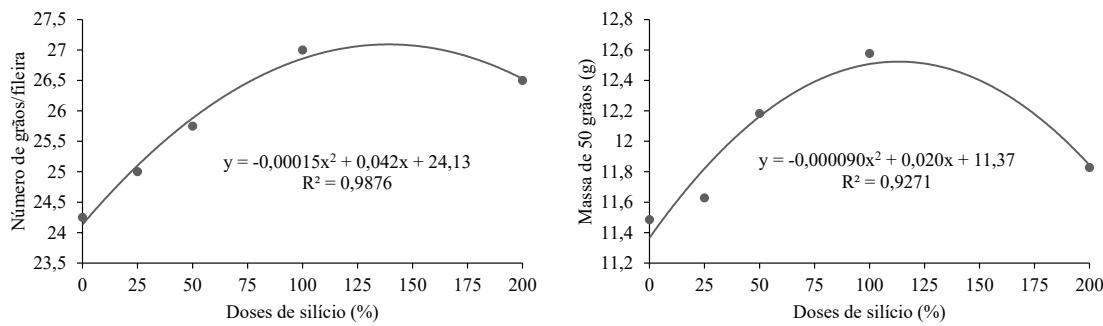


Figura 10. O número de grão por fileira (A) e a massa de 50 grãos (B) do milho em função das doses de silício.

O acréscimo na dose de silício proporcionou incrementos no número de grão por fileira do milho até a dose de 141,77%, com a aplicação desta dose de silício foi atingido o número de grão por fileira máximo de 27,15. O número de grão por fileira máximo verificado na dose de silício de 141,77%, foi aproximadamente 11,10; 7,53; 4,65; 0,96 e 1,87% maior que o número de grão por fileira observado nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 10A).

A elevação na dose de silício proporcionou incrementos na massa de 50 grãos do milho até a dose de 113,65%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de 50 grãos máxima de 12,53 g. A massa de 50 grãos máxima verificada na dose de silício de 113,65%, foi aproximadamente 9,28; 5,65; 2,91; 0,13 e 5,36% maior que a massa de 50 grãos observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 10B).

A massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos do milho em função das doses de silício, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 92,71 e 97,08% (Figura 11A e B).

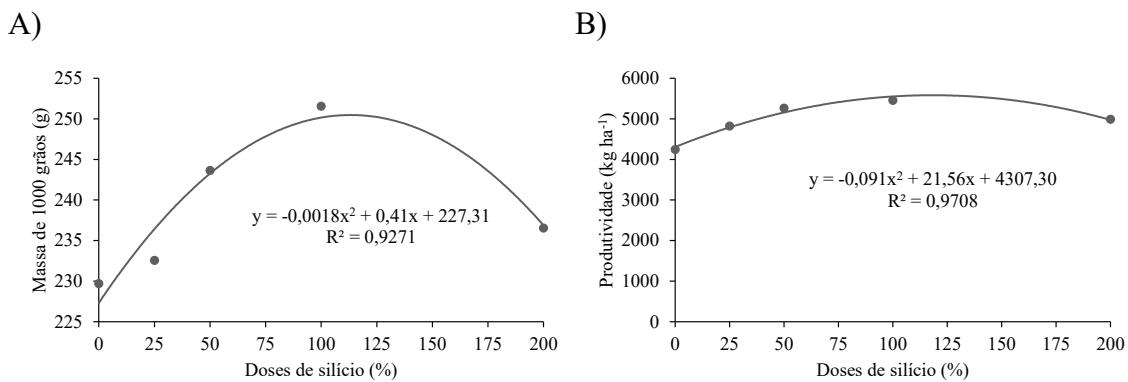


Figura 11. A massa de 1000 grãos (A) e a produtividade de grãos (B) do milho em função das doses de silício.

O aumento na dose de silício proporcionou incrementos na massa de 1000 grãos do milho até a dose de 113,64%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a massa de 1000 grãos máxima de 250,55 g. A massa de 1000 grãos máxima verificada na dose de silício de 113,64%, foi aproximadamente 9,28; 5,64; 2,91; 0,13 e 5,36% maior que a massa de 1000 grãos observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 11A).

O acréscimo na dose de silício proporcionou incrementos na produtividade de grãos do milho até a dose de 118,31%, com a aplicação desta dose de silício foi atingida a produtividade de grãos máxima de 5582,44 kg ha<sup>-1</sup>. A produtividade de grãos máxima verificada na dose de silício de 118,31%, foi aproximadamente 22,84; 14,21; 7,61; 0,55 e 10,89% maior do que a produtividade de grãos observada nas doses de silício de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 11B).

## DISCUSSÃO

O comportamento observado para a altura de planta (Figura 2A) revela que a absorção de silício proporciona incrementos significativos no crescimento até doses intermediárias, tanto aos 30 quanto aos 60 dias após a plantação (DAP). Este efeito pode estar relacionado à atuação do silício como regulador do crescimento por meio da estabilização de estruturas celulares e da melhoria na eficiência fisiológica das plantas. O ponto de máxima altura aos 30 DAP (140,04% da dose) e aos 60 DAP (143,44%) sugere resposta potencializada ao longo do tempo, possivelmente pelo acúmulo progressivo do elemento em tecidos vegetativos. Embora os incrementos percentuais em relação às doses extremas (0% e 200%) não sejam expressivos, eles indicam que o silício pode prolongar a taxa de crescimento por maior período, favorecendo o desenvolvimento vegetativo em estádios críticos (Khan et al., 2021; Galván et al., 2023).

Em relação ao diâmetro de colmo (Figura 2B), observou-se incremento contínuo com o aumento das doses de silício, com o ponto máximo atingido apenas nas doses mais elevadas: 171,64% aos 30 DAP e 200% aos 60 DAP. Esse padrão de resposta é compatível com a literatura, que descreve o acúmulo de silício em tecidos de sustentação como fator determinante para o aumento da rigidez e da espessura dos colmos. A deposição de sílica na parede celular contribui para o reforço estrutural, promovendo maior resistência ao acamamento e melhor capacidade de transporte de seiva, além de favorecer a tolerância a estresses bióticos e abióticos. Esses efeitos estruturais são

especialmente importantes em gramíneas como o milho, que apresentam crescimento rápido e arquitetura ereta, com alta exigência em suporte mecânico (SUN et al., 2022).

De modo geral, a maior responsividade do diâmetro de colmo às doses crescentes de silício, em comparação à altura de planta (Figuras 2A e B), pode ser explicada pela priorização fisiológica da planta em garantir a sustentação do crescimento aéreo, sobretudo em fases mais avançadas do ciclo. Além disso, o fato de o colmo manter incremento até a dose máxima indica que, nesse compartimento, não houve saturação do efeito benéfico do silício, ao contrário do que foi verificado para a altura de planta (Fellet et al., 2021).

O comprimento de folha (Figura 3A) apresentou aumento significativo com a aplicação de silício, alcançando valores máximos de 60,17 cm aos 30 DAP (105,64% da dose) e 80,43 cm aos 60 DAP (123,48%). A resposta mais pronunciada no estádio inicial sugere que o silício contribui para o crescimento longitudinal das folhas, favorecendo a expansão celular ao estimular a atividade enzimática e o balanço hormonal, especialmente citocininas e auxinas. Aos 60 DAP, embora o incremento continue, ele ocorre de forma mais suave, indicando que a expansão foliar atinge um platô fisiológico à medida que a planta direciona recursos para estruturas reprodutivas ou para o espessamento foliar (Michonneau et al., 2021).

A largura de folha (Figura 3B) também foi positivamente influenciada, com valores máximos observados em doses ligeiramente superiores ao comprimento: 9,79 cm aos 30 DAP (89,35%) e 11,83 cm aos 60 DAP (128,55%). O ganho em largura sugere que o silício contribui para a rigidez e sustentação dos tecidos foliares, permitindo expansão mais ampla da lâmina foliar sem colapsos estruturais. Esse comportamento é consistente com o papel do silício na deposição de sílica amorfa nas paredes celulares, conferindo maior estabilidade e resistência à pressão de turgor (Kumar e Bhandari, 2022).

O aumento da área foliar (Figura 3C), que integra o efeito das duas dimensões anteriores, foi mais evidente. A área máxima aos 30 DAP ( $441,02 \text{ cm}^2$ ) foi alcançada com 98,90% da dose de silício, enquanto aos 60 DAP o ponto máximo ( $712,84 \text{ cm}^2$ ) foi obtido com 126,68%. Este resultado evidencia o efeito acumulativo do silício na arquitetura foliar, refletindo-se em maiores superfícies fotossinteticamente ativas. Como a área foliar é diretamente proporcional à capacidade de interceptação de luz e ao acúmulo de fotoassimilados, o incremento observado pode aumentar o potencial produtivo, especialmente sob condições de elevada radiação solar, típicas de regiões tropicais (Tang et al., 2022).

Outro ponto relevante é que, mesmo nas doses mais altas (200%), as reduções observadas em relação às máximas são discretas, reforçando que o silício, mesmo em níveis elevados, não apresenta efeitos fitotóxicos evidentes sobre o milho. Isso confirma sua segurança agronômica e viabilidade de uso em estratégias de manejo que visem o aumento da área foliar e, consequentemente, da eficiência fotossintética (Fiala et al., 2021).

O índice SPAD (Figura 4A), utilizado como estimativa indireta da concentração de clorofila, foi favorecido com a aplicação de silício, alcançando valores máximos de 49,04 aos 30 DAP (121,93% da dose) e 27,90 aos 60 DAP (135,44%). Esses resultados indicam que o silício atua positivamente na manutenção e estabilidade dos pigmentos fotossintéticos, provavelmente por meio da proteção estrutural das células do mesófilo e pela atenuação de estresses oxidativos. O silício reduz a atividade de espécies reativas de oxigênio (ROS) em folhas, preservando a clorofila e mantendo a capacidade de absorção de luz (Mostafa et al., 2021).

Notadamente, a magnitude do índice SPAD (Figura 4A) aos 30 DAP foi maior que aos 60 DAP, sugerindo que o silício é particularmente efetivo na fase inicial de estabelecimento do aparato fotossintético. Este comportamento pode ser atribuído à maior atividade metabólica foliar durante o estádio vegetativo, em que o silício favorece o acúmulo de clorofila e aumenta a eficiência do uso de nitrogênio (Ning et al., 2023).

Em relação ao NDVI (Figura 4B), os dados mostraram incremento gradual até doses intermediárias de silício, com máximos de 0,81 aos 30 DAP (130,96%) e 0,74 aos 60 DAP (137,76%). Este índice, amplamente utilizado para estimar biomassa, vigor e cobertura vegetal, reflete o estado funcional e estrutural do dossel vegetal. O aumento do NDVI em resposta ao silício indica melhora na densidade foliar e na atividade fotossintética, em consonância com os incrementos observados anteriormente em área foliar, comprimento e largura das folhas (Galindo-Gutiérrez e Garcés-Gómez, 2023).

Adicionalmente, os maiores valores de NDVI (Figura 4B) nas fases iniciais do ciclo, seguidos de leve declínio nas doses mais altas, sugerem um ponto de saturação fisiológica, em que o aumento da biomassa foliar não é mais acompanhado de ganhos proporcionais na atividade fotossintética. Isso corrobora a natureza moduladora do silício, cuja ação depende do equilíbrio entre disponibilidade, demanda metabólica e capacidade de assimilação pela planta (Bhardwaj e Kapoor, 2021).

O comportamento conjunto de SPAD e NDVI (Figuras 4A e B) reafirma que o silício atua como elemento funcional no milho, promovendo não apenas o crescimento

morfológico, mas também a eficiência fisiológica da cultura. Essa sinergia resulta em plantas com maior capacidade de captação e conversão da radiação solar em assimilados, especialmente em ambientes de elevada radiação e estresse abiótico, como os observados em solos tropicais (Kovács et al., 2022).

A clorofila *a* (Figura 5A), principal pigmento fotossintético envolvido na captura da energia luminosa, apresentou os maiores teores na dose de 122,35% de silício aos 30 DAP (42,57) e na dose de 114,23% aos 60 DAP (26,82). Esses dados indicam que o silício contribui diretamente para a biossíntese ou estabilidade da clorofila *a*, o que pode ser atribuído à ação protetora sobre estruturas celulares sensíveis ao estresse oxidativo e à degradação por radicais livres. A deposição de sílica nas paredes celulares e a melhora na homeostase hídrica e nutricional proporcionada pelo silício são fatores que favorecem o acúmulo de clorofila (Bhardwaj e Kapoor, 2021).

Notavelmente, a magnitude da clorofila *a* foi superior aos 30 DAP, podendo ser explicado pela maior atividade fotossintética e expansão do aparato foliar nesta fase, antes da senescência ou redirecionamento de recursos para os órgãos reprodutivos. A leve redução observada nas doses mais elevadas sugere uma curva de resposta com efeito de saturação, em que o excesso de silício não resulta em incrementos adicionais de clorofila, mas também não provoca inibição, evidenciando sua segurança agronômica (González-Moscoso et al., 2022).

