



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DOSES DE SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO EM DIFERENTES
REGIMES HÍDRICOS NO ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA
DO MILHO CULTIVADA EM CAMPO**

PEDRO LUCAS CAMPOS LANZA

Jaboticabal – SP
2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DOSES DE SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO EM DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS NO ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO MILHO
CULTIVADO EM CAMPO**

PEDRO LUCAS CAMPOS LANZA

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientadoras: Prof^{as}. Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira e
Dra. Kamilla Silva Oliveira

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP
1ºSemestre /2024

L297d

Lanza, Pedro Lucas Campos

Doses de Silício via fertirrigação em diferentes regimes hídricos no estado nutricional da cultura do milho cultivada em campo / Pedro Lucas Campos Lanza. -- Jaboticabal, 2024

67 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Gelza Carliane Marques Teixeira

1. Cereais. 2. Nutrição das Plantas. 3. Irrigação. 4. Silicates. I.

Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

PEDRO LUCAS CAMPOS LANZA

**DOSES DE SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO EM DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS NO ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO MILHO CULTIVADO
EM CAMPO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.


Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 19/01/2024

Aprovado

Reprovado


Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 19/06/2024 15:19:30 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

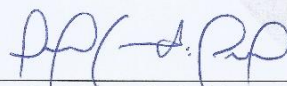
 Documento assinado digitalmente
DEYVIELEN MARIA RAMOS ALVES
Data: 19/06/2024 14:00:00 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

M. Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

 Documento assinado digitalmente
PAULO SÉRGIO RODRIGUES DE LIMA
Data: 19/06/2024 10:22:59 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Eng. Paulo Sérgio Rodrigues de Lima
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 25/06/24



Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

" O conhecimento transforma e engrandece o homem, a falta dele nos condiciona a erros e a um abismo de preconceitos e ignorância"

– Autor Desconhecido

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Pedro Lucas Campos Lanza, natural de Batatais – São Paulo, Brasil, com nascimento em 12 de outubro de 2001, filho de Silvia Regina de Campos Lanza e José Orivaldo Lanza. Em 2020 ingressou no curso de Engenharia Agrônômica pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal. Concluiu em 2020, cursos na modalidade à distância fornecidos pela EMBRAPA, com destaque o curso intitulado “Fertirrigação”. Durante a faculdade, realizou iniciação científica na Modalidade Bolsa PIBIC – CNPq, no período de 01/09/2021 a 31/08/2022, sob a supervisão da Prof^a. Regina Aparecida Leite de Camargo, intitulado “A comercialização de produtos orgânicos e agroecológicos durante a pandemia Covid-19” e apresentou no evento “XXXIV Congresso de Iniciação Científica da Unesp-FCAV/Jaboticabal”, realizado em setembro de 2022. Participou do “27° Curso de Especialização em Citricultura” realizado pelo Centro de Citricultura “Sylvio Moreira”/IAC, promovido pelo IAC. Realizou estágio fora da faculdade, na empresa da família que é produtora de laranja irrigada e sequeiro em Batatais-SP, agregando-se conhecimento técnico e desenvolvimento pessoal. Realizou no período de 01/05/2023 a 30/04/2024 outra iniciação científica, com financiamento pela FAPESP, sob a supervisão do Prof. Renato de Mello Prado, intitulado “Papel do silício via fertirrigação no estado nutricional da cultura do milho cultivado em campo sob déficit hídrico”. E é membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da FCAV/UNESP (Genplant), sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado, no Departamento de Ciência do Solo.

OFERECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio e incentivo nesta jornada.

Ofereço esse TIC, ao meu orientador, professor Renato, as coorientadoras, Gelza e Kamilla, a todos do grupo GENPLANT por todo auxílio e dedicação na elaboração deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio financeiro para desenvolvimento desta pesquisa – 2023/00047-9

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada. Aos meus pais e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

À toda minha família, minha mãe Silvia, meu Pai José, meu irmão Caio, todos estiveram sempre presentes em minha vida nos momentos bons e ruins, minha eterna gratidão a todos e que servem de inspiração para minha vida.

Em especial gostaria de agradecer minha mãe que esteve sempre preocupada comigo me ligando quase todo dia para saber se estava bem, nunca mediu esforços para ver minha felicidade, a minha eterna gratidão por tudo que a senhora faz por mim, te amo.

Ao meu pai, minha inspiração, que desde pequeno me proporcionou o contato com a natureza, me colocando para “trabalhar”, todo esse amor pela profissão de produtor de laranja, serve de exemplo. Uma pessoa com quem aprendi ser alegre, engraçado, animado e corajoso, além disso me mostrou como ser um homem trabalhador, perseverante, sonhador e que nunca desiste de lutar.

À minha namorada que esteve comigo, me dando força, suporte e auxiliando também neste trabalho, uma pessoa incrível, que amo e também tenho eterna gratidão.

Ao Professor Dr. Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, orientação, compreensão e dedicação durante a condução dos trabalhos.

À minha coorientadora Gelza Carliane Teixeira que agradeço de coração por todo apoio desde o início do trabalho no laboratório, auxiliando em tudo que eu precisava, me salvando sempre quando havia dúvida. Sempre me manteve acreditado, otimista e para não esquecer de te lembrar. Foi uma honra ter sido seu coorientado.

À minha outra coorientadora, Kamilla Silva Oliveira, que agradeço de coração por todo apoio no laboratório, auxiliando em tudo que eu precisava, nas mensagens para saber “Está livre amanhã né?!, pode vir, estamos te esperando”. Sempre me manteve acreditado, otimista e saber que vidraria acaba nunca. Foi uma honra ter sido seu coorientado nessa reta final.

Aos meus colegas da graduação pela amizade, companheirismo e auxílio nestes anos de caminhada.

Aos membros da banca M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves e Eng. Agr. Paulo Sergio Rodrigues de Lima que aceitaram participar da comissão examinadora deste trabalho.

A todos do Genplant, em especial a Gelza, Kamilla, Milton, “Paulos” e “Carlos” pela troca de conhecimento e ajuda na avaliações e análises.

Agradeço ao Departamento de Ciência do Solo, a todos os funcionários que me auxiliaram. E à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, por toda sua estrutura fornecida, conhecimentos passados, lugar onde sempre sonhei estar, sou muito grato por toda experiência adquirida aqui.

E agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação. **A todos o meu Muito Obrigado!**

ÍNDICE

RESUMO	xiii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Importância da cultura do milho na produção agrícola brasileira	5
2.2. Cenário atual de mudanças climáticas	6
2.3. Uso da irrigação e fertirrigação nos cultivos anuais	8
2.4. Diagnose foliar como ferramenta nos cultivos de alta produtividade	11
2.5. Silício na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico e aumento da eficiência de uso de água	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Área de experimento	16
3.2. Tratamentos	18
3.3. Adubações	19
3.4. Amostras deformadas e indeformadas do solo	20
3.5. Manejo de cultivo	20
3.5.1. Irrigação	20
3.5.2. Fornecimento de silício	21
3.6. Variáveis analisadas	22
3.6.1. Conteúdo relativo de água	22
3.6.2. Potencial hídrico foliar (Ψ_w)	22
3.6.3. Índice de Extravasamento de eletrólitos	23
3.6.4. Altura da planta, diâmetro do caule, número de folhas e área foliar	23
3.6.5. Análise foliar dos nutrientes	23
3.6.6. Teor de Si disponível no solo	25
3.6.7. Componentes de produtividade	25
3.7. Forma de análise dos resultados	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45

FIGURAS

- Figura 1.** Foto da área experimental retirada do Google Earth 16
- Figura 2.** Condições experimentais na área de realização do experimento em campo durante o cultivo de milho. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (a) umidade relativa máxima (UR Max.), umidade relativa mínima (UR Min.) e precipitação (P) (b). 18
- Figura 3.** Conteúdo relativo de água (a), potencial hídrico (Ψ_w) (b) e índice de extravasamento de eletrólitos (c) em plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo - SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. 28
- Figura 4.** Altura da planta (a) e diâmetro do caule (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. 30
- Figura 5.** Número de folhas (a) e área foliar (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. 31
- Figura 6.** Teor de silício (Si) (a) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F 32
- Figura 7.** Teores de macronutrientes (N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f) e S (g)) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F 35
- Figura 8.** Teores de micronutrientes (Fe (a), Mn (b), Zn (c) e Cu (d)) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam

diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F 38

Figura 9. Teor de silício (Si) no solo em área de milho cultivado sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F. 39

Figura 10. Massa de 1000 grãos (a) e produtividade (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F. 40

TABELA

Tabela 1. Recomendações de adubação para milho grão com base na produtividade esperada e classe de resposta da área cultivada. As doses indicadas são quantidades totais para a semeadura e cobertura (Adaptado de Duarte et al., 2022) 19

DOSES DE SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO EM DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DO MILHO CULTIVADO EM CAMPO

RESUMO

O cultivo irrigado de culturas anuais como milho é expressivo, mas tem sido limitado nos últimos anos pela restrição hídrica em períodos críticos do desenvolvimento dada as mudanças climáticas; por isso é primordial pesquisas estratégicas para aumentar eficiência do uso da água com sustentabilidade nas áreas agrícolas. Para isso, a nutrição de plantas equilibrada pode contribuir para aumentar a eficiência no uso da água, em especial com fornecimento de silício (Si) em cultivos fertirrigados. Dessa forma, testamos as seguintes hipóteses: i) existe uma dose de Si ótima para fertirrigação e os teores de Si no solo e foliar adequado para seu uso fundamentado na cultura do milho; ii) o Si é um mitigador de danos causados pelo déficit hídrico moderado e severo na cultura do milho a partir da melhoria do teor de água na planta e do estado nutricional da cultura; iii) o fornecimento ótimo de Si via fertirrigação pode diminuir a necessidade hídrica mantendo alta produtividade. O trabalho testou essas hipóteses realizando um experimento com a cultura do milho objetivando-se estabelecer o efeito de doses de Si via fertirrigação em três regimes hídricos no estado nutricional da cultura irrigada cultivada em condição de campo. Assim, os tratamentos consistem, de fatorial 3x4, três regimes hídricos: 80% (sem déficit - WWD), 60% (déficit hídrico moderado - MDW) e 40% (déficit hídrico severo - SWD) da capacidade de retenção de água no solo; quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. O experimento com milho em condição de campo foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), localizada em Jaboticabal, e os parâmetros avaliados foram: conteúdo relativo de água, potencial hídrico foliar, extravasamento de eletrólitos, altura da planta, diâmetro do caule, número de folhas, área foliar, análise foliar para Si, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn e Cu, teor de Si disponível no solo e os componentes de produtividade (massa de 1.000 grãos e produtividade). Os resultados mostraram que no intervalo de 4,9 a 11 kg ha⁻¹ de Si, foi capaz de melhorar o desenvolvimento da planta e obter maior produtividade e converge para uma dose ideal independente do regime hídrico (WR) próxima de 6,5 kg ha⁻¹ de Si. O fornecimento de 5,8 kg ha⁻¹ de Si no regime MWD foi capaz de acrescentar mais de 350 kg ha⁻¹ na produtividade do milho em relação a dose 0 kg ha⁻¹ de Si do regime WWD e utilizando 20% da capacidade de retenção de água a menos. Nas doses de 5,8 e 6,4 kg ha⁻¹ de Si a produtividade aumentou mais de 1.550 e 1.750kg ha⁻¹ nos tratamentos de MWD e SWD, respectivamente.

Palavras-chave: Cereais, Cultivos tropicais, Irrigação, Nutrição das Plantas, Silicatos

DOSES OF SILICION VIA FERTIGATION IN DIFFERENT WATER REGIMES ON THE NUTRICIONAL STATUS OF MAIZE CROP CULTIVATED IN THE FIELD

SUMMARY

Irrigated cultivation of annual crops such as corn is significant, but has been limited in recent years due to water restrictions in critical periods of development due to climate change; which is why strategic research is essential to increase the efficiency of water use with sustainability in areas agricultural. For this, balanced plant nutrition can contribute to increasing water use efficiency, especially with the supply of silicon (Si) in fertirrigated crops. Thus, we tested the following hypotheses: i) there is an optimal Si dose for fertigation, and are soil and foliar Si levels suitable for its use based on corn cultivation; ii) Si is a multistress element by mitigating damage caused by water deficit moderate and severe associated with stress in maize plants; iii) the optimal supply of Si via fertigation can reduce the water requirement while maintaining high productivity. Work tested these hypotheses by carrying out an experiment with corn crops, aiming to establish the effect of Si doses via fertigation in three water regimes on the nutritional status of the irrigated crop grown in field conditions. Thus, the treatments will consist of a 3x4 factorial, three water regimes: 80% (no deficit - WWD), 60% (moderate water deficit - MWD) and 40% (severe water deficit - SWD) of the water retention capacity in the soil; four doses of Si supplied via fertirrigation: 0; 4; 8 and 12 kg ha⁻¹. The experiment with corn under field conditions was carried out at the Teaching, Research and Extension Farm of the Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences (FCAV/UNESP), located in Jaboticabal, and the parameters evaluated were: relative water content, leaf water potential, electrolyte extravasation, plant height, stem diameter, number of leaves, leaf area, leaf analysis for Si, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn and Cu, Si content available in the soil and productivity components (mass of 1.000 grains and productivity). The results demonstrated that in the range of 4,9 to 11 kg ha⁻¹ of Si, it was able to improve plant development and obtain greater productivity and converge to an ideal dose independent of the water regime (WR) close to 6,5 kg ha⁻¹ of Si. The supply of 5,8 kg ha⁻¹ of Si in the MWD regime was able to add more than 350 kg ha⁻¹ to corn productivity in relation to dose 0 kg ha⁻¹ of Si in the WWD regime and using 20% less water retention capacity. At doses of 5,8 and 6,4 kg ha⁻¹ Si, productivity increased by more than 1.550 and 1.750 kg ha⁻¹ in the moderate and severe deficit treatments, respectively.

