

**UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO DE MILHO SOB DÉFICIT  
HÍDRICO SUBMETIDO A APLICAÇÃO FOLIAR DE QUITOSANA E  
SILICATO DE CÁLCIO E POTÁSSIO**

**IRTES APARECIDA BARROS DE OLIVEIRA**

*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS – BRASIL**  
**2023**

**IRTES APARECIDA BARROS DE OLIVEIRA**

**DESEMPENHO MORFOFISIOLÓGICO DE MILHO SOB DÉFICIT  
HÍDRICO SUBMETIDO A APLICAÇÃO FOLIAR DE QUITOSANA E  
SILICATO DE CÁLCIO E POTÁSSIO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**RIO VERDE  
GOIÁS - BRASIL  
2023**

Universidade de Rio Verde  
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

O47d Oliveira, Irtes Aparecida Barros de

Desempenho Morfofisiológico de milho sob déficit hídrico submetido a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. / Irtes Aparecida Barros de Oliveira. – 2023.  
45 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Rosa.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos César Evangelista de Menezes.

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2023.

Contém índice de tabelas e figuras.

1. Antitranspirante. 2. Estresse hídrico. 3. Taxa fotossintética. 4. *Zea mays*. I. Rosa, Márcio. II. Menezes, Carlos César Evangelista de. III. Título.

CDD: 633.15

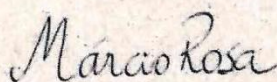
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

**IRTES APARECIDA BARROS DE OLIVEIRA**

**Desempenho Morfofisiológico de Milho Sob Déficit Hídrico Submetido à Aplicação  
Foliar de Quitosana e Silicato de Cálcio e Potássio.**

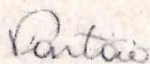
Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de  
Rio Verde, como parte das exigências do Programa  
de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para  
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVAÇÃO: 31 de julho de 2023



---

Prof. Dr. Márcio Rosa  
Presidente da Banca Examinadora  
Membro – FA/UniRV



---

Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves  
Cantão  
Membro - FA/UniRV



---

Prof. Dr. Eduardo Lima do Carmo  
Membro-FA/UniRV



---

Prof. Dr. Lucas Loram  
Lourenço  
Membro Externo -UniBras

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais: Benedita de Barros Oliveira e Vanderlei Oliveira Melo, por todo apoio dedicado durante este período.

As minhas irmãs: Mirtes Oliveira e Kaires Oliveira, por todo companheirismo e apoio no percurso até este momento.

## EPÍGRAFE

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar.  
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*  
*(Madre Teresa de Calcutá)*

## AGRADECIMENTOS

É com grande alegria e gratidão que expresso meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica, tornando possível a conclusão deste trabalho.

A Deus, cuja presença em minha vida é inegável. Sua orientação, força e proteção foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios ao longo desta trajetória. Sou grata por Sua graça e misericórdia, que sempre me acompanharam, dando-me coragem e sabedoria para enfrentar os obstáculos.

A minha família, especialmente aos meus amados pais: Vanderlei Oliveira Melo, Benedita de Barros Oliveira, minhas irmãs: Mirtes e Kaires Oliveira e demais familiares, expresso meu profundo agradecimento. Vocês foram a base sólida que me sustentou durante todos esses anos de estudo. O amor, o incentivo e o apoio incondicional que recebi de vocês foram essenciais para que eu não desistisse em momentos de dificuldade. Sempre soube que podia contar com cada um de vocês, e esse suporte fez toda a diferença.

Ao meu dedicado professor e orientador Marcio Rosa, agradeço por compartilhar seu conhecimento e paixão pela educação.

Aos demais professores, fica minha gratidão, cada um de vocês contribuiu significativamente para o meu crescimento intelectual e despertou em mim o desejo de aprender e aprofundar meus estudos. Sou grata por todas as orientações, conselhos e feedbacks que me forneceram ao longo do caminho!

Ao meu coorientador Prof. Dr. Carlos César Evangelista de Menezes, pelo suporte concedido.

Aos graduandos em Agronomia: João Pedro Silva Felber, Vitor Ferreira Miola, Nyanne Rodrigues de Oliveira, Bruno Dário (IFGoiano) Kevin Albuquerque e Rodolfo Almeida e aos mestrandos: Wendson Cavalcante e Igor Kioshi do PPGPV, agradeço pelo auxílio na condução e nas avaliações do experimento.

Ao Complexo de Laboratórios de Biotecnologia Vegetal do IFGoiano – Campus Rio Verde, e aos professores Dr. Fabiano Guimarães Silva e Dr. Fábila Barbosa da Silva, pela disponibilização do analisador de trocas gasosas.

Também não posso deixar de agradecer aos servidores da Universidade, cujo trabalho muitas vezes acontece nos bastidores, com empenho e dedicação sendo fundamentais para

criar um ambiente propício para o aprendizado e para oferecer o suporte necessário a todos os alunos. Obrigada por tornarem a nossa experiência acadêmica mais enriquecedora e agradável!

Por fim, quero agradecer a todos os amigos e colegas que estiveram ao meu lado durante esta caminhada, suas amizades, apoio mútuo e momentos compartilhados tornaram esta jornada ainda mais especial.

Este trabalho não seria possível sem o auxílio de cada um de vocês. Mais uma vez, obrigada por fazerem parte da minha vida e por serem parte importante desta conquista!



## BIOGRAFIA

IRTES APARECIDA BARROS OLIVEIRA, filha de Benedita de Barros Oliveira e Vanderlei Oliveira Melo, natural de Paracatu, Minas Gerais, nasceu em 27 de dezembro de 1995.

Graduada em Agronegócio pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES) em junho de 2016, trabalhou pelo período de 5 anos em empresa privada do ramo de melhoramento genético e sementeira, findando seu vínculo empregatício em agosto de 2021.

Em janeiro de 2021, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) da UniRV, em nível de Mestrado (*Stricto sensu*) na área de concentração Grandes culturas, sob orientação do Prof. Dr. Márcio Rosa e coorientação do Prof. Dr. Carlos César Evangelista de Menezes.

Atualmente trabalha como diretora de mecanização agrícola, na Secretaria de Agropecuária no município de Paracatu - MG, atua como docente em instituições de ensino superior, ministrando aulas no curso de Agronomia e em áreas correlatas as ciências agrárias.

## SUMÁRIO

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| LISTA DE TABELAS.....         | vii |
| LISTA DE FIGURAS.....         | ix  |
| RESUMO.....                   | xi  |
| ABSTRACT.....                 | xii |
| 1 INTRODUÇÃO.....             | 1   |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS.....     | 5   |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 8   |
| 4 CONCLUSÃO.....              | 23  |
| REFERÊNCIAS.....              | 24  |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 | Análise físico-química do solo utilizado neste estudo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5  |
| TABELA 2 | Índice de clorofilas em plantas de milho submetidas a variações de capacidade de campo e à aplicação de quitosana e silicato de cálcio e potássio. CLA: clorofila <i>a</i> , CLB: clorofila <i>b</i> , CLA/CLB: Razão entre clorofila <i>a</i> e <i>b</i> , CLT: clorofilas totais.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 9  |
| TABELA 3 | Parâmetros de fluorescência da clorofila <i>a</i> de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a fontes de silicato e quitosana. Rendimento quântico potencial ( $\phi Po$ ), rendimento quântico de transporte de elétrons ( $\phi Eo$ ), rendimento quântico de dissipação de calor ( $\phi Do$ ), taxa de fechamento dos centros de reação do FSII ( $Mo$ ), índice de desempenho fotoquímico ( $PI_{ABS}$ ), fluxo de absorção de energia por centro de reação ( $ABS/RC$ ), dissipação de energia por centro de reação ( $Dio/RC$ ) e índice de desempenho fotoquímico total ( $PI_{tot}$ )..... | 11 |
| TABELA 4 | Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) e condutividade livre (CL), condutividade final (CF).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 14 |
| TABELA 5 | Características de trocas gasosas e de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Condutância estomática ( $g_s$ ), taxa fotossintética líquida ( $A$ ), taxa transpiratória ( $E$ ), razão entre concentração interna e externa de $CO_2$ ( $C_i/C_a$ ), eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência instantânea do uso da água ( $A/E$ ).....                                                                                                                                                                               | 16 |
| TABELA 6 | Índice de clorofilas em plantas de milho submetidas a variações de capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. CLA: clorofila <i>a</i> , CLB: clorofila <i>b</i> , CLA/CLB: Razão entre clorofila <i>a</i> e <i>b</i> , CLT: clorofilas totais.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 18 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 7  | Parâmetros de fluorescência da clorofila <i>a</i> de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Rendimento quântico potencial ( $\phi Po$ ), rendimento quântico de transporte de elétrons ( $\phi Eo$ ), rendimento quântico de dissipação de calor ( $\phi Do$ ), taxa fotossintética líquida ( $Mo$ ), índice de desempenho fotoquímico ( $PI_{ABS}$ ), fluxo de absorção de energia por centro de reação ( $ABS/RC$ ), dissipação de energia por centro de reação ( $Dio/RC$ ) e índice de desempenho fotoquímico total ( $PI_{tot}$ )..... | 18 |
| TABELA 8  | Características de trocas gasosas e status hídrico de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Condutância estomática ( $gs$ ), taxa fotossintética líquida ( $A$ ), taxa transpiratória ( $E$ ), razão entre concentração interna e externa de $CO_2$ , eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ), eficiência do uso da água ( $A/E$ ).....                                                                                                                                                                                                     | 19 |
| TABELA 9  | Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ), condutividade livre ( $CL$ ), condutividade final ( $CF$ ).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| TABELA 10 | Características biométricas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: altura ( $Alt$ ), diâmetro de colmo ( $DC$ ), área foliar ( $AF$ ), massa seca foliar ( $MSF$ ), massa seca de caule ( $MSC$ ), massa seca de raízes ( $MSR$ ) e massa seca total ( $MST$ ).....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 20 |

## LISTA DE FIGURAS

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 | A - Plantas de milho no dia da aplicação dos produtos. B – Ambiente de crescimento das plantas após aplicação dos produtos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 6  |
| FIGURA 2 | Condições meteorológicas do experimento durante o período de exposição às variações de capacidade de campo. Dados: Inmet ( <a href="https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001">https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001</a> ).....                                                                                                                                                                              | 9  |
| FIGURA 3 | Índices de clorofilas <i>a</i> (A), <i>b</i> (B) e totais (C) em plantas de milho após 14 dias de exposição a condições contrastantes de capacidade de campo.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 10 |
| FIGURA 4 | Rendimento quântico potencial fotossistema II, $\phi Po$ (A), Taxa de fechamento dos centros de reação do FSII, $Mo$ (B), rendimento quântico de dissipação de energia $\phi Do$ (C), fluxo de absorção de energia por centro de reação, $ABS/RC$ (D), dissipação de energia na forma de calor $Dio/RC$ (E), índice de desempenho fotoquímico, $PI_{ABS}$ (F) e índice de desempenho total, $PI_{Total}$ (G).....          | 12 |
| FIGURA 5 | Taxa de fechamento dos centros de reação do fotossistema II, $Mo$ (A), índice de desempenho fotoquímico do FSII, $PI_{ABS}$ (B) e índice de desempenho fotoquímico total, $PI_{Total}$ (C) em plantas de milho em função da aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio.....                                                                                                                             | 13 |
| FIGURA 6 | Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a fontes de silício e quitosana: potencial hídrico foliar (A), condutividade final (B) e condutividade livre (C). Na interação, médias com letras minúsculas comparam o resultado da capacidade de campo em cada produto, enquanto letras maiúsculas compara os produtos em cada capacidade de campo..... | 15 |
| FIGURA 7 | Condutância estomática – $gs$ (A), taxa fotossintética líquida - $A$ (B), taxa transpiratória - $E$ (C), eficiência instantânea do uso da água ( $A/E$ ) e razão entre concentração interna e externa de $CO_2$ ( $E$ ) em plantas de milho após 14 dias de condições contrastantes de capacidade de campo.....                                                                                                            | 17 |

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 8 | Altura de plantas (A), área foliar (B), massa seca foliar (C), massa seca de caule (D) e massa seca total (E) de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio submetidas a duas capacidades de campo..... | 21 |
| FIGURA 9 | Altura de plantas de milho em função da aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio.....                                                                                                                                                                                   | 22 |

## RESUMO

OLIVEIRA, I. A. B.; **Desempenho morfofisiológico de milho sob déficit hídrico submetido a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio**. 2023. 45f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade de Rio Verde, Rio Verde, GO, 2023.