A clorofila *b* (Figura 5B), pigmento acessório que complementa a captação da luz e transfere energia para a clorofila *a*, também respondeu positivamente ao silício. Os teores máximos foram de 15,06 aos 30 DAP (dose ótima de 120,24%) e de 4,72 aos 60 DAP (128,85%). A relação proporcional entre os aumentos de clorofila *a* e *b* sugere efeito conjunto do silício na manutenção da maquinaria fotossintética, assegurando tanto a eficiência de captação da luz quanto a integridade funcional dos complexos antena dos fotossistemas (Martina et al., 2025).

Importante destacar que a clorofila *b* apresentou menor sensibilidade em termos absolutos aos 60 DAP, com variações percentuais mais discretas, podendo indicar uma estabilidade estrutural ou limitação fisiológica no acúmulo desse pigmento em estádios mais avançados do ciclo. Mesmo assim, os resultados confirmam a continuidade do efeito positivo do silício na fisiologia da planta ao longo do tempo (Chen et al., 2024).

De forma geral, a elevação dos teores de clorofilas *a* e *b* (Figuras A e B) com a aplicação de silício indica aumento da eficiência fotossintética potencial das plantas de milho, e pode resultar em maior produção de assimilados e, consequentemente, refletir

em ganhos em produtividade. Esses achados são consistentes com a literatura que aponta o silício como elemento benéfico em diversas culturas, promovendo melhor desempenho sob estresses abióticos e maior eficiência de uso dos recursos ambientais (MOREIRA, 2023;BRANCO, 2025).

O índice Falker de clorofila total (Figura 6A), representando a soma dos pigmentos a e b, alcançou máximos de 57,70 aos 30 DAP (122,75% da dose) e 31,54 aos 60 DAP (115,06%). Esse padrão de resposta reflete os resultados previamente observados para clorofilas individuais, reafirmando que o silício contribui de maneira integrada para a preservação e biossíntese dos pigmentos em diferentes estádios de desenvolvimento. A maior concentração nos 30 DAP sugere que o silício é particularmente eficaz no estágio vegetativo inicial, quando há elevada demanda por capacidade fotossintética para sustentar o crescimento ativo da parte aérea.

O aumento no índice Falker de clorofila total pode ser atribuído à ação do silício sobre a estabilização das membranas celulares e sobre a redução da taxa de degradação da clorofila, por meio da attenuação de estresses oxidativos. Estudos prévios indicam que o silício ativa mecanismos antioxidantes endógenos e mantém a integridade dos cloroplastos sob estresses ambientais, como salinidade e deficiência hídrica (Cassol et al, 2020).

A relação clorofila a/b (Figura 6 B), importante indicador do balanço entre os dois principais pigmentos da fotossíntese, apresentou comportamentos distintos entre os períodos avaliados. Aos 30 DAP, observou-se declínio na razão a/b até a dose de 116,04%, com valor mínimo de 2,82. Essa redução sugere aumento proporcionalmente maior na clorofila *b* em relação à clorofila *a*, indicando que o silício pode ter favorecido a ampliação dos complexos de antena do fotossistema II, nos quais a clorofila *b* é predominante. Tal efeito pode estar associado à adaptação fisiológica das folhas para maior absorção de luz em condições de rápido crescimento foliar (Tang et al., 2022).

Já aos 60 DAP (Figura 6B), houve aumento na razão *a/b* até a dose de 101,61%, com valor máximo de 5,68, indicando maior proporção de clorofila *a*. Este resultado pode refletir uma reorganização estrutural do aparato fotossintético, priorizando a clorofila *a* em estádios mais avançados, quando a planta direciona recursos para maximizar a eficiência da conversão energética e reduzir a dissipação de energia. Essas variações na razão *a/b* demonstram que o silício não apenas eleva os teores absolutos de pigmentos fotossintéticos, mas também atua na modulação do equilíbrio entre eles, promovendo ajustes finos conforme o estágio fenológico da cultura. Essa plasticidade funcional é

essencial para a otimização da eficiência fotossintética em condições ambientais variáveis (Qiao et al., 2024).

A massa de folha (Figura 7A) aumentou até a dose de 107,39%, com valor máximo de 48,23 g. Este resultado está em consonância com os aumentos previamente observados na área foliar, comprimento e largura das folhas, confirmando que o silício favorece a expansão e desenvolvimento dos tecidos foliares. A maior massa foliar pode ser atribuída ao aumento da espessura das folhas, à maior integridade dos tecidos celulares e à redução de perdas por senescência precoce, já que o silício reduz o estresse oxidativo e reforça as estruturas celulares (Liang et al., 2003; Tatagiba et al., 2024).

A massa de colmo (Figura 7B) alcançou seu valor máximo (94,24 g) com a aplicação de 127,79% da dose de silício, indicando uma resposta mais prolongada em comparação à massa de folha. Este comportamento reforça o papel estrutural do silício, que é depositado nos tecidos mecânicos, como os colmos, promovendo maior resistência e espessamento celular. A maior massa de colmo está diretamente associada à capacidade de suporte da planta e à eficiência de transporte de água e nutrientes, e pode impactar positivamente a produção de grãos, especialmente sob condições de estresse ambiental.

A amplitude do ganho de biomassa, tanto foliar quanto caulinár, em relação às doses de referência (0 a 200%), indica que o silício não apenas favorece o crescimento vegetativo, mas também contribui para a estabilidade e funcionalidade dos tecidos. A redução nas doses mais elevadas sugere a existência de um ponto de saturação fisiológica, comum em elementos benéficos, em que o excesso de silício não promove incrementos adicionais e pode até resultar em leve decréscimo da resposta. Além disso, os dados reforçam que o silício atua de forma integrada, promovendo simultaneamente maior acúmulo de biomassa, aumento da área foliar e manutenção da integridade pigmentária, o que potencializa a eficiência fotossintética e o aproveitamento dos recursos hídricos e nutricionais pela planta (Farouk et al., 2023; Tatagiba et al., 2024).

A massa de palha (Figura 8A), variável associada à porção vegetativa remanescente após a colheita, apresentou incremento até a dose de 124,45%, com valor máximo de 19,86 g. O aumento da massa de palha reflete a maior produção foliar e caulinár previamente observada, demonstrando que o silício contribui para a longevidade e resistência estrutural das partes vegetativas da planta. Isso pode estar relacionado à deposição de sílica nas paredes celulares e à redução da taxa de senescência, fatores que prolongam a funcionalidade dos tecidos mesmo em fases reprodutivas (Nagel, 2024).

A massa de espiga (Figura 8B), componente diretamente vinculado ao rendimento agrícola, também respondeu positivamente ao silício, com aumento até a dose de 119,79%, atingindo o valor máximo de 122,23 g. Este resultado é particularmente relevante, pois demonstra que o silício não atua apenas na promoção do crescimento vegetativo, mas também potencializa a capacidade produtiva da planta. O aumento da massa de espiga pode ser explicado pela maior eficiência fotossintética (conforme sugerido pelos índices SPAD e NDVI), melhor translocação de assimilados e incremento da estrutura reprodutiva, todos favorecidos pela integridade funcional proporcionada pelo silício (Abo-Hamed et al., 2025).

A massa de sabugo (Figura 8C), componente estrutural da espiga, também aumentou até a dose de 126,50%, com valor máximo de 22,52 g. Esse resultado está em consonância com os efeitos do silício sobre o desenvolvimento de tecidos de sustentação, como observado para o colmo. O sabugo, ao suportar os grãos, beneficia-se do reforço estrutural conferido pelo silício, o que pode resultar em espigas mais robustas e uniformes (Ernst et al., 2024).

De modo geral, a resposta conjunta dessas três variáveis indica que o silício promove não apenas o crescimento da planta como um todo, mas também a alocação eficiente de biomassa entre estruturas vegetativas e reprodutivas. Isso reforça seu papel como elemento funcional com impacto direto na produtividade do milho, especialmente em ambientes tropicais sujeitos a estresses abióticos, em que a estabilidade fisiológica promovida pelo silício pode ser decisiva para o desempenho da cultura (Ning et al., 2023).

O comprimento da espiga (Figura 9A), cuja resposta máxima foi observada com a aplicação de 127,40% da dose de silício, atingindo 12,81 cm, é um dos principais componentes do rendimento, pois está diretamente relacionado ao número de fileiras e grãos por fileira. O incremento observado é coerente com os efeitos já discutidos do silício sobre a área foliar, eficiência fotossintética e acúmulo de biomassa, os quais favorecem a maior produção e transporte de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos. O silício, ao reforçar a arquitetura vegetal e melhorar a homeostase hídrica e nutricional, cria condições favoráveis para o pleno desenvolvimento da espiga (Galván, et al, 2023).

O diâmetro do sabugo (Figura 9B), por sua vez, aumentou até a dose de 132,47%, atingindo o valor máximo de 27,14 mm. Este parâmetro também está relacionado à robustez da espiga e, indiretamente, à capacidade de suportar maior número de grãos por unidade de área. A resposta contínua do sabugo ao incremento de silício, mesmo em doses elevadas, indica que os tecidos lignificados e de suporte estrutural

respondem de forma mais persistente à presença do elemento, o que é coerente com sua função de reforço das paredes celulares (Epstein, 1999; Liang et al., 2007).

Adicionalmente, os ganhos percentuais obtidos com doses superiores a 100% demonstram que o silício atua além de um mero efeito residual, promovendo respostas quantitativas nos componentes reprodutivos do milho. Esses efeitos são particularmente importantes em regiões tropicais, em que o estresse hídrico, térmico ou nutricional pode limitar o desenvolvimento pleno da espiga. De forma geral, os dados indicam que o silício, ao modular positivamente características como o comprimento da espiga e o diâmetro do sabugo, contribui diretamente para o aumento do rendimento potencial da cultura. Tais efeitos consolidam sua importância como elemento benéfico na nutrição do milho, não apenas sob a ótica fisiológica, mas também produtiva e econômica (Alayafí et al., 2022).

O número de grãos por fileira (Figura 10A), que é um dos principais determinantes do rendimento de grãos, apresentou incremento até a dose de 141,77%, com valor máximo de 27,15 grãos. Esse aumento reflete os efeitos acumulativos do silício sobre o crescimento vegetativo vigoroso, a eficiente fotossíntese (demonstrada pelos índices SPAD, NDVI e teor de clorofila), e o fortalecimento da estrutura reprodutiva da planta, fatores que, combinados, favorecem o florescimento mais uniforme, a maior taxa de fecundação e o enchimento mais completo das espigas (Girardi et al., 2025).

Já a massa de 50 grãos (Figura 10B), que reflete o peso individual dos grãos e é indicador direto da qualidade do enchimento dos grãos, atingiu valor máximo de 12,53 g com a aplicação de 113,65% da dose de silício. O incremento nesse parâmetro está associado à maior capacidade da planta de produzir e translocar fotoassimilados para os grãos em formação, condição favorecida por folhas mais ativas, maior massa foliar e manutenção da integridade fisiológica ao longo do ciclo. Além disso, o silício atua na preservação da turgescência celular, pode contribuir para o enchimento mais eficiente dos grãos, especialmente sob condições de estresse hídrico moderado (Aluko et al., 2021).

A natureza parabólica da resposta em ambos os casos evidencia um ponto de saturação fisiológica a partir do qual doses adicionais de silício não resultam em melhorias adicionais e podem até comprometer a resposta. Isso reforça a importância de definir faixas agronomicamente ótimas para o uso do silício como insumo em cultivos comerciais. Em conjunto, esses resultados demonstram que o silício exerce influência positiva e multifatorial sobre a produtividade do milho, atuando desde os estágios iniciais de desenvolvimento até os atributos finais de rendimento. Essa ação integrada do silício

em componentes quantitativos e qualitativos dos grãos sustenta o potencial como aliado estratégico em sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em solos de baixa fertilidade ou sob regimes climáticos restritivos (Zhang et al., 2024).

A massa de 1000 grãos (Figura 11A), um dos principais componentes do rendimento, atingiu valor máximo de 250,55 g com a aplicação de 113,64% da dose de silício. Este incremento indica que o silício favorece não apenas o número de grãos, mas também a qualidade do enchimento, possivelmente por promover melhor translocação de fotoassimilados, manutenção da atividade fotossintética e eficiência no uso da água, como já evidenciado em outras variáveis do estudo. A estabilidade fisiológica conferida pelo silício contribui para que o processo de enchimento de grãos ocorra de forma mais completa, refletindo em maior massa final dos grãos (SANTANA et al., 2024).

A produtividade de grãos (Figura 11B), variável de maior relevância agronômica, apresentou incremento contínuo até a dose de 118,31%, com valor máximo de 5582,44 kg ha<sup>-1</sup>. A magnitude do ganho (até 22,84% em relação à testemunha) evidencia que o silício impacta diretamente o desempenho produtivo do milho, sobretudo pela soma dos efeitos observados ao longo do ciclo: maior área e massa foliar, maior eficiência fotossintética (SPAD e NDVI), incremento na biomassa de colmo, espiga e sabugo, e maior número e massa de grãos (Alayafi et al., 2022).