Keywords: Cereals, Tropical crops, Irrigation, Plant Nutrition, Silicates

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro representa 24% do Produto Interno Bruto (PIB) do país como indicou o Cepea (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada), da Esalq/USP no final de 2023 (Tecnologia, 2023). Contudo, as mudanças nas temperaturas e a instabilidade do regime de chuva vêm se modificando com o passar dos anos, gerando preocupação para a segurança alimentar e tornando mais arriscado a produção agrícola brasileira (Besharat et al., 2020).

Ocorrências de longos períodos de seca tem sido cada vez mais frequente (Alves, 2018). Assim como outras culturas, a planta de milho quando submetida a condições adversas de temperatura do ar, umidade e hídricas, como o déficit hídrico, a exemplo dos distúrbios no desenvolvimento, as plantas apresentam modificação na estrutura morfológica, havendo diminuição da altura, diâmetro do caule, número de folhas e produção de massa seca da planta (Amin et al., 2016).

A cultura do milho é uma das gramíneas mais cultivadas do agronegócio brasileiro, sendo vinculado como uma cultura de sucessão da soja (Richetti, 2021). O ciclo desta Poaceae, compreende a germinação e emergência,

desenvolvimento vegetativo, fase reprodutiva, maturação e colheita, a ocorrência de estresse hídrico por deficiência hídrica no período de reprodutivo podem causar perdas que ultrapassam 50% da produtividade (Magalhães, 2006).

De acordo Coelho (2006), a cultura do milho extrai alta quantidade de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e possui relação direta com o aumento da produtividade; e para os micronutrientes a quantidade requerida pela cultura do milho é relativamente baixa especialmente de ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu) e molibdênio (Mo). Embora os macronutrientes são requeridos em maior quantidade e os micronutrientes requeridos em menor quantidade, faz-se necessário que ambos os nutrientes estejam disponíveis em uma faixa adequada para a planta, confirmando a “Lei do mínimo” de Liebig (Vasconcellos et al., 2001).

Uma das formas de mitigar os problemas hídricos e o estresse provocado nas plantas, é a utilização da fertirrigação alinhado irrigação e nutrição balanceada com a aplicação de fontes de silício (Si) na cultura (Mota, 2023). A implantação de um sistema de irrigação e fertirrigação onera os custos de produção, entretanto tem-se um maior ganho em produtividade e diminuição dos riscos de interferência dos fatores abióticos (Pereira, 2015). Contudo, estudos de campo com fertirrigação na cultura do milho e o uso do Si ainda é limitado, dada a falta de informação, especialmente, sobre ação da dose ou faixa ideal a ser recomendada no Brasil (Miranda et al., 2018).

O Si é um elemento benéfico de ocorrência natural que auxilia no crescimento e no desenvolvimento das plantas, e é conhecido por auxiliar na

tolerância das culturas aos estresses abióticos, por promover melhor desenvolvimento da parte aérea e principalmente, radicular (Amin, 2018). Plantas acumuladoras de Si, como o milho, em condição de estresse hídrico por déficit acumulam maior quantidade deste elemento, que é capaz de influenciar variáveis como: massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea e produtividade (De Sousa, 2022). Além disso, o trabalho recente com fornecimento de Si via fertirrigação realizado por Dos Santos et al. (2021) têm indicado melhoria dos teores nutricionais, desempenho fisiológico e crescimento. Verificou-se que o Si aplicado mitigou o estresse por deficiência de K e obteve melhor aproveitamento da água, bem como conteúdo de clorofila e carotenoides (Gonzales, 2024). Contudo, a dose ideal a ser aplicada em condição de campo via fertirrigação usando fonte fluída, permanece desconhecida.

Desta forma, pesquisas com Si caminham para uma abordagem holística, objetivando compreender melhor seus benefícios no estado nutricional das plantas para aumentar a eficiência produtiva de culturas anuais irrigadas, bem como, estabelecer critérios de uso e aferir com precisão seu potencial agrônomo nestas áreas.

Para isso, é importante ter respostas para as seguintes hipóteses: i) existe uma dose de Si ótima para fertirrigação e os teores de Si no solo e foliar adequado para seu uso fundamentado na cultura do milho?; ii) o Si é um mitigador de danos causados pelo déficit hídrico moderado e severo na cultura do milho irrigado a partir da melhoria do teor de água na planta e do estado nutricional da cultura?; iii) o fornecimento ótimo de Si via fertirrigação pode diminuir a necessidade hídrica mantendo alta produtividade?

A fim de testar e buscar respostas à essas hipóteses, foi conduzido um experimento com a cultura do milho objetivando-se estabelecer o efeito de quatro doses de Si via fertirrigação em três regimes hídricos no estado nutricional do milho irrigado e cultivado em condição de campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da cultura do milho na produção agrícola brasileira

O milho (*Zea mays L.*) pertence à família das Poaceae, é uma espécie originária da América no Norte, sendo o México seu centro de origem e datado a mais de 10 mil anos (Silveira, 2015). É uma planta anual, de metabolismo C4, robusta e ereta, altura variando de 1 a 4 metros, com alta aplicabilidade para produção de grãos (Magalhães et al., 2006). O grão produzido é destinado 84% a alimentação animal, como avicultura e suinocultura, e 11% a indústria que produz óleos, elementos espessantes, corantes e alimentos (Menegaldo, 2011).

Esta gramínea é a terceira cultura de cereal mais importante, apresenta grande relevância econômica mundial e para o Brasil, no qual ocupa a terceira posição de maior produtor mundial, ficando atrás de Estados Unidos da América (EUA) e China, e terceiro maior exportador, ficando atrás de EUA e Argentina (Adalberto, 2022).

No Brasil, o milho ocupa uma área de 21,1 milhões de hectares e chega a produções de 118,5 milhões de toneladas de grãos contabilizando as 3 safras,

compreendidas em: primeira safra (fevereiro a junho), segunda safra (julho a agosto) e a terceira safra (outubro a dezembro) (Conab, 2023). Da área plantada mais de 75% correspondem a 90% da produção nacional que estão concentradas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Portal Embrapa, 2021).

De acordo com Barros (2014), o ciclo do milho altera com a cultivar e época de semeadura, variando de 100 a 160 dias de ciclo, sendo o normal entre 110 a 145 dias. A cultura do milho pode ser cultivada em diferentes regiões com precipitações de 350 a 5000 mm anuais, dos quais a planta necessita entorno de 500 - 800 mm parcelado para completar seu ciclo e expressar máxima produtividade, pois 2 dias em condição de estresse hídrico em florescimento pleno é capaz de causar danos superiores a 20% na produtividade, e de 4 a 8 dias as perdas podem ultrapassar 50% (Magalhães et al., 2006). Desta forma, em regiões de instabilidade no regime hídrico, os sistemas de irrigação e fertirrigação ganham uma importância, pois diminui as perdas de produção associadas ao déficit hídrico (Da Silva, 2010).

A diminuição na produtividade que ocorre em plantas sob limitação da disponibilidade hídrica, deve-se a diminuição na fotossíntese, pois o déficit hídrico induz menor disponibilidade de CO₂ e menor assimilação do carbono em glicose, causando queda na produção de grãos por unidade de área (César et al., 2006).

2.2. Cenário atual de mudanças climáticas

Segundo o Relatório Especial sobre “Mudanças Climáticas e Terra” do IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) o aquecimento global

ocorreu a um ritmo acelerado, impactando o sistema terrestre; no século XXI, a temperatura média na superfície terrestre aumentou em 1,53°C em relação ao século XIX e XX, e foi 0,66°C superior à variação correspondente na temperatura média global. Essas temperaturas maiores, com instabilidades na precipitação, modificaram as épocas de plantio e colheita em dias, proporcionando diminuição nos rendimentos de culturas regionais e na disponibilidade de água em algumas regiões (Pires et al., 2014).

Nos últimos 10 anos a imprensa retratou diversos momentos de seca pelo Brasil, com destaque a maior escassez de chuva nas regiões Sul e Sudeste em 2013/2014 que levou a um alerta de emergência hídrica para a população, provocou falta de água para abastecer as hidrelétricas gerou uma situação possível de falta energia elétrica de certa parte do país (Alves e Baldicero, 2018).

A estação agroclimatológica da FCAV/UNESP, registrou no período de 2010 a 2023, cinco anos com o balanço hídrico climatológico em déficit anual, dos quais quatro estão compreendidos nos últimos seis anos; e foi registrado no ano de 2023, valores mensais de temperatura máxima, mínima e média superiores à média do período de 1971 a 2014.

Os efeitos das mudanças climáticas têm afetado as culturas, que estão sujeitas a recursos hídricos limitados, tendo período mais longo de exposição ao déficit hídrico (Besharat et al., 2020). O aumento do tempo de exposição à seca induz estresse secundário por deficiência nutricional dada a necessidade da água para absorção dos nutrientes (Rizwan et al., 2015) e diminui o transporte de água e de nutrientes via xilema (Ibrahim et al., 2020).

Os danos causados pelo déficit hídrico podem agravar os prejuízos biológicos na planta ao induzir deficiência nutricional, pois alguns nutrientes como K possui função associada ao status hídrico foliar, aumentando a área foliar, a eficiência do uso de água nas plantas estressadas e diminuindo a transpiração foliar (Martineau et al., 2017). Além disso, a nutrição ótima da planta melhora a assimilação líquida de carbono (C), o transporte de açúcares no floema das folhas às raízes (Ibrahim et al., 2020) e previne danos oxidativos, mantendo a homeostase das espécies reativas de oxigênio (ERO) e ativando enzimas do metabolismo antioxidante (Ul-Allah et al., 2020).

Assim, plantas cultivadas sob níveis de disponibilidade de água sub-ótimas, podem sofrer com estresse nutricional, dada a limitação na absorção dos nutrientes, induzindo cenários temporário ou permanente de desbalanço no estado nutricional (Nascimento et al, 2015).

2.3. Uso da irrigação e fertirrigação nos cultivos anuais

Com a diminuição das precipitações, mesmo em regiões que historicamente possuem altas produtividade de grãos, como o Norte do Estado de São Paulo, estratégias para aumentar a eficiência do uso da água ganham importância (Rodrigues et al., 2022). A agricultura irrigada paulista possui cerca de 30% de toda a área irrigada no Brasil (ANA, 2021), predominando culturas anuais nestas áreas, como milho.

Fica evidente a necessidade da redução do consumo e do aumento do aproveitamento econômico da água, ou seja, da eficiência de uso da água, para

garantir recursos de abastecimento alimentar adequados como pré-requisitos para uma produção agrícola sustentável (Firouzabadi et al., 2021).

A fertirrigação trata-se da aplicação de um ou mais fertilizantes juntamente com a água de irrigação (Silva e Feitosa, 2003). De acordo com Mendonça e Mantovani (2001) foi introduzido em território brasileiro com a aplicação de resíduos orgânicos e evoluiu para aplicação de fertilizantes minerais. Essa técnica possibilita o parcelamento dos nutrientes para as plantas, isto é, doses menores com maior frequência de aplicação, mantendo durante todo o ciclo da cultura teores próximos dos ideais no solo, proporcionando maior eficiência na absorção e o uso do nutriente, evitando possíveis perdas por lixiviação (Savvas e Ntatsi, 2015).

A técnica da fertirrigação reduz custos de mão de obra, investimentos com máquinas e implementos, evita a compactação do solo e proporciona um melhor aproveitamento da aplicação do fertilizante (Silva e Feitosa, 2003). De acordo com Kaneko et al. (2012), a adubação via fertirrigação no milho proporciona maior lucratividade e rentabilidade, e um menor tempo de retorno do investimento, quando comparada com a adubação tratorizada.

A aplicação do fertilizante com a água de irrigação acelera o primeiro contato do fertilizante com a zona de absorção das raízes, radículas, em razão do fertilizante estar compondo a solução nutritiva do solo, sendo dispensável a necessidade de precipitação posteriormente a aplicação do fertilizante (Coelho et al., 2010).

A aplicação de Si via fertirrigação pode ser uma forma eficiente de oferta deste elemento, sendo uma estratégia promissora para a agricultura moderna. Esta forma de aplicação é norteada nos modelos de sustentabilidade, pela necessidade emergente na agricultura de se aumentar a produtividade e aliviar o estresse abiótico e biótico, nos cenários atuais e futuros (Cassel et al, 2021).

A fertirrigação tem potencial para atenuar o efeito de precipitação de soluções silicatadas, ao possibilitar a aplicação de doses menores de forma mais frequente, resultando em uma maior eficiência ao longo do processo (Cassel et al, 2021). Como consequência, observa-se um aumento no acúmulo de Si pelas raízes das plantas durante todo o ciclo de crescimento, pode suscitar ganhos na produtividade (Gonzalez, 2024).