O déficit hídrico é considerado o fator abiótico que mais limita as produções agrícolas. Entre as propostas de manejo para mitigar o estresse causado por fatores abióticos está a aplicação foliar de silicatos e de biopolímeros, como o polissacarídeo quitosana. Estes produtos podem formar uma camada protetora na superfície das folhas, o que reduz riscos por escaldadura e a perda de água por transpiração, aumentando a eficiência no uso da água pelas. Adicionalmente podem atuar na defesa contra espécies reativas de oxigênio, pragas e doenças. Portanto, investigações relacionadas à utilização de substâncias inorgânicas e orgânicas na mitigação de estresse hídrico, podem representar estratégia importante, para conferir segurança aos cultivos potencializando a produtividade e a lucratividade. Nesse contexto, objetivou-se com este estudo avaliar respostas morfofisiológicas de híbrido de milho mediante a utilização de quitosana e silicato de cálcio e potássio em condições de déficit hídrico. O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 3, com cinco repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação de duas tensões hídricas no solo, 80% e 40% da capacidade de campo e 3 doses de produtos (suspensão de silicato de cálcio e potássio a 3%, quitosana P.A 160 mg L<sup>-1</sup> e controle, sem aplicação). Cada unidade experimental foi composta por um vaso de polietileno de 8L com uma planta. A aplicação dos produtos, foi realizada aos 50 dias após a emergência, com pulverizador costal com volume de calda equivalente a 200 L ha<sup>-1</sup>. Dois dias após houve a imposição dos tratamentos de déficit hídrico. Aos 14 dias após a exposição aos tratamentos foram determinados: o índice de clorofilas, a eficiência fotoquímica, as trocas gasosas foliares, o potencial hídrico foliar e a taxa de liberação de eletrólitos. Posteriormente a rega foi ajustada de forma a obter-se 80% da capacidade para todos os vasos e após uma semana, as avaliações citadas anteriormente foram repetidas. As plantas foram coletadas para determinação: da altura, número de folhas, diâmetro de caule, área foliar e massa seca 80 dias após a semeadura. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (p<0,05) e posteriormente ao teste de médias de Tukey a 5%. Não foram observadas interações significativas entre produtos e capacidade de campo para a maioria dos parâmetros avaliados. A redução da capacidade de campo, por 14 dias, afetou negativamente os índices fisiológicos avaliados, havendo recuperação após aumento do teor de água para 80% da capacidade de campo. Entretanto, o estresse foi suficiente para reduzir: a área foliar, a altura de plantas e o acúmulo de matéria seca. A aplicação de quitosana se destacou em relação ao controle por promover maiores índices de desempenho fotoquímico e altura de plantas.

**Palavras-chave:** antitranspirantes, estresse hídrico, taxa fotossintética, *Zea mays*.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, I. A. B.; **Morphophysiological performance of corn under water deficit submitted to foliar application of chitosan and calcium and potassium silicate.** 2023. 45f. Dissertation (Master in Plant Production) University of Rio Verde, Rio Verde, GO, 2023.

Water deficit is considered the abiotic factor that most limits agricultural production. Among the management proposals to mitigate the stress caused by abiotic factors is the foliar application of silicates and biopolymers such as the polysaccharide chitosan. These products can form a protective layer on the surface of the leaves, which reduces the risk of scalding and water loss through transpiration, increasing the efficiency of the plant's use of water. Additionally, they can act in defense against reactive oxygen species, pests and diseases. Therefore, investigations related to the use of inorganic and organic substances in the mitigation of water stress, may represent an important strategy to provide safety to crops, enhancing productivity and profitability. In this context, the aim of this study was to evaluate the morphophysiological responses of corn hybrids using chitosan and calcium and potassium silicate under conditions of water deficit. The experiment was set up in a completely randomized design, in a 2 x 3 factorial scheme, with five replications. The treatments were composed by the combination of two water tensions in the soil, 80% and 40% of the field capacity and 3 doses of products (suspension of calcium and potassium silicate at 3%, chitosan P.A 160 mg L<sup>-1</sup> and control, without application). Each experimental unit consisted of an 8L polyethylene pot with a plant. The application of the products was carried out 50 days after emergence, with a knapsack sprayer with a spray volume equivalent to 200 L ha<sup>-1</sup>. Two days later, water deficit treatments were imposed. At 14 days after exposure to treatments, chlorophyll index, photochemical efficiency, leaf gas exchange, leaf water potential and electrolyte leakage rate were determined. Subsequently, the watering was adjusted in order to obtain 80% of the capacity for all pots and after a week the aforementioned evaluations were repeated. Plants were collected to determine height, number of leaves, stem diameter, leaf area and dry mass 80 days after sowing. The data obtained were submitted to analysis of variance ( $p < 0.05$ ) and subsequently to Tukey's mean test at 5%. No significant interactions were observed between products and field capacity for most of the evaluated parameters. The reduction in field capacity, for 14 days, negatively affected the evaluated physiological indices, with recovery after increasing the water content to 80% of field capacity. However, the stress was enough to reduce leaf area, plant height and dry matter accumulation. The application of chitosan stood out by promoting higher levels of photochemical performance and plant height.

Keywords: antiperspirants, water stress, photosynthetic rate, *Zea mays*



# 1 INTRODUÇÃO

O cultivo do milho é globalmente difundido, com Brasil ocupando a terceira posição na produção mundial, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China (RUFF et al., 2023). Em face da importância econômica e da preocupação com a segurança alimentar em escala global, é crucial intensificar os estudos destinados a mitigar os impactos dos estresses abióticos sobre as lavouras de milho. A disponibilidade hídrica e a seca estão entre as principais preocupações das mais diversas lideranças mundiais ao redor do planeta. A seca é o fator abiótico mais difundido que contribui para grandes perdas de rendimento em sistemas agrícolas em todo o mundo (PEREIRA et al., 2020). Dentre os fatores de riscos que afetam o desempenho do milho safrinha em Goiás, o estresse hídrico foi apontado por todos os produtores como o principal, o que limita ou reduz o rendimento da cultura (SILVA; FRANCISCHINI, 2013). Com base em levantamento de dados publicados entre 1980 e 2015, Daryanto et al. (2016), destacam que a produtividade do milho sofreu uma redução até 40% em escala global devido à seca.

O estresse abiótico causado pelo déficit hídrico, pode alterar os processos fisiológicos e bioquímicos da planta. Além de alterações no turgor celular e na condutância estomática, há queda nos teores de clorofila (ZHOU et al., 2015), estímulo à oxidação de proteínas (FU; HUANG, 2001) e lipídeos da membrana pelo incremento de espécies reativas de oxigênio (GHOBADI; FARSIANI; HONARMAND, 2011). Consequentemente, isso gera: decréscimo da expansão celular, perdas em produção de massa fresca e seca das plantas, além da redução em altura e diâmetro dos colmos (YAN et al., 2016). Segundo Sah et al. (2020), no milho, a expressão fenotípica após um nível crítico de déficit hídrico é caracterizada pela redução: na duração do *stay-green*, do comprimento da espiga, massa da semente, altura da planta, número de grãos por espiga, número de folhas, espigas por planta, fileiras de grãos por espiga, grãos por fileira e senescência precoce das folhas, mesmo durante a floração, consequentemente queda do desempenho produtivo.

A deficiência hídrica provoca alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade vai depender: do genótipo, da duração deste evento, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta (SAINT PIERRE et al., 2012). Desta forma, em condições de estresse hídrico as variáveis de trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas,

pelo aumento do efeito fotoinibitório (GLAZ et al., 2004). O milho embora seja uma espécie exigente em água, possui eficiência do uso da água maior do que plantas C3. Isso se deve ao fato desta espécie possuir metabolismo fotossintético C4, tendo assim mecanismo concentrador de CO<sub>2</sub>, decorrente da sua anatomia funcional. Dessa forma, nas células do mesófilo, há a atuação da PEPcarboxilase que possui alta afinidade pelo CO<sub>2</sub>, formando oxaloacetato o qual é convertido a malato e posteriormente transportado até as células da bainha do feixe vascular, onde é descarboxilado proporcionando elevada razão CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, o que favorece a atividade carboxilase da RubisCO, reduzindo a fotorrespiração (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; SANTANA et al., 2023).

Menos de 5% da água absorvida pelas raízes é utilizada para o crescimento, desenvolvimento e colheita, os 95% restantes se perdem por transpiração. A redução da transpiração, por meio da utilização de antitranspirantes, representa uma oportunidade para aliviar os efeitos adversos do déficit hídrico e melhorar a produtividade das culturas em condições de escassez hídrica (ABDULAH et al., 2015). Os antitranspirantes vegetais são produtos químicos capazes de reduzir a taxa de transpiração, quando aplicados nas folhas das plantas (CASTRO et al., 2017).

Com base no mecanismo de ação, estes antitranspirantes são agrupados em três categorias, sendo elas: partículas de filme, materiais refletores e os que promovem fechamento estomático. Os antitranspirantes com partículas de filme, cobrem a superfície da folha com películas que diminuem a perda de vapor de água. Os materiais refletores induzem a reflexão de uma parte da radiação que incide sobre a superfície vegetal, onde foi aplicado podendo ser fruto ou folha. E, por último aquele que promovem fechamento estomático, interferindo nos processos metabólicos nos tecidos foliares (AHMED, 2014). Alguns exemplos de compostos que podem ser antitranspirantes sendo: ceras, silicões e polímeros plásticos e minerais. Os antitranspirantes vegetais podem ser físicos ou fisiológicos. Os físicos formam barreira para a transpiração ou alteram a condutância estomática, enquanto os fisiológicos agem sobre a condutância estomática e abscisão foliar (CASTRO et al., 2017).

Dentre os antitranspirantes, o mais estudado é o caulim, um mineral constituído principalmente de silicato de alumínio (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), que pode ser utilizado puro ou adicionado a uma formulação. O caulim é uma partícula de filme que contribui com o aumento da reflectância da folha, diminui a temperatura da superfície foliar, melhora taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e condutância estomática, melhora a eficiência do uso da água, conseqüentemente, melhora o desenvolvimento da planta e produção de frutos com maior qualidade (SOTELO-CUITIVA, 2011; KOCIĘCKA et al., 2023). Os silicatos solúveis,

devido a sua praticidade e à possibilidade de utilização de doses menores, além de serem facilmente adaptáveis aos equipamentos normalmente usados pelos produtores têm mostrado potencial de utilização. Os silicatos solúveis são obtidos pela fusão da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com hidróxidos ou carbonatos de sódio ou potássio em fornos pressurizados, resultando nas principais fontes de silicatos solúveis, como os silicatos de sódio e potássio (REIS et al., 2007).

O uso do silicato de potássio solúvel ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) tem apresentado resultados promissores no aumento da produção vegetal em diversas culturas, como soja, milho, batata, café e morango (RODRIGUES et al., 2007a; RODRIGUES et al., 2007b; MERRIGHI et al., 2007; LUZ et al., 2010). Esses resultados não se limitam apenas à redução da transpiração foliar, mas também se estendem ao aumento da eficiência na utilização de nutrientes imóveis, como cálcio, ferro, zinco, manganês e cobre. Além disso, essa aplicação de silicato proporciona maior resistência contra pragas e doenças mostrando-se benéfica mesmo em culturas não consideradas acumuladoras de silicato de potássio solúvel (RODRIGUES et al., 2007b). Abdalah et al (2019), verificaram que a aplicação foliar em plantas de trigo com caulim ou  $\text{K}_2\text{SO}_4$  resultaram em um aumento nos parâmetros de crescimento, componentes de rendimento, pigmentos fotossintéticos e constituintes de carboidratos. Foi observado um maior acúmulo de solutos orgânicos nas folhas (açúcares solúveis totais e aminoácidos livres), atividades de enzimas antioxidantes e alguns minerais (N, P, K e Ca). Em milho, Al-Mokadem et al. (2023), relataram que a aplicação foliar de soluções de caulim (3 e 6%) promoveram aumento nas variáveis de crescimento e rendimento das plantas de milho cultivadas sob condições normais e de estresse hídrico. No entanto, há uma carência de estudos com abordagem fisiológica sobre os antitranspirantes à base de silicatos em culturas anuais (SALIB, 2018; KOCIEŃKA et al., 2023), sobretudo em milho (AL-MOKADEM et al., 2023).

