

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

**SILÍCIO NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO FOTOSSISTEMA II E NA
PRODUÇÃO DE BIOMASSA EM PLANTA DE PIMENTÃO
CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA COM DEFICIÊNCIA E
SUFICIÊNCIA DE CÁLCIO**

Wagner Fernandes dos Santos

Jaboticabal – SP

2025

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

**SILÍCIO NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO FOTOSSISTEMA II E NA
PRODUÇÃO DE BIOMASSA EM PLANTA DE PIMENTÃO
CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA COM DEFICIÊNCIA E
SUFICIÊNCIA DE CÁLCIO**

Wagner Fernandes dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal como parte das exigências para graduação em Engenharia Agrônômica

Jaboticabal - SP

2 / 2025

S237s

Santos, Wagner

Silício na eficiência quântica do fotossistema II e na produção de biomassa em planta de pimentão cultivado em solução nutritiva com deficiência e suficiência de cálcio /

Wagner Santos. -- Jaboticabal, 2025

45 p. : il., tabs.

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

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Milton Costa

1. Capsicum annuum L.. 2. Estresse nutricional. 3. Elemento benéfico. 4. Pigmentos
fotossintéticos. 5. Fluorescência da clorofila a. I. Título.

Wagner Fernandes dos Santos

Silício na eficiência quântica do fotossistema II e na produção de biomassa em planta de pimentão cultivado em solução nutritiva com deficiência e suficiência de cálcio

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.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.S.c Milton Garcia Costa

Área de Concentração: Nutrição de plantas

Data da defesa: 29/10/2025

(x) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 05/11/2025 23:07:07-0300
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
ANTONIO MARCIO SOUZA ROCHA
Data: 06/11/2025 13:07:22-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Antônio Márcio Souza Rocha

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
JOAO VICTOR DA SILVA SANTOS
Data: 06/11/2025 09:01:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

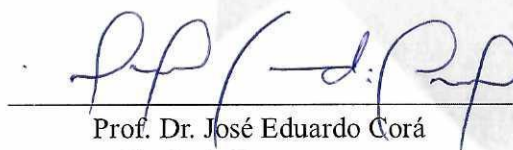
M.S.c. João Victor da Silva Santos

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

06/11/2025

Aprovado Ad Referendum do
Conselho do Departamento



Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

DEDICO

A minha esposa Stefania por todo companheirismo, dedicação e amor. E a família que estamos construindo juntos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante do Espírito Santo em minha vida, guiando e iluminando cada um dos meus passos. À intercessão de Nossa Senhora Aparecida e de São José, meus intercessores junto a Jesus.

À minha esposa, Stefania Fernandes dos Santos, expresso minha profunda gratidão por todo amor e companheirismo. Agradeço por seu incentivo, apoio e, principalmente, por compartilhar comigo o propósito de buscar o céu. Amo você.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos, pelo apoio. Meu sincero agradecimento pelo amor e pela força que sempre me ofereceram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela oportunidade concedida para o desenvolvimento deste trabalho, pela acolhida em sua equipe e pelas orientações que contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu coorientador, o pós-graduando Milton Garcia, registro meu profundo reconhecimento pelo apoio, amparo e orientação. Sua dedicação, disponibilidade e comprometimento foram essenciais para a realização deste trabalho. Um profissional exemplar, inteligente e comprometido, a quem deixo meus sinceros agradecimentos.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP, pela acolhida durante todos esses anos, pelas oportunidades concedidas, pelos momentos vivenciados e por todo o aprendizado e crescimento proporcionados.

Aos amigos que fiz ao longo dessa trajetória, pela alegria compartilhada, pelo companheirismo e pela amizade que permanece.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUÇÃO	10
2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	14
2.1 Importância de plantas de pimentão	14
2.2 Manejo nutricional de cálcio na cultura do pimentão.....	15
2.2.1 Demanda nutricional de cálcio no pimentão	15
2.2.2 Deficiência de cálcio	17
2.3 Silício na vida das plantas	18
2.4 Relação de cálcio e silício nas plantas.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Caracterização experimental e condução experimental	21
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	24
3.3 Análises experimentais	24
3.4 Processamento de dados	26
4 RESULTADOS	26
4.1 Teores de cálcio e de silício em plantas de pimentão.....	26
4.2 Extravasamento de eletrólitos celulares e pigmentos fotossintéticos em plantas de pimentão.....	27
4.3 Eficiência fotoquímica e acúmulo de biomassa em plantas de pimentão	29
5 DISCUSSÃO	31
6 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