Esses resultados podem inferir que o silício é promotor do rendimento em gramíneas, principalmente em condições de estresse abiótico, comuns em ambientes tropicais. Além disso, a ausência de respostas negativas nas doses mais elevadas, ainda que com pequena redução do efeito, indica que o uso de silício é agronomicamente seguro, desde que aplicado na faixa de resposta fisiológica otimizada. Dessa forma, os dados confirmam que a aplicação de silício pode ser uma estratégia eficiente para o aumento da produtividade do milho, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas por meio do fortalecimento fisiológico das plantas e da melhoria da eficiência no uso de recursos naturais (Kovács et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2025).

## CONCLUSÕES

O máximo crescimento e desenvolvimento do milho aos 30 e 60 DAP ocorre quando a cultura é adubada com dose de silício acima de 120%, indicando incrementos de até 9,50% nos componentes produtivos do milho.

A utilização de silício na cultura do milho promove incrementos nos componentes de produção da cultura, nos parâmetros comprimento de espiga, número de grãos por fileira, massa de espiga, massa de sabugo e massa de 50 grãos.

O silício desempenha papel relevante na fisiologia e no desenvolvimento do milho, sendo capaz de promover melhorias na produtividade e em variáveis fisiológicas quando aplicado em doses moderadas.

O comportamento quadrático observado em diversas variáveis indica que há limite ideal de aplicação, além do qual os efeitos benéficos reduzem ou tornam-se prejudiciais, possivelmente por causa da toxicidade ou à competição metabólica entre diferentes estruturas da planta.

A produtividade de grãos máxima do milho ( $5582,44 \text{ kg ha}^{-1}$ ) é verificada na dose de silício de 118,31%, promovendo incrementos de até 22,84%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) pelo auxílio financeiro ao presente projeto de pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-HAMED, S.; ELGHAREEB, E.M.; EL-SHAHABY, O.; IBRAHEEM, F. Monitoring dynamics in ear-leaf physiology during maize grain filling: genotype and nitrogen impact on source–sink relations and yield. *Acta Physiologiae Plantarum* v.47, n.34, p.1-15, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11738-025-03775-8>

ALAYAFI A. H., AL-SOLAIMANI S. G. M., ABD EL-WAHED M. H., ALGHABARI F. M., SABAGH A. EL. Silicon supplementation enhances productivity, water use

efficiency and salinity tolerance in maize. **Frontiers in Plant Science**, v.13, n.1, 953451, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.953451>

ALUKO, O.O.; LI, C.; WANG, Q.; LIU, H. Sucrose Utilization for Improved Crop Yields: A Review Article. **International Journal of Molecular Sciences**. v.22, n.9, 4704, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22094704>

ARAB-AVAL, M.; GANJALI, H. R. Morpho-Physiological Responses of Wheat to Silicon and Bio-Fertilizer under Water-Deficit Conditions. **The Philippine Agricultural Scientist**, v. 105, n. 1, p. 68-78, 2022. <https://doi.org/10.62550/EL058021>.

ARAÚJO, V. de S.; SOUSA, T. K. R. de; NOBRE, R. de S.; SANTOS, C. de M.; NEGREIROS, K. K. da S.; CARVALHO, A. C. C. de; VELOSO, F. de S.; VELOSO, R. C.; REZENDE, J. S. Influência da aplicação foliar de silício no desenvolvimento e produtividade do milho sob déficit hídrico no semiárido piauiense. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e25711528051, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28051>.

ARYADEEP, R. Nanopartículas de silício no melhoramento de culturas e agricultura. **Jornal Internacional sobre Avanços Recentes em Biotecnologia e Nanotecnologia**, 3(1): 54-65, 2020.

ASGARI, F.; MAJD, A.; JONOUBI, P.; NAJAFI, F. Efeitos das nanopartículas de silício nas características moleculares, químicas, estruturais e ultraestruturais da aveia (*Avena sativa L.*). **Fisiologia Vegetal e Bioquímica**, 127: 152-160, (2018).

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, p.1-41, 2003.

BHARDWAJ, S.; KAPOOR, D. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.166, n.1, p.1044-1053, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.005>.

BRANCO, J. da S. C. Efeito do silício e bactérias fixadoras de nitrogênio nos parâmetros morfoprodutivos e no valor nutricional de silagens de milho na forma de ração total para

ovinos e bovinos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, UFMA – Universidade Federal do Maranhão, 2025.

CASSOL, J.C.; DORNELLES, S. H. B.; SOARES, J. da S.; NUNES, E. A.; LOPES, S. J. Silício na mitigação de estresse por frio em sementes de arroz tratadas com dietholate. **Vivências**, v.16, n.31, 2020.

CHEN, Y.; WANG, L.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; JIN, S. Altered Photoprotective Mechanisms and Pigment Synthesis in *Torreya grandis* with Leaf Color Mutations: An Integrated Transcriptome and Photosynthesis Analysis. **Horticulturae**, v.10, n.11, 1211, 2024. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10111211>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/2025. Brasília, 2025.

DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.& KORNDÖRFER, G.H. Silicon on Agriculture. Amsterdam, **Elsevier Science**, Vol 8, Ed.1, 424p, 2001.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do abastecimento, p.1-306, 2013.

ERNST, D.; KOLENČÍK, M.; ŠEBESTA, M.; ŽITNIAK ČURNÁ, V.; QIAN, Y.; STRAKA, V.; DUCSAY, L.; KRATOŠOVÁ, G.; ĎURIŠOVÁ, L.; GAŽO, J.; BALÁŽI, J. Enhancing Maize Yield and Quality with Metal-Based Nanoparticles without Translocation Risks: A Brief Field Study. **Plants**, v.13, n.14 1936, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13141936>

FAROUK, S.; AL-HUQAIL, A.A.; EL-GAMAL, S.M.A. Potential Role of Biochar and Silicon in Improving Physio-Biochemical and Yield Characteristics of Borage Plants under Different Irrigation Regimes. **Plants**, v.12, n.8, 1605, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12081605>

FELLET, G.; PILOTTO, L.; MARCHIOL, L.; BRAIDOT, E. Tools for nano-enabled agriculture: fertilizers based on calcium phosphate, silicon, and chitosan nanostructures. **Agronomy**, v.11, n.6, 1239, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061239>.

FERNANDES, L. A. Uso de pós de rocha e biocarvão para a produção do tomateiro. Dissertação de Mestrado. Instituto de Ciências Agrárias, IFMG, 2024.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FIALA, R.; FIALAVÁ, I.; VACULÍK, M.; LUXOVÁ, M. Effect of silicon on the young maize plants exposed to nickel stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.166, n.1, p.645-656, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.026>

FLORES, R. A.; ARRUDA, E. M.; DAMIN, V.; SOUZA JUNIOR, J. P.; MARANHÃO, D. D. C.; CORREIA, M. A. R.; PRADO, R. M. Physiological quality and dry mass production of *Sorghum bicolor* following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 4, p. 631-638, 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.04.pne967>.

FREITAS, L. B.; COELHO, E. M.; MAIA, S. C. M.; SILVA, T. R. B. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 262-267, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000200020>.

GALINDO-GUTIÉRREZ, N. F.; GARCÉS-GÓMEZ, Y. A. Effects of silicon application on yield, spectral index, and fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) infestation on maize (*Zea mays*) crop. **AgriEngineering**, v.5, n.4, p.2112-2122, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040129>.

GALVÁN, J. S.; MORENO, A. C.; ROMERO, A. L.; AGUILAR, E. J.; ORTIZ, D. V. Efecto nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*musa spp.*) en ecuador. **Agron. Costarricense**, v.47, n.2, 2023. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v47i2.56131>

GIRARDI, V. A. M.; OLIVEIRA, C. E. da S.; LIMA, B. H. de; GATO, I. M. B.; SANTOS, P. L. F. dos; JÚNIOR, N. C. de S. JALAL, A.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation of plant growth-promoting bacteria and silicon to optimize nitrogen fertilization in Emerald grass. **Ornamental Horticulture** n. 31, 2025. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v31.e312800>.

GONZÁLEZ-MOSCOSO, M.; JUÁREZ-MALDONADO, A.; CADENAS-PLIEGO, G.; MEZA-FIGUEROA, D.; SENGUPTA, B.; MARTÍNEZ-VILLEGAS, N. Silicon nanoparticles decrease arsenic translocation and mitigate phytotoxicity in tomato plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, n.1, p.34147–34163, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17665-2>

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.

KHAN, M. I. R.; ASHFAQUE, F.; CHHILLAR, H.; IRFAN, M.; KHAN, N. A. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: An entrancing crosstalk between stress alleviators, **Plant Physiology and Biochemistry**, v.162, p. 36-47, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.024>.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**, v.11, n.9, 1223, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>.

KUMAR, S.; BHANDARI, D. Silicon: as a potential source to pests management. **International Journal of Tropical Insect Science**, v.42, n.1, p.3221–3234, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00869-5>

LEITE, W. de S. **Silício como mitigador do déficit hídrico em cultivares de feijão-caupi**. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Agrárias, UFPI, Campus Ministro Petrônio Portela, 2024.

LI, R.; S. Y.; W. H.; W. H. Advances in Understanding Silicon Transporters and the Benefits to Silicon-Associated Disease Resistance in Plants. **MDPI – Applied Sciences**, 12(7):3282, 2022.

LIANG, Y.C., SUN, W.C., ZHU, Y.G., CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environment Pollution** 147, 422–428, 2007.

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; MA, L.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANG, X. Silicon-Mediated Physiological and Agronomic Responses of Maize to Drought Stress Imposed at the Vegetative and Reproductive Stages. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1136, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081136>.

MARTINA, A.; FERRONI, L.; MARROCCHINO, E. The Soil–Plant Continuity of Rare Earth Elements: Insights into an Enigmatic Class of Xenobiotics and Their Interactions with Plant Structures and Processes. **Journal of Xenobiotics**, v.15, n.2, 46, 2025. <https://doi.org/10.3390/jox15020046>

MICHONNEAU, P.; ROBLIN, G.; BÉRÉ, E.; FLEURAT-LESSARD, P.; ATANASSOVA, R. Adaptive responses of miniature rose to cultivation modes and abiotic stresses. **Trees**, v.35, n.1, p.809–829, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02079-3>

MOREIRA, V. de A. **Inoculação com bactérias promotoras de crescimento, fornecimento de silício e adubação nitrogenada em grama esmeralda**. Dissertação de Mestrado, 88 p., Faculdade de Agronomia de Ilha Solteira – UNESP, 2023.

MOSTOFA, M. G., RAHMAN, MD. M., ANSARY, MD. M. U., KEYA, S. S., ABDELRAHMAN, M., MIAH, MD. G.; PHAN TRAN, L. S. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v.41, n.6, p.918–934, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

NAGEL, J. C. O uso do silício na cultura da soja: avanços recentes e impactos na produtividade. **Revista Delos**, 17(62), e3140, 2024.

<https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n62-075>

NING, D.; ZHANG, Y.; LI, X.; QIN, A.; HUANG, C.; FU, Y.; GAO, Y.; DUAN, A. The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages. **Plants**, v.12, n.12, 2386, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12122386>

OLIVEIRA, J. G. A. de; REIS, H. S. dos; ARAÚJO, J. F.; BOMFIM, L.S.V.; BARBOSA, A. C. F. Biodiversidade e a revitalização dos solos - da ação microbiológica à adição de nutrientes para remineralização. **Ciência Florestal**, n.35, 2025. <https://doi.org/10.5902/1980509870819>.

PORCINO, M. M. **Indução de resistência do meloeiro à Fusarium sp. com elicidores à base de silício**. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Campus II, Areia, 2022.

QIAO, M.; HONG, C.; JIAO, Y.; HOU, S.; GAO, H. Impacts of Drought on Photosynthesis in Major Food Crops and the Related Mechanisms of Plant Responses to Drought. **Plants**, v.13, n.13, 1808, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13131808>

QUINTINO NETA, F. X.; DE ASSIS, V. C. S. S.; OLIVEIRA, C. de S. de; OLIVEIRA, J. A. de; OLIVEIRA, G. H. de; DE SÁ, A. A. S.; SILVA, R. P. da; BERTI, M. P. da S. Dinâmica do silício no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22 n. 9, 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n9-085>

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 134, p. 14-20, 2011.

SACALA, E. The influence of increasing doses of silicon on maize seedlings grown under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, Vol. 40, Iss: 6, pp 819-827, 2017.  
<https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1236948>

SAFI, S. M. A.; HAMMOOD, W. F.; AL-KHALDY, R. A. Response of Cultivars of Maize (*Zea mays L.*) to Silicon under the Influence of Water Stress. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1158, n. 6, p. 062036, 2023.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/6/062036>.