Entre as substâncias orgânicas com potencial antitranspirantes destaca-se a quitosana. Esta é obtida a partir da quitina, o polissacarídeo natural mais abundante depois da celulose encontrada no planeta. Estruturalmente, a quitina é composta por resíduos de N-acetilglucosamina. Após a desacetilação da quitina, a quitosana é obtida, sendo composta por um polímero linear constituído por duas subunidades, D-glucosamina e N-acetil-D-glucosamina, unidas por ligações glicosídicas. A presença do grupo amina facilita modificações estruturais e a síntese de derivados funcionais (HIDANGMAYUM et al., 2019).

Estudos indicam que a quitosana pode influenciar na expressão de genes, tanto no núcleo quanto no cloroplasto, resultando em um aumento nas atividades fotossintéticas e das

enzimas antioxidantes enzimáticas, bem como interagir com lipídios, íons metálicos, proteínas e macromoléculas e ativar genes relacionados à defesa das plantas por meio de modificações na cromatina (HADWIGER, 2015; RABÊLO et al., 2019). Com as mudanças climáticas em curso e o crescente interesse em produção de alimentos de forma sustentável, o uso excessivo de produtos químicos sintéticos tem se tornado insustentável. Nesse contexto, a aplicação da quitosana como um eliciador mostra-se altamente promissora, abordando questões relacionadas à adaptação ao estresse causado por fatores bióticos e abióticos (AVILA et al., 2023).

A quitosana e seus oligômeros têm sido empregados em plantas para conferir resistência contra estresses abióticos, como déficit hídrico, salinidade, estresse térmico e toxicidade de metais pesados (MALERBA; CERANA, 2015). Sua habilidade em eliminar o excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs) e, conseqüentemente, melhorar o desempenho sob estresse, tem despertado o interesse de pesquisadores para explorar ainda mais esse novo biopolímero em diversas aplicações. No feijão comum, quando aplicado hidroponicamente, a quitosana também foi capaz de alterar a morfologia da raiz e da parte aérea e acúmulo de minerais na biomassa vegetal (CHATELAIN et al., 2014). O efeito positivo de antitranspirante em plantas de milho foi observado por Lizárraga-Paulín et al. (2011), com a aplicação do biopolímero a base de quitosana. Houve aumento na altura de plantas, no número de ramificações da parte aérea, no número de folhas, da área foliar e de atributos de biomassa.

No contexto de estresse por seca ou desidratação, o tratamento com quitosana tem amenizado os efeitos adversos causados pelo estresse hídrico, ao estimular a produção de enzimas antioxidantes (GUO et al., 2003; YIN et al., 2008), fortalecer a capacidade de absorção de água através do aumento do crescimento radicular (ZENG; LUO, 2012), e aprimorar a eficiência fotossintética (LI et al., 2008).

Portanto, investigações relacionadas à utilização de antitranspirantes, sejam inorgânicos ou orgânicos, representam estratégia importante, para conferir segurança, aos cultivos e para potencializar a produtividade e a lucratividade.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar respostas morfofisiológicas de híbrido de milho mediante a utilização de quitosana, silicato de cálcio e potássio em condições contrastantes de capacidade de campo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental da Fazenda Fontes do Saber na Universidade de Rio Verde (UniRV), Rio Verde, Goiás, localizada na latitude 17°47'14"S e longitude 50°57'53" e altitude de 782 m. O experimento foi instalado em céu aberto, sob delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 3, com cinco repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação de duas tensões hídricas no solo controle (80% da capacidade de campo) e déficit hídrico (40% da capacidade de campo) e dois produtos (suspensão de silicato de cálcio e potássio 46% 6 L ha<sup>-1</sup>, e solução de quitosana 160 mg L<sup>-1</sup>) e um tratamento controle, sem aplicação de produtos.

Foram utilizadas sementes do híbrido P3707 VYH (Pioneer®). Tal genótipo se caracteriza como: híbrido simples, precoce, de coloração amarelo alaranjada, textura semidentada, com potencial de utilização, tanto para produção de grãos, quanto silagem. No dia 26 de abril de 2023, foi realizada a semeadura de forma manual em casa de vegetação nas unidades experimentais. Estas, foram compostas por vasos de polietileno preto de 8 litros preenchidos com 8kg de solo previamente corrigido, proveniente da área de mata localizada na Fazenda Fontes do Saber da Universidade de Rio Verde, de horizonte A de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico (SANTOS et al., 2018), coletados na camada de 0-20 cm, cujas características físico-químicas são descritas na Tabela 1.

TABELA 1 - Análise físico-química do solo utilizado neste estudo

| cmolc dm <sup>-3</sup> |      |      |      |      | mg dm <sup>-3</sup> |      | g Kg <sup>-1</sup> |
|------------------------|------|------|------|------|---------------------|------|--------------------|
| Ca+Mg                  | Ca   | K    | Mg   | Al   | H+Al                | P    | M.O                |
| 2,59                   | 1,93 | 0,12 | 0,66 | 0,05 | 3,40                | 86,6 | 38,84              |

| Dados Complementares |      |       |                        |      | Textura |       |       |
|----------------------|------|-------|------------------------|------|---------|-------|-------|
| pH                   | %    |       | cmolc dm <sup>-3</sup> |      | %       |       |       |
| CaCl <sub>2</sub>    | m    | V     | CTC                    | SB   | Argila  | Silte | Areia |
| 5,22                 | 1,81 | 44,39 | 6,11                   | 2,71 | 35,0    | 12,0  | 53,0  |

|      |       |      |      |      |
|------|-------|------|------|------|
| B    | Fe    | Mn   | Cu   | Zn   |
| 0,68 | 50,16 | 0,89 | 1,02 | 0,76 |

Fonte: Laboratório NemaLab - Rio Verde.

Aos 07 dias após a emergência, procedeu-se o desbaste, mantendo-se apenas uma planta por vaso. Aos 09 e 16 dias após a emergência foi realizada aplicação de solução nutritiva comercial para o estabelecimento das plantas.

Aos 50 dias após a emergência (Figura 1A), as plantas receberam a aplicação dos produtos com potencial mitigador de estresse hídrico. O silicato de cálcio e potássio a 46% foi utilizado a partir de suspensão comercial diluída diretamente em água na concentração de 3%. A solução de quitosana foi preparada de acordo com as metodologias descritas por Korsangruang et al. (2010) e Ávila et al. (2023), com quitosana sólida (ACS Científica) sendo dissolvida em ácido acético (0,25% v/v) com constante agitação e pH ajustado para 6,0 usando hidróxido de sódio diluído. Posteriormente, foi aplicada diretamente nas folhas na concentração de 160 mg L<sup>-1</sup>. As aplicações foram realizadas utilizando um pulverizador costal com pressurização por CO<sub>2</sub> munido de barra de 2 m, contendo quatro pontas de pulverização (0,45 m entre pontas), aplicando volume de calda equivalente a 200 L ha<sup>-1</sup>.



FIGURA 1 - A - Plantas de milho no dia da aplicação dos produtos. B – Ambiente de crescimento das plantas após aplicação dos produtos.

Após a aplicação dos produtos as plantas foram transferidas para ambiente a céu aberto (Fig. 1B) para se aproximar das condições naturais. Dois dias após a aplicação, as plantas foram expostas a déficit hídrico por um período de 14 dias. Para os tratamentos sem déficit hídrico, a umidade do solo foi mantida em torno de 80 % da sua capacidade de campo, enquanto para os tratamentos submetidos ao déficit hídrico, a umidade do solo foi ajustada para 40 % da sua capacidade de campo. Os vasos foram pesados diariamente a fim de aferir a necessidade de água.

Aos 15 dias após a exposição aos tratamentos foram determinados o índice de clorofilas, a eficiência fotoquímica, as trocas gasosas foliares, o potencial hídrico foliar e a taxa de extravasamento de eletrólitos. Dois dias após as avaliações, todas as plantas foram niveladas com a capacidade de campo a 80% a fim de avaliar a capacidade dos produtos proporcionarem a recuperação do status fisiológico. Após uma semana nessa condição repetiu-se as análises anteriores e as plantas foram coletadas para a determinação das características biométricas.

### **Detalhamento das avaliações fisiológicas**

Os índices de clorofila *a* (*Cl<sub>a</sub>*), clorofila *b* (*Cl<sub>b</sub>*), clorofila total (*Cl<sub>t</sub>*) e razão entre a clorofila *a* e *b* (*Cl<sub>a</sub>/Cl<sub>b</sub>*) foram determinados utilizando o clorofilômetro ClorofiLog CFL 1030, (Falker, RS, Brasil) em folhas totalmente expandidas.

As variáveis de fluorescência da clorofila foram avaliadas utilizando o fluorômetro FluorPen FP 110/D (Photon Systems Instrumentes, Czech Republic). Foram explorados os índices de rendimento quântico máximo do fotossistema II ( $\phi Po$ ), rendimento quântico de transporte de elétrons ( $\phi Eo$ ), taxa de fechamento dos centros de reação do FS II (*Mo*), a absorção de energia por centro de reação (*ABS/RC*), rendimento quântico de dissipação de energia ( $\phi Do$ ), o fluxo de dissipação de energia por centro de reação (*Dio/RC*), e os índices de desempenho fotoquímico (*PI<sub>ABS</sub>*) e total (*PI<sub>Total</sub>*), conforme Strasser et al. (2000).

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para registro: da taxa fotossintética (*A*,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa transpiratória (*E*,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (*g<sub>s</sub>*,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*). A partir desses dados foi possível calcular a eficiência instantânea do uso da água (*A/E*), a razão entre concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> e a eficiência de carboxilação (*A/C<sub>i</sub>*). As medições foram realizadas utilizando um analisador de gases por infravermelho (IRGA, LI-6800, Licor®, Nebraska, EUA), com a câmara de medição configurada com radiação fotossinteticamente ativa constante de 1500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , CO<sub>2</sub> a 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  de CO<sub>2</sub>, temperatura de 25 °C e umidade relativa de 60%.

O potencial hídrico foliar foi medido entre as 05h00 e 06h00 por meio de câmara de pressão do tipo Scholander modelo 3115 SAPS II (Soilmoisture Equipment Corp, CA, USA).

A avaliação do extravasamento de eletrólitos dos tecidos foliares, indicador da descompartmentalização celular, foi realizada mediante a taxa de liberação de eletrólitos, segundo adaptação da metodologia descrita por Vasquez-Tello et al. (1990) e Pimentel et al. (2002). Para tal, foram coletados 12 discos foliares, de oito mm de diâmetro, de cada repetição. Os discos foram lavados previamente com água e então submersos em 30 mL de

água destilada, em frascos âmbar, por período de 24 horas à temperatura ambiente (23-25 °C). Após este período, foi mensurada a condutividade livre (CL,  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), utilizando condutivímetro portátil AMP-4 (Tecnal, Brasil). Posteriormente, os mesmos frascos foram colocados em estufa por uma hora sob temperatura de 100°C e, após o resfriamento até temperatura ambiente, foi medida a condutividade total (CT,  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). As coletas dos discos foliares foram realizadas no horário entre 10h e 11h.

### **Características biométricas**

A altura de plantas foi determinada com régua graduada em centímetros, tomando-se a distância entre o nível do solo e o ápice da planta. A área foliar foi obtida pela expressão  $AF = C \times L \times 0,75$  (SANGOI et al., 2007), em que C e L representam o comprimento e a largura, respectivamente, de todas as folhas com mais de 30% de área verde. O diâmetro do caule foi determinado na base das plantas por meio de paquímetro.