RESUMO

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) está entre as principais hortaliças de relevância econômica e social no Brasil, tendo a produtividade e qualidade limitada pela deficiência de cálcio (Ca). A deficiência de Ca provoca estresse oxidativo e compromete o sistema fotossintético, enquanto o silício (Si) atua como mitigador, promovendo melhorias nesse estresse. No entanto, os mecanismos pelos quais o Si atua em plantas de pimentão sob deficiência de Ca ainda são pouco compreendidos. Portanto, objetivou-se avaliar o suprimento de Si em plantas de pimentão submetidas a deficiência de Ca, avaliando seus impactos sobre pigmentos fotossintéticos, eficiência fotoquímica e a produção de biomassa. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação em vasos, em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com duas concentrações de Ca na solução nutritiva (deficiência e suficiência) e duas concentrações de Si (ausência e presença de Si) com 4 repetições; foram avaliados teores de Ca e Si, extravasamento de eletrólitos celulares, pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila a e biomassa das plantas. A deficiência de Ca na planta foi moderada mas diminuiu os teores de pigmentos fotossintéticos e comprometeu a eficiência do fotossistema II e diminuiu a biomassa. A aplicação de Si atenuou os danos oxidativos, preservando os pigmentos e melhorando a eficiência fotoquímica, mas não foi suficiente para incrementar a produção de massa seca possivelmente pelo fato que a deficiência de Ca foi moderada. E curiosamente os efeitos benéficos do Si em plantas com suficiência de Ca favoreceu a estabilidade fotossintética incrementando os teores de pigmentos e a produção de massa seca das plantas de pimentão. A deficiência de Ca compromete aspectos fisiológicos e o crescimento do pimentão, mas o uso do Si se destacou na hortaliça cultivada em solução nutritiva com suficiência de Ca.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L., estresse nutricional, pigmentos fotossintéticos, elemento benéfico, fluorescência da clorofila a.

ABSTRACT

Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) is among the main vegetables of economic and social importance in Brazil, with productivity and quality limited by calcium (Ca) deficiency. Calcium deficiency causes oxidative stress and compromises the photosynthetic system, while silicon (Si) acts as a mitigator, promoting improvements in this stress. However, the mechanisms by which Si acts in bell pepper plants under Ca deficiency are still poorly understood. Therefore, the objective was to evaluate the supply of Si in bell pepper plants subjected to Ca deficiency, assessing its impacts on photosynthetic pigments, photochemical efficiency, and biomass production. The experiment was developed in a greenhouse in pots, in a completely randomized design in a factorial scheme with two concentrations of Ca in the nutrient solution (deficiency and sufficiency) and two concentrations of Si (absence and presence of Si) with 4 repetitions; The study evaluated calcium (Ca) and silicon (Si) levels, cellular electrolyte leakage, photosynthetic pigments, chlorophyll a fluorescence, and plant biomass. Calcium deficiency in the plant was moderate, but it decreased photosynthetic pigment levels, compromised photosystem II efficiency, and reduced biomass. Si application attenuated oxidative damage, preserving pigments and improving photochemical efficiency, but was not sufficient to increase dry matter production, possibly due to the moderate calcium deficiency. Interestingly, the beneficial effects of Si in plants with sufficient calcium favored photosynthetic stability, increasing pigment levels and dry matter production in bell pepper plants. Calcium deficiency compromises physiological aspects and bell pepper growth, but the use of Si stood out in the vegetable cultivated in a nutrient solution with sufficient calcium.

Keywords: *Capsicum annuum* L., nutritional stress, photosynthetic pigments, beneficial element, chlorophyll a fluorescence.

1 INTRODUÇÃO

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é economicamente muito importante (Hernández-Pérez et al., 2020), seu fruto é rico em vitaminas essenciais e antioxidantes (Babellahl et al., 2020). O cultivo do pimentão em estufas a cultura de fatores climáticos adversos, como chuvas, geadas, excesso de sol e ventos que possam causar danos às plantas (Aguiar et al., 2004).