SANTANA, A. T. DE; FREITAS, L. M. DE. Influência da aplicação de silício foliar no desenvolvimento e nas características agronômicas de grão de bico. **Scentia 21**, v.3, n.1, 2024.

SETU, F. F.; RAHMAN, M. A.; SARKER, M. Z. I.; UDDIN, M. K.; AHMED, I.; MOHIUDDIN, K. M. Application of Diverse Silicon Sources to Soil for Reducing Wheat Blast Disease. **Journal of the Bangladesh Agricultural University**, v. 22, n. 3, p. 295–309, 2024. DOI: [10.3329/jbau.v22i3.76401](https://doi.org/10.3329/jbau.v22i3.76401).

SOUZA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**.  
 Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2<sup>a</sup> ed. 416 p., 2004.

SRINIVASAN, C.; PERIYAKAMAN, C. ; MOOKIAH, S. ; PARAMAN, M. P. ; RAMAN, R. ; YUVARAJ, M. Combined effects of silicon and growth regulator on plant growth parameters of maize (*Zea mays L.*). **Research Square**, 2024.  
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3925365/v1>.

SUN, H.; CAO, Y.; CAO, Y.; KIM, D.; MERELLI, B. Biomaterials technology for agrofood resilience. **Advanced Functional Materials**, v.32, n.1, 2201930, 2022.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.202201930>

SUSILOWATI, A.; WIDYAWATI, W.; SULISTYOWATI, L. The comparison of chlorophyll a, b, and the total of maize (*Zea mays saccharata* Sturt. l. var. P-21) by applying fertilizers of nanosilica-NPK and nanosilica-manure. **Journal of Physics:**

**Conference Series**, v. 1217, n. 1, p. 012155, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012155>.

TANG, W.; GUO, H.; BASKIN, C.C.; XIONG, W.; YANG, C.; LI, Z.; SONG, H.; WANG, T.; YIN, J.; WU, X.; MIAO, F.; ZHONG, S.; TAO, Q.; ZHAO, Y.; SUN, J. Effect of light intensity on morphology, photosynthesis and carbon metabolism of alfalfa (*Medicago sativa*) Seedlings. **Plants**, v.11, n.13, 1688, 2022.  
<https://doi.org/10.3390/plants11131688>

TATAGIBA, S. D.; CARELLI, C.; FIGUEIREDO, A. L. P.; BRANCALEONI, L.; GARDIN, J. P. P.; SOUZA, A. C. M. de; PADILHA, A. S. Uso do silício no crescimento e produção do feijoeiro submetido a diferentes condições hídricas. **Researchgate**, 17(3)  
<http://dx.doi.org/10.36560/17320241930>

VENDRAME, V. R. S. **Relações entre a mineralogia, fertilidade, acidez e macrofauna em latossolos do cerrado sob pastagem.** Tese de Doutorado. Centro de Ciências Agrárias, UEL – Londrina, 2024.

VILLASEÑOR-ORTIZ, D. R.; TENESACA, L. F. L. Contribución del silicio al crecimiento, rendimiento productivo y control de sigatoka negra en el cultivo de banano. **Acorbat – Revista de tecnologia y ciencia**, 1(10, 34, 2024).  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.2434>.

ZHANG, F.; LIU, Y.; LIANG, Y.; DAI, Z.; ZHAO, Y.; SHI, Y.; GAO, J.; HOU, L.; ZHANG, Y.; AHAMMED, G.J. Improving the Yield and Quality of Tomato by Using Organic Fertilizer and Silicon Compared to Reducing Chemical Nitrogen Fertilization. **Agronomy**, v.14, n.5, 966, 2024.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy14050966>

## CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a revista Pesquisa Agropecuária Tropical)

### **DESEMPENHO AGRONÔMICO DA CULTURA DO MILHO EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO COM ZINCO EM LATOSSOLO DE CERRADO**

#### **RESUMO**

O zinco é um micronutriente essencial para a agricultura, atuando na síntese de proteínas e hormônios de crescimento, como as auxinas, que são cruciais para o desenvolvimento e maturação de flores, grãos e sementes e que frequentemente causa deficiência nutricional. Sua presença garante a saúde e a produtividade das plantas, influenciando processos como a fotossíntese e a resistência a estresses, além disso o zinco tem sido pouco estudado, enquanto micronutriente importante para o crescimento, desenvolvimento e rendimento do milho. Por essas constatações, objetivou-se com este estudo avaliar o crescimento, desenvolvimento, os componentes produtivos e a produtividade do milho (LG 36799), adubado com zinco, em Latossolo Vermelho de Cerrado. O experimento foi conduzido em vasos plásticos, dispostos a céu aberto, na estação experimental do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrego (LVdf), fase cerrado, de textura argilosa. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, 5 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de sulfato de zinco (0, 25, 50, 100 e 200%). Utilizou-se  $5,2 \text{ kg ha}^{-1}$  para o tratamento de 100%, de modo que os demais tratamentos foram proporcionais a dose recomendada. As variáveis avaliadas foram a altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, comprimento de folha, largura de folha, área foliar, índice SPAD, índice NDVI, clorofila

*a*, clorofila *b*, índice Falker de clorofila total, clorofila *a/b*, massa de folha, massa de colmo, massa de palha, massa de espiga, massa de sabugo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, diâmetro de sabugo, número de fileiras de grãos da espiga, número de grãos por fileira, massa de 50 grãos, massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos. A utilização do zinco na cultura do milho cultivado em Latossolo de Cerrado é fundamental para a obtenção de maior crescimento, área foliar, teor de clorofila, índice SPAD, índice NDVI, biomassa, componentes produtivos e produtividade de grãos, principalmente em doses elevadas.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, micronutriente, sulfato de zinco, produtividade, SPAD.

## INTRODUÇÃO

O zinco, segundo Dechen & Nachtigall (2006), é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, já que atua como ativador enzimático. Malavolta (1980), observou que o zinco atua como cofator regulador da síntese de diversas substâncias ligadas ao metabolismo vegetal, crucial para ativação enzimática, triptofano e, indiretamente, para a produção de ácido indolacético (AIA), além da manutenção e resistência celular.

Abha Manohar et al.,(2023), destacaram a importância do zinco para a saúde das plantas. Estes autores relataram que o sulfato de zinco ( $ZnSO_4$ ) aumentou significativamente o rendimento e o crescimento do milho (*Zea mays* L.) em vários estudos conduzidos em 2022.

Navi et al., (2024), destacaram que o zinco é um micronutriente vital nas plantas, pois além de atuar como cofator catalítico nas reações enzimáticas, é essencial para o metabolismo e síntese de muitas proteínas, além dos carboidratos, biossíntese do hormônio do crescimento (AIA) e manutenção da integridade da membrana celular, interferindo diretamente no rendimento geral da planta.

Os mesmos autores, baseados no conhecimento geral, levantaram algumas interações do zinco com outros nutrientes. Segundo os autores, altos níveis de zinco podem inibir a absorção de ferro. Altos índices de fósforo no solo, podem reduzir a absorção de zinco pelas plantas, já que podem competir pelos mesmos locais de ligação no solo. O cálcio também pode afetar a disponibilidade e absorção do zinco. Já o

manganês, em altos níveis, pode inibir a absorção de Zn. Com o cobre, o zinco tem uma relação sinérgica. O nível adequado de um pode melhorar a absorção do outro.

Segundo Shamsi et al., (2023), o zinco nas plantas, é essencial para a floração e frutificação e funciona como cofator de 300 enzimas, interações proteicas e estrutura da cromatina. Porém, sua toxicidade resulta em crescimento atrofiado dos rebentos, necrose na ponta das folhas, enrolamento das folhas mais jovens e clorose. A faixa ideal de utilização ainda é um desafio para os pesquisadores.

Solos do cerrado são, geralmente, deficitários em zinco. Sendo absorvido na forma de  $ZN^{2+}$ , pode ser administrado via solo, via foliar ou pelo tratamento de sementes. Em lavouras de milho, quando o teor no solo estiver entre 0 e 1  $mg/dm^{-3}$ , aplicar 6  $Kg ha^{-1}$  ou via foliar, 2,2  $Kg ha^{-1}$ , de sulfato de zinco, em 280 L água (EMBRAPA,1999). Segundo Malavolta (2006), o zinco é o micronutriente que mais limita a produtividade das culturas.

Considerando os aspectos abordados, objetivou-se com este experimento, avaliar o crescimento, desenvolvimento, os componentes produtivos e a produtividade do milho, adubado com zinco, em Latossolo Vermelho de Cerrado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos plásticos, dispostos a céu aberto, no período de outubro de 2024 a janeiro de 2025, na estação experimental do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. As coordenadas geográficas do local de instalação são 17°48'28" S e 50°53'57" O, com altitude média de 720 m ao nível do mar. O clima da região é classificado conforme Köppen & Geiger (1928), como Aw (tropical), com chuva nos meses de outubro a maio, e com seca nos meses de junho a setembro. A temperatura média anual varia de 20 a 35 °C e as precipitações variam de 1.500 a 1.800 mm anuais e o relevo é suave ondulado (6% de declividade).

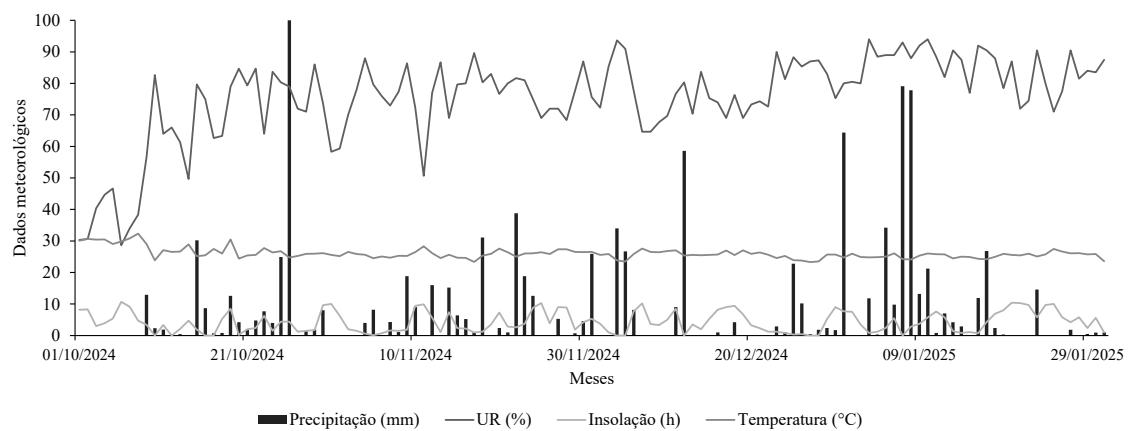


Figura 1. Dados meteorológicos: umidade relativa (UR), insolação, temperatura média, precipitação pluvial, ocorridas no período decorrente do experimento, Rio Verde-GO, safra 2024/25.

O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, coletado junto ao IFGoiano (LVdf), fase cerrado, de textura argilosa (EMBRAPA, 2013), cujas características químicas desse solo se encontram na (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento de milho, Rio Verde-GO, safra 2024/25

Camada <sup>1</sup>	Al	H + Al	M.O	CTC	SB	pH
m	---cmolc dm <sup>-3</sup> ---		g dm <sup>-3</sup>	-	%	CaCl <sub>2</sub>
0,00-0,20	0,00	3,30	16,00	5,13	35,73	5,20
0,20-0,40	0,00	2,60	18,00	4,71	44,77	5,50
Camada	N	P	K	Ca	Mg	S
m	%	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	---cmolc dm <sup>-3</sup> ---	mg dm <sup>-3</sup>	
0,00-0,20	0,09	0,80	87,00	1,20	0,40	7,10
0,20-0,40	0,10	3,70	78,00	1,30	0,60	9,50
Camada	Na	Zn	B	Cu	Fe	Mn
m	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>
0,00-0,20	3,00	2,50	0,19	4,70	36,00	17,40
0,20-0,40	2,00	1,20	0,17	3,30	34,30	17,00

<sup>1</sup>P, K, Ca e Mg: Resina; S: Fosfato de cálcio 0,01 mol L<sup>-1</sup>; Al: KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al: SMP; B: água quente; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA; M.O - Matéria Orgânica; pH - em CaCl<sub>2</sub>; CTC - Capacidade de troca de cátions; SB - Saturação da CTC por bases

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, 5 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em cinco doses de sulfato de zinco ( $ZnSO_4$ ) (0, 25, 50, 100 e 200%). Utilizou-se  $5,2 \text{ kg ha}^{-1}$  para o tratamento de 100%, de modo que os demais tratamentos foram proporcionais a dose recomendada. A aplicação foi via solo, sendo o sulfato de zinco diluído em água.

Todos os tratamentos foram adubados no sulco de plantio com nitrogênio na forma de ureia N ( $30 \text{ kg ha}^{-1}$ ), fósforo  $P_2O_5$  ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ), na forma de superfosfato triplo, potássio  $K_2O$  ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ), na forma de cloreto de potássio, e micronutrientes, exceto zinco conforme resultados das análises de solo e recomendação de Sousa e Lobato (2004).