A matéria seca de caule, folhas e raízes foi determinada após secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72h.

### **Análise estatística**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ao teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade, por meio do *software* Sisvar (FERREIRA, 2019).

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Durante a condução do experimento a única precipitação pluviométrica ocorreu no penúltimo dia de condução, durante o período de reidratação das plantas, com acumulado de apenas 1mm. Portanto, não influenciando nas respostas observadas. As temperaturas médias máximas não excederam os 30,2°C e a umidade relativa do ar no período variou entre 22 e 86% (Figura 2).



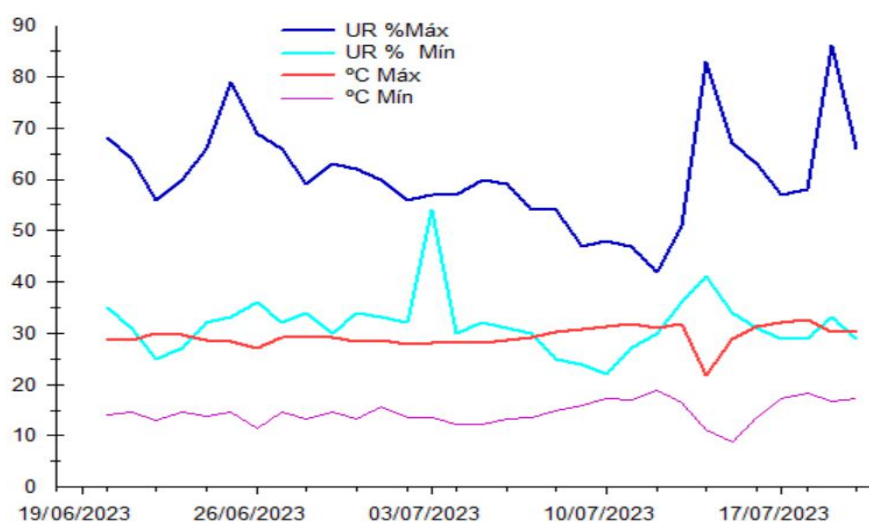


FIGURA 2 - Condições meteorológicas do experimento durante o período de exposição às variações de capacidade de campo. Dados: Inmet (<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>).

Na Tabela 2 são expostos os resultados da análise de variância para índices de clorofilas. Não houve interação entre capacidade de campo e utilização de produtos, no entanto, houve efeito isolado da capacidade de campo, exceto para a razão entre clorofilas *a* e *b*.

TABELA 2 - Índice de clorofilas em plantas de milho submetidas a variações de capacidade de campo e à aplicação de quitosana e silicato de cálcio e potássio. CLA: clorofila *a*, CLB: clorofila *b*, CLA/CLB: Razão entre clorofila *a* e *b*, CLT: clorofilas totais

| Fonte de variação        | CLA  | CLB | CLA/B | CLT  |
|--------------------------|------|-----|-------|------|
| Capacidade de campo (CC) | *    | *   | ns    | *    |
| Produtos (P)             | ns   | ns  | ns    | ns   |
| CC x P                   | ns   | ns  | ns    | ns   |
| Média geral              | 22,1 | 6,0 | 3,7   | 28,1 |
| CV%                      | 4,5  | 8,3 | 6,4   | 4,9  |

\* Significativo a 5% de probabilidade, ns: não significativo, CV: coeficiente de variação.

Observou-se que os índices de clorofilas *a* e *b* (Figuras 3A e 3B), foram afetadas negativamente pela restrição hídrica nos vasos sob 40% da capacidade de campo, consequentemente reduzindo o índice de clorofilas totais nessa condição (Figura 3C). Entretanto, a razão clorofila *a/b* não variou (Figura 3D).

As clorofilas desempenham papel importante na fotossíntese, sendo estes pigmentos os principais responsáveis pela captação de energia luminosa e seu conteúdo pode ser bastante

sensível às variações ambientais. Os menores índices encontrados sob déficit hídrico podem ser explicados levando-se em conta que a deficiência hídrica beneficia a síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs), que prejudicam o metabolismo vegetal, dentre outras razões, por induzirem a oxidação dos pigmentos fotossintéticos (SILVA et al., 2016).

Em plantas sob estresse hídrico, verifica-se decréscimos nos teores de clorofila, o que pode ser enquadrado como um típico indício de estresse oxidativo, sendo, provavelmente, resultado de foto-oxidação dos pigmentos, associados à própria degradação das moléculas de clorofila (CARLIN et al., 2012; SILVA et al., 2016). A redução no teor de clorofila em grande parte das plantas sob estresse pode ser atribuída à desorganização das membranas dos tilacoides, resultando em uma maior taxa de degradação em comparação com a síntese de clorofila. Esse processo é mediado pela ação de enzimas proteolíticas, como a clorofilase, que desempenham um papel crucial na degradação da clorofila e, conseqüentemente, na lesão ao aparato fotossintético (RONG-HUA et al., 2006). A redução no conteúdo deste pigmento como consequência do estresse hídrico tem sido relatada para diversas culturas como: ervilha, girassol, trigo e milho (MORAN et al., 1994; GHOBADI et al., 2013; ABDALLAH et al., 2019; AZEEM et al., 2022).

Embora seja relatado que o aumento da razão clorofila *a/b* seja indicador de estresse, devido a conversão de clorofila *b* em *a*, e ao menor investimento de N em clorofila *b* (CRUZ et al., 2007), não foi observada variação neste estudo.

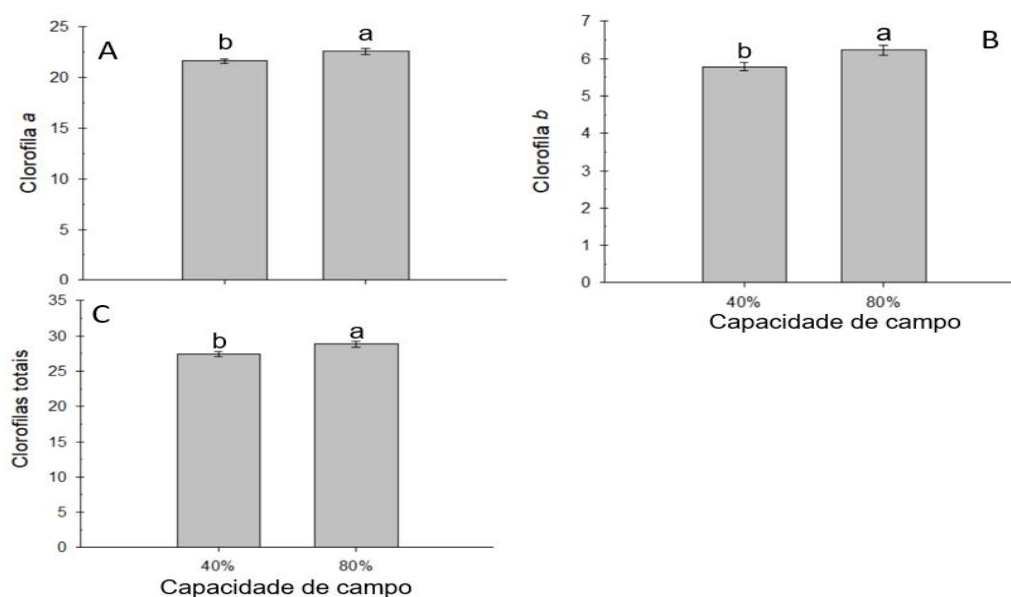


FIGURA 3 - Índices de clorofilas *a* (A), *b* (B) e totais (C) em plantas de milho após 14 dias de exposição a condições contrastantes de capacidade de campo. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de F a 5%.

Diferentemente do relatado por Almeida et al. (2020) e Karaat e Denizhan (2023), não foram observados efeitos protetores sobre as clorofilas mediados pela aplicação foliar de quitosana e silicato, respectivamente. Similar ao observado para índice de clorofilas, não foram observadas interações entre a capacidade de campo e os produtos utilizados sobre os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* (Tab. 4). Contudo, a variação na capacidade de campo promoveu alterações na maioria das características avaliadas, enquanto, a aplicação dos produtos afetou apenas os parâmetros, Mo, PI<sub>ABS</sub> e PI<sub>Total</sub>.

TABELA 3 – Parâmetros de fluorescência da clorofila *a* de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a fontes de silicato e quitosana. Rendimento quântico potencial ( $\phi Po$ ), rendimento quântico de transporte de elétrons ( $\phi Eo$ ), rendimento quântico de dissipação de calor ( $\phi Do$ ), taxa de fechamento dos centros de reação do FSII (Mo), índice de desempenho fotoquímico (PI<sub>ABS</sub>), fluxo de absorção de energia por centro de reação (ABS/RC), dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) e índice de desempenho fotoquímico total (PI<sub>tot</sub>)

| Fonte de variação        | $\phi Po$ | $\phi Eo$ | $\phi Do$ | Mo  | PI <sub>ABS</sub> | ABS/RC | Dio/RC | PI <sub>Tot</sub> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|-------------------|--------|--------|-------------------|
| Capacidade de campo (CC) | *         | ns        | *         | *   | *                 | **     | *      | *                 |
| Produtos (P)             | ns        | ns        | ns        | *   | *                 | ns     | ns     | *                 |
| CC x P                   | ns        | ns        | ns        | ns  | ns                | ns     | ns     | ns                |
| Média geral              | 0,79      | 0,33      | 0,21      | 9,7 | 1,2               | 2,5    | 0,5    | 0,82              |
| CV (%)                   | 2,9       | 12,8      | 10,5      | 1,1 | 27,5              | 6,4    | 17,3   | 24,6              |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F, CV: coeficiente de variação.

O rendimento quântico potencial ( $\phi Po$ , ou  $F_v/F_m$ ) foi menor em plantas sob a capacidade de campo de 40% (Fig. 4A). Nesta condição também observou-se maiores taxas de fechamento dos centros de reação do FSII (Mo) (Fig. 4B), dessa forma indicando menor grau de organização estrutural dos cloroplastos (STRASSER et al., 2000), consequentemente havendo maior dissipação de energia na forma de calor ( $\phi Do$ ) (Fig. 4C). Nesse sentido, o maior fluxo de absorção de energia por centro de reação (ABS/RC), observado nas plantas sob 40% da capacidade de campo (Fig. 4D), indicam maior sobrecarga energética em função de menos centros de reação estarem ativos nessa condição, aumentando dessa forma a dissipação de energia na forma de calor (Dio/RC) (Fig. 4E).