Os polos produtivos recentes localizam-se sobretudo nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, sendo São Paulo responsável por cerca de 27% da produção nacional e, em conjunto com Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro, alcançam 66% do volume produzido (Pedroso; Ferreira, 2023). A base econômica é majoritariamente familiar, sendo na produção paulista, estabelecimentos familiares representam 81% das unidades e 69% do volume, e superam 80% do número de estabelecimentos na Bahia e em Minas Gerais, impulsionando a expansão da área cultivada (Alves, 2006; Pedroso; Ferreira, 2023).

Considerando a importância social e econômica do pimentão, torna-se fundamental avaliar seu crescimento, desenvolvimento e produtividade, os quais podem ser limitados pela deficiência de cálcio.

A principal função do cálcio (Ca) nas plantas é garantir a estabilidade das membranas celulares, regulando sua permeabilidade e participando dos processos de sinalização celular (Prado 2021). O Ca é absorvido pelas plantas na forma iônica (Ca^{2+}) a partir da solução do solo, movendo-se pelas raízes por fluxo de massa e chegando à parte aérea de forma passiva, por meio da corrente de transpiração, esse transporte ocorre de forma unidirecional pelo xilema,

enquanto a redistribuição pelo floema é pouco frequente (Prado, 2021). A maior parte do Ca está localizada no apoplasto (30–40% do total da planta), enquanto a presença no citoplasma é menor, controlada pelo fato de que a maior parte do Ca no vacúolo encontra-se como oxalato de Ca, estabelecendo um equilíbrio de cátions que mantém baixa a concentração citoplasmática (Prado, 2021).

A deficiência de Ca é caracterizada em folhas novas menores com surgimento de manchas necróticas internervais e formas irregulares, com dilaceramento na margem foliar (Prado, 2021). Para a cultura do pimentão, os estudos incipientes sobre os prejuízos biológicos da deficiência de Ca na síntese de pigmentos e na eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), evidenciando a necessidade de novos estudos especialmente em cultivos atuais.

Em sistemas de cultivo protegido, o pimentão pode ser produzido diretamente no solo, modalidade amplamente utilizada por produtores, além de também poder ser conduzido em sistemas sem solo (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018). Diante do exposto, evidencia-se uma lacuna relacionada à deficiência de Ca, especialmente em cultivos conduzidos com extração contínua do nutriente do solo e manejo inadequado da adubação, favorecendo condições propícias ao desenvolvimento dessa carência.

Diante do desafio imposto pela deficiência de Ca, uma estratégia promissora para mitigar seus efeitos em plantas de pimentão é o uso de Si. No entanto, essa hipótese requer confirmação por meio de estudos que avaliem a aplicação de silício e seus possíveis efeitos benéficos sob condições de deficiência de Ca.

O silício (Si) é reconhecido como um elemento benéfico para as plantas, capaz de estimular seu crescimento, embora não seja essencial (Ma e Yamaji, 2006). Entre os principais efeitos positivos do Si, especialmente em plantas submetidas a estresses bióticos ou abióticos, destacam-se a redução da oxidação celular e dos danos decorrentes do estresse (Buchelt et al., 2020; Teixeira et al., 2020).

Pesquisas recentes indicam que a utilização de nanopartículas de Si pode favorecer o metabolismo das plantas em situações de deficiência nutricional, aumentando a eficiência na absorção e no aproveitamento de nutrientes, como carbono, nitrogênio e fósforo (Carvalho et al., 2022; de Faria Melo et al., 2023). O Si em particular, tem se evidenciado por sua capacidade de favorecer o desenvolvimento vegetal, manter a integridade estrutural e potencializar as respostas antioxidantes, inclusive em situações de estresse (Alves et al., 2023).

Adicionalmente, o Si pode melhorar a eficiência fotossintética, aumentando a absorção de luz e protegendo o fotossistema II, fundamental em condições de estresse e em crescimento em condições ótimas (Mathur e Roy, 2020). Apesar de os efeitos benéficos do Si terem sido observados em plantas submetidas a estresse hídrico e carências de N e P (Carvalho et al., 2022), seu efeito em pimentão cultivado sob deficiência de Ca ainda é pouco estudado.