A intensificação dos cultivos e o aumento do uso de Si na agricultura proporcionam a melhor eficiência nas aplicações desse elemento benéfico. A fertirrigação permite o uso de doses inferiores a 20 kg ha⁻¹ por área, enquanto ainda assegura a absorção adequada do elemento pelas plantas (Frew et al., 2018). Isso ocorreria porque as fontes solúveis de Si possuem concentrações variando de 1,5 a 3,5 mmol L⁻¹, e nesse intervalo evita a polimerização, conforme indicado por Birchall (1995), esse processo é problemático em concentrações superiores a 3,5 mmol L⁻¹.

Desta forma, a pesquisa avaliou a aplicação de 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, a partir de seis parcelamentos nas seguintes doses 0; 0,67; 1,33 e 2,00 kg ha⁻¹ de Si, e na lâmina de 2,5 mm correspondem a 0; 0,96; 1,90 e 2,85 mmol L⁻¹ de Si na solução em cada aplicação, evitando o processo de polimerização e

permitindo maior disponibilidade desde elemento. As doses testadas circundam os extremos de máximo e mínimo para não ocorrer polimerização, mas não ultrapassa concentrações maiores que $3,5 \text{ mmol L}^{-1}$ (Birchall, 1995). A polimerização do Si consiste em um processo químico que resulta na formação de macromoléculas insolúveis, denominadas de polímeros, mediante a combinação de moléculas menores, os monômeros, o que proporciona menor atividade química, mobilidade em água, adsorção às partículas coloidais e absorção pelas plantas (Paim, 2006).

2.4. Diagnose foliar como ferramenta nos cultivos de alta produtividade

A diagnose foliar é possível de realizar através da observação visual de sintomas ou distúrbios nutricionais, ou por meio de análise química das folhas (De Mello Prado, 2021). A análise química consiste na avaliação e análise das condições das folhas de uma planta para identificar possíveis problemas ou deficiências, para isso, é necessário a coleta de um número de folhas específico, na posição correta da planta e em um período característico para cada cultura (De Mello Prado, 2021).

Para a amostragem do milho, é necessário coletar um mínimo de 30 folhas do terço central da folha da base da espiga, na fase de pendoamento com mais de 50% das plantas pendoadas (Duarte et al., 2022). A folha a ser coleta pode alterar conforme o método utilizando, sendo necessário posteriormente usar as faixas de teores adequados relacionado a forma como foi amostrado, e assim determinar o estado da planta, deficiente, adequado e ou toxicidade (De Mello Prado, 2021).

Segundo Duarte et al. (2022) as culturas apresentam exigências diferentes para os nutrientes, a planta de milho necessita dos nutrientes na seguinte ordem: os macronutrientes, N, K e, em seguida, Ca, Mg, P e S; e os micronutrientes o Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo e Cl que são exigidos em menores quantidades.

A deficiência de qualquer um deles, seja macronutriente ou micronutriente, podem causar efeitos nos processos metabólicos, como propõe a Lei do mínimo de Liebig (Vasconcellos et al., 2001). O milho possui alta sensibilidade a deficiência de Zn, média a de Cu, Fe e Mn e baixa a de B e Mo (Coelho, 2006). Entretanto a deficiência de N provoca redução no desenvolvimento da planta e conseqüentemente na produtividade (Vasconcellos, 2002).

A diagnose foliar pela análise química permite identificar a concentração dos nutrientes nas folhas associada a 90 a 100% da produtividade máxima (De Mello Prado, 2021). A interpretação precisa dos resultados dessa análise requer experimentação para estabelecer índices de calibração que reflitam adequadamente o estado nutricional das plantas (Cantarella et al., 2022).

Após realizada a coleta e análise química das folhas, é necessário comparar com a faixa de teor padrão estipulado para cada nutriente, na cultura do milho a faixa de teores adequados para os macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, são respectivamente, 25-35; 1,9-3,5; 17-30; 2,5-6,0; 1,5-4,0 e 1,5-3,0 g kg⁻¹, e para os micronutrientes: Fe, Mn, Zn e Cu, são respectivamente, 70–200; 40 – 100; 20–50; 6–15 mg kg⁻¹ (Cantarella et al., 2022).

2.5. Silício na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico e aumento da eficiência de uso de água

Uma estratégia reconhecida para mitigar o estresse nas culturas é o uso do Si, considerado um elemento benéfico (Vasanthi et al., 2014). O Si é o segundo elemento mais abundante após o oxigênio, constitui 50-70% da massa do solo na forma de dióxido de Si (SiO_2) (Epstein, 1994). No entanto, na solução do solo, o Si disponível se apresenta predominantemente como ácido monossilícico (H_4SiO_4) em baixa concentração (~1 mM) (Katz et al., 2021).

O Si é absorvido na forma de ácido monossilícico e permanece nessa forma na seiva do xilema (Mitani et al., 2005). Ao atingir as folhas através da perda de água, o Si passa por polimerização, concentrando-se na formação de sílica amorfa ou biogênica, constituindo 90% do Si absorvido; e posteriormente é transformado em estruturas de Si-celulose presentes na parede celular (Yoshida, 1965). Apenas uma pequena fração de sílica em escala nanométrica está contida em estruturas intercelulares (Woesz et al., 2006).

Em plantas sujeitas a déficit hídrico, os depósitos de Si nas paredes celulares dos vasos do xilema reduzem às perdas de água (Pei et al., 2010). Além disso, o Si em plantas sob déficit hídrico desempenha uma função osmorreguladora, modificando os teores de prolina e açúcares (Avila et al., 2021). Isso proporciona ajuste na condutividade hidráulica das raízes, estimula a produção de proteínas como a aquaporina (Abbas et al., 2015), aumenta o crescimento das raízes, como observado em plantas de milho (Besharat et al., 2020), resultando em aumento da absorção de água (Teixeira et al., 2020a) e nutrientes (Ibrahim et al., 2020).

Em condições de deficiência nutricional, o Si atua na mobilização do nutriente deficiente no apoplasto das raízes (Pavlovic et al., 2013) e rearranjo para a parte aérea (Bityutskii et al., 2014), diminuindo a obstrução dos vasos, dificultando a formação de calose (Doncheva et al., 2009), e ao elevar a eficiência de utilização do nutriente deficiente (Teixeira et al., 2020c; Sarah et al., 2021).

Os estudos atuais se concentram na avaliação dos efeitos do Si na atenuação de estresses isolados em cultivos de sequeiro ou irrigados em vasos (Epstein, 1994; Teixeira et al., 2020a; Teixeira et al., 2020c; Teixeira et al., 2021). Fundamentado na possibilidade de agravamento do estresse por déficit hídrico no futuro, a demanda de Si na agricultura pode tornar-se frequente, afim de buscar a segurança alimentar e qualidade de vida.

Neste contexto, considera-se que a inclusão do Si nas práticas agrícolas pode contribuir para o uso racional e sustentável da água para irrigação, um recurso limitado (Cardozo et al., 2018), devido aos impactos diretos na melhoria dos processos fisiológicos em plantas sob estresse, mas também aos efeitos sinérgicos do Si com nutrientes, favorecendo o estado nutricional ótimo das culturas.

Nos estudos pioneiros com Si no Brasil os resultados foram promissores indicando a eficiência da fertirrigação com Si em otimizar a absorção deste elemento verificado nas culturas da cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021; Oliveira Filho et al., 2021), eucalipto (Souza Junior et al., 2021) e forrageiras (Rocha et al., 2021). Porém os trabalhos desenvolvidos até o momento estão

restritos a ambientes controlados e em vasos como na cana de açúcar (Ferreira, 2022; Teixeira, 2018) e forrageiras (Buchelt, 2019).

A carência de informações sobre a melhor dose agronômica e econômica a ser aplicada de Si via fertirrigação em condições de campo no Brasil é evidente, bem como os teores de Si no solo e foliar considerado adequado para as culturas, o que seria relevante como indicador técnico para o manejo do Si ancorado na base científica.

Já em países como a Espanha (Peris-Felipo et al., 2020) encontram-se estudos sobre fertirrigação, e em alguns países como Filipinas (IRRI, 1993), Japão (Liang et al., 2015) e Flórida (EUA) recomendações oficiais de Si, existindo um conjunto significativo de informações sobre os teores adequados de Si no solo e nas folhas em diferentes estados americanos, no qual expandiu-se o número de trabalhos em condição de campo (Tubana et al., 2016).

Ensaio de campo de longo prazo realizados em 26 estados da China demonstram que a aplicação de fontes solúveis de Si na forma de silicato de potássio tem aumentado a produção em diversas culturas (Liu et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de experimento

O experimento com o cultivo de milho em condição de campo foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), localizada em Jaboticabal ($-21^{\circ} 14' 50.7''$ de latitude e $48^{\circ} 17' 01.8''$ de longitude, 546 m de altitude), São Paulo, Brasil (Figura 1)



Figura 1. Foto da área experimental retirada do Google Earth

O solo da área experimental foi classificado por Andrioli e Centurion (1999) e corresponde a um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef). Anteriormente a instalação, foram coletadas amostras de solos da camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para análise química para fins de fertilidade (Raij et al., 2001), análise do teor de Si disponível utilizando o cloreto de cálcio como extrator (Korndörfer et al., 2004) e análise granulométrica (Camargo et al., 1986).

O cultivo de milho foi realizado na safra 2022/2023. As sementes de milho pertenciam a empresa Forseed e o híbrido foi FS575PWU. O plantio foi realizado com espaçamento entre linhas de 0,45m e 3,5 sementes por m, totalizando uma população de 77.777 plantas por hectare. Os dados de temperatura, umidade, radiação global e pluviosidade durante o período de cultivo foram registrados na Estação Agroclimatológica da FCAV (Figura 2).

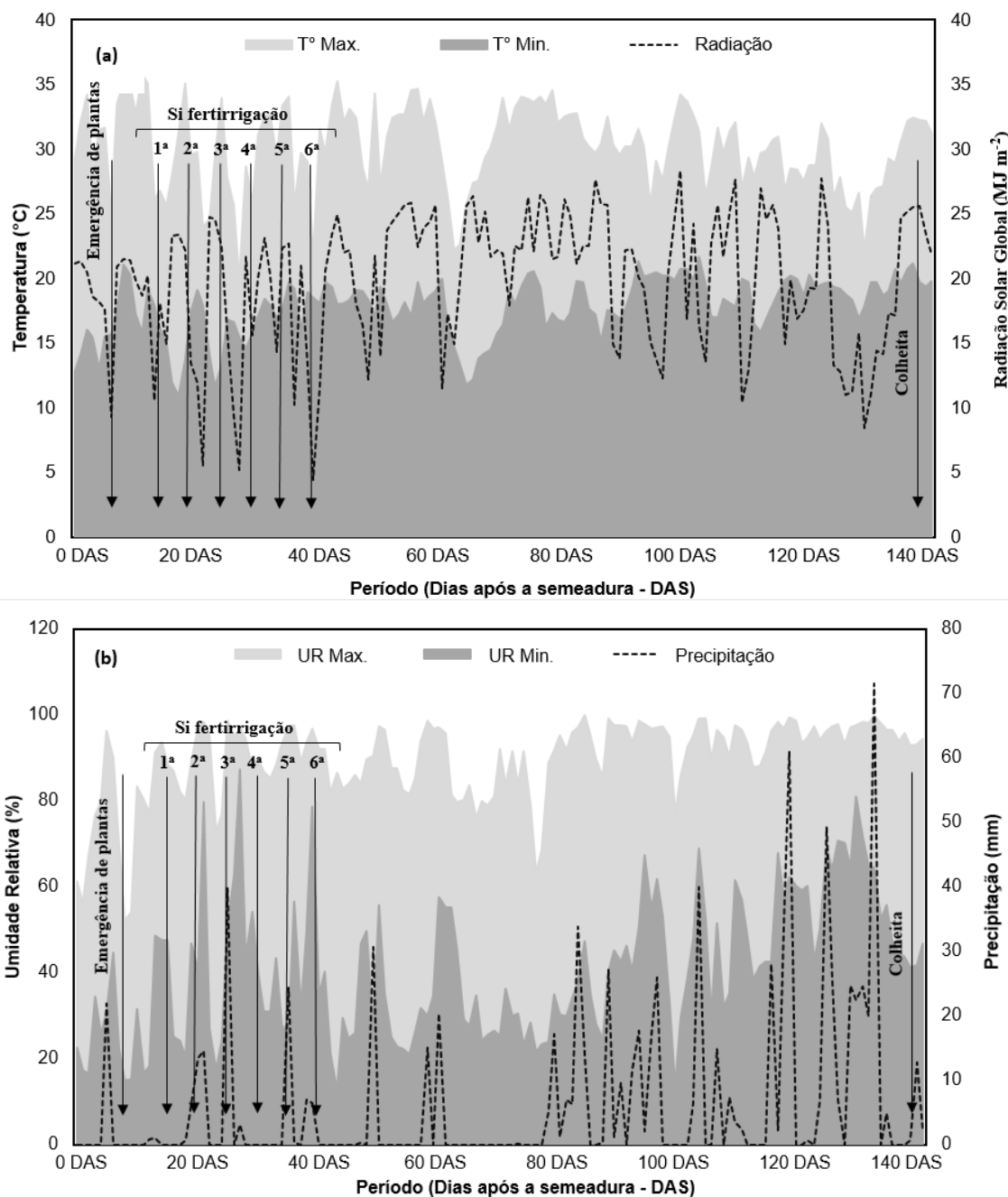


Figura 2. Condições experimentais na área de realização do experimento em campo durante o cultivo de milho. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (a) umidade relativa máxima (UR Max.), umidade relativa mínima (UR Min.) e precipitação (P) (b).