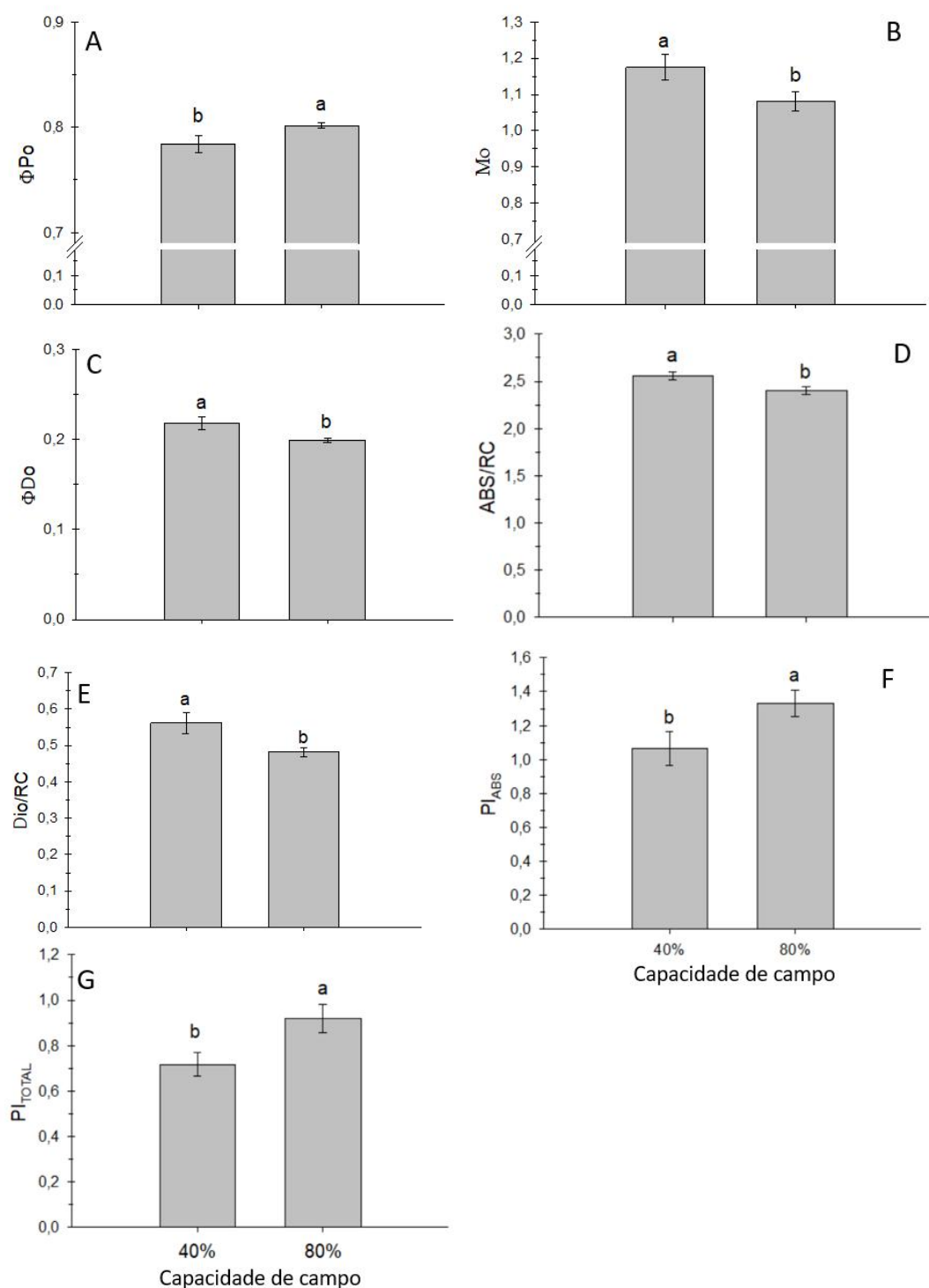


FIGURA 4 – Rendimento quântico potencial fotossistema II,  $\Phi Po$  (A), Taxa de fechamento dos centros de reação do FSII, Mo (B), rendimento quântico de dissipação de energia  $\Phi Do$  (C), fluxo de absorção de energia por centro de reação, ABS/RC (D), dissipação de energia na forma de calor Dio/RC(E), índice de desempenho fotoquímico,  $PI_{ABS}$  (F) e índice de desempenho total,  $PI_{Total}$  (G). Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de F a 5%.

O aumento dos índices de dissipação de energia na forma de calor ( $\phi Do$  e  $Dio/RC$ ) a 40% da capacidade de campo, repercutiu em quedas tanto do índice de desempenho fotoquímico (PIABS) (Fig. 4F), quanto total PITotal (Fig. 4G). O PIABS é um indicador de desempenho mais sensível que  $\phi Po$ , pois associa a densidade de centros de reação ativos, a captura de energia de excitação e a conversão dessa energia em transporte de elétrons, em uma única expressão multiparamétrica (KUMAR et al., 2020). Já o PITotal inclui em seus componentes a capacidade de redução dos aceptores finais do FSI (TSIMILLI; STRASSER, 2008; TSIMILLI-MICHAEL, 2020). Segundo Yusuf (2010), o PITotal representa o potencial das plantas para conservar energia para o crescimento e sobrevivência sob condições estressantes.

Os menores valores de Mo em plantas tratadas com quitosana indicam que este biopolímero promoveu maior estabilidade dos mecanismos fotoquímicos em relação ao controle (Fig. 5A). Isto refletiu nos maiores índices de desempenho, PIABS e PITotal (Figs. 5B e 5C, respectivamente).

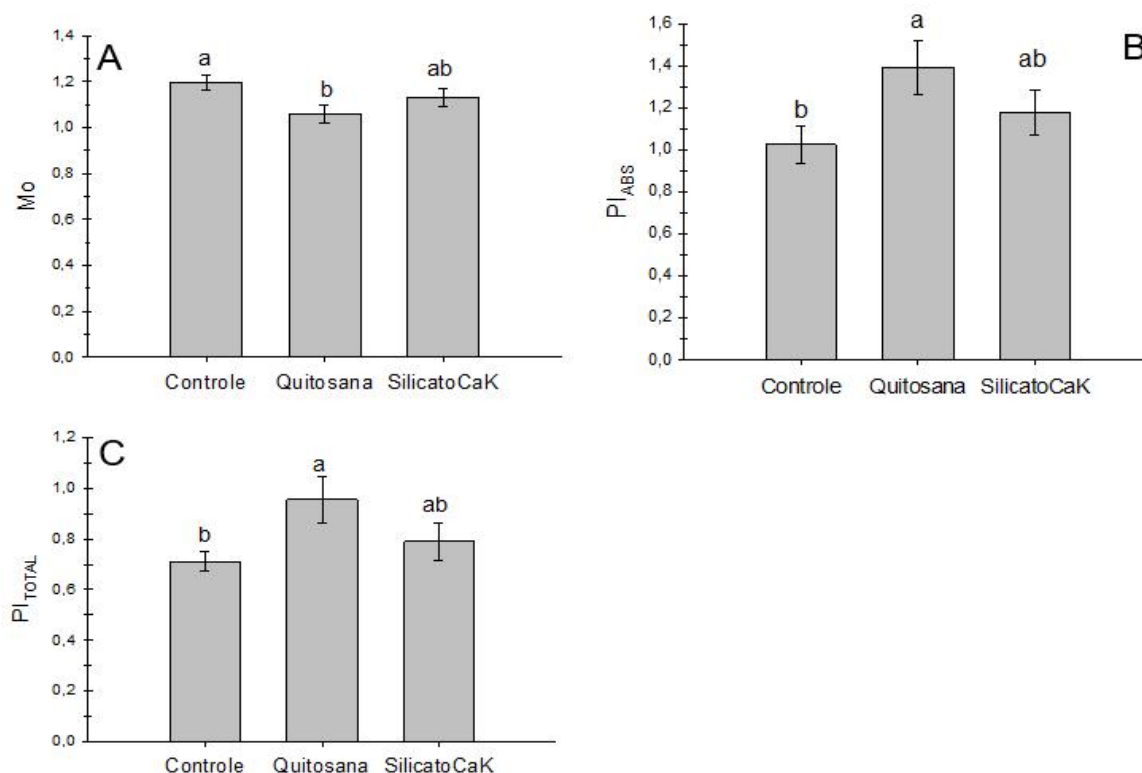


FIGURA 5 - Taxa de fechamento dos centros de reação do fotossistema II, Mo (A), índice de desempenho fotoquímico do FSII, PI<sub>ABS</sub> (B) e índice de desempenho fotoquímico total, PI<sub>Total</sub> (C) em plantas de milho em função da aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Verificou-se interação entre capacidade de campo e produtos para a variável condutividade livre, enquanto o potencial hídrico foliar e a condutividade final foram afetados somente em função da disponibilidade hídrica (Tab. 5). O que está ligada aos danos sofridos aos mecanismos fisiológicos a planta em questão, que influenciou significativamente na interação existente.

TABELA 4 - Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) e condutividade livre (CL), condutividade final (CF)

| Fonte de variação        | $\Psi_w$ | CL   | CF   |
|--------------------------|----------|------|------|
| Capacidade de campo (CC) | **       | ns   | **   |
| Produtos (P)             | ns       | *    | ns   |
| CC x P                   | ns       | *    | ns   |
| Média geral              | -0,24    | 13,0 | 58,4 |
| CV (%)                   | 29,7     | 12,3 | 14,4 |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F , CV: coeficiente de variação.

Segundo Bergamaschi (1992), no início da manhã, quando a planta está túrgida, o potencial da água nas folhas é da ordem de -0,1 a -0,3 MPa, valores que são semelhantes ao do presente estudo. O potencial hídrico a 40% da CC foi aproximadamente de -0,35 MPa enquanto nas plantas a 80% da CC foi de -0,136 MPa, (Fig. 6A) uma variação de 157,35%. Com a diminuição da disponibilidade de água no solo, há a redução do  $\Psi_w$  deste, tornando mais difícil para as plantas extrair a água adsorvida aos colóides do solo, sendo necessário o ajustamento osmótico das plantas para reduzir o seu potencial osmótico e, conseqüentemente o hídrico, garantindo o estabelecimento de um gradiente de  $\Psi_w$ . Além disso, quanto menor for o teor de água nas células das plantas, menor será o  $\Psi_p$  e, conseqüentemente, menor o  $\Psi_w$  das plantas (JALES et al., 2021).

O estresse oxidativo gerado, associado ao acúmulo de solutos resultou em maior condutividade total (final) em plantas sob 40% da CC (Fig. 6B). A liberação de eletrólitos nas folhas é um indicador da estabilidade da membrana celular. Baixa liberação de eletrólitos reflete alta estabilidade, enquanto alta liberação de eletrólitos indica o oposto. Geralmente, o estresse hídrico causa peroxidação de lipídios da membrana e produz certos compostos, como malondialdeído e etileno, que levam à diminuição da estabilidade da membrana (GHOBADI et al., 2013). A atuação dos produtos no extravasamento de eletrólitos foi discreta, sendo observado que a 40% da capacidade de campo, as plantas sob aplicação foliar de quitosana

tiveram menor condutividade livre em relação ao controle, mas não se diferenciando daquelas com silicato (Fig. 6C).

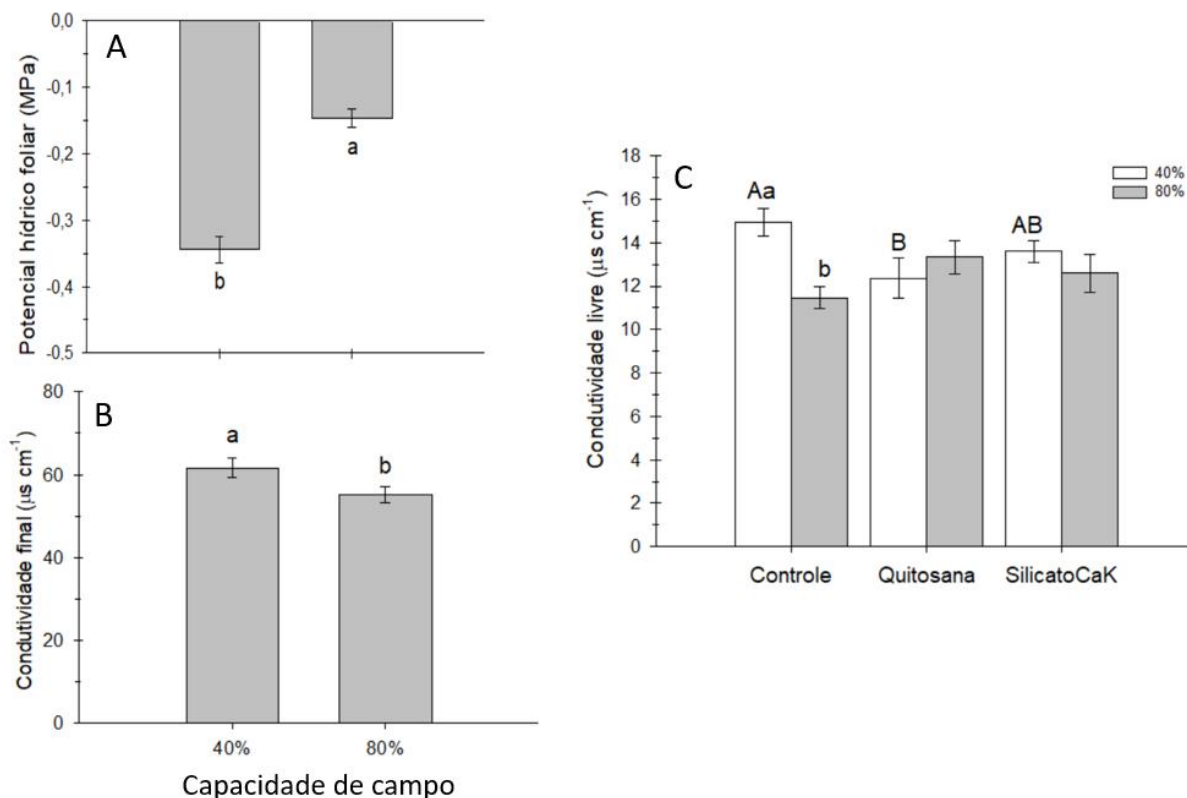


FIGURA 6 – Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a fontes de silício e quitosana: potencial hídrico foliar (A), condutividade final (B) e condutividade livre (C). Na interação, médias com letras minúsculas comparam o resultado da capacidade de campo em cada produto, enquanto letras maiúsculas compara os produtos em cada capacidade de campo. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Não foram observadas interações entre capacidade de campo e produtos aplicados sobre as respostas de trocas gasosas, nem efeito isolado dos produtos. Entretanto, as variações na capacidade de campo afetaram a condutância estomática ( $g_s$ ), as taxas fotossintéticas ( $A$ ) e transpiratórias ( $E$ ), a razão entre concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$ , ( $C_i/C_a$ ) bem como, a eficiência instantânea do uso da água ( $A/E$ ) (Tab. 5).