Nesse cenário, torna-se evidente que deficiência de Ca causa prejuízos biológicos irreversível nas plantas de pimentão e o Si pode tornar-se uma estratégia eficiente, portanto, torna-se pertinente testar as hipóteses que (i) a deficiência de Ca provoca a degradação de pigmentos fotossintéticos e a diminuição da eficiência fotoquímica do PSII. E (ii) a aplicação do Si pode atenuar

os danos causados nos pigmentos fotossintéticos e na eficiência fotoquímica do PSII, diminuindo a perda de biomassa e, ainda, (iii) os efeitos do Si não restringue em condições de estresse podendo, extrapolar em condições ótimas de cultivo.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o suprimento de Si em plantas de pimentão sob deficiência de Ca, investigando seus efeitos sobre a concentração de pigmentos fotossintéticos, na eficiência fotoquímica e na produção de biomassa.

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1 Importância econômica e social do cultivo de pimentão

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) pertencente à família Solanaceae, tem origem nas regiões tropicais e úmidas da América Central e do Sul, abrange diversas espécies de pimentas de expressivo valor econômico, entre as quais se destacam *Capsicum annuum* L., *Capsicum frutescens* L. e *Capsicum chinense* J., reconhecidas por seus frutos pungentes (Menichini et al., 2009).

O pimentão pode ser cultivado a céu aberto e em ambiente protegido, sendo que este proporciona maior produtividade por permitir melhor controle das condições ambientais e das práticas de manejo (Melo et al., 2019). Nessa modalidade, a ventilação é manejada para evitar temperaturas superiores a 30–35°C, pois para o seu desenvolvimento a temperatura ótima é entre 18°C e 23°C (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018).

O cultivo de pimentões coloridos em ambiente protegido diminui a exposição dos frutos a condições climáticas desfavoráveis, reduzindo perdas de produtividade e de qualidade, além de possibilitar um aumento de até cinco vezes no valor agregado do produto (Lang et al., 2020). Em ambientes protegidos, o pimentão pode ser cultivado diretamente no solo ou por meio do chamado sistema “sem solo” (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018). O tutoramento vertical, conhecido como sistema “tipo holandês”, favorece a interceptação de luz, sustenta o peso dos frutos e reduz problemas fitossanitários (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018).

O levantamento dos estabelecimentos produtores de pimentão no Brasil, com base no Censo Agropecuário de 2017, evidenciou a predominância da

agricultura familiar em pequenos estabelecimentos, com destaque para São Paulo, responsável por 27% da produção nacional, e para os estados da Bahia e Minas Gerais, que juntos concentram cerca de 30% dos estabelecimentos produtores (Pedroso; Ferreira, 2023). A agricultura familiar é determinante na ampliação das áreas de produção, enquanto empreendimentos empresariais garantem o abastecimento de mercados internos e externos (Pedroso; Ferreira, 2023).

No Brasil, o pimentão (*Capsicum annuum* L.) está entre as dez hortaliças de maior importância econômica e social (Henz et al., 2007). A cultura do pimentão destaca-se entre as hortaliças de maior expressão econômica cultivadas em ambiente protegido, situando-se entre as cinco com maior área cultivada no Brasil e em diversos países, em função da elevada produtividade e qualidade dos frutos obtidos nessas condições (Lorentz et. Al., 2002).

2.2 Manejo nutricional de cálcio na cultura do pimentão

2.2.1 Demanda nutricional de cálcio no pimentão

O avanço dos ambientes protegidos tem sido associado ao aumento significativo da produtividade, podendo alcançar até o dobro da obtida em áreas a céu aberto, sobretudo em espécies como o pimentão, reconhecido por sua excelente adaptação a esse sistema (Lúcio et al., 2006). Esse modelo intensivo, caracterizado por ciclos curtos e sucessivos em áreas reduzidas, promove elevada extração de macro e micronutrientes em intervalos estreitos de tempo (Hochmuth; Mylavarapu; Hanlon, 2015). No entanto, essa intensidade acelera o esgotamento da fertilidade natural do solo, especialmente em estufas, onde o

cultivo sequencial, frequentemente sem rotação adequada, favorece a salinização, os desequilíbrios nutricionais e a degradação física e biológica (Valarini *et al.*, 2011).