3.2. Tratamentos

Os tratamentos consistem em um fatorial duplo 3x4, sendo três regimes hídricos (WR): 80% (sem déficit hídrico - WWD), 60% (déficit hídrico moderado - MWD) e 40% (déficit hídrico severo - SWD) da capacidade de retenção de água

no solo – CRA e quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. O experimento foi instalado em esquema de parcela sub-dividida (split-plot) dispostos em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Os regimes hídricos foram determinados como fatores principais e as doses de Si foram consideradas como subfatores, ou seja, fator secundário. As parcelas experimentais apresentam dimensões de 2,25 x 6 m, área total de 13,5 m² e área útil de 5,4 m².

3.3. Adubações

Diante da falta de pesquisa com doses de Si via fertirrigação no Brasil considerou-se uma indicação do International Rice Research Institute (IRRI) recomendando doses variando de 40 a 60 kg ha⁻¹ de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente 6 a 9 kg ha⁻¹ de Si) (IRRI, 1993). A adubação para os demais nutrientes (N, K, P, S, Zn) (Tabela 1) e a calagem seguiram as indicadas por Duarte et al. (2022), no milho recomenda elevar a saturação por bases a 70% e o Mg a um teor mínimo de 8 mmol_c dm⁻³.

Tabela 1. Recomendações de adubação para milho grão com base na produtividade esperada e classe de resposta da área cultivada. As doses indicadas são quantidades totais para a semeadura e cobertura (Adaptado de Duarte et al., 2022)

Produtividade esperada	Dose de N para classe de resposta a nitrogênio		P resina, mg dm ⁻³⁽³⁾			K ⁺ trocável, mmol _c dm ^{-3(4,5)}			S	Zn, mg dm ⁻³	
	Grãos	Alta	Média e Baixa	< 16	16 - 40	> 40	< 1,6	1,6 - 3,0		> 3,0	-
t ha ⁻¹	N, kg ha ⁻¹		P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹			K ₂ O, kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	
< 6	90	60	90	60	30	70	40	30	20	4	2
6 - 8	120	90	100	70	40	90	50	30	20	4	2
8 - 10	160	120	120	90	60	100	70	40	40	4	2
10 - 12	200	140	(2)	110	70	110	90	50	40	4	2
> 12	220	160	(2)	120	80	120	100	60	40	4	2

(2) É improvável a obtenção de alta produtividade de milho em solos com teores muito baixos de P, independentemente da dose de adubo empregada; no caso do K, a adubação pode ser suprimida para solos com teores muito altos (>6,0 mmol_c dm⁻³)

(3) Em solos com teores de P acima de 80 mg dm⁻³, aplicar somente 20 a 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como adubação de arranque.

(4) Doses recomendadas para a produção de grãos. (5) A adubação potássica pode ser suprimida para solos com teores de K muito altos (>6,0 mmol_c dm⁻³)

3.4. Amostras deformadas e indeformadas do solo

Os níveis de CRA ou WRC foram determinados a partir da coleta de amostras indeformadas do solo para determinação da curva de retenção de água em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 1986). A condição hídrica adequada (sem déficit hídrico) foi de 80% da CRA porque permite que 80% dos microporos sejam preenchidos com água disponível e os 20% restantes com ar, mantendo trocas gasosas na zona das raízes (Boaretto et al., 2014). O déficit hídrico moderado foi de 60% da CRA, baseando-se em estudos anteriores com as culturas de milho (Amin et al., 2014; 2018). E avaliou o déficit hídrico severo de 40% da CRA, pois condições extremas de seca são comuns em regiões de regime hídrico instável (Bodner et al., 2015).

3.5. Manejo de cultivo

3.5.1. Irrigação

Inicialmente as plantas foram mantidas em condição hídrica adequada (80% de CRA), sendo os níveis de MWD e SWD iniciados aos 30 dias após a emergência da cultura. O volume de água a ser aplicado para manter os níveis de CRA foi determinado de acordo com os balanços hídricos diários, calculando o excesso ou o déficit de água no solo em relação à capacidade do campo. As entradas para o sistema consideradas foram a água de irrigação e a precipitação pluvial. A única saída de água considerada foi a evapotranspiração da cultura (ETc), admitindo-se que a percolação profunda e o escoamento foram insignificantes (Webber et al., 2006).

A ETc da cultura foi determinada a partir do balanço hídrico como a soma da água de irrigação, precipitação e uso da água do solo ao longo da estação de crescimento. Além disso, ETc foi estimada considerando a evapotranspiração de referência (ETp) determinada pelo método de Penman-Monteith parametrizada pela FAO-56 (Allen et al., 1998), usando dados meteorológicos coletados na estação Agroclimatológica da FCAV/UNESP (localizada próxima a área experimental), e o coeficientes de cultura (Kc) para cada fase. Foi adotado o sistema de irrigação por gotejamento autocompensante.

As irrigações foram aplicadas quando o déficit hídrico fosse igual ao esgotamento máximo permitido da água disponível no solo. Para o esquema de irrigação recomendado pela FAO, ou condição WWD, as parcelas foram irrigadas quando 45% da água disponível fosse esgotada. Os fatores de esgotamento para os tratamentos de MWD e SWD são de 60% e 70%, respectivamente (Webber et al., 2006).

3.5.2. Fornecimento de silício

O fornecimento de Si foi realizado via fertirrigação aplicando-se lâmina de 2,5 mm contendo o Si em seis parcelamentos, iniciado aos 10 dias após completa emergência das plantas com intervalo de 4 dias entre aplicações. Assim, com o parcelamento, as doses usadas em cada aplicação foram de 0; 0,67; 1,33 e 2,00 kg ha⁻¹ de Si, que na lâmina de 2,5 mm correspondem a 0; 0,96; 1,90 e 2,85 mmol L⁻¹ de Si na solução em cada aplicação, ou seja, abaixo de 3,5 mmol L⁻¹ e sem risco de polimerização do elemento. A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (Si = 115,2 g L⁻¹, Na₂O = 60,5 g

L⁻¹). O sorbitol presente nessa fonte possui propriedades estabilizantes que mantêm maior concentração de formas monoméricas de Si (Babiker e Duncan, 1974) diminuindo os riscos de polimerização da solução aplicada. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de Na presente na fonte de Si nos tratamentos baseando-se na maior dose de Si a ser aplicada, utilizando soluções estoques de cloreto de sódio a 1,0 mol L⁻¹.

As plantas foram cultivadas durante todo o ciclo fenológico e as análises fisiológicas e nutricionais foram realizadas na fase de pleno florescimento das plantas.

3.6. Variáveis analisadas

3.6.1. Conteúdo relativo de água

Foram coletados dez discos (26,4 mm² cada) da primeira folha completamente desenvolvida da planta de milho, sendo imediatamente pesados para obter a massa fresca (Mf). Posteriormente, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 horas para obter a massa túrgida (Mt) e secas em estufa de circulação forçada de ar a 80°C por 24 horas, para obter a massa seca (Ms). Os valores foram determinados pela Equação 01, proposta por Barrs e Weatherley (1962).

$$\text{Equação 01 : } [(Mf - Ms)/(Mt - Ms)] \times 100$$

3.6.2. Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

O potencial hídrico foliar foi determinado no terço médio da lâmina da segunda folha completamente desenvolvida da planta de milho, com uma câmara de pressão de Scholander (3000F01, Soil Moisture Equipment, EUA),

aplicando-se pressão até que haja exsudação na área do corte. As medidas foram avaliadas entre 5 e 6 horas da manhã (Turner, 1981).

3.6.3. Índice de Extravasamento de eletrólitos

Dez discos foliares (26,4 mm² cada) foram coletados do terço central da folha da base da inserção da espiga nas plantas de milho. Os discos coletados foram emergidos em água deionizada por 2 horas; seguidamente foi realizado uma leitura da condutividade elétrica (EC1) da solução usando um medidor de condutividade (AK51, Akso, BR). As amostras depois foram autoclavadas a 121°C por 20 min e após o resfriamento uma nova leitura de condutividade elétrica foi realizada (EC2). O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a Equação 02 (Dionisio-Sese & Tobita, 1998).

$$\text{Equação 02: } EC1/EC2 \times 100$$

3.6.4. Altura da planta, diâmetro do caule, número de folhas e área foliar

A medição da altura da planta considerando desde a base até a inserção da primeira folha completamente desenvolvida. O diâmetro do colmo foi medido a 5 cm da base da planta. O número de folhas foi obtido a partir da contagem e a área foliar usando um medidor de área foliar (L-3100, LiCor, EUA).

3.6.5. Análise foliar dos nutrientes

Essa análise química foi realizada na folha diagnóstica, na fase de pendoamento (50% das plantas pendoadas), procedeu-se a coleta do terço central da folha da base da inserção da principal espiga, para cultura do milho

(Cantarella et al., 1997). A coleta da cultura ao todo foi de 15 folhas por parcela, sendo 5 plantas de cada parcela (Duarte et al., 2022). Em seguida as amostras de folhas foram descontaminadas na lavagem e secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ e posteriormente moídas em moinho do tipo Willey.

O teor de Si foi obtido das amostras moídas pela extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a $120\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Kraska e Breitenbeck, 2010) e a leitura realizada por colorimetria com molibdato de amônio, ácido oxálico e ácido clorídrico usando espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm (Korndörfer et al., 2004). Foram estabelecidos nível crítico e faixa de suficiência do Si para a cultura do milho, dada sua ausência na literatura.

O teor de N foi determinado pela adição de ácido sulfúrico concentrado às amostras moídas, seguido de destilação e titulação com ácido sulfúrico (Bataglia et al., 1983).

Os teores foliares de K, Ca, Mg, P, S, Mn, Fe, Zn e Cu foram determinados a partir da digestão das amostras com ácido perclórico e ácido nítrico (2:1) (Bataglia et al., 1983). A leitura de K, Ca, Mg, Fe, Zn e Cu foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno. A determinação de P foi por reação colorimétrica com molibdato de amônio e vanadato de amônio com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 420 nm. O teor de S foi quantificado por reação induzida com ácido SEED e

cloreto de bário com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 420 nm.

3.6.6. Teor de Si disponível no solo

O solo foi coletado na zona úmida fertirrigada próximo a planta (15 subamostras por parcela) aos 10 dias após a última aplicação de Si e as amostras foram devidamente preparadas para análise química para fins de fertilidade do solo, conforme indicado por Rajj et al. (2001). O teor de Si disponível no solo foi determinado usando cloreto de cálcio a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ como extrator, segundo método de Korndörfer et al. (2004).

3.6.7. Componentes de produtividade

Foram determinadas na fase de maturação fisiológica, determinando-se a massa de 1.000 grãos e a produtividade da cultura do milho.

3.7. Forma de análise dos resultados

Os resultados foram submetidos à análise univariada, utilizando os softwares Sigmaplot® v.14 e Software livre R.

A análise de variância foi realizada pelo teste F ($p \leq 0,05$), após verificação da normalidade e homocedasticidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks e teste de Bartlett). Quando significativa, foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$) para os dados qualitativos. Os dados quantitativos, correspondentes as doses de Si, foram analisados por meio de modelos matemáticos de regressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conteúdo relativo de água teve diferença pelo teste F para os regimes ($p < 0,01$), entretanto para as doses de Si e na interação dos regimes com as doses não houve diferença significativa. Os três regimes hídricos apresentaram ajuste polinomial quadrático. Os máximos conteúdos de água encontrados em plantas de milho foram de 76; 72; 69% nas doses de Si em 8,84; 9,04; 11,02 kg ha⁻¹ para WWD, MWD e SWD, respectivamente. Para o conteúdo relativo de água observou-se que não houve diferença entre os regimes (WWD, MWD e SWD) nas doses de Si (0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹) (Figura 3a).

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) apresentou diferença pelo teste F para os regimes ($p < 0,05$), bem como para as doses de Si ($p < 0,01$), entretanto na interação dos regimes com as doses não teve diferença significativa. Os três regimes hídricos apresentaram ajuste polinomial quadrático. Os máximos potenciais hídricos encontrados em plantas de milho foram de -0,42; -0,65; -0,90 MPa nas doses de Si em 10,36; 9,29; 9,47 kg ha⁻¹ para WWD, MWD e SWD, respectivamente. O regime WWD apresentou diferença no potencial hídrico foliar

em relação ao SWD, sendo superior em todas as doses de Si testadas (Figura 3b).

O índice de extravasamento de eletrólitos também apresentou diferença para os regimes ($p < 0,05$) e doses de Si ($p < 0,01$), entretanto na interação dos regimes com as doses não teve diferença significativa. Os três regimes hídricos apresentaram ajuste polinomial quadrático. Os mínimos extravasamentos encontrados em plantas de milho foram de 22; 27; 34% nas doses de Si em 6,23; 6,51; 5,41 kg ha⁻¹ para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 3c).

O índice de extravasamento de eletrólitos indicou diferença entre dos regimes hídricos estudados. Na dose 0, 4 e 12 kg ha⁻¹ de Si o regime SWD apresentou maior índice de extravasamento em relação ao regime WWD. Contudo na dose 8 kg ha⁻¹ não houve diferença entre os regimes hídricos WWD, MWD e SWD.