Os vasos utilizados tinham capacidade para 10 kg, porém foram devidamente preenchidos com 8 kg de solo (Latossolo Vermelho distroferrico), para evitar o escoamento superficial e 2 Kg de esterco de curral curtido.

A cultivar escolhida para ser implantada no experimento foi o LG 36799, tecnologia Vip3. As principais características da variedade são: alta produtividade e estabilidade, excelente sanidade foliar, qualidade de colmo e raiz, bom empalhamento e qualidade de grãos, tolerância aos enfezamentos.

As variáveis avaliadas foram a altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, comprimento de folha, largura de folha, área foliar, índice SPAD, índice NDVI, clorofila *a*, clorofila *b*, índice Falker de clorofila total, clorofila *a/b*, massa de folha, massa de colmo, massa de palha, massa de espiga, massa de sabugo, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, diâmetro de sabugo, número de fileiras de grãos da espiga, número de grãos por fileira e a massa de 50 grãos.

A altura de plantas (AP) foi avaliada utilizando fita métrica, na medida da superfície do solo até o colarinho da folha +1; o diâmetro de colmo (DC), foi determinado com auxílio de um paquímetro na base da planta, rente à superfície do solo; o número de folhas (NF) foi determinado pela contagem das folhas totalmente expandida com o mínimo de 20% de área verde conforme Benincasa (2003).

A área foliar foi obtida pela relação entre o comprimento e a largura da folha, com mais de 50% de área verde, de acordo com metodologia descrita por Tollenaar (1992), conforme equação 1:

$$AF = C \times L \times 0,75 \quad (1)$$

Em que:

C - Comprimento da folha (cm);  
 L - Largura da folha (cm);  
 0,75 - Fator de correção para área foliar da cultura.

Os teores de clorofilas foram avaliados com base no Índice de Clorofilas Falker (ICF) aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP). A mensuração foi efetuada através da leitura de duas folhas por parcela, quantificando-se: Clorofila *a* (CLR*a*); Clorofila *b* (CLR*b*); Índice Falker de clorofila total (CLR*t*) e, a relação clorofila *a*/clorofila *b* (CLR*a/b*), utilizando-se o aparelho Falker ClorofiLOG® modelo CFL 1030.

O índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o índice SPAD foram avaliados aos 30 e 60 DAP. O índice NDVI foi mensurado utilizando-se um sensor de lavoura portátil GreenSeeker® (Trimble). As leituras foram realizadas, numa altura de 50 cm. O SPAD (SPAD) foi obtido com auxílio do aparelho Minolta SPAD® 502, efetuado a leitura de duas folhas por parcela.

O diâmetro de espiga e diâmetro de sabugo foram determinados com auxílio de um paquímetro. O comprimento de espiga, foi medido com o auxílio de uma régua graduada. O número de fileiras de grãos da espiga e o número de grãos por fileira foram determinados por meio da contagem do número fileiras/grãos e grãos/fileira de cada espiga, por ocasião da colheita.

Na colheita todas as partes de cada planta foram acondicionadas em sacos de papel para pesagem. As partes da planta foram levadas para estufa de secagem com circulação e renovação de ar por 48 horas a temperatura de 65°C e, posteriormente pesadas. Pesos foram obtidos em balança com precisão de 0,01 g para obtenção da massa e para pesagem das partes das plantas. Assim, foram obtidos a massa de folha (MF), massa de colmo (MC), massa de palha (MP), massa de espiga (ME), massa de sabugo (MS), massa de 50 grãos (M50) e a massa de 1000 grãos (M1000).

A produtividade de grãos (PG) do milho foi determinada a partir da pesagem dos grãos, após a secagem, trilha e limpeza. Para a obtenção do peso dos grãos foi utilizado uma balança com precisão de 0,01 g. A produtividade de grãos foi obtida em kg ha<sup>-1</sup>, após a correção da umidade padrão para 13%.

Os dados foram submetidos à análise da variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ) e em casos de significância, foi realizada análise de regressão para os níveis de adubação com zinco, utilizando o software estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2011).

## RESULTADOS

A dose de zinco não foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, para o número de folhas do milho aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP), para a altura de plantas e NDVI aos 60 DAP, apresentando uma média de aproximadamente 7,80 e 9,95 (número de folhas), 168,06 cm (altura de plantas) e 0,72 (NDVI). O número de fileiras de grãos da espiga do milho também não foi significativo para a adubação com zinco, com uma média de aproximadamente 17,70.

A altura de planta e o diâmetro de colmo do milho em função das doses de zinco aos 30 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, assim como o diâmetro de colmo aos 60 DAP, com  $R^2$  médio de 97,21 e 95,40%, respectivamente (Figura 2A e B).

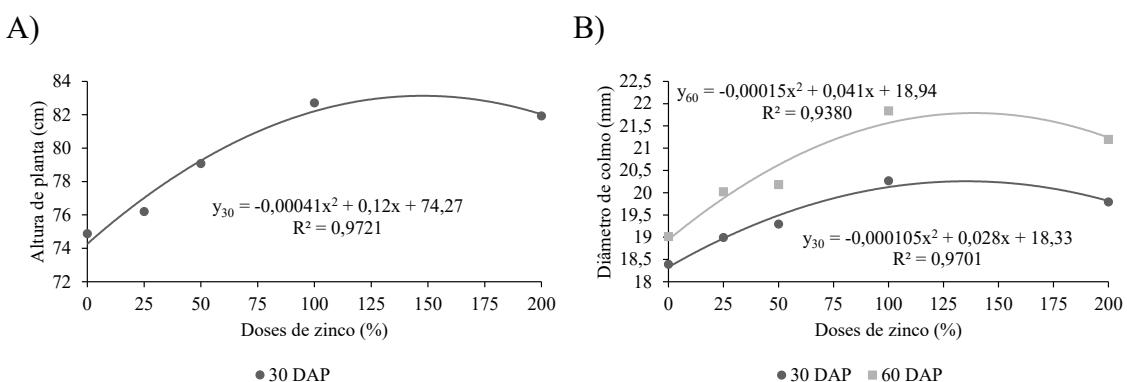


Figura 2. A altura de planta (A) e o diâmetro de colmo (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos na altura de planta do milho até a dose de 146,29%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a altura de planta máxima de 83,05 cm. A altura de planta máxima verificada na dose de zinco de 146,29%, foi aproximadamente 10,57; 7,26; 4,58; 1,06 e 1,42% maior do que a altura de planta estimada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2A).

A elevação na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos no diâmetro de colmo do milho até a dose de 135,81%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o diâmetro de colmo máximo de 20,26 mm. O diâmetro de colmo máximo verificado na dose de zinco de 135,81%, foi aproximadamente 9,56; 6,36; 3,82; 0,66 e 2,13% maior que o diâmetro de colmo estimado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2B).

O aumento na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos no diâmetro de colmo do milho até a dose de 138,54%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o diâmetro de colmo máximo de 21,78 mm. O diâmetro de colmo máximo verificado na dose de zinco de 138,54%, foi aproximadamente 13,04; 8,76; 5,33; 1,01 e 2,57% maior que o diâmetro de colmo estimado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 2B).

O comprimento de folha, largura de folha e área foliar do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 97,86, 96,80 e 98,37%, respectivamente (Figura 3A, B e C).

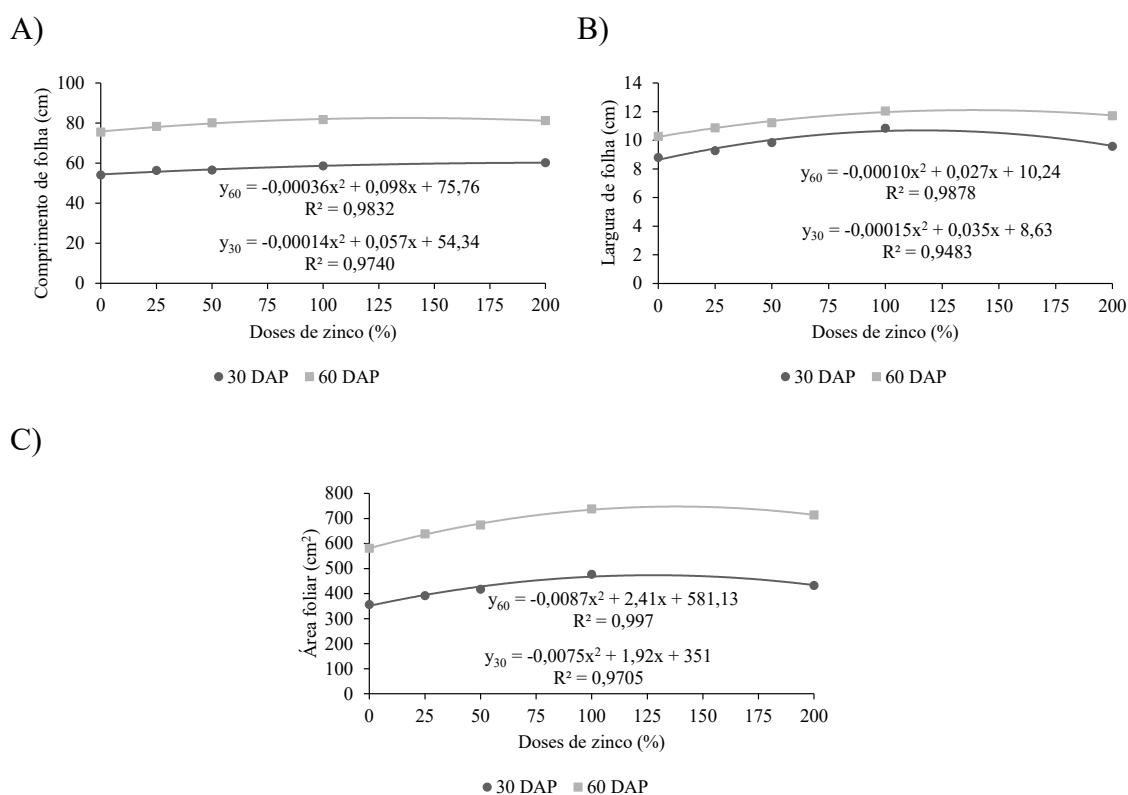


Figura 3. O comprimento de folha (A), largura de folha (B) e área foliar (C) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O aumento na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos no comprimento de folha do milho até a dose de 200%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o comprimento de folha máximo de 60,09 cm. O comprimento de folha máximo verificado na dose de zinco de 200%, foi aproximadamente 9,57; 7,35; 5,43 e 2,45% maior que o comprimento de folha observado nas doses de zinco de 0, 25, 50 e 100%, respectivamente (Figura 3A).

O acréscimo na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos no comprimento de folha do milho até a dose de 136,57%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o comprimento de folha máximo de 82,48 cm. O comprimento de folha máximo verificado na dose de zinco de 136,57%, foi aproximadamente 8,14; 5,43; 3,27; 0,58 e 1,76% maior que o comprimento de folha observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3A).

A elevação na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos na largura de folha do milho até a dose de 118,20%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a largura de folha máxima de 10,73 cm. A largura de folha máxima verificada na dose de zinco de 118,20%, foi aproximadamente 19,53; 12,14; 6,50; 0,46 e 9,35% maior que a largura de folha estimada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3B).

O aumento na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos na largura de folha do milho até a dose de 135,05%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a largura de folha máxima de 12,06 cm. A largura de folha máxima verificada na dose de zinco de 135,05%, foi aproximadamente 15,12; 10,04; 5,99; 1,02 e 3,50% maior que a largura de folha estimada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3B).

O acréscimo na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos na área foliar do milho até a dose de 128,01%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a área foliar máxima de 473,91 cm<sup>2</sup>. A área foliar máxima verificada na dose de zinco de 128,01%, foi aproximadamente 25,93; 16,79; 9,63; 1,24 e 8,20% maior que a área foliar observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3C).

A elevação na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos na área foliar do milho até a dose de 138,55%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a área foliar máxima de 748,13 cm<sup>2</sup>. A área foliar máxima verificada na dose de zinco de 138,55%, foi aproximadamente 22,32; 14,99; 9,12; 1,73 e 4,39% maior que a área foliar observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 3C).

O índice SPAD e NDVI do milho em função das doses de zinco aos 30 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, assim como o índice SPAD aos 60 DAP, com R<sup>2</sup> médio de 98,38 e 94,35%, respectivamente (Figura 4A e B).