Em condições de fertirrigação, observaram ordens distintas de concentração de macronutrientes: $N > K > Cl > Mg > Ca > P > S > Na$ nas folhas e $K > N > Cl > P > Ca > S > Mg > Na$ nos frutos (Albuquerque *et al.*, 2012). A absorção média de macronutrientes pelo pimentão ocorre, em geral, na ordem decrescente $K > N > Ca > Mg > S > P$ na parte aérea; essa hierarquia pode oscilar ao longo do ciclo e entre sistemas de cultivo, sem alterar a predominância de K e N, a exigência relativa varia com estágio fenológico, cultivar, ambiente e manejo da fertirrigação (Sediyama *et al.*, 2009; Braga; Marouelli, 2017).

Ao longo do ciclo, as concentrações médias de Ca atinge $12,8 \text{ g kg}^{-1}$ em plantas de pimenta sob fertirrigação (Marcussi, 2005). Em folhas, órgãos de alta transpiração, o acúmulo é expressivo, enquanto nos frutos há maior concentração nos estádios iniciais, seguida de diluição conforme aumenta a massa, o que pode resultar em desequilíbrio entre aporte e demanda (Marcussi, 2005).

O contato íon raiz para o Ca predominantemente ocorre por fluxo de massa, acompanhando o movimento da água no solo em direção às raízes (Epstein; Bloom, 2006). Assim, a disponibilidade hídrica adequada em todas as fases, sobretudo nas reprodutivas, é determinante para o suprimento do nutriente para a planta (Hocking *et al.*, 2016). O déficit hídrico ou alta umidade relativa do ar, que reduzem a transpiração, comprometem a absorção de Ca e

agravam deficiências nas plantas (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018; Campos; Santos; Nacarath, 2021).

2.2.2 Deficiência de cálcio

A deficiência de Ca no pimentão manifesta-se principalmente em distúrbios fisiológicos (Braga, Marquelli e Silva, 2017). O mais recorrente é a podridão apical, causada pela baixa vascularização xilemática da região distal dos frutos em crescimento acelerado (Brandão Filho; Silva; Marquelli, 2018). Esse problema pode ser prevenido com o parcelamento das adubações e maior atenção à fertirrigação nos períodos de florescimento e enchimento dos frutos (Braga, Marquelli e Silva, 2017).).

A deficiência de Ca no pimentão expressa-se desde sinais morfofisiológicos até falhas fotoquímicas, surgindo de branqueamento nas folhas evoluindo para necroses em ápices e margens, fragilidade tecidual e redução de crescimento (Silva, 2013). Nos frutos, a deficiência de Ca tem sido associada a alterações fisiológicas que comprometem a firmeza e aumentam a suscetibilidade a desordens e podridões, e prejudicar o desenvolvimento floral e a formação de estruturas reprodutivas (Alves *et al.*, 2009).

No nível mecanístico em ensaios in vivo em solanáceas já foi verificado que o cátion integra o complexo Mn_4CaO_5 do PSII; sua limitação diminui a evolução de O_2 e o transporte de elétrons, derruba F_v/F_m , $\Phi PSII$ e ETR, eleva NPQ e consequentemente diminui o teor de clorofilas e de outros pigmentos (Li *et al.*, 2025; Weng *et al.*, 2022).

2.3 Silício na vida das plantas

O Si constitui cerca de um quarto da crosta terrestre, embora apenas uma pequena fração esteja disponível em formas assimiláveis pelas plantas, sobretudo o ácido monossilícico (H_4SiO_4) dissolvido na solução do solo (Mendes; Souza; Machado, 2011). No pimentão a aplicação de nanopartículas de Si promoveu aumentos na produção de biomassa, pois elevou a eficiência fotossintética, melhorou o balanço hídrico e reduziu danos oxidativos e de membrana causados pela salinidade (Li *et al.*, 2025).

A absorção pode ocorrer de forma passiva, acompanhando o fluxo de massa da água pelo apoplasto, ou de maneira ativa, pela rota simplástica, dependente de transportadores especializados (Mendes, Souza; Machado, 2011). Na via apoplástica, o H_4SiO_4 acompanha a água até a endoderme, onde a barreira de Caspary limita sua progressão e direciona a entrada para o simplasto (Paulilo; Viana; Randi, 2010). Nesse processo, a deposição de Si pode reforçar a barreira endodérmica, funcionando como bloqueio físico adicional ao movimento de íons (Canturário *et al.*, 2014).