O Si mitigou o efeito deletério da restrição hídrica, ao melhorar o potencial hídrico, isto é, melhorou a disponibilidade de água na folha. Este efeito reduziu o nível de estresse como observado pela diminuição do índice de extravasamento de eletrólitos na cultura do milho. O potencial benéfico do Si pode ser explicado pelo fato do elemento ser depositado nas paredes celulares dos vasos do xilema das gramíneas (Pei et al., 2010), produção de osmólitos reguladores como a prolina estimulando o aumento da absorção de água nas Poáceas, a exemplo da cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2020) resultados semelhantes foram obtidos na cultura do milho (Marques et al., 2022).

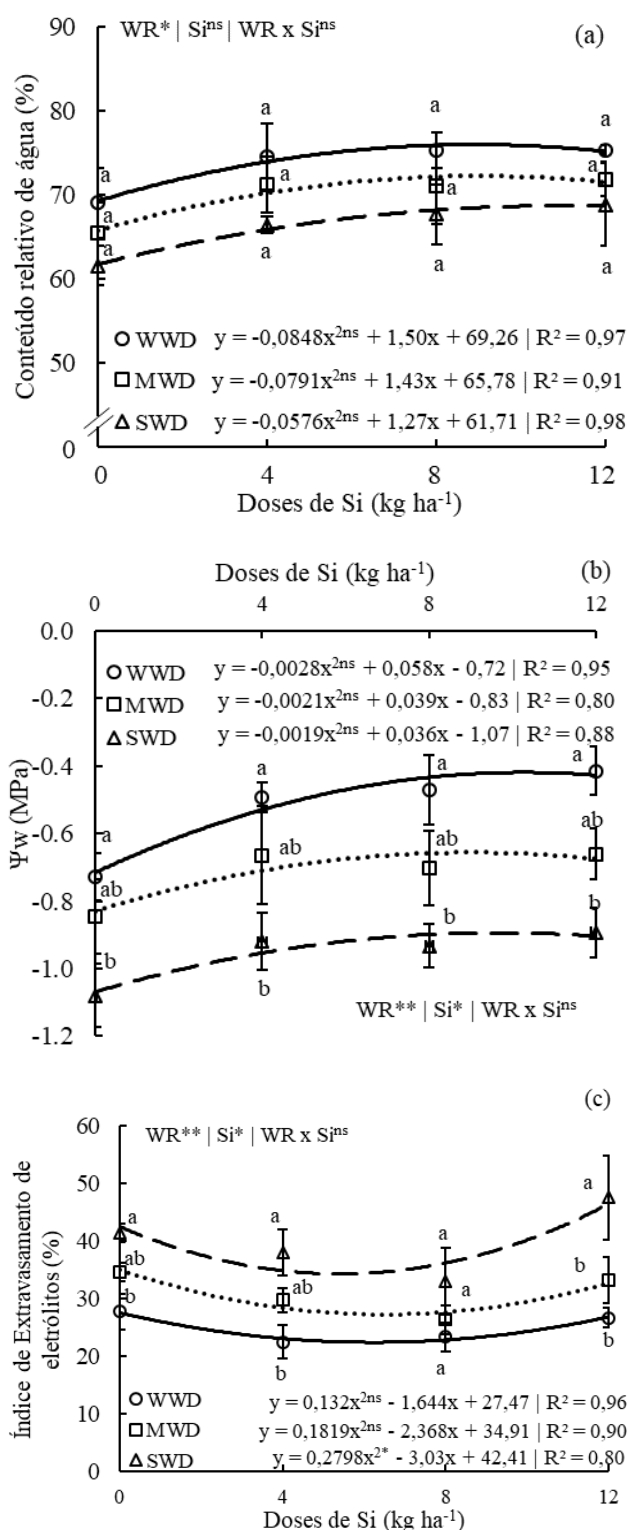


Figura 3. Conteúdo relativo de água (a), potencial hídrico (Ψ_w) (b) e índice de extravasamento de eletrólitos (c) em plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo - SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F.

A altura da planta e o diâmetro do caule foram influenciados apenas pelos efeitos isolados dos fatores WR e Si ($p < 0,05$) nos três regimes hídricos. As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático significativo para todos dos regimes hídricos, para a altura da planta e o diâmetro do caule (Figura 4a-b).

As máximas alturas da planta em plantas foram de 2,6; 2,4 e 2,2 m obtidas com a aplicação de Si nas doses de 5,3; 5,4 e 6,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente; para WWD, MWD e SWD (Figura 4a). As plantas cultivadas sob WWD apresentaram maiores alturas de plantas em todas as doses de Si testadas, em relação às plantas sob MWD, que por sua vez foram maiores do que as observadas em plantas sob SWD.

Os valores máximos de diâmetro do caule de plantas foram de 25,9; 24,8 e 23,9 mm obtidos nas doses de Si de 6,5; 6,9 e 7,9 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes WWD, MWD e SWD (Figura 4b). Plantas cultivadas sob WWD apresentaram diâmetros de caule maiores às plantas cultivadas sob SWD em todas as doses de Si.

As diferentes doses de silício testada apresentaram pouca ou nenhuma diferença para altura da planta e diâmetro dentro do mesmo regime.

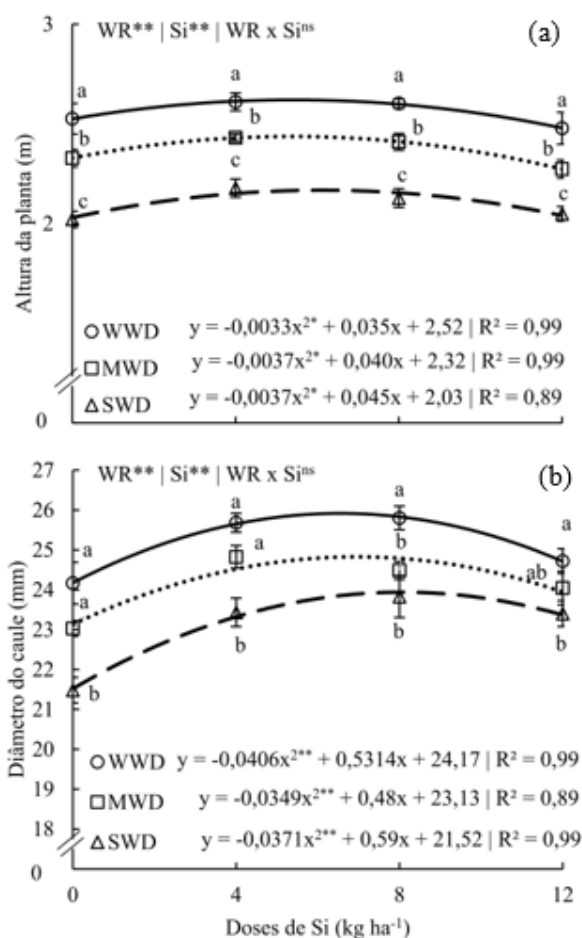


Figura 4. Altura da planta (a) e diâmetro do caule (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Apenas os fatores isolados WR e Si proporcionaram efeitos suficientes para influenciar o número de folhas e área foliar ($p < 0,05$) nos três regimes hídricos. As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático significativo para todos dos regimes hídricos para ambas as variáveis (Figura 5a-b).

O maior número de folhas em plantas 14; 14 e 13 foram obtidos aplicando 6,4; 6,7 e 6,9 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5a). As plantas apresentaram área foliar máxima de 7.324,9; 6.705,0 e 6.234,1

cm², obtidas nas doses 6,1; 6,2 e 6,8 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5b). As plantas cultivadas sob o regime WWD, apresentaram maior número de folhas nas doses 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si e maior área foliar na dose 0 kg ha⁻¹ de Si em relação às plantas sob SWD.

As diferentes doses de silício testada apresentaram pouca ou nenhuma diferença para número de folhas e área foliar dentro do mesmo regime.

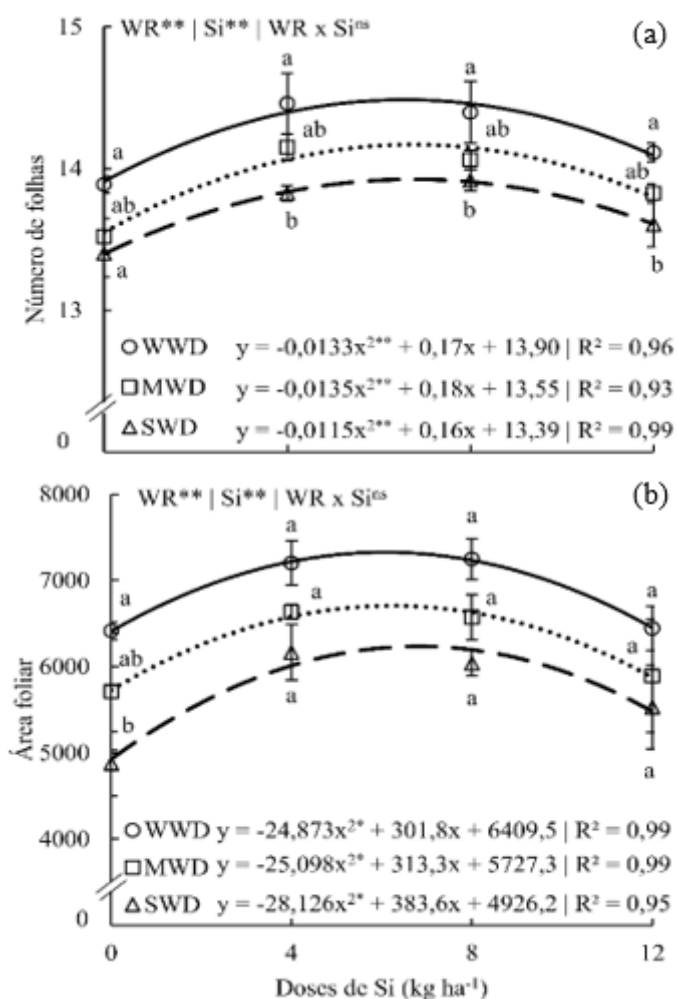


Figura 5. Número de folhas (a) e área foliar (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O teor de Si na folha diagnóstica foi observado efeito da interação WR x Si ($p < 0,01$) e dos fatores isolados ($p < 0,05$). Os três regimes hídricos apresentaram ajuste polinomial quadrático. Os máximos valores de teor de Si foram de 8,33; 5,05 e 4,26 g kg⁻¹ obtidos nas doses de 7,2; 5,9 e 7,7 kg ha⁻¹ de Si, nos regimes WWD, MWD e SWD, respectivamente. Plantas sob WWD apresentaram teores de Si superiores aos obtidos em plantas sob MWD e SWD (Figura 6).

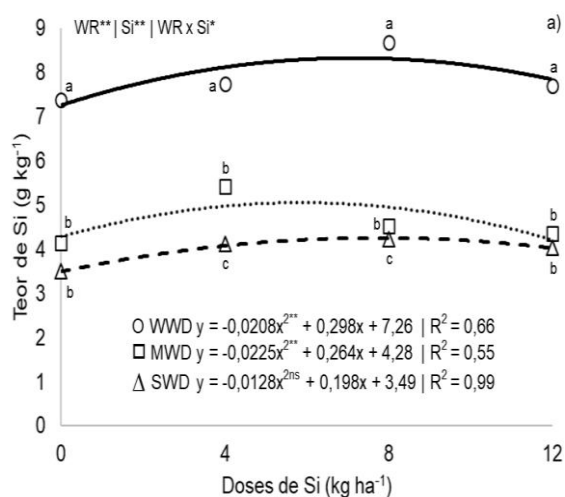


Figura 6. Teor de silício (Si) (a) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F

O teor de N na folha diagnóstica de plantas de milho cultivadas, demonstraram apenas o efeito isolado de WR e Si (ambos a $p < 0,05$). Os teores de N apresentaram ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos. Os máximos teores de N foram de 27,0; 26,4 e 24,5 g kg⁻¹ ocorreram nas doses de 6,9; 6,3 e 5,8 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD. No cultivo apenas na dose de 8 kg ha⁻¹ de Si, as plantas sob WWD apresentaram maiores teores de N, em relação às SWD (Figura 7b). A faixa

adequada do teor de N está entre 25 – 35 g kg⁻¹, assim sendo, doses entre 2,3 – 11,6 kg ha⁻¹ de Si no regime WWD e 1,2 – 11,5 kg ha⁻¹ de Si para o regime MWD proporcionaram teores na faixa do adequados para N.

Os teores de P e K na folha diagnóstica de plantas foram influenciados apenas pelos efeitos isolados de WR e Si ($p < 0,05$). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático nos teores de P e K, para todos os regimes hídricos. Os teores de P máximos em plantas foram de 1,36; 1,16; 1,08 g kg⁻¹ nas doses de 5,5; 5,7 e 6,5 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Maiores teores de P na folha diagnóstica de plantas sob WWD foram observados em todas as doses de Si, em relação às plantas sob SWD (Figura 7c). A faixa adequada do teor de P está entre 1,9 – 3,5 g kg⁻¹, todos os tratamentos estavam a baixo da faixa adequada. Os teores de Si não influenciaram a faixa de teores absorvidos de P.