A)

B)

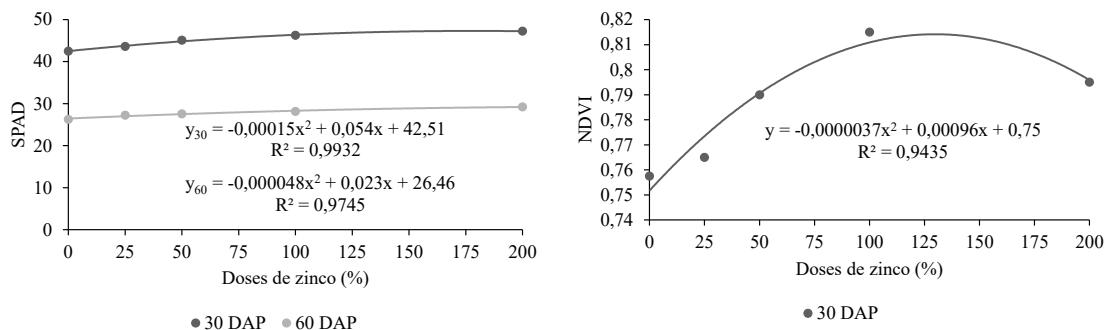


Figura 4. O índice SPAD (A) e NDVI (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos no índice SPAD do milho até a dose de 179,53%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o índice SPAD máximo de 47,34. O índice SPAD máximo verificado na dose de zinco de 179,53%, foi aproximadamente 10,21; 7,57; 5,32; 2,00 e 0,13% maior do que o índice SPAD observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4A).

O aumento na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos no índice SPAD do milho até a dose de 200%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o índice SPAD máximo de 29,20. O índice SPAD máximo verificado na dose de zinco de 200%, foi aproximadamente 9,39; 7,50; 5,81 e 3,05% maior que o índice SPAD observado nas doses de zinco de 0, 25, 50 e 100%, respectivamente (Figura 4A).

A elevação na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos no índice NDVI do milho até a dose de 130,01%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o índice NDVI máximo de 0,81. O índice NDVI máximo verificado na dose de zinco de 130,01%, foi aproximadamente 7,68; 5,01; 2,91; 0,41 e 2,23% maior que o índice NDVI estimado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 4B).

A clorofila *a* e *b* do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 96,83 e 96,52%, respectivamente (Figura 5A e B).

A)

B)

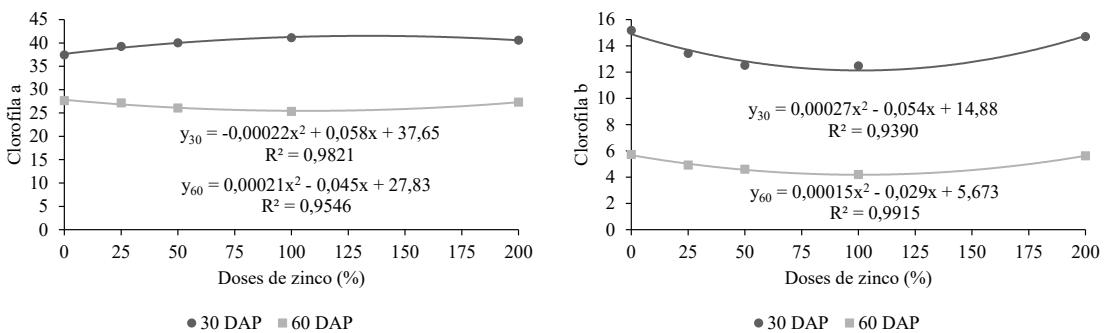


Figura 5. A clorofila a (A) e a clorofila b (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

O acréscimo na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos na clorofila *a* do milho até a dose de 131,41%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila *a* máxima de 41,45. A clorofila *a* máxima verificada na dose de zinco de 131,41%, foi aproximadamente 9,17; 6,01; 3,52; 0,52 e 2,50% maior que a clorofila *a* observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5A).

O aumento na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou diminuição na clorofila *a* do milho até a dose de 106,31%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila *a* mínima de 25,45. A clorofila *a* mínima verificada na dose de zinco de 106,31%, foi aproximadamente 8,53; 5,17; 2,55; 0,033 e 6,75% menor que a clorofila *a* observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 5A).

A elevação na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou diminuição na clorofila *b* do milho até a dose de 101,00%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila *b* mínima de 12,13. A clorofila *b* mínima verificada na dose de zinco de 101,00%, foi aproximadamente 18,50; 11,39; 5,47 e 17,91% menor que a clorofila *b* observada nas doses de zinco de 0, 25, 50 e 200%, respectivamente (Figura 5B).

O acréscimo na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou diminuição na clorofila *b* do milho até a dose de 98,53%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila *b* mínima de 4,22. A clorofila *b* mínima verificada na dose de zinco de 98,53%, foi aproximadamente 25,67; 16,13; 7,73 e 26,81% menor que a clorofila *b* observada nas doses de zinco de 0, 25, 50 e 200%, respectivamente (Figura 5B).

O índice Falker de clorofila total e *a/b* do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 DAP, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  médio de 98,38 e 97,06%, respectivamente (Figura 6A e B).

A)

B)

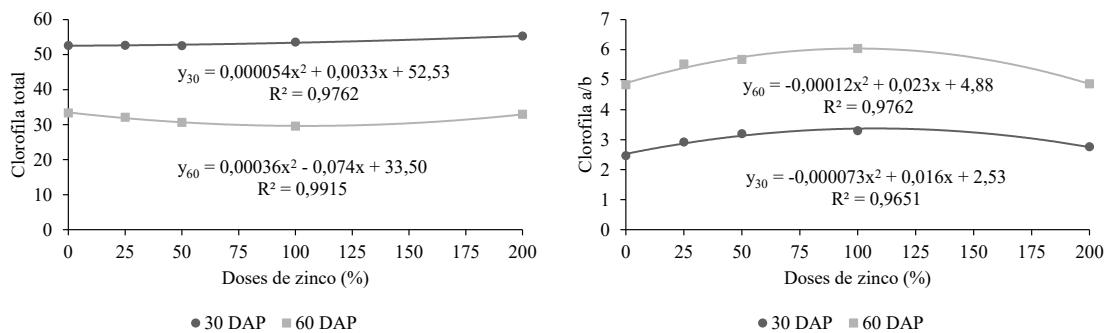


Figura 6. O índice Falker de clorofila total (A) e a clorofila a/b (B) do milho em função das doses de zinco aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP).

A elevação na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou diminuição no índice Falker de clorofila total do milho até a dose de 0%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o índice Falker de clorofila total mínima de 52,53. O índice Falker de clorofila total mínima verificada na dose de zinco de 0%, foi aproximadamente 0,22; 0,57; 1,63 e 5,09% menor que o índice Falker de clorofila total observado nas doses de zinco de 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6A).

O aumento na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou diminuição no índice Falker de clorofila total do milho até a dose de 103,07%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o índice Falker de clorofila total mínima de 29,68. O índice Falker de clorofila total mínima verificada na dose de zinco de 103,07%, foi aproximadamente 11,42; 6,88; 3,30; 0,01 e 10,23% menor que o índice Falker de clorofila total observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6A).

O acréscimo na dose de zinco aos 30 DAP, proporcionou incrementos na clorofila a/b do milho até a dose de 107,84%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila a/b máxima de 3,37. A clorofila a/b máxima verificada na dose de zinco de 107,84%, foi aproximadamente 25,15; 14,84; 7,24; 0,13 e 18,37% maior que a clorofila a/b observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6B).

A elevação na dose de zinco aos 60 DAP, proporcionou incrementos na clorofila a/b do milho até a dose de 96,67%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a clorofila a/b máxima de 6,00. A clorofila a/b máxima verificada na dose de zinco de 96,67%, foi aproximadamente 18,68; 10,27; 4,35; 0,02 e 21,34% maior que a clorofila a/b observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 6B).

A massa de folha e a massa de colmo do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 97,42 e 96,28%, respectivamente (Figura 7A e B).

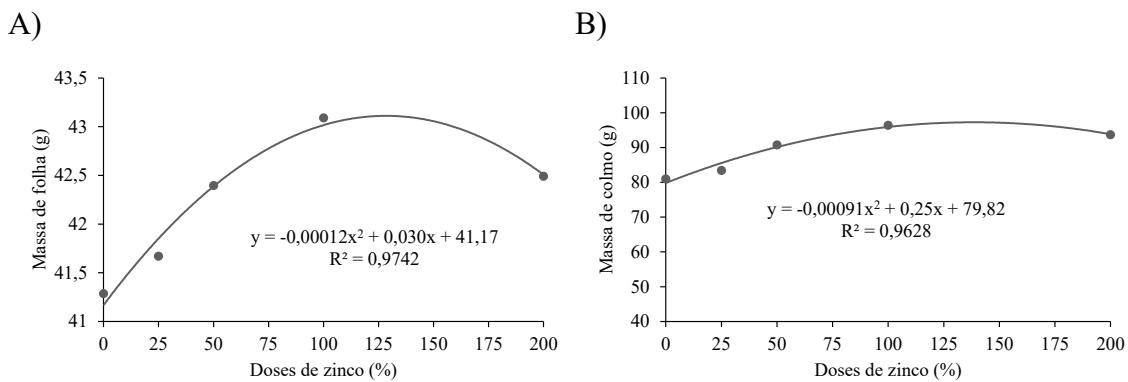


Figura 7. A massa de folha (A) e a massa de colmo (B) do milho em função das doses de zinco.

O acréscimo na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de folha do milho até a dose de 126,12%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de folha máxima de 43,08 g. A massa de folha máxima verificada na dose de zinco de 126,12%, foi aproximadamente 4,43; 2,85; 1,61; 0,19 e 1,52% maior que a massa de folha observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 7A).

O aumento na dose de zinco, proporcionou incrementos na massa de colmo do milho até a dose de 138,49%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de colmo máxima de 97,28 g. A massa de colmo máxima verificada na dose de zinco de 138,49%, foi aproximadamente 17,94; 12,05; 7,32; 1,39 e 3,54% maior do que a massa de colmo estimada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 7B).

A massa de palha e a massa de espiga do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 93,32 e 94,42%, respectivamente (Figura 8A e B).

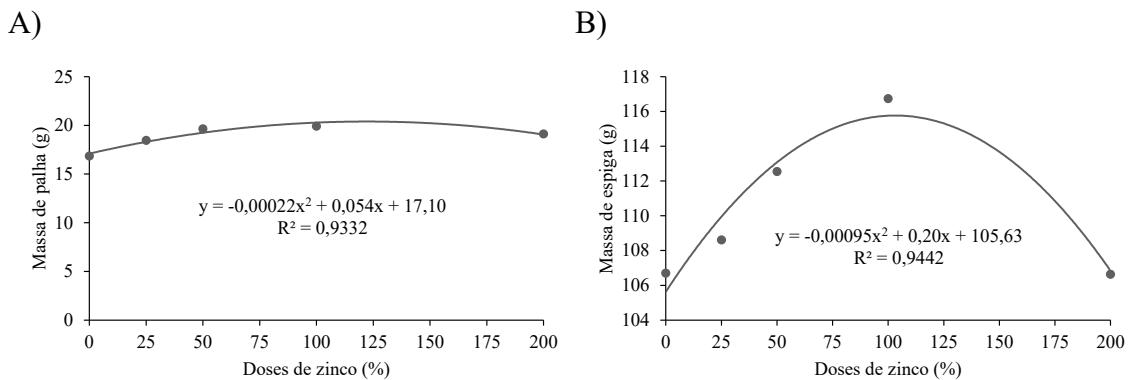


Figura 8. A massa de palha (A) e a massa de espiga (B) do milho em função das doses de zinco.

A elevação na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de palha do milho até a dose de 122,61%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de palha máxima de 20,41 g. A massa de palha máxima verificada na dose de zinco de 122,61%, foi aproximadamente 16,21; 10,27; 5,68; 0,55 e 6,46% maior que a massa de palha observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 8A).

O acréscimo na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de espiga do milho até a dose de 103,46%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de espiga máxima de 115,80 g. A massa de espiga máxima verificada na dose de zinco de 103,46%, foi aproximadamente 8,78; 5,05; 2,34; 0,01 e 7,65% maior que a massa de espiga observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 8B).

O comprimento de espiga e o diâmetro de espiga do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 97,30 e 99,08%, respectivamente (Figura 9A e B).

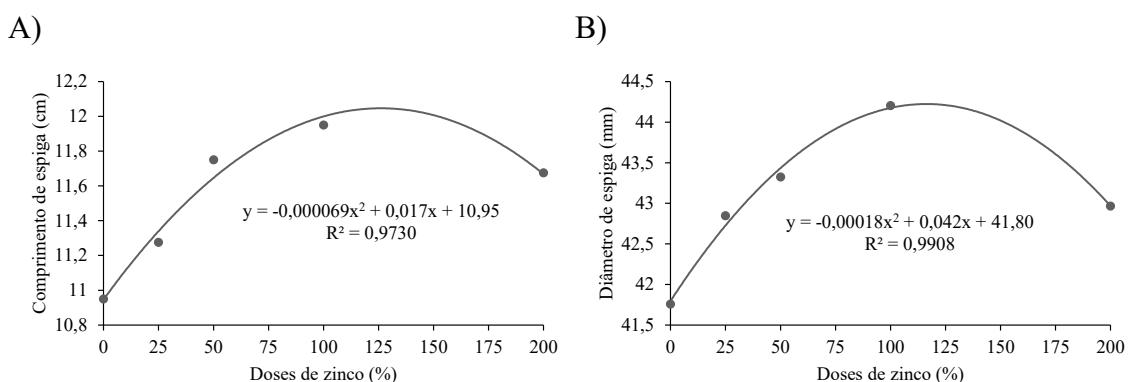


Figura 9. O comprimento de espiga (A) e o diâmetro de espiga (B) do milho em função das doses de zinco.