A capacidade de acumulação de Si varia amplamente entre espécies vegetais, o que permite classificá-las em acumuladoras ($> 10 \text{ g kg}^{-1}$), intermediárias ($5 - 10 \text{ g kg}^{-1}$) ou não acumuladora ($< 10 \text{ g kg}^{-1}$), de acordo com o teor do elemento nos tecidos e a eficiência de absorção radicular (Queiroz *et al.*, 2013).

Em pimentão, os teores foliares variaram entre 0,21% e 0,55%, valores inferiores ao limiar de 1% estabelecido para plantas acumuladoras, confirmando o enquadramento da espécie no mesmo grupo do tomateiro (Tonin, 2005). Do

ponto de vista agrônomo, isso indica que a adubação silicatada dificilmente gera ganhos expressivos em eudicotiledôneas não acumuladoras, cujas respostas tendem a ocorrer de forma localizada e em cenários de estresse (Tonin, 2005).

Além de participar dos processos de absorção e acúmulo, o Si apresenta relação estreita com a estabilidade funcional do fotossistema II (FSII), notadamente em condições de estresse ambiental (Harizanova; Koleva-Valkova, 2019).

Na alface hidropônica (cv. Lucy Brown), cultivada sob salinidade severa, o Fv/Fm manteve-se acima de 0,80; concomitantemente, o Si reduziu em 30,48% o acúmulo de H₂O₂ e modulou para baixo a atividade antioxidante — peroxidase do ascorbato (−18,80%), peroxidase guaiacol (−31,78%), catalase (−28,14%) e dismutase do superóxido (−44,17%) —, embora sem reflexo em incremento de biomassa fresca ou seca (Lemos-Neto, 2020).

Em *Capsicum annuum* L. tipo chili, Lob *et al.* (2023) conduziram ensaio em fertirrigação com suprimento radicular de Si (0, 108, 180 e 360 ppm). A dose de 360 ppm elevou o diâmetro do caule (8,92 mm), a biomassa seca (67,23 g) e o acúmulo de Si em caule (54 mg kg⁻¹) e frutos (24 mg kg⁻¹); 180 ppm maximizaram altura (20,98 cm), número de folhas (27) e Si foliar (87 ppm) (Lob *et al.*, 2023). Em *Capsicum annuum* tipo pimentão, híbrido Magali-R, Cantuário *et al.* (2014) aplicaram silicato de potássio via foliar sob déficit hídrico e registraram redução da podridão apical, ausência de efeito sobre escaldadura e correlação positiva entre a tensão de água no solo e o número de frutos afetados.

Em condições de contaminação por cádmio e chumbo, a aplicação foliar de Si favorece a recuperação fisiológica e bioquímica das plantas, aumentando o crescimento radicular, a biomassa e os pigmentos fotossintéticos, além de intensificar a atividade antioxidante, reduzir marcadores de estresse oxidativo e limitar a translocação de metais tóxicos (Ansari *et al.*, 2025).

2.4 Relação de cálcio e silício nas plantas

Estudos recentes reforçam que a ação do Si se estende à estabilização de membranas e à redução da peroxidação lipídica, mecanismos que preservam a integridade celular (Irfan *et al.*, 2023). O Si deve ser compreendido como modulador químico do ambiente edáfico e do apoplasto, ampliando a funcionalidade das raízes e fortalecendo a resposta antioxidativa das plantas em condições de estresse (Saja-Garbarz *et al.*, 2024).

O Si, por sua vez, associa-se à celulose e à hemicelulose, sendo depositado como sílica amorfa que reforça a parede celular e amplia a resistência mecânica (Guerriero; Hausman; Legay, 2016).

A deficiência de cálcio, ao reduzir o teor de pectatos de Ca, compromete a formação adequada da parede celular, resultando em deformações foliares e menor produção de matéria seca (Avalhães *et al.*, 2009). Além disso, essa carência desencadeia estresse oxidativo, ocasionando danos às membranas e intensificando o extravasamento de eletrólitos das células (White e Broadley, 2003; Yan *et al.*, 2006).