TABELA 5 - Características de trocas gasosas e de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A), taxa transpiratória (E), razão entre concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (Ci/Ca), eficiência de carboxilação (A/Ci) e eficiência instantânea do uso da água (A/E)

| Fonte de variação        | gs   | A    | E    | Ci/Ca | A/Ci | A/E |
|--------------------------|------|------|------|-------|------|-----|
| Capacidade de campo (CC) | **   | **   | **   | *     | ns   | **  |
| Produtos (P)             | ns   | ns   | ns   | ns    | ns   | ns  |
| CC x P                   | ns   | ns   | ns   | ns    | ns   | ns  |
| Média geral              | 0,08 | 13,7 | 1,48 | 0,19  | 0,2  | 9,3 |
| CV (%)                   | 21,1 | 17,0 | 19,7 | 22,8  | 24,6 | 5,7 |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F, CV: coeficiente de variação.

O regime hídrico a 40% da CC foi limitante para o intercâmbio gasoso foliar nas plantas do híbrido utilizado, sendo verificada a diminuição de gs, A e E (Fig. 7). A diminuição de gs (Fig. 7A) limitou o influxo de carbono, acarretando menor taxa de fixação de carbono a 40% da CC (Fig. 7B), bem como menor perda de vapor de água por transpiração (Fig. 7C). Um dos primeiros efeitos do déficit hídrico nas plantas vasculares é o fechamento dos estômatos em resposta a um decréscimo no potencial hídrico foliar consequentemente da taxa fotossintética (CASAROLI; JONG VAN LIER, 2015).

O genótipo deste estudo exibiu mecanismo de defesa contra a restrição hídrica, sendo observada modulação estomática, visto que a taxa transpiratória decresceu proporcionalmente mais do que a redução da fixação de carbono. Isto foi evidenciado pelo aumento da eficiência instantânea do uso da água dados pela razão A/E ( $\mu\text{mol}$  de CO<sub>2</sub> fixado por  $\text{mmol}$  de vapor de água perdido) em plantas sob menor oferta de água (Fig. 5D). Resultado similar foi observado por Santos et al. (2014), em plantas de milho após 21 dias após a suspensão da irrigação.



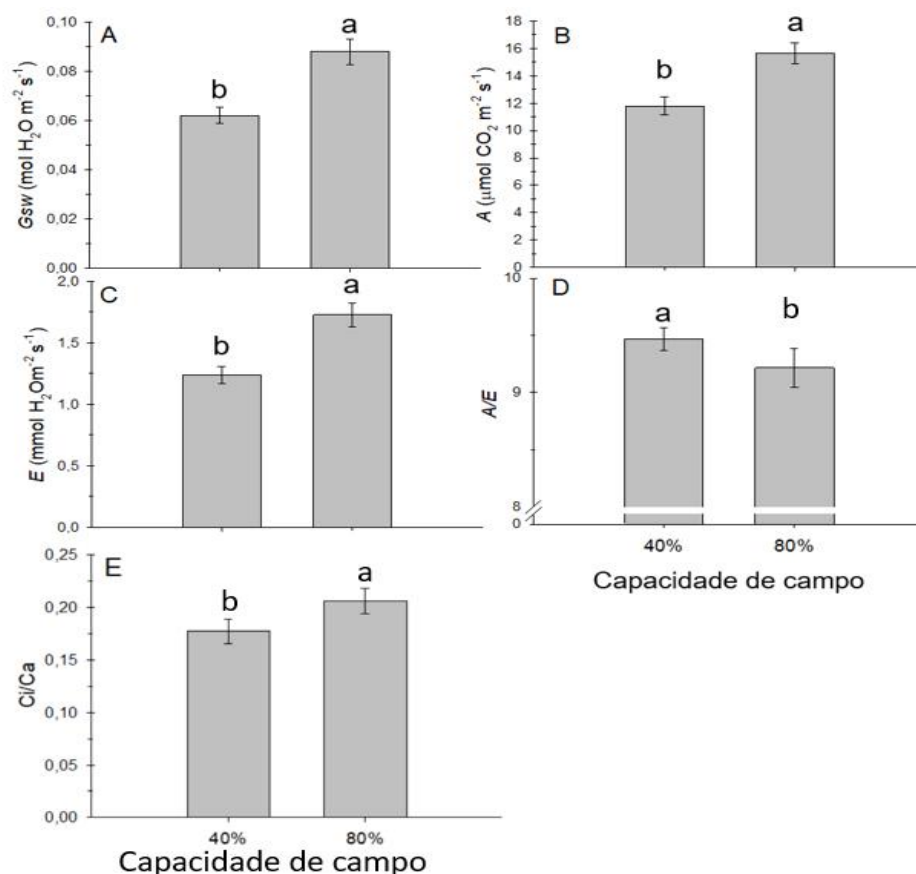


FIGURA 7 - Condutância estomática –  $g_s$  (A), taxa fotossintética líquida -  $A$  (B), taxa transpiratória -  $E$  (C), eficiência instantânea do uso da água ( $A/E$ ) e razão entre concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $E$ ) em plantas de milho após 14 dias de condições contrastantes de capacidade de campo. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de F a 5%.

Apesar do potencial papel do silicato de cálcio e potássio, bem como da quitosana como antitranspirantes foliares, tais produtos não foram efetivos na alteração da transpiração foliar, nem no aumento da eficiência do uso da água.

### Recuperação do status hídrico

Aos 07 dias após a elevação da capacidade de campo de 40% para 80% da capacidade de campo verificou-se que as plantas igualaram a capacidade de biossíntese de clorofilas com aquelas que não passaram por um período de restrição hídrica (Tab. 7). No entanto, em função da fase de desenvolvimento, a média geral de clorofilas aumentou 20,3% na segunda avaliação, enquanto a razão entre clorofilas  $a/b$  decresceu 56,7%. Isso pode relacionar-se a capacidade de recuperação da planta, após reestabelecimento da irrigação.

TABELA 6 - Índice de clorofilas em plantas de milho submetidas a variações de capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. CLA: clorofila *a*, CLB: clorofila *b*, CLA/CLB: Razão entre clorofila *a* e *b*, CLT: clorofilas totais

| Fonte de variação        | CLA  | CLB  | CLA/B | CLT  |
|--------------------------|------|------|-------|------|
| Capacidade de campo (CC) | ns   | ns   | ns    | ns   |
| Produtos                 | ns   | ns   | ns    | ns   |
| CC x P                   | ns   | ns   | ns    | ns   |
| Média geral              | 20,9 | 12,9 | 1,6   | 33,8 |
| CV (%)                   | 5,9  | 7,8  | 4,5   | 6,3  |

\* Significativo a 5% de probabilidade, ns: não significativo, CV: coeficiente de variação.

Similar ao observado para o índice de clorofilas, as variáveis da fluorescência da clorofila *a* praticamente se igualaram entre os tratamentos (Tab. 8).

TABELA 7 – Parâmetros de fluorescência da clorofila *a* de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Rendimento quântico potencial ( $\phi Po$ ), rendimento quântico de transporte de elétrons ( $\phi Eo$ ), rendimento quântico de dissipação de calor ( $\phi Do$ ), taxa fotossintética líquida ( $Mo$ ), índice de desempenho fotoquímico ( $PI_{ABS}$ ), fluxo de absorção de energia por centro de reação ( $ABS/RC$ ), dissipação de energia por centro de reação ( $Dio/RC$ ) e índice de desempenho fotoquímico total ( $PI_{Tot}$ )

| Fonte de variação        | $\phi Po$ | $\phi Eo$ | $\phi Do$ | $Mo$ | $PI_{ABS}$ | $ABS/RC$ | $Dio/RC$ | $PI_{Tot}$ |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|------|------------|----------|----------|------------|
| Capacidade de campo (CC) | ns        | ns        | ns        | ns   | ns         | ns       | ns       | ns         |
| Produtos (P)             | ns        | ns        | ns        | ns   | ns         | ns       | ns       | ns         |
| CC x P                   | ns        | ns        | ns        | ns   | ns         | ns       | ns       | ns         |
| Média geral              | 0,81      | 0,37      | 0,2       | 1,1  | 1,4        | 2,5      | 0,5      | 1,05       |
| CV                       | 1,2       | 7,5       | 4,5       | 7,0  | 16,2       | 5,4      | 8,7      | 18,0       |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F

A ausência de variação nas trocas gasosas após a reidratação (Tab. 9) corrobora a afirmação que a reduzida taxa fotossintética observada anteriormente a 40% tinha pouca contribuição de danos bioquímicos, sobretudo às enzimas carboxilativas PEPCarboxilase e Rubisco, sendo mais efeito estomático induzido pelo baixo potencial hídrico e pelo ácido abscísico, o que foi evidenciando também pela redução de  $Ci/Ca$  (Fig. 7E) (SANTOS et al., 2014; SCALON et al., 2015; JALES et al., 2021).

TABELA 8 - Características de trocas gasosas e status hídrico de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A), taxa transpiratória (E), razão entre concentração interna e externa de CO<sub>2</sub>, eficiência de carboxilação (A/Ci), eficiência do uso da água (A/E)

| Fonte de variação        | gs   | A    | E    | Ci/Ca | A/Ci | A/E |
|--------------------------|------|------|------|-------|------|-----|
| Capacidade de campo (CC) | ns   | ns   | ns   | ns    | ns   | ns  |
| Produtos (P)             | ns   | ns   | ns   | ns    | ns   | ns  |
| CC x P                   | ns   | ns   | ns   | ns    | ns   | ns  |
| Média geral              | 0,09 | 15,7 | 1,96 | 0,21  | 0,22 | 8,1 |
| CV                       | 16,4 | 15,5 | 16,0 | 26,6  | 37,4 | 7,3 |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F

Com a regularidade da oferta hídrica, houve o restabelecimento do potencial hídrico, suprimindo a necessidade de ajuste osmótico, consequentemente aumentando a integridade das membranas (Tab. 10).

TABELA 9 - Potencial hídrico e estabilidade de membranas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ), condutividade livre (CL), condutividade final (CF)

| Fonte de variação        | $\Psi_w$ | CL   | CF   |
|--------------------------|----------|------|------|
| Capacidade de campo (CC) | ns       | ns   | ns   |
| Produtos (P)             | ns       | ns   | ns   |
| CC x P                   | ns       | ns   | ns   |
| Média geral              | -0,16    | 13,3 | 52,9 |
| CV (%)                   | 33,5     | 16,1 | 9,2  |

\*\*, \* Significativo a 1% e 5% de probabilidade, ns: não significativo pelo teste de F

Apesar do restabelecimento de índices relacionados as características fotossintéticas e ao status hídricos, a exposição ao déficit hídrico por duas semanas foi suficiente para promover alterações significativas sobre a altura, a área foliar e na matéria seca das plantas de milho. Além disso verificou-se efeito dos produtos sobre a altura das plantas (Tab. 11).