O aumento na dose de zinco proporcionou incrementos no comprimento de espiga do milho até a dose de 126,48%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o comprimento de espiga máximo de 12,05 cm. O comprimento de espiga máximo verificado na dose de zinco de 126,48%, foi aproximadamente 9,16; 5,90; 3,35; 0,40 e 3,09% maior que o comprimento de espiga observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 9A).

O crescimento na dose de zinco proporcionou incrementos no diâmetro de espiga milho até a dose de 115,94%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o diâmetro de espiga máximo de 44,21 mm. O diâmetro de espiga máximo verificado na dose de zinco de 115,94%, foi aproximadamente 5,47; 3,37; 1,77; 0,10 e 2,88% maior que o diâmetro de espiga observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 9B).

O diâmetro de sabugo e a massa de sabugo do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 96,45 e 98,63%, respectivamente (Figura 10A e B).

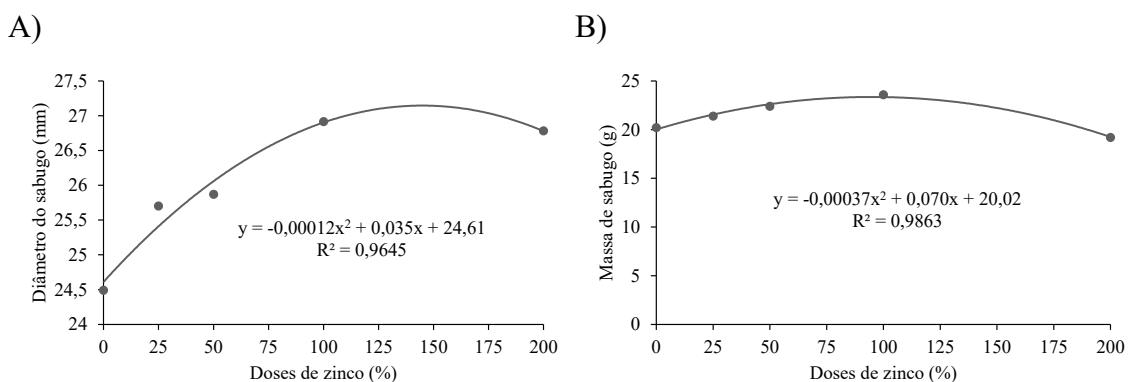


Figura 10. O diâmetro de sabugo (A) e a massa de sabugo (B) do milho em função das doses de zinco.

O aumento na dose de zinco, proporcionou incrementos no diâmetro do sabugo do milho até a dose de 145,87%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o diâmetro do sabugo máximo de 27,16 mm. O diâmetro do sabugo máximo verificado na dose de zinco de 145,87%, foi aproximadamente 9,40; 6,45; 4,06; 0,93 e 1,29% maior que o diâmetro do sabugo estimado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 10A).

O acréscimo na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de sabugo do milho até a dose de 95,15%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de sabugo máxima de 23,37 g. A massa de sabugo máxima verificada na dose de zinco de 95,15%, foi aproximadamente 14,33; 7,79; 3,23; 0,04 e 17,40% maior que a massa de sabugo observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 10B).

O número de grãos por fileira e a massa 50 grãos do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 98,90 e 97,40%, respectivamente (Figura 11A e B)

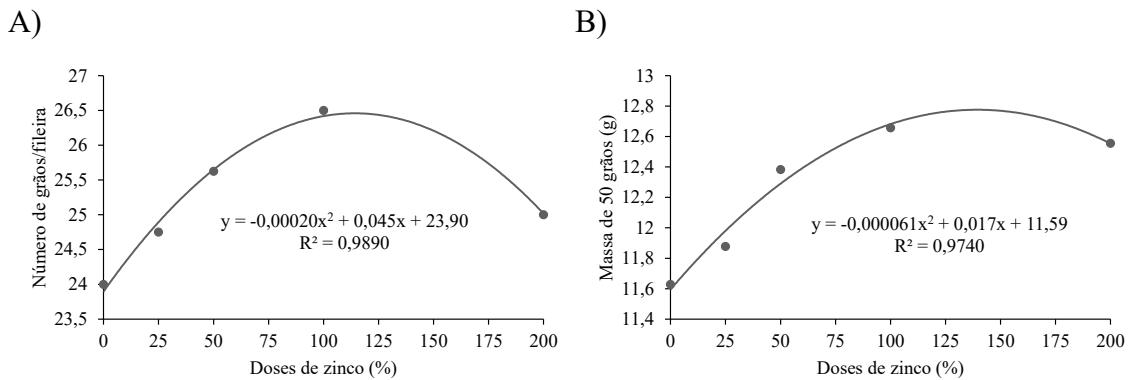


Figura 11. O número de grãos por fileira (A) e a massa de 50 grãos (B) do milho em função das doses de zinco.

O aumento na dose de zinco proporcionou incrementos no número de grãos por fileira do milho até a dose de 112,15%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingido o número de grãos por fileira máximo de 26,41. O número de grãos por fileira máximo verificado na dose de zinco de 112,15%, foi aproximadamente 9,52; 5,75; 2,92; 0,11 e 5,84% maior que o número de grãos por fileira observado nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 11A).

O acréscimo na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de 50 grãos do milho até a dose de 138,93%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de 50 grãos máxima de 12,77 g. A massa de 50 grãos máxima verificada na dose de zinco de 138,93%, foi aproximadamente 9,22; 6,20; 3,78; 0,72 e 1,78% maior que a massa de 50 grãos observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 11B).

A massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos do milho em função das doses de zinco, adequaram-se a modelos quadráticos, com  $R^2$  de aproximadamente 97,40 e 96,38%, respectivamente (Figura 12A e B).



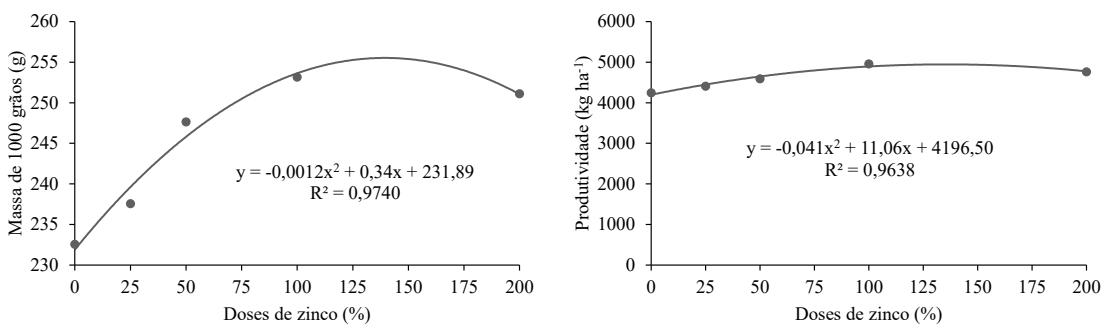


Figura 12. A massa de 1000 grãos (A) e a produtividade de grãos (B) do milho em função das doses de zinco.

A elevação na dose de zinco proporcionou incrementos na massa de 1000 grãos do milho até a dose de 141,25%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a massa de 1000 grãos máxima de 255,83 g. A massa de 1000 grãos máxima verificada na dose de zinco de 141,25%, foi aproximadamente 9,36; 6,34; 3,91; 0,80 e 1,62% maior que a massa de 1000 grãos observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 12A).

O acréscimo na dose de zinco proporcionou incrementos na produtividade de grãos do milho até a dose de 135,56%, com a aplicação desta dose de zinco foi atingida a produtividade de grãos máxima de 4946,30 kg ha<sup>-1</sup>. A produtividade de grãos máxima verificada na dose de zinco de 135,56%, foi aproximadamente 15,16; 10,08; 6,04; 1,04 e 3,42% maior que a produtividade de grãos observada nas doses de zinco de 0, 25, 50, 100 e 200%, respectivamente (Figura 12B).

## DISCUSSÃO

O experimento avaliou o impacto de diferentes doses de zinco no desenvolvimento e produtividade do milho, revelando efeitos variados sobre as características biométricas e fisiológicas da cultura.

Para o número de folhas do milho aos 30 e 60 dias após o plantio (DAP), a altura de plantas e NDVI aos 60 DAP, e o número de fileiras de grãos da espiga do milho, a dose de zinco não foi significativa. Observou-se uma média de aproximadamente 7,80 e 9,95 folhas (30 e 60 DAP, respectivamente), 168,06 cm de altura de plantas, 0,72 de NDVI e 17,70 fileiras de grãos por espiga.

A ausência de significância para o número de folhas e altura de plantas aos 60 DAP pode parecer contraditória à função do zinco, que é essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, incluindo a síntese de clorofila e a ativação enzimática (Oliveira, 2024; Ali Raza et al., 2021). No entanto, Ullah (2023) também observou que a aplicação de sulfato de zinco influenciou vários parâmetros de crescimento no milho, *exceto* na emergência, e pode indicar que, em estágios mais avançados (como os 60 DAP), outros fatores nutricionais ou ambientais podem ter limitado ou superado o efeito do zinco isolado, ou a faixa de doses testada pode ter atingido um platô de resposta para essas variáveis mais cedo. Furlani & Furlani (1996) e Kume et al. (2022) ressaltam a importância de um equilíbrio no fornecimento de zinco; tanto a deficiência quanto o excesso podem prejudicar o crescimento. É possível que as doses aplicadas já estivessem em um nível adequado para estas variáveis, ou que os genótipos de milho utilizados no experimento apresentassem menor sensibilidade ou maior capacidade de absorção de zinco em estágios iniciais, tornando o número de folhas e a altura aos 60 DAP menos responsivos às variações na dose.

Similarmente, a falta de significância para o NDVI aos 60 DAP pode ser explicada pela mesma lógica. Embora o zinco seja crucial para a síntese de clorofila e, consequentemente, para a atividade fotossintética (indicada pelo NDVI), o fato de o SPAD aos 60 DAP ter sido significativo e adequado a um modelo quadrático (Figura 4A) sugere que a clorofila estava sendo influenciada positivamente, mas essa influência não traduziu em aumento significativo no NDVI no mesmo período. Isso pode ocorrer se outros fatores limitantes ao crescimento global da planta (como disponibilidade de água, outros nutrientes ou estresse ambiental) estiverem mascarando o efeito do zinco na biomassa verde total refletida pelo NDVI, ou se o SPAD for um indicador mais sensível e precoce do status de clorofila do que o NDVI em certas condições.

Para o número de fileiras de grãos da espiga do milho, a ausência de significância pode indicar que essa característica é mais determinada geneticamente ou por condições ambientais específicas no início do desenvolvimento reprodutivo, que não foram predominantemente influenciadas pelas doses de zinco testadas. Apesar de o zinco ser vital para o desenvolvimento reprodutivo e enchimento de grãos (Ali Raza et al., 2021), a formação do número de fileiras de grãos ocorre em fases bem precoces, e outros trabalhos (Finoto Rasteiro et al., 2020) mostraram que, em doses acima de um ideal, o

zinc pode até ter efeito negativo na quantidade de grãos por espiga, reforçando a ideia de que um equilíbrio é delicado e pode não ter sido capturado como significativo para esta variável específica.

As variáveis que demonstraram resposta significativa às doses de zinco, ajustando-se a modelos quadráticos com altos valores de  $R^2$ , evidenciam o papel crucial desse micronutriente no desenvolvimento do milho, podendo ser visto na altura de planta e diâmetro de colmo aos 30 DAP, e diâmetro de colmo aos 60 DAP (Figura 2A e B): O aumento da altura de planta e do diâmetro de colmo até doses ótimas de zinco (146,29% e 135,81% para 30 DAP, e 138,54% para 60 DAP, respectivamente) está em linha com a literatura que destaca o papel do zinco no crescimento e desenvolvimento. Manohar et al. (2023) e Singh & Pradan (2023) observaram que a aplicação de zinco melhora significativamente a altura de plantas e o diâmetro de colmo. O zinco atua como cofator de diversas enzimas e é essencial para a síntese de auxinas, hormônios de crescimento, o que justifica o incremento nessas variáveis (Ali Raza et al., 2021; Furlani & Furlani, 1996).