Evidências de interação positiva entre Si e Ca mostram que o suprimento de Si mitiga os danos da deficiência de Ca, reduz perdas de membrana, eleva o

teor de ácido ascórbico, melhora firmeza e favorece o acúmulo de Ca na parte aérea sob deficiência (Silva *et al.*, 2021).

Diante desse conjunto, programas nutricionais que associem fontes solúveis de Si a fertilizantes de Ca configuram via promissora para eficiência de recursos e robustez fisiológica, com diferentes graus de resposta segundo espécie, genótipo, método de aplicação e ambiente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização experimental e condução experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no departamento de Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP, em Jaboticabal-SP, Brasil, de agosto a outubro de 2023, utilizando a cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.), tipo Lamuyo.

No desenvolvimento do experimento foram monitoradas a temperatura e a umidade relativa do ar diariamente dentro da casa de vegetação por meio de um termo-higrômetro digital com sensor externo. As medições indicaram variações na temperatura do ar ($30,7^{\circ}\text{C} \pm 10,0^{\circ}\text{C}$) e na umidade relativa do ar ($56,6\% \pm 7,0^{\circ}\text{C}$) (Figura 1).

Realizou-se a semeadura de sementes de pimentão em bandejas de polietileno, utilizando fibra de coco inerte como substrato. Após a emergência das plântulas, ocorreu transferência para vasos de polietileno de $1,5 \text{ dm}^3$ contendo areia branca lavada. A areia foi lavada com solução de ácido clorídrico 0,1 M e deixada em repouso por 24 h, depois os vasos foram enxaguados

abundantemente com água deionizada, repetindo-se o processo até que ocorre a diminuição da condutividade elétrica da água drenada ($< 0,010 \text{ mS/cm}$).

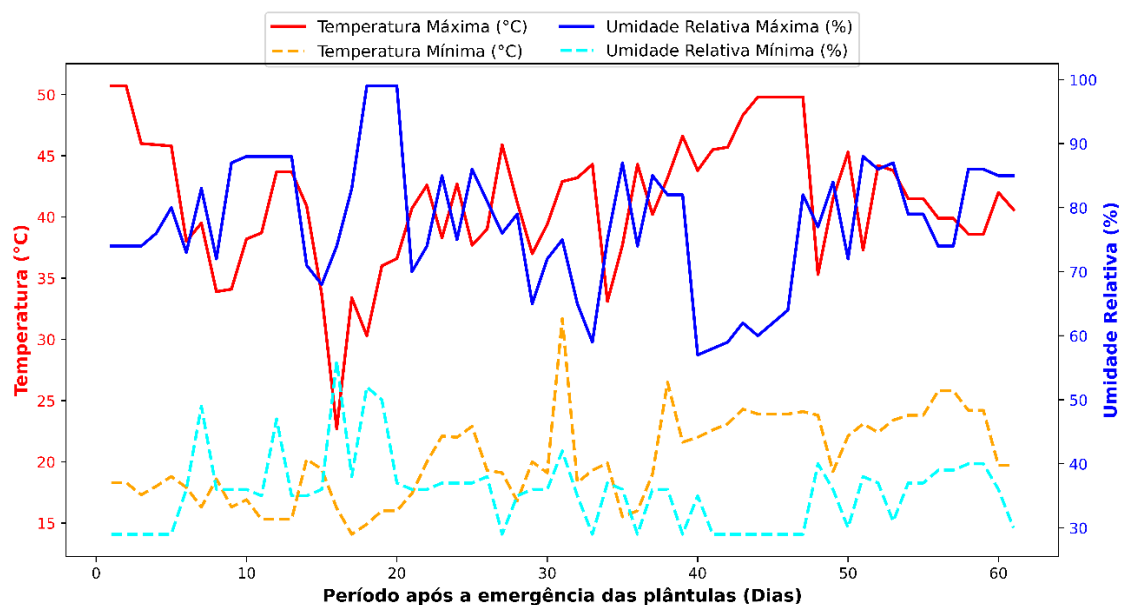


Figura 1. Monitoramento climático do período experimental de cultivo de pimentão sob deficiência e suficiência de Ca combinado suprimento de Si.