TABELA 10 – Características biométricas de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio: altura (Alt), diâmetro de colmo (DC), área foliar (AF), massa seca foliar (MSF), massa seca de caule (MSC), massa seca de raízes (MSR) e massa seca total (MST)

| Fonte de variação        | ALT   | DC   | AF    | MSF  | MSC  | MSR  | MST   |
|--------------------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| Capacidade de campo (CC) | *     | ns   | *     | *    | *    | ns   | **    |
| Produtos (P)             | *     | ns   | ns    | ns   | ns   | ns   | ns    |
| CC x P                   | ns    | ns   | ns    | ns   | ns   | ns   | ns    |
| Média geral              | 106,1 | 14,0 | 0,306 | 40,0 | 55,2 | 37,6 | 133,6 |
| CV (%)                   | 5,5   | 9,2  | 9,7   | 13,0 | 27,6 | 25,2 | 14,9  |

\*\*, \*. Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, ns: não significativo pelo teste de F.

Além de alterações: bioquímicas, fisiológicas e anatômicas, ainda existem diversas modificações das culturas relacionadas à arquitetura das plantas (redução da área foliar, limitação do crescimento da parte aérea e radicular, comprometimento da biomassa, redução das células parenquimáticas, e da lâmina foliar, aumento do tecido vascular e espessura da parede celular) sendo ocasionadas devido ao estresse hídrico (GONÇALVES, 2017). Neste estudo, verificou-se decréscimos nas médias de altura (Fig. 8A), de área foliar (Fig. 8B), massa seca de folha (Fig. 8C), caule (Fig. 8D) e consequentemente total (Fig. 8E) em plantas que foram expostas na menor CC.

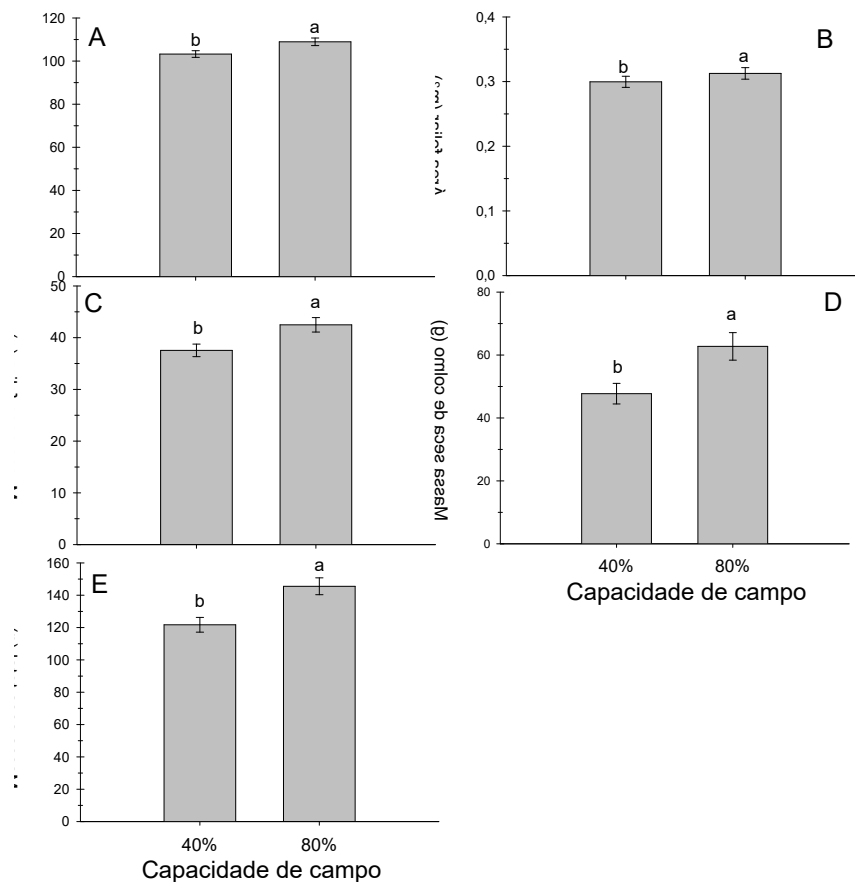


FIGURA 8 – Altura de plantas (A), área foliar (B), massa seca foliar (C), massa seca de caule (D) e massa seca total (E) de plantas de milho submetidas a variação da capacidade de campo e a aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio submetidas a duas capacidades de campo. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de F a 5%.

As alterações estomáticas, consequentemente com menor aporte de carbono observadas nas avaliações anteriores corroboram com os resultados observados.

De acordo com Zhao et al. (2018), quando o estresse hídrico ocorre durante as fases vegetativas há a redução da altura da planta, da expansão foliar e a massa seca da parte aérea em comparação com plantas bem irrigadas. Neste estudo, as plantas já estavam na iminência do florescimento (pré-florescimento) cujo estágio em que a exposição ao déficit hídrico foi capaz de proporcionar redução de até 60% de produtividade no milho, segundo Magalhães e Durães (2006). Essa redução pode ocorrer em relação a uma diminuição na condutância estomática e na fotossíntese. A restrição no fornecimento de energia para o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos antecipa a maturidade fisiológica do pendão em até oito dias em relação à espiga, impossibilitando a fecundação (SETTER; FLANNIGAN, 2001; AVILA et al., 2016).

A altura de plantas expostas a quitosana tiveram valores similares ao controle e superaram aquelas que receberam aplicação de silicato (Fig. 9). Embora a redução na altura da planta de milho não esteja necessariamente ligada a baixos níveis de rendimento, sendo este mais diretamente correlacionada com a altura de inserção da espiga, o aumento da estatura com a manutenção do diâmetro, pode indicar uma eficiência de aproveitamento de fotoassimilados (FAVARATO et al., 2016). As médias de acúmulo de biomassa foram 138,5, 133,1 e 129,3 g nas plantas com quitosana, silicato e controle respectivamente, no entanto, não variaram estatisticamente ( $p>0,05$ ) (Tab.11).

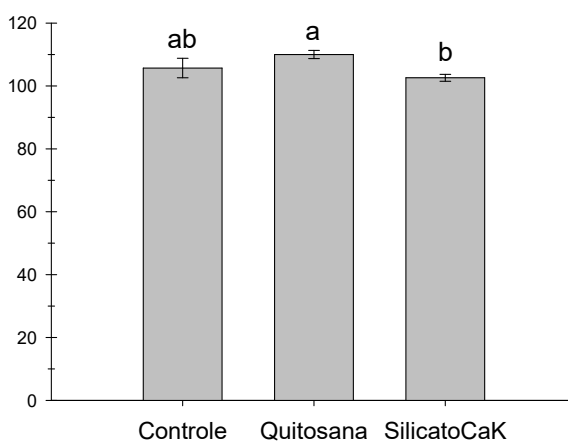


FIGURA 9 – Altura de plantas de milho em função da aplicação foliar de quitosana e silicato de cálcio e potássio. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

As limitações fisiológicas observadas em condições de restrição hídrica impuseram limitações significativas no ganho de biomassa, as quais não foram atenuadas pela aplicação dos produtos testados. A consequente queda no acúmulo de matéria seca total chegou a 22,5%, indicando que mesmo um período de duas semanas de restrição hídrica, pode causar significativa perda de rentabilidade ao agricultor. Contudo, as menores taxas de extravasamento inicial (condutividade livre) sob déficit hídrico, índices mais expressivos de desempenho fotoquímico e aumento da altura observadas nas plantas submetidas a aplicação de quitosana encorajam mais investigações a respeito do potencial de utilização deste biopolímero.

Conclui-se a partir da realização deste trabalho que o acúmulo de matéria seca de milho sob 40% da capacidade de campo foi 22,5% inferior em relação àquelas cultivadas sob 80%. A suspensão comercial de silicato de cálcio e potássio e a solução de quitosana

utilizadas não exibiram ação antitranspirante, nem aumentaram a eficiência instantânea do uso da água, não sendo capazes de mitigar o estresse hídrico gerado em capacidade de campo a 40%.

#### **4 CONCLUSÃO**

A suspensão comercial de silicato de cálcio e potássio e a solução de quitosana utilizadas não exibiram ação antitranspirante, nem aumentaram a eficiência instantânea do uso da água.

Os resultados obtidos com o uso da quitosana indicam um potencial promissor desse biopolímero. As plantas expostas a quitosana apresentaram: maior estabilidade de membranas, melhor desempenho fotoquímico e aumento na altura das plantas, em relação ao controle, reforçando a necessidade de continuidade das pesquisas para a sua utilização.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M. M. S.; EL-BASSIOUNY, H. M. S.; ABOUSEEDA, M. A. Potential role of kaolin or potassium sulfate as anti-transpirant on improving physiological, biochemical aspects and yield of wheat plants under different watering regimes. **Bulletin of the National Research Centre**, 43:134, 2019.
- ABDULLAH, A. S.; AZIZ, M. M.; SIDDIQUE, K. H. M.; FLOWER, K. C. Film antitranspirants increase yield in drought stressed wheat plants by maintaining high grain number. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 11–18, 2015.
- AHMED, A. Y. M. Impact of spraying some antitranspirants on fruiting of Williams bananas grown under aswan region conditions. **Stem Cell**, v. 5, n. 4, p. 34-39, 2014.
- ALMEIDA, L. G.; MAGALHÃES, P. C.; KARAM, D.; SILVA, E. M.; ALVARENGA, A. A. Chitosan application in the induction of water deficit tolerance in maize plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 42, e42463, 2020.
- AL-MOKADEM, A. Z.; SHETA, M. H.; MANCY, A. G.; HUSSEIN, H.-A. A.; KENAWY, S. K. M.; SOFY, A. R.; ABU-SHAHBA, M. S.; MAHDY, H. M.; SOFY, M. R.; AL BAKRY, A.F.; AGHA, M. Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. **Plants**, 12, 222, 2023.
- AVILA, R. G.; MAGALHÃES, P. C.; VITORINO, L. C.; BESSA, L. A.; DE SOUZA, K. R. D.; QUEIROZ, R. B.; JAKELAITIS, A.; TEIXEIRA, M. B. Chitosan induces sorghum tolerance to water deficits by positively regulating photosynthesis and the production of primary metabolites, osmoregulators, and antioxidants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p.1156–1172, 2023.
- AVILA, R. G.; MAGALHÃES, P. C.; ALVARENGA, A. A.; LAVINSKI, A. O.; CAMPOS, C. N.; SOUZA, T. C.; GOMES JÚNIOR, C.C. Drought-tolerant maize genotypes invest in root system and maintain high harvest index during water stress. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, p.451-461, 2016.
- AZEEM, M.; HAIDER, M. Z.; JAVED, S.; SALEEM, M. H.; ALATAWI, A. Drought stress amelioration in maize (*Zea mays* L.) by inoculation of *Bacillus* spp. strains under sterile soil conditions. **Agriculture**, 12, 50, 2022.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 84 p, 2014.
- BERGAMASCHI H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In:\_. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, Ed. Universidade,. p. 25-32, 1992.
- CARLIN, S. D.; RHEIN, A. F. de L; SANTOS, D. M. M. dos. Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 553-564, 2012.



CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Resposta fotossintética do feijoeiro em função da intensidade de radiação e do teor de água no solo. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.13, n.1, p.69-75, 2015.

CASTRO, P. R. C.; CARVALHO, M. E. A.; MENDES, A. C. C. M.; ANGELINI, B. G. **Manual de estimulantes vegetais: nutrientes, biorreguladores, bioestimulantes, bioativadores, fosfitos e biofertilizantes na agricultura tropical**. 1. ed. Editora Agronômica Ceres, 2017, 453p.