Do mesmo modo em comprimento de folha, largura de folha e área foliar aos 30 e 60 DAP (Figura 3A, B e C): A resposta quadrática para essas variáveis, com máximos atingidos em diferentes doses de zinco (ex: comprimento de folha aos 30 DAP até 200%, área foliar aos 60 DAP até 138,55%), reforça a importância do zinco na expansão celular e na formação de biomassa. Maior área foliar implica maior capacidade fotossintética, essencial para a produção de fotoassimilados e, consequentemente, para o crescimento da planta e a formação de colmo, como observado por Anupama (2023) e Varsha et al. (2024), que destacam o incremento em variáveis biométricas.

Já para massa de folha e massa de colmo (Figura 7A e B): O incremento nessas massas até doses ótimas de zinco (126,12% para massa de folha e 138,49% para massa de colmo) é uma consequência direta do aumento no tamanho das folhas e do diâmetro do colmo, refletindo maior acumulação de matéria seca. Manohar et al. (2023) também salientaram a acumulação de matéria seca como um benefício notável da aplicação de zinco, corroborando os resultados.

Com relação as variáveis fisiológicas podem ser observadas nas, que o aumento no índice SPAD e NDVI aos 30 DAP e SPAD aos 60 DAP ( Figuras 4A e B ) com a

aplicação de zinco demonstra o impacto positivo do micronutriente na saúde e atividade fotossintética da planta. O zinco é um componente crucial da enzima anidrase carbônica e de outras enzimas envolvidas na síntese de clorofila. Valores mais altos de SPAD indicam maior teor de clorofila, o que se traduz em maior eficiência fotossintética (Xin et al., 2024). A melhoria no SPAD é consistente com Kumar et al. (2024), que relataram o incremento nos níveis de N, K e Cu, que indiretamente influenciam a síntese de clorofila.

Notadamente, para as clorofilas a, b, total e a/b aos 30 e 60 DAP (Figura 5A e B; Figura 6A e B): As respostas quadráticas para as clorofilas 'a' e 'b' (com incrementos ou decréscimos em doses específicas) e as relações de clorofila 'a/b' e índice Falker de clorofila total são de particular interesse. A elevação na clorofila 'a' (30 DAP) e na relação 'a/b' (30 e 60 DAP) mostra efeito positivo do zinco na maquinaria fotossintética. No entanto, a diminuição na clorofila 'a' e 'b' aos 60 DAP em certas doses, e no índice Falker de clorofila total aos 30 e 60 DAP (com mínimos em 0% e 103,07% respectivamente), é um achado importante. Isso pode indicar que, em doses muito elevadas ou em estágios mais avançados de desenvolvimento, o excesso de zinco pode começar a ter efeito negativo ou de toxicidade, desorganizando os pigmentos fotossintéticos ou gerando desequilíbrio nutricional, como alertado por Kume et al. (2022) sobre o excesso de zinco causar desbalanço nutricional. A relação clorofila a/b é um indicador da adaptação da planta à luz e à eficiência do fotossistema, e seu aumento (Figura 6B) sugere possível otimização da capacidade de captação de luz em certas doses.

Analizando os componentes de produtividade, tem-se o aumento da massa de palha e massa de espiga (Figura 8A e B) com a aplicação de zinco (até 122,61% para palha e 103,46% para espiga) é indicativo do melhor desenvolvimento da planta como um todo, que se reflete na biomassa total acumulada e na formação dos componentes da espiga. A maior massa de espiga é um precursor direto de maior produtividade de grãos.

Já para comprimento de espiga e diâmetro de espiga (Figura 9A e B), as respostas quadráticas para essas características (comprimento máximo em 126,48% e diâmetro máximo em 115,94% de zinco) são cruciais para a produtividade. Espigas maiores e mais robustas tendem a abrigar mais grãos e com maior peso. Isso é corroborado por Singh & Pradan (2023), que destacaram a melhoria nas características das espigas.

Observando as Figura 10A e B, nota-se que o incremento no diâmetro e massa de sabugo (máximos em 145,87% e 95,15% de zinco, respectivamente) também demonstra a influência do zinco no desenvolvimento reprodutivo da planta. Embora o sabugo não seja a parte economicamente colhida, seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado à formação e enchimento dos grãos.

Para as variáveis número de grãos por fileira e massa de 50 grãos (Figura 11A e B) observa-se que o aumento do número de grãos por fileira (até 112,15%) e da massa de 50 grãos (até 138,93%) têm importância na medida que são componentes diretos da produtividade final. Xin et al. (2024) observaram que a aplicação de ZnSO<sub>4</sub> aumentou o número de grãos em cultivares sensíveis à deficiência de zinco. Além disso, Ram & Dawson (2023) encontraram melhorias no número de grãos por espiga com a aplicação de zinco.

Por fim, para a massa de 1000 grãos e produtividade de grãos (Figura 12A e B), percebe-se claramente que a elevação da massa de 1000 grãos (até 141,25% de zinco) e, principalmente, da produtividade de grãos (até 135,56% de zinco, resultando em 4946,30 kg ha<sup>-1</sup>) é a evidência mais clara do benefício da adubação com zinco. Esses resultados são altamente consistentes com a literatura. Estudos como os de Anupama (2023), Oliveira (2024), Singh & Indu (2023), Mazinagou et al. (2023), Kathula et al. (2023), Varsha et al. (2024), KEERTHI & SINGH (2022) e SINGH & PRADHAN (2023) todos relatam aumentos significativos na produtividade e em variáveis relacionadas ao rendimento do milho com a aplicação de zinco, muitas vezes em combinação com outros nutrientes ou práticas. A otimização da dose de zinco é crucial para maximizar a produtividade, como demonstrado pelas respostas quadráticas.

## **CONCLUSÕES**

A adubação com zinco demonstrou-se eficaz na promoção do desenvolvimento morfológico, fisiológico e produtivo do milho, evidenciando que doses equilibradas deste micronutriente podem potencializar a expressão de variáveis agronômicas relevantes.

A maioria das variáveis respondeu de maneira significativa à aplicação de Zn, com destaque para os incrementos na altura de planta, diâmetro de colmo, área foliar, teor de clorofila, número e massa de grãos e produtividade total.

As curvas quadráticas obtidas indicam que as doses entre 100% e 140% foram as mais responsivas, enquanto doses extremas, sobretudo elevadas, podem comprometer o desempenho da cultura.

Assim, os resultados reforçam a importância da adubação racional com zinco como estratégia para aumento da produtividade do milho em condições tropicais, sendo imprescindível considerar os limites de tolerância da planta para evitar efeitos fitotóxicos decorrentes de excesso do micronutriente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) pelo auxílio financeiro ao presente projeto de pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHA MANOHAR, K.; SAGAR, L.; DINKAR.; GAIKWAD, D. J. Effect of Different Zinc Fertilization Methods on Growth and Productivity of Summer Maize (*Zea mays L.*), **Agricultural science digest**, 2023.

ALLOWAY, B. J. Zinc in soils and crop nutrition. **International Zinc Association IFA**, Paris, 139 p., 2008.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, p.1-41, 2003.

CUNHA, F. N. **Desenvolvimento, produtividade e qualidade industrial da cana-de-açúcar fertirrigada com nitrogênio e zinco.** Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde - GO, 84p., 2017.

DECHEN, A. R. & NACHTIGALL, G. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C.L. **Fertilidade do Solo**, cap. 3, p. 91-133, (2006).

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1980, 251p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas.** São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

GALRÃO, E. Z. EMBRAPA cerrados, **Correção da deficiência de zinco em lavouras de milho nos solos do cerrado.** Planaltina, DF, 1999.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do abastecimento, p.1-306, 2013.

FARIAS, C. H. A. **Otimização do uso da água e do zinco na cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro paraibano.** Universidade Federal de Campina Grande – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2006. 142p.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde.** Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

NAVI, L.; SUSHMA, H. A.; ARAGANJI, S.; SHANTHANAGOWDA, G. M.; CHANDRA, H. Agronomic Effectiveness of Zinc Sources as Micronutrient Fertilizers: A Comprehensive Review'. **International Journal of Plant and Soil Science (Sciencedomain International)**, v. 36, n. 8, p. 167-176, 2024.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2018.

FINOTO RASTEIRO, B., A.; ZUFI JUNIOR, F., C.; FISCHER FILHO, J., A. Interação de nitrogênio e zinco na produção de milho. **Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 97–109, 2020. <https://doi.org/10.52138/citec.v12i1.41>.

KATHULA, K. V.; MANOHAR, K. A.; SAGAR, L.; GAIKWAD, D. J. Effect of Different Zinc Fertilization Methods on Growth and Productivity of Summer Maize (*Zea mays L.*), **Agricultural science digest**, 2023. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5732>

KUME, W. T.; CAMPOS, L. M.; RIBEIRO, R.; CAIONE, G. Desordens nutricionais provocadas por deficiência e excesso de zinco em plantas de milho. **Científica**, v.49, n.4, 2022. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2021v49n4p165-173>

MAZINAGOU, M.; SOGBEDJI, J. M.; N'GBENDEMA, A. Zinc biofortified maize (*Zea mays L.*) grain production strategy on the rhodic Ferralsol of Southern Togo. University of Lomé, **International journal of agriculture and Nutrition**, v.6, n.1, 2023. <https://doi.org/10.33545/26646064.2023.v5.i2a.130>.

OHSE, S., & PINHEIRO DOS SANTOS, L. L. (2020). Modos de aplicação de zinco em genótipos de milho. **Revista Campo Digital**, 15(1), 2020.

RAM, G. S. & DAWSON, J. Effect of Soil Application of Zinc and Foliar Application of Boron on Growth and Yield of Maize (*Zea mays L.*). **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 5, p. 108-113, 2023. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i51751>.

RANGASWAMY, N.S.; KAVITHA, P.; NAIDU, M.V.; VIJAYA BHASKAR REDDY, U. Effect on Soil Properties as Influenced by the Application of FYM Enriched with Zinc Solubilizers and Zinc Sulphate in Maize (*Zea mays L.*), **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n.5, p. 357-365, 2023.

SEPAT, S.; SINGH, H.; SINGH, A. K. Assessment of zinc sources and levels for urea coating to achieve higher productivity and soil fertility in spring maize (*Zea mays*). **Indian Agricultural Research Institute**, 94(8):817-821, 2024. <https://doi.org/10.56093/ijas.v94i8.143069>.

SHAMSI, I. H.; ZHANG, Q.; MA, Z.; NOREEN, S.; AKHTER, M. S.; IQBAL, U.; ADIL, M. F.; KARIM, M. F.; ULLAH, N. Zinc Toxicity and Tolerance in Plants. **Insights from Omics Studies**, p. 275 292, 2023. <https://doi.org/10.1002/9781119906506.ch13>

SINGH, R.; INDU, T. H. Response of Sulphur and Zinc on Yield and Economics of Maize (*Zea mays L.*), **International Journal of Plant & Soil Science**, v.37, n. 2, 2023. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i173218>.

SINGH, R. & PRADHAN, A. Influence of Biofertilizers and zinc Sulphate on yield and economics of Maize (*Zea mays L.*). **International Journal of Plant and Soil Science**, v.35, n. 17, p.149-154, 2023. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i173193>.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. (Eds). 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica/Embrapa-CPA, 416 p., 2004.

TEIXEIRA FILHO, M.C.M. **Doses, fontes e modos de aplicação de zinco na cultura da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Unesp – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 153 p., 2011.

ULLAH, A.; DIN, M. U.; HAMMAD, JAN, Z.; TAHIR, M.; ANJUM, M. M.; KHAN, B.; AHMAD, T.; UD DIN, M. Influence of different zinc sulfate levels on yield and yield components of maize cultivars (*Zea mays L.*) in the agro-climatic condition of district Bajaur. **Pure and applied biology**, v. 12, n. 3, 2023.  
<http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2023.120152>

VARSHA, C. V.; SINGH, R.; INDU, T. H. Effect of Sulphur and Zinc on Growth and Yield of Baby Corn (*Zea mays L.*). Management Development Institute, **Journal of**

**experimental agriculture international**, v.46, n. 5, 2024.

<https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i52412>

XIN, J.; REN, N.; HU,X.; YANG, J. Variations in grain yield and nutrient status of different maize cultivars by application of zinc sulfate. **Plos One**, v.19, 2024.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295391>

## CONCLUSÃO GERAL

A adubação com silício e zinco promoveu efeitos significativos no crescimento, desenvolvimento e rendimento do milho híbrido LG 36799 cultivado em Latossolo Vermelho do Cerrado. O silício, quando aplicado em doses moderadas, contribuiu para o incremento de variáveis morfofisiológicas e produtivas, com produtividade máxima de grãos alcançada na dose de 118,31%. Da mesma forma, o zinco potencializou atributos agronômicos e fisiológicos da cultura, com melhores respostas entre 100% e 140% da dose recomendada. Ambos os nutrientes apresentaram comportamento quadrático, indicando a necessidade de manejo racional para evitar perdas por excesso. Dessa forma, o uso equilibrado de silício e zinco se mostra uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade do milho em solos tropicais, desde que respeitados os limites fisiológicos da cultura.