Os máximos teores de K em plantas foram de 19,1; 18,5 e 18,3 g kg⁻¹ que ocorreram nas doses de 4,3; 5,3 e 5,2 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente para o regime WWD, MWD e SWD. Apenas na dose 0 kg ha⁻¹ de Si o teor de K apresentou diferença significativa, com maior teor na folha diagnose de plantas do regime WWD em relação às plantas sob SWD (Figura 7d). A faixa adequada do teor de K está entre 17 – 30 g kg⁻¹, assim sendo, apenas nas doses superiores a 11,4 kg ha⁻¹ de Si sob regime SWD proporcionaram teores inadequados de K.

Os teores de Ca na folha diagnóstica de milho apresentaram efeitos dos fatores Si e WR ($p < 0,05$), com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si avaliadas. As plantas obtiveram máximos valores nas doses de Si de 6,5; 6,9 e

4,9 kg ha⁻¹, proporcionando teores foliares de Ca máximos de 2,13; 2,70 e 2,69 g kg⁻¹, respectivamente, para plantas sob WWD, MWD e SWD. Nas plantas sob WWD, foi observado menores teores de Ca, em relação às plantas sob MWD e SWD, em todas as doses de Si avaliadas (Figura 7e). A faixa adequada do teor de Ca está entre 2,5 – 6,0 g kg⁻¹, assim sendo, doses entre 1,5 – 8,3 kg ha⁻¹ de Si no regime MWD e 2,1 – 11,8 kg ha⁻¹ de Si para o regime SWD proporcionaram teores adequados de Ca.

Os teores de Mg foram afetados pelos efeitos do fator Si ($p < 0,05$) isolado. As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático nos teores de Mg, para todos os regimes hídrico. As doses de Si de 6,5; 6,2 e 6,5 kg ha⁻¹ aplicadas nas plantas induziram, respectivamente, os teores máximos de Mg de 1,41; 1,52 e 1,36 g kg⁻¹ para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente. Apenas em plantas cultivadas que receberam a dose de 4 kg ha⁻¹ de Si, foi observado diferença no teor de Mg na folha diagnóstica de milho, sendo maior em plantas sob MWD, em relação às plantas sob WWD e SWD (Figura 7f). A faixa adequada do teor de Mg está entre 1,5 – 4,0 g kg⁻¹, assim sendo, doses entre 4,6 – 7,7 kg ha⁻¹ de Si no regime MWD proporcionaram teores adequados de Mg.

Os teores de S na folha diagnose das plantas de milho foram influenciados apenas efeito isolado de WR e Si ($p < 0,05$). Os teores de S apresentaram ajuste polinomial quadrático com as doses de Si. Os máximos teores de S nas plantas foi de 2,16; 1,97 e 1,79 g kg⁻¹ ocorreram nas doses de Si de 6,2; 6,5 e 6,7 kg ha⁻¹ para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente.

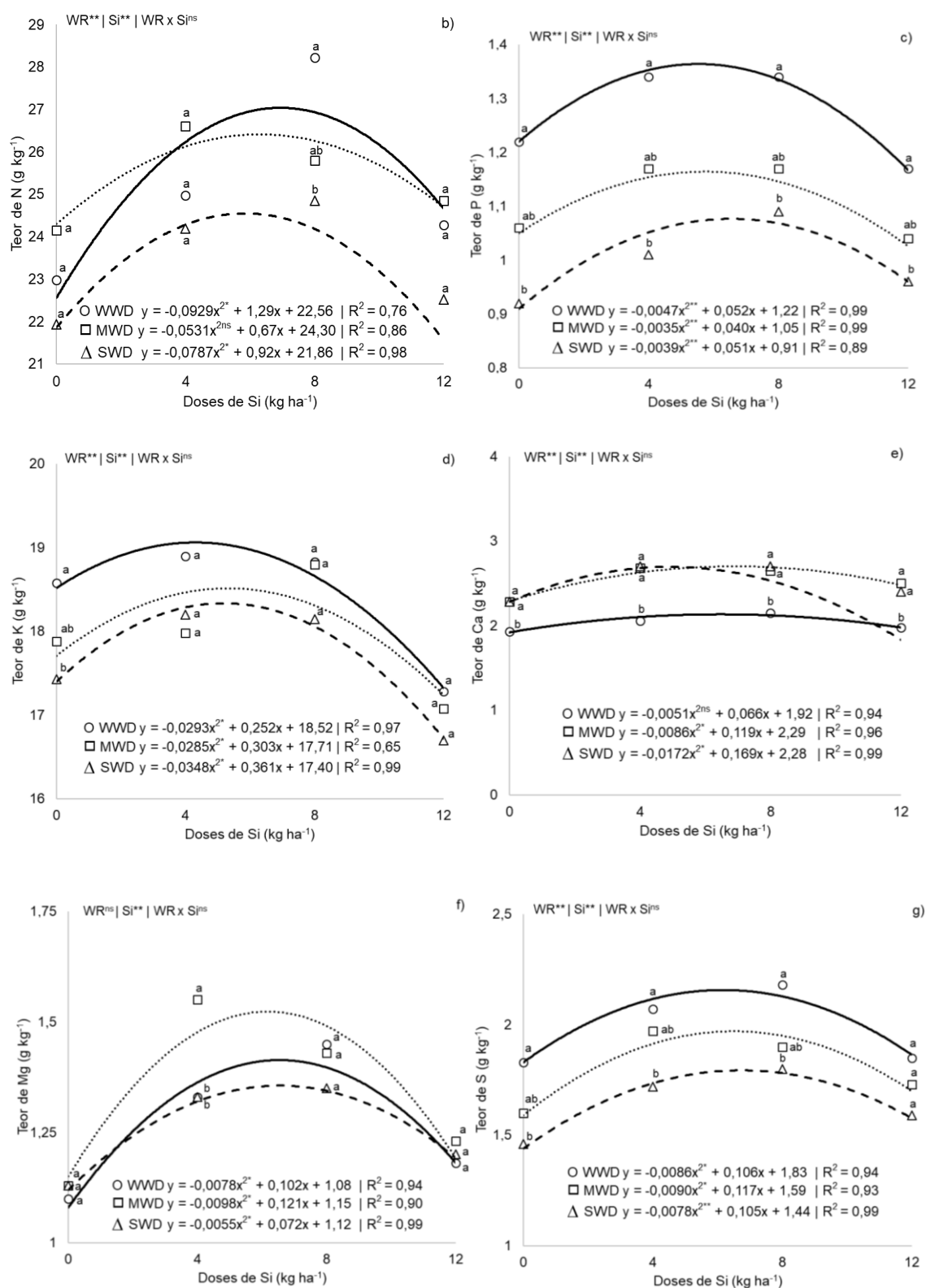


Figura 7. Teores de (N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f) e S (g)) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F

Nas doses de 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si fornecidas, proporcionaram maiores teores de S em plantas sob WWD, em relação às sob SWD (Figura 7g). A faixa adequada do teor de S está entre 1,5 – 3,0 g kg⁻¹, assim sendo, apenas nas doses inferiores a 0,6 kg ha⁻¹ de Si sob regime SWD proporcionaram teores inadequados de S.

Os teores de Fe foram influenciados apenas pelo efeito isolado Si ($p < 0,05$) com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si dos regimes. Os teores de Fe máximos foram de 165,66; 183,15 e 179,91 mg kg⁻¹ nas doses de Si de 6,2; 6,7 e 6,4 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. O fornecimento de Si na dose de 4 kg ha⁻¹ do regime WWD, proporcionou teor de Fe menor em relação aos obtidos em plantas sob MWD e SWD (Figura 8a). A faixa adequada do teor de Fe está entre 70 – 200 mg kg⁻¹, assim sendo, todas as doses de silício proporcionaram teores adequados de Fe. Os teores de Si não influenciaram a faixa de teores absorvidos de Fe.

Os teores de Mn foram influenciados pelo efeito isolado WR e Si ($p < 0,05$) com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si dos regimes. Os teores de Mn máximos foi de 33,40; 41,26 e 48,30 mg kg⁻¹ foram alcançados nas doses de 6,7; 6,2 e 7,3 kg ha⁻¹ Si de kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. O teor de Mn em plantas sob SWD foram maiores aos obtidos nas plantas sob WWD em todas as doses de Si (Figura 8b). A faixa adequada do teor de Mn está entre 40 – 100 mg kg⁻¹, assim sendo, doses entre 3,0 – 9,3 kg ha⁻¹ de Si no regime MWD e superiores a 1,0 kg ha⁻¹ de Si para o regime SWD proporcionaram teores adequados de Mn.

Os teores de Zn foram influenciados pelo efeito isolado WR ($p < 0,05$) e Si ($p < 0,01$) com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si dos regimes. Os máximos teores de Zn em plantas foram de 31,69; 35,92 e 39,29 mg kg^{-1} nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD, ocorreram respectivamente nas doses de Si de 5,3; 5,3 e 6,2 kg ha^{-1} . O teor de Zn em plantas sob SWD foram maiores aos obtidos nas plantas WWD, em todas as doses de Si (Figura 8c). A faixa adequada do teor de Zn está entre 20 – 50 mg kg^{-1} , assim sendo, todas as doses de silício proporcionaram teores adequados de Zn. Os teores de Si não influenciaram a faixa de teores absorvidos de Zn.

Os teores de Cu foram influenciados apenas pelo efeito isolado Si ($p < 0,05$) com ajuste polinomial quadrático para as doses de Si dos regimes. Os teores máximos de Cu em plantas foram 14,19; 13,29 e 14,97 mg kg^{-1} na folha diagnose, e aconteceram quando as plantas receberam as doses de Si de 5,7; 5,3 e 6,3 kg ha^{-1} , nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD. As doses de Si não diferenciaram nos regimes hídricos estudados (Figura 8d). A faixa adequada do teor de Cu está entre 6 – 15 mg kg^{-1} , assim sendo, todas as doses de silício proporcionaram teores adequados de Cu. Os teores de Si não influenciaram a faixa de teores absorvidos de Cu.

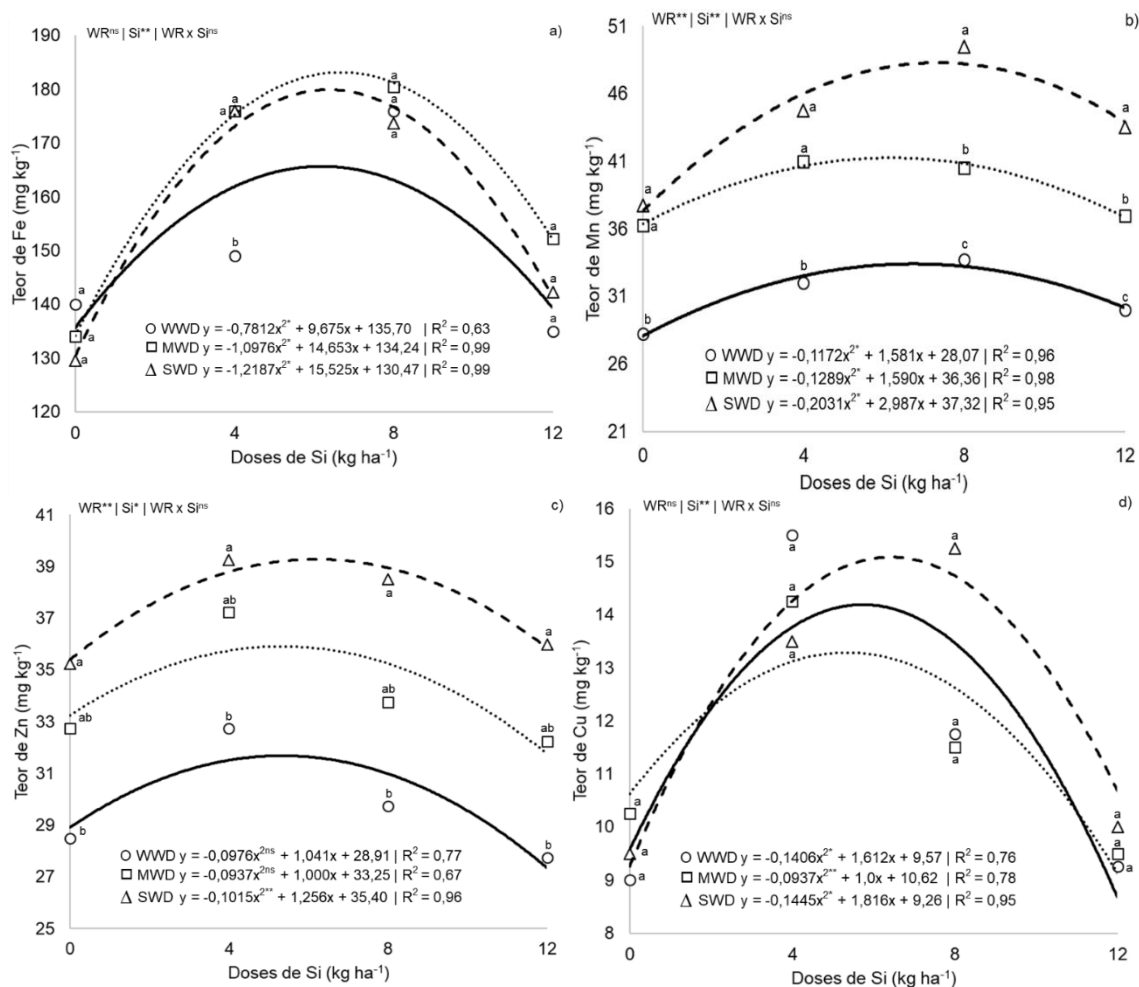


Figura 8. Teores de micronutrientes (Fe (a), Mn (b), Zn (c) e Cu (d)) na folha diagnóstica de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p < 0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a p < 0,01 e p < 0,05, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F

O teor de Si no solo apresentou efeitos da interação entre os fatores WR x Si (p < 0,05). As plantas cultivadas apresentaram ajuste polinomial quadrático para o efeito de doses de Si, em todos os regimes hídricos, exceto para SWD. Os máximos teores de Si no solo foram de 4,6 e 4,7 mg dm⁻³, obtidos nas doses de 7,5 e 9,7 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD (Figura 9). O teor de Si no solo aumentou na taxa de 0,0592 mg dm⁻³ para cada kg ha⁻¹ de Si.