CHATELAIN, P. G.; PINTADO, M. E.; VASCONCELOS, M. W. Evaluation of chitooligosaccharide application on mineral accumulation and plant growth in *Phaseolus vulgaris*. **Plant Science**, v.215–216, p. 134–140, 2014.

CRUZ, J. L.; PELACANI, C. R.; CARVALHO, J. E. B.; SOUZA FILHO, L. F. S.; QUEIROZ, D. C. Níveis de nitrogênio e a taxa fotossintética do mamoeiro "golden". **Ciência Rural**, v. 37(1), p. 64-71, 2007.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P. A. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. **PloS One**, v. 11 (5), e0156362, 2016.

FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, C. M.; GUARCONI, R. C.; BALBINO, J. M. S. – Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Bragantia**, v. 75, n. 4, p. 497-506, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FU, J.; HUANG, B. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.45, n.2, p.105-114, 2001.

GHOBADI, M.; TAHERABADI, S.; GHOBADI, M. E.; MOHAMMADI, G. R.; JALALI-HONARMAND, S. Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 29–38, 2013.

GHOBADI, M. E.; FARSIANI, A.; HONARMAND, S. J. The effect of water deficit and sowing date on yield components and seed sugar contents of sweet corn (*Zea mays* L.). **African journal of agricultural research**, v. 6, p.5769-5774, 2011

GLAZ, B.; MORRIS, D. R.; DAROUB, S. H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. **Crop Science**, v.44, p.1633-1641, 2004.

GONÇALVES, C. G. **Modificações morfológicas, fisiológicas e seletividade da soja a diferentes herbicidas em resposta ao estresse hídrico**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Campos Jaboticabal (Tese de Doutorado). 120p. 2017.

GUO, H. L.; DU, Y. G.; BAI, X. F.; ZHAO, X. M. Effects of active oxygen on suspended cotton cell culture by oligochitosan. **Chinese Journal of Marine Drugs**, v. 1, p. 11–12, 2003.

- HADWIGER, L. A. Anatomy of a nonhost disease resistance response of pea to *Fusarium solani*: PR gene elicitation via DNase, chitosan and chromatin alterations. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 373, 2015.
- HIDANGMAYUM, A.; DWIVEDI, P.; KATIYAR, D.; HEMANTARANJAN, A. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 25(2), p. 313-326 2019.
- JALES, H. F.; MAGALHAES, P. C.; RONCHI, C. P.; PAIVA, A. P. L.; de CARVALHO, L. P.; de GOMES JÚNIOR, C. C. **Morfofisiologia do milho inoculado com *Azospirillum brasilense* submetido à restrição hídrica e à adubação nitrogenada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 43 p.
- KARAAT, F. E.; DENIZHAN, H. The effects of different particle film applications on almond trees. **Ciência Rural**, v.53, n.3, e20210757, 2023.
- KOCIĘCKA, J.; LIBERACKI, D.; STRÓZECKI, M. The role of antitranspirants in mitigating drought stress in plants of the grass family (Poaceae)—A Review. **Sustainability**, v. 15, 9165, 2023.
- KORSANGRUANG, S.; SOONTHORNCHAREONNON, N.; CHINTAPAKORN, Y.; SARALAMP, P.; PRATHANTURARUG, S. Effects of abiotic and biotic elicitors on growth and isoflavonoid accumulation in *Pueraria candollei* var. *candollei* and *P. candollei* var. *mirifica* cell suspension cultures. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 103, p.333–342, 2010.
- KUMAR, D.; SINGH, H.; RAJ, S.; SONI, V. Chlorophyll a fuorescence kinetics of mung bean (*Vigna radiata* L.) grown under artificial continuous light. **Biochemistry and Biophysics Reports**, 24:100813, 2020.
- LI, Y.; ZHAO, X. M.; XIA, X. Y.; LUAN, Y. S.; DU, Y. G.; LI, F. L. Effects of oligochitosan on photosynthetic parameter of *Brassica napus* seedlings under drought stress. **Acta Agronomica Sinica**, v. 34, p. 326–329, 2008.
- LIZÁRRAGA-PAULÍN E. G.; TORRES-PACHECO I.; MORENO-MARTÍNEZ E.; MIRANDA CASTRO S. P.; Chitosan application in maize (*Zea mays*) to counteract the effects of abiotic stress at seedling level, **African Journal of Biotechnology**, v. 10, p. 6439–6446, 2011.
- LUZ, J. M. Q.; RODRIGUES, R. R.; CARVALHO, P.C.; CANTUÁRIO, F. S.; SOUSA, V. B. F. **Aplicação de silicato de potássio via foliar em morangueiro: produtividade e qualidade**. In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 50. Anais. Guarapari: ABH. 2010.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da produção. In: CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. (Ed.). **A cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 63-87, 2008.
- MALERBA, M.; CERANA, R. Reactive oxygen and nitrogen species indefense/stress responses activated by chitosan in sycamore cultured cells. **International Journal of Molecular Sciences**, v.16, p. 3019–3034, 2015.

MERRIGHI, A. L. N.; FERNANDES, A. L. T.; FIGUEIREDO, F. C. Novas pesquisas reforçam os efeitos do silício líquido solúvel aplicado via foliar em cafeeiros. **Revista Campo e Negócios**, n. 56, p. 25-27, 2007.

MORAN, J. F.; BECANA, M.; TRURBE-ORMAETXE, T.; FRECHILLA, S.; KLUCAS, R.; APARICIO-TEJO, P. Drought induces oxidative stress in pea plants. **Planta**, v.194, p. 346-352, 1994.

PEREIRA, S. I. A.; ABREU, D.; MOREIRA, H.; VEGA, A.; CASTRO, P. M. L. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. **Heliyon**, v. 6, e05106, 2020.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABOUD, A. C. S.; MACAULEY, H. R. Tolerância protoplasmática foliar à seca, em dois genótipos de caupi cultivados em campo. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, v.22, p.07-14, 2002.

RABÊLO, V. M.; MAGALHÃES, P. C.; BRESSANIN, L. A.; CARVALHO, D. T.; REIS, C. O.; KARAM, D.; DORIGUETTO, A. C.; SANTOS, M. H.; SANTOS FILHO, P. R. S.; SOUZA, T. C. The foliar application of a mixture of semisynthetic chitosan derivatives induces tolerance to water deficit in maize, improving the antioxidant system and increasing photosynthesis and grain yield. **Scientific Reports**, v.9:8164, 2019.

REIS, T. H. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; POZZA, A. A. A.; NOGUEIRA, F. D.; RODRIGUES, C. R. **O silício na nutrição e defesa de plantas**. EPAMIG, nº 82, p. 119, 2007.

RONG-HUA, L.; PEI-GUO, G.; BAUM, M.; GRANDO, S.; CECCARELLI, S. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. **Agricultural Sciences in China**, v.5, p.751–757, 2006.

RODRIGUES, C. R.; RODRIGUES, T. M.; FIGUEIREDO, F. C. Aumento de qualidade e produção com aplicação de silício solúvel. **Revista Campo e negócios HF**. v. 24, p. 34-40, 2007b.

RODRIGUES, C. R.; RODRIGUES, T. M.; FIGUEIREDO, F. C. Aplicação de silício líquido solúvel via foliar em batata: Aumento de 5 toneladas/ha de batata extra. **Revista Campo e Negócios HF**. v. 10, p. 66-70, 2007a.

RUFF, O. J.; PEREIRA DUARTE, J.; CARDOSO DOS SANTOS, C.; RODRIGUES DOS SANTOS, C. L. Doses de fósforo em híbridos de milho cultivados em solo arenoso. **Scientific Electronic Archives**, 16(5), 2023.

SAH, R. P.; CHAKRABORTY, M.; PRASAD, K.; PANDIT, M.; TUDU, V. K.; CHAKRAVARTY, M. K.; NARAYAN, S. C.; RANA, M.; MOHARANA, D. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, 10:2944, 2020.

SAINT PIERRE, C.; CROSSA, J. L.; BONNETT, D.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; REYNOLDS, M. P. Phenotyping transgenic wheat for drought resistance. **Journal of Experimental Botany**, v.63, p.1799-1808, 2012.

SALIB, N. C. **Respostas fisiológicas de soja à aplicação de caulim e carbonato de cálcio**, 2018, 54p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP – Piracicaba, 2018.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; ZANIN, C. G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de planta. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.6, p.263-271, 2007.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 356p, 2018.

SANTOS, O. O.; FALCÃO, H.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; LUSTOSA, B. M.; SANTOS, M. G. Desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária sob déficit hídrico e reidratação. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p. 203-212, 2014.

SCALON, S. P. Q.; KODAMA, F. M.; DRESCH, D. M.; MUSSURY, R. M.; PEREIRA, Z. V. Gas exchange and photosynthetic activity in *Hancornia speciosa* gomes seedlings under water deficit conditions and during rehydration. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 4, p. 1124-1132, 2015.

SETTER, T. L.; FLANNIGAN, B. A. Water deficit inhibits cell division and expression of transcripts involved in cell proliferation and endoreduplication in maize endosperm. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 360, p.1401-1408, 2001.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; SOUSA, C. H. C.; CHAGAS, K. L. Pigmentos fotossintéticos e potencial hídrico foliar em plantas jovens de coqueiro sob estresses hídrico e salino. **Revista Agro@mbiente**, v. 10, n. 4, p. 317-325, 2016.

SILVA A. G.; FRANCISCHINI R. Sistemas de produção de milho safrinha em Goiás. In: **Seminário Nacional de Milho Safrinha**, 12. Dourados. Anais... Brasília, DF: Embrapa; Dourados: Embrapa, 2013.

SOTELO-CUITIVA, Y. M.; RESTREPO-DÍAZ, H.; GARCÍA-CASTRO, A.; RAMÍREZ-GODOY, A.; FLÓREZ-RONCANCIO, V. J. Effect of kaolin film particle applications (Surround WP®) and water deficit on physiological characteristics in rose cut plants (*Rose* spp L.). **American Journal of Plant Sciences**, v. 2, p. 354-358, 2011.

STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: YUNUS, M.; PATHER, U.; MOHANLY, P. (Eds.) (2000) **Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaptation**. London: Taylor and Francis, p. 445-483.

TSIMILLI-MICHAEL, M. Revisiting JIP-test: An educative review on concepts, assumptions, approximations, definitions and terminology. **Photosynthetica**, v. 58, p. 275–292, 2020.

VASQUEZ-TELLO, A. Y.; ZUILY-FODIL, A. T.; PHAM THI, J.; VIEIRA, S. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. **Journal of Experimental Botany**, v.41, p.827-832, 1990.

YAN, W.; ZHONG, Y.; SHANGGUAN Z. Evaluation of physiological traits of summer maize under drought stress. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Scienc** v. 66(2), p. 133-140, 2016.

YIN, H.; BAI, X.F.; DU, Y. G. The primary study of oligochitosan inducing resistance to *Sclerotinia scleraotiorum* on *B. napus*. **Journal of Biotechnology**, v. 136, p. 600–601, 2008.

YUSUF, M. M.; KUMAR, D.; RAJWANSI, R.; STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; GOVINDJEE, SARIN, N. B. Overexpression of  $\gamma$ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: physiological and chlorophyll fluorescence measurements. **Biochim Biophys Acta**, v. 1797, p.1428–1438, 2010.

ZENG, D.; LUO, X. Physiological effects of chitosan coating on wheat growth and activities of protective enzyme with drought tolerance. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, p. 282–288, 2012.

ZHAO, J.; XUE, Q. W.; KIRK, E. J.; HOU, X. B.; HAO, B. Z.; THOMAS, H. M.; XU, W. W.; STEVEN, R. E.; SUSAN, A. S.; DAVID, K. B. Shoot and root traits in drought tolerant maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, p.1093-1105, 2018.

ZHOU, L.; XU, H., MISCHKE, S.; MEINHARDT, L. W.; ZHANG, D.; ZHU, X.; FANG, W. Exogenous abscisic acid significantly affects proteome in tea plant (*Camellia sinensis*) exposed to drought stress. **Horticulture Research**, v.1, p.14029, 2015.