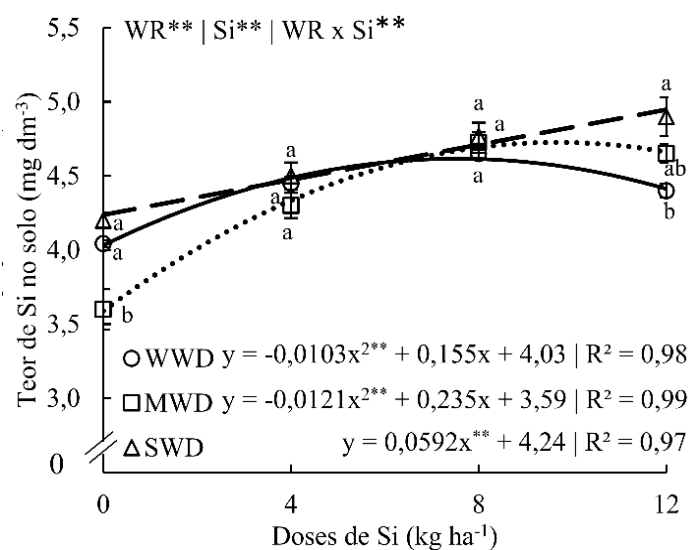


Figura 9. Teor de silício (Si) no solo em área de milho cultivado sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a $p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F.

Comparando os teores de Si no solo e na planta, o no solo apresentou diferença entre os regimes MWD com WWD e SWD na dose 0 kg ha⁻¹ de Si e entre WWD com SWD na dose 12 kg ha⁻¹ de Si; já entre as doses de Si no mesmo regime ocorreu em WWD na 12 kg ha⁻¹ com as doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹, e MWD na dose de Si 0 kg ha⁻¹ com 4 e 8 kg ha⁻¹.

Os teores de Si na folha apresentaram diferença nas doses 0 e 12 kg ha⁻¹ de Si com 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si do regime SWD. E entre os regimes hídricos, o regime WWD indicou maior teor de Si na folha que as demais condições hídricas nas quatro doses aplicadas.

Os efeitos isolados de WR e Si ($p < 0,05$) influenciaram a massa de 1.000 grãos nas plantas cultivadas. As doses de Si proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática nos três regimes hídricos. O valor máximo de massa de 1.000 grãos em plantas cultivadas sob WWD foi de 394,6 g na dose de Si de 5,0

kg ha⁻¹. Para o regime hídrico de MWD, o valor máximo obtido foi 382,7 g na dose de Si de 4,9 kg ha⁻¹. Já para o regime hídrico de SWD, foi de 370,9 g na dose de 4,9 kg ha⁻¹ de Si aplicado via fertirrigação (Figura 10a). As doses de Si não diferenciaram nos regimes hídricos estudados.

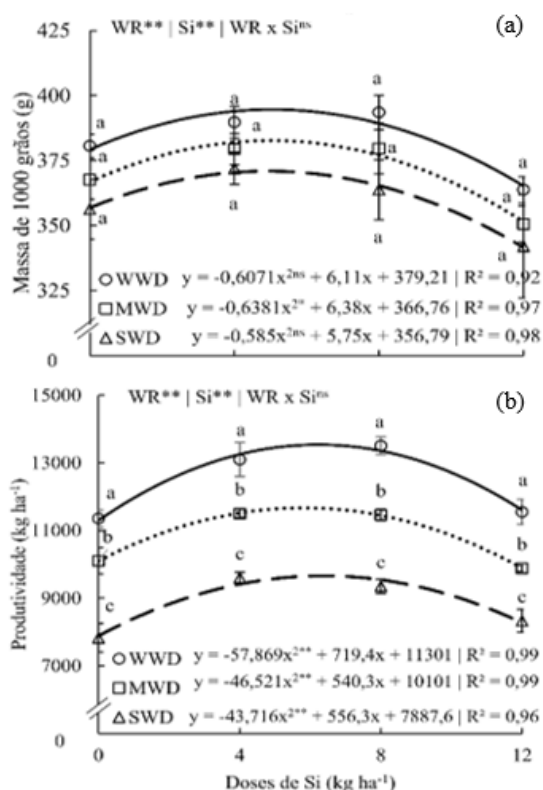


Figura 10. Massa de 1000 grãos (a) e produtividade (b) de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Letras indicam diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p < 0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a p < 0,01 e p < 0,05, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F.

Os efeitos isolados WR e Si (p < 0,05) influenciaram a produtividade. As doses de Si proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática nos três regimes hídricos. As máximas produtividades obtidas foram de 13.536,8; 11.669,8 e 9.657,4 kg ha⁻¹, obtidas com as doses de 6,2; 5,8 e 6,4 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 10b). As plantas do regime WWD apresentaram produtividade de grãos superiores às submetidas

aos regimes MWD em todas as doses de Si, que por sua vez foram maiores do que as observadas em plantas sob SWD.

Em resumo, ficou evidenciado que quando as plantas não receberam Si (0 kg ha^{-1} de Si) e sob o regime SWD apresentaram menores teores dos nutrientes (K, Fe, Zn e Cu) no intervalo de adequado, e em relação aos demais regimes quando comparado as outras doses de Si.

O enriquecimento com Si na dose 4 kg ha^{-1} foi capaz de alterar o status nutricional de N de deficiente para adequado no regime WWD, de N, Ca e Mn no regime MWD, e de Ca, S e Mn no regime SWD. A dose de 8 kg ha^{-1} de Si alterou o status de N de deficiente para adequado no regime WWD, de N, Ca e Mn para o MWD e de Ca, S e Mn no SWD. A dose de 12 kg ha^{-1} de Si induziu status de deficiente para o nutriente K em SWD.

Estes efeitos demonstram que a deficiência hídrica limita a absorção de nutrientes de forma tão drástica que induz alteração do status nutricional causando desbalanço nutricional causando deficiência. Isto ocorre devido a necessidade de água para condução e absorção de nutrientes (Paz, 2000).

O Si por sua vez, demonstra efetivo em melhorar a absorção da maioria dos macronutrientes (N, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu) em plantas de milho, melhorando o status nutricional, sendo uma ferramenta útil para os cultivos de milho. Isto acontece pelo fato do Si poder aumentar crescimento radicular, fato comprovado em milho (Besharat et al., 2020), melhorando a absorção de água (Teixeira et al., 2020b), fato observado neste estudo pela melhoria da condição hídrica das plantas, e conseqüentemente, aumenta a

absorção de nutrientes (Ibrahim et al., 2020). Contudo, neste trabalho demonstrou-se que a melhoria nutricional proporcionada pelo Si foi expressiva ao ponto de retirar as plantas da condição de deficiência nutricional para a maioria dos nutrientes.

Neste sentido, conclui-se que as doses de 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si foram capazes de melhorar o rendimento produtivo do milho nos diferentes regimes hídricos, principalmente em situação de estresse. Destaca-se que, se comparado às doses 0 e 4 kg ha⁻¹ de Si do regime MWD, há um incremento na produtividade superior a 1.400 kg ha⁻¹, comprovando a expressiva resposta da planta nesta condição de Si.

As plantas cultivadas sob regime WWD apresentou a melhor resposta em dose compreendida entre 4,9 a 10,4 kg ha⁻¹ de Si. As plantas cultivadas sob regime MWD indicou a melhor resposta a dose entre 4,9 a 9,7 kg ha⁻¹ de Si. E no regime SWD entre 4,9 a 11 kg ha⁻¹ de Si para todos os parâmetros avaliados. Portanto, indicaram que no intervalo de doses entre 4,9 a 11 kg ha⁻¹ de Si é capaz de promover o melhor desenvolvimento para a planta de milho independentemente do regime hídrico.

A dose ideal para o regime WWD e MWD estão na faixa de 6,2 - 6,5 kg ha⁻¹ de Si, pois a média, moda e mediana das melhores condições das variáveis são: 6,5; 6,5; 6,2, respectivamente, e no regime SWD está na faixa de 6,5 - 6,7 kg ha⁻¹ de Si, pois a média, moda e mediana das melhores condições das variáveis são: 6,7; 6,5; 6,5, respectivamente. Identificando que a dose ideal independe do regime está na faixa de 6,2 – 6,7 kg ha⁻¹ de Si.

No regime WWD, as plantas que estavam na dose de $6,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si obtiveram a maior produtividade de $13.536,8 \text{ kg ha}^{-1}$, apresentavam teores de Si na planta de $7,75 \text{ g kg}^{-1}$ e teores de Si no solo de $4,59 \text{ mg dm}^{-3}$. No regime MWD, as plantas que apresentavam a dose de $5,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si obtiveram a maior produtividade de $11.669,8 \text{ kg ha}^{-1}$, apresentavam teores de Si na planta de $4,7 \text{ g kg}^{-1}$ e teores de Si no solo de $4,55 \text{ mg dm}^{-3}$. Já no regime SWD, as plantas que estavam na dose de $6,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si obtiveram a maior produtividade de $9.657,4 \text{ kg ha}^{-1}$, apresentavam teores de Si na planta de $4,26 \text{ g kg}^{-1}$ e teores de Si no solo de $4,62 \text{ mg dm}^{-3}$. Desta forma, com os teores de Si na planta de $4,26$ a $7,75 \text{ g kg}^{-1}$ e teores de Si no solo entre $4,55$ a $4,62 \text{ g dm}^{-3}$ é possível obter máxima produtividade a depender do regime hídrico.

O Si é um mitigador de danos causados pelo MWD e SWD na cultura do milho irrigado a partir da melhoria do teor de água na planta e do estado nutricional da cultura. O trabalho indicou um incremento na produtividade do milho superior a 1.550 kg ha^{-1} , na dose de $5,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si no tratamento MWD e de 1.750 kg ha^{-1} , na dose de $6,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si no tratamento SWD.

O fornecimento de $5,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si no regime MWD via fertirrigação foi capaz de proporcionar um incremento superior a 350 kg ha^{-1} na produtividade de grão em relação ao regime WWD na dose 0 kg ha^{-1} e diminuir a necessidade hídrica em 20% da capacidade de retenção de água no solo.

5. CONCLUSÃO

A dose de Si ótima para fertirrigação converge para 6,2 a 6,7 kg ha⁻¹ de Si e os teores de Si no solo variam de 4,55 a 4,62 mg dm⁻³ e foliar de 4,26 a 7,75 g kg⁻¹ visando a melhor produtividade na cultura do milho.

O silício é um mitigador de danos causados pelo déficit hídrico por melhorar o potencial hídrico, diminuindo o índice de extravasamento de eletrólitos, melhorando o status nutricional das plantas e potencializando a produtividade.

O fornecimento de 5,8 kg ha⁻¹ de Si via fertirrigação foi capaz de diminuir a necessidade hídrica em 20% da capacidade de retenção de água no solo, incrementando mais de 350 kg ha⁻¹ na produtividade.

REFERÊNCIAS

- Abbas, T., Balal, R.M., Shahid, M.A., Pervez, M.A., Ayyub, C.M., Aqueel, M.A., Javaid, M.M., 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol. Plant.* 37, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5> .
- Adalberto Aragão e Elisio Contini Embrapa Sede 1 -Edição 2022. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/10180/26187851/O+agro+no+Brasil+e+no+mundo/098fc6c1-a4b4-7150-fad7-aaa026c94a40#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20gr%C3%A3os%20em>>. Acesso em: 2 jan. 2024.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage, Roma.
- ALVES BRAGA, Hugo; BALDICERO MOLION, Luiz Carlos. A Seca de 2013/2014 na Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, 2018.
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., Lee, D.J., 2018. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon* 10, 177–183. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x>.
- Amin, M., Ahmad, R., Basra, S.M.A., Murtaza, G., 2014. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. *Pakistan J. Agric. Sci.* 51, 187–196.
- Andrioli, I., Centurion, J.F., 1999. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Anais.

Brasília.

ANA, 2021. Atlas Irrigação: Uso da água na Agricultura Irrigada, 2^a. ed. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília.

Avila, R.G., Magalhães, P.C., da Silva, E.M., de Souza, K.R.D., Campos, C.N., de Alvarenga, A.A., de Souza, T.C., 2021. Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. *Agric. Water Manag.* 255, 107004. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>.

Babiker, A.G.T., Duncan, H.J., 1974. Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. *Weed Res.* 14, 375–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>.

BARROS, José FC; CALADO, José G. A cultura do milho. 2014.

Barrs, H., Weatherley, P., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 15, 413–428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>.

Base.digital. Milho, a evolução de uma cultura milenar. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/noticias/milho-a-evolucao-de-uma-cultura-milenar/#:~:text=A%20origem%20do%20milho>>.

Bataglia, O.C., Furlani, A.M.C., Teixeira, J.P.F., Furlani, P.R., Gallo, J.R., 1983. Métodos de análise química de plantas (No. 78). Campinas.

Besharat, S., Barão, L., Cruz, C., 2020. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. *J. Environ. Manage.* 263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>.

Birchall, J.D., 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chem. Soc. Rev.* 24, 351–357. <https://doi.org/10.1039/CS9952400351>.

Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimovi, V., 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant Physiol. Biochem.* 74, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.015>.

Boaretto, L.F., Carvalho, G., Borgo, L., Creste, S., Landell, M.G.A., Mazzafera, P., Azevedo, R.A., 2014. Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. *Plant Physiol. Biochem.* 74, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>.

Bodner, G., Nakhforoosh, A., Kaul, H.P., 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 401–442.

<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>.

- BUCHELT, Antonio Carlos. Silício na mitigação de deficiência nutricional e formas de aplicação via fertirrigação e foliar em plantas forrageiras. 2019.
- Camargo, O.A. de, Moniz, A.C., Jorge, J.A., Valadares, J.M.A.S., 1986. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Instituto Agronômico de Campinas - IAC, Campinas.
- Cantarella, H. et al. Boletim 100: Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo. 2022.
- Cantarella, H., Raij, B. van., Camargo, C.E.O., 1997. Cereais, in: Raij, B. van., Cantarella, H., Quaggio, J.A., Furlani, A.M.C. (Eds.), Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo. Boletim Técnico, 100, Campinas, pp. 45–47.
- Cardozo, N.P., de Oliveira Bordonal, R., La Scala, N., 2018. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *J. Clean. Prod.* 204, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.
- Cassel, Júlia Letícia et al. Benefícios da aplicação de silício em plantas. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021.
- César, P. et al. Fisiologia da Produção de Milho. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/490408/1/Circ76.pdf>>.
- Coelho, Antonio Marcos. Nutrição e adubação do milho. 2006.
- Coelho, E.F.; Costa, E.L; Borges, A.L.; Neto, T.M.A.; Pinto, JM. Fertirrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.31, n.259, p.58-70, nov/dez, 2010.
- Conab - Safra Brasileira de Grãos. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>.
- Da Silva Sandim, Aline et al. Doses de silício na produtividade do milho (*Zea mays* L.) híbrido simples na região de Campo Grande–MS. *Revista Cultivando o Saber*, v. 3, n. 1, p. 171-178., 2010.
- De Mello Prado, Renato. Nutrição de plantas. Editora Unesp, 2021.
- De Sousa Araújo, Vinícius et al. 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, p. e25711528051-e25711528051, 2022.
- Dionisio-Sese, M. L., & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/S0168->

9452(98)00025-9.

- DO NASCIMENTO, FABIO NUNES et al. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 167-181, 2015.
- Doncheva, S., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M., Barceló, J., 2009. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environ. Exp. Bot.* 65, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.11.006>.
- Dos Santos Sarah, Marcilene Machado et al. O silício fornecido através das raízes ou folhas alivia a deficiência de potássio nas plantas de milho. *Silício*, pág. 1-10, 2021.
- Duarte, A.P.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Milho para grãos e silagem. In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Junior, D.; Boaretto, R.M.; Raij, B van. *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2022. p.199-200.
- Epstein, E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 91, 11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>.
- Escassez de chuvas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil leva a alerta de emergência hídrica. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/escassez-de-chuvas-nas-regioes-sul-e-sudeste-do-brasil-leva-a-alerta-de-emergencia-hidrica/>>. Acesso em: 5 jan. 2024.
- FERREIRA, Patrícia Messias. Silício via fertirrigação mitiga os efeitos da toxicidade de cobre aplicado via semente em plantas de soja. 2022.
- Firouzabadi, A.G., Baghani, J., Jovzi, M., Albaji, M., 2021. Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. *Agric. Water Manag.* 251, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868>.
- Freitas, Lucas Barbosa de et al. Adubação foliar com silício na cultura do milho. *Revista Ceres*, v. 58, p. 262-267, 2011.
- Frew, A., Weston, L. A., Reynolds, O. L. & Gurr, G. M. (2018). The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, 121(7), 1265– 1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>.
- GONZALEZ-PORRAS, Carlos Vital. Silício via fertirrigação, com e sem fertilização potássica sob três regimes hídricos em campo, na mitigação de estresses fisiológicos em feijoeiro. 2024.
- Ibrahim, M.F.M., El-Samad, G.A., Ashour, H., El-Sawy, A.M., Hikal, M., Elkelish, A., El-Gawad, H.A., El-Yazied, A.A., Hozzein, W.N., Farag, R., 2020.

- Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081212>.
- Importância Socioeconômica - Portal Embrapa . <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica>. Acesso em 2 de janeiro de 2024.
- IPCC. IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>.
- IRRI, 1993. Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
- Kaneko, Flávio Hiroshi et al. Estudo de caso-Análise econômica da fertirrigação e adubação tratorizada em pivos centrais considerando a cultura do milho. *Agrarian*, v. 5, n. 16, p. 161-165, 2012.
- Katz, O., Puppe, D., Kaczorek, D., Prakash, N.B., Schaller, J., 2021. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants* 10, 1–36. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods, in: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph, pp. 635–662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.
- Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Nolla, A., 2004. Análise de silício no solo, planta e fertilizantes, 2nd ed. UFU, Uberlândia.
- Kraska, J.E., Breitenbeck, G.A., 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41, 2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., 2015. Silicon in Agriculture, *Silicon in Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>.
- Liu, J.M., Han, C., Sheng, X.B., Liu, S.K., Qi, X. 2011. Potassium-containing silicate fertilizer: its manufacturing technology and agronomic effects. Oral presentation at 5th International Conference on Silicon in Agriculture; September 13–18, Beijing.
- Magalhães, P. et al., 2006. Fisiologia do Milho. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/15589/1/Circ_22.pdf>.
- MALDANER, Luciano J. et al. Exigência agroclimática da cultura do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 13-23,

2014.

- Martineau, E., Domec, J.C., Bosc, A., Dannoura, M., Gibon, Y., Bénard, C., Jordan-Meille, L., 2017. The role of potassium on maize leaf carbon exportation under drought condition. *Acta Physiol. Plant.* 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2515-5>.
- Marques, D.J., Bianchini, H.C., Maciel, G.M. *et al.* Morphophysiological Changes Resulting from the Application of Silicon in Corn Plants Under Water Stress. *J Plant Growth Regul* 41, 569–584 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10322-5>.
- Mauad, M. *et al.* Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 867-873, 2003.
- Mendonça, F.C.; Mantovani, E.C. Análise econômica da utilização da fertirrigação na cafeicultura na região de Araguari-MG. *Anais do Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, p.462-470, 2001.
- Menegaldo, J. G. A importância do milho na vida das pessoas. 2011.
- MIRANDA, Priscila Silva *et al.* Aplicação de silício na cultura do milho. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2018.
- Mitani, N., Jian, F.M., Iwashita, T., 2005. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Physiol.* 46, 279–283. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>.
- MOTA, Natalia Carneiro Juliano da. Efeito da aplicação foliar de silício na fisiologia e na qualidade da produção da casta Touriga Francesa–Douro Superior. 2023.
- Oliveira Filho, A.S.B. De, Mello, R. De, Teixeira, G.C.M., Rocha, A.M.S., Souza Junior, J.P. de, Piccolo, M. de C., Rocha, J.R., 2021. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C: N: P stoichiometry and its use efficiency. *Agric. Water Manag.* 255, 107006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>.
- Oliveira, Kamilla Silva. Respostas de cana-de-açúcar e de cana-energia à aplicação de manganês com silício via radicular e foliar. 2022.
- Paim, Lilian Aparecida *et al.* Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. *Química Nova*, v. 29, p. 28-33, 2006.
- Pavlovic, J., Samardzic, J., Maksimovi, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K.H., Hansen, T.H., Husted, S., Schjoerring, J.K., Liang, Y., Nikolic, M., 2013. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytol.* 198, 1096–1107.

<https://doi.org/10.1111/nph.12213>.

- Paz, Vital Pedro da Silva; Teodoro, Reges Eduardo Franco; Mendonça, Fernando Campos. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, p. 465-473, 2000.
- Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., Zhou, W.J., 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J. Plant Growth Regul.* 29, 106–115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>.
- PEREIRA, Rodrigo Moura et al. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. *Irriga*, v. 1, n. 2, p. 149-157, 2015.
- Pereira de Albuquerque, P.; Resende, M.; AGR, E. Cultivo do milho. Manejo de Irrigação. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/487012/1/Com47.pdf>>. Acesso em: 4 jan. 2024.
- Peris-Felipo, F.J., Benavent-Gil, Y., Hernández-Apaolaza, L., 2020. Silicon beneficial effects on yield, fruit quality and shelf-life of strawberries grown in different culture substrates under different iron status. *Plant Physiol. Biochem.* 152, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.026>.
- PIRES, Marcel V. et al. Percepção de produtores rurais em relação às mudanças climáticas e estratégias de adaptação no estado de Minas Gerais, Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 37, n. 4, p. 431-440, 2014.
- Plantio de milho safrinha: conceitos, época de semeadura e ciclo. Disponível em: <<https://sementesbiomatrix.com.br/blog/safrinha/plantio-de-milho-safrinha/#:~:text=Materiais%20superprecoce%20completam%20o%20seu>>.
- Raij, B., Andrade, J., Cantarella, H., Quaggio, J., 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. IAC, Campinas.
- Richetti, Alceu; RETORE, Marciana; CECCON, Gessi. Retorno econômico da inserção de *Crotalaria ochroleuca* na sucessão soja-milho safrinha. 2021.
- Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S.A., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M.F., Abbas, F., 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 15416–15431. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5305-x>.
- Rocha, J.R., de Mello Prado, R., Teixeira, G.C.M., de Oliveira Filho, A.S.B., 2021. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. *J. Agron. Crop Sci.* 1–13. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>.

- Rodrigues, L. N. et al. Uso eficiente da água na agricultura irrigada: bases para elaboração de estratégias e programas. 2022.
- Sarah, M.M. dos S., Prado, R. de M., Teixeira, G.C.M., Souza Júnior, J.P. de, Medeiros, R.L.S. de, Barreto, R.F., 2021. Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00908-1>.
- Savvas, Dimitrios; Ntatsi, Geórgia. Atividade bioestimulante do silício na horticultura. ↑ *Scientia Horticulturae*, v. 66-81, 2015.
- SILVA, D. J.; FEITOSA FILHO, J. C. Fertirrigação para iniciantes. 2003.
- Silveira, Diógenes Cecchin et al. Caracterização agromorfológica de variedades de milho crioulo (*Zea mays* L.) na região noroeste do Rio Grande do Sul. *Ciência & Tecnologia*, v. 1, n. 1, p. 01-11, 2015.
- Souza Junior, J.P. de, Prado, R. de M., Moraes, T. chagas B. de, Frazão, J.J., Santos Sarah, M.M. dos, Oliveira, K.R. de, Paula, R.C. de, 2021. Silicon fertigation and salicylic acid foliar spraying mitigate ammonium deficiency and toxicity in *Eucalyptus* spp. clonal seedlings. *PLoS One* 16, 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250436>.
- Tecnologia, I. PIB do Agronegócio Brasileiro - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>.
- TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques. Silício na mitigação do déficit hídrico de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar na fase inicial de crescimento. 2018.
- Teixeira, Gelza Carliane Marques et al. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 20, p. 849-859, 2020b.
- Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Oliveira, K.S., D'Amico-Damião, V., da Silveira Sousa Junior, G., 2020a. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 1311–1320. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>.
- Teixeira, G.C.M., Mello Prado, R., Rocha, A.M.S., 2021. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *J. Agron. Crop Sci.* 00, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>.
- Teixeira, G.C.M., Prado, R. de M., Rocha, A.M.S., Piccolo, M. de C., 2020c. Root- and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. *PLoS One* 15, 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>.

- Tubana, B.S., Babu, T., Datnoff, L.E., 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. *Soil Sci.* 181, 393–411. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>.
- Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58, 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>.
- Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., Shahzad, U., Farooq, U., Nawaz, F., 2020. Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. *Plants* 9, 1–11.
- Unesp. Disponível em: <<https://www.fcav.unesp.br/#>>.
- Vasconcellos, C. A.; Pereira Filho, I. A.; Cruz, J. C. Adubacao para o cultivo do milho verde. 2002.
- Vasconcellos, C. A. et al. Nutrição e adubação do milho visando obtenção do minimilho. 2001.
- Vasanthi, N., Saleena, L.M., Raj, S.A., Vijay, R., Pvt, B., 2014. Silicon in crop production and crop protection - A Review. *Agric. Res. Commun. Cent.* 35, 14–23. <https://doi.org/10.5958/j.0976-0741.35.1.002>.
- Webber, H.A., Madramootoo, C.A., Bourgault, M., Horst, M.G., Stulina, G., Smith, D.L., 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 86, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.012>.
- Woesz, A., Weaver, J.C., Kazanci, M., Dauphin, Y., Aizenberg, J., Morse, D.E., Fratzl, P., 2006. Micromechanical properties of biological silica in skeletons of deep-sea sponges. *J. Mater. Res.* 21, 2068–2078. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0251>.
- Yoshida, S., 1965. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. Ser. B* 15, 1–58.