Após o transplante das mudas de pimentão, por seis dias receberam apenas água deionizada, após isso foi aplicada gradualmente uma solução nutritiva baseada na fórmula de Hoagland e Arnon (1950) (Tabelas 1 e 2), iniciando com uma concentração de 5% e ajustada progressivamente para 50% ao longo de 20 dias após o transplante. E depois de 27 dias de transplante a solução nutritiva foi ajustada para 60% e manteve assim até o final do experimento. Os vasos foram lavados com água $1500 \pm 250 \text{ mL}$ de água deionizada a cada 7 dias para diminuição da condutividade elétrica da água drenada ($< 0,010 \text{ mS/cm}$).

Tabela 1. Composição de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) para omissão e suficiência de Ca nas diferentes porcentagens de concentrações dos reagentes utilizados durante o experimento

Reagentes	Solução nutritiva de Hoagland and Arnon (1950)							
	5%		20%		50%		60%	
	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca
	mmol L ⁻¹							
KH ₂ PO ₄	0,05	0,05	0,2	0,2	0,5	0,5	0,6	0,6
KNO ₃	0,25	0,25	1	1	2,5	2,5	3,0	3,0
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0,25	0,25	1	1	-	2,5	-	3,0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,1	0,1	0,4	0,4	1	1	1,2	1,2
NH ₄ NO ₃	-	-	-	-	2,5	-	3,0	-
	μmol L ⁻¹							
H ₃ BO ₃	2,31	2,31	9,25	9,25	23,14	23,14	32,39	32,39
MnCl2.4H2O	0,46	0,46	1,83	1,83	4,57	4,57	6,40	6,40
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	38,25	38,25	153	153	382,5	382,5	535,5	535,5
CuCl ₂	14,85	14,85	59,4	59,4	148,5	148,5	207,9	207,9
H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	5,55	5,55	22,20	22,20	55,50	55,50	77,70	77,70
Fe-EDDHA (6% Fe)	4.475	4.475	17.9	17.9	44.75	44.75	62.65	62.65

Tabela 2. Concentração de macronutrientes (mmol L⁻¹) e micronutrientes (μmol L⁻¹) utilizadas nas soluções nutritivas derivadas da formulação de Hoagland e Arnon (1950), ajustadas para diferentes proporções da solução nutritiva (5%, 20%, 50% e 60%) na presença (+Ca) ou ausência (-Ca) de Ca

Nutrientes	Solução nutritiva de Hoagland and Arnon (1950)							
	5%		20%		50%		60%	
	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca	-Ca	+Ca
	mmol L ⁻¹							
N	0,75	0,75	3,00	3,00	7,50	7,50	9,00	9,00
P	0,05	0,05	0,20	0,20	0,50	0,50	0,60	0,60
K	0,30	0,30	1,20	1,20	3,00	3,00	3,60	3,60
Ca	0,50	0,50	2,00	2,00	-	5,00	-	6,00
Mg	0,20	0,20	0,80	0,80	2,00	2,00	2,40	2,40
S	0,20	0,20	0,80	0,80	2,00	2,00	2,40	2,40
μmol L ⁻¹								
B	2,31	2,31	9,25	9,25	23,14	23,14	32,39	32,39
Cl	30,61	30,61	122,46	122,46	306,14	306,14	367,37	367,37
Cu	14,85	14,85	59,40	59,40	148,50	148,50	207,90	207,90
Fe	4,48	4,48	17,90	17,90	44,75	44,75	62,65	62,65
Mn	0,46	0,46	1,83	1,83	4,57	4,57	6,40	6,40
Mo	5,55	5,55	22,20	22,20	55,50	55,50	77,70	77,70
Zn	4,48	4,48	17,90	17,90	44,75	44,75	62,65	62,65

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento seguiu um delineamento bifatorial, compreendendo duas condições Ca (deficiência – 0 mmol L⁻¹ e suficiência – 6 mmol L⁻¹) e aplicação de Si (presença – 2,0 mmol L⁻¹ e ausência – 0 mmol L⁻¹ de Si), com 4 repetições por tratamento, dispostas em um delineamento inteiramente casualizado.

O Si foi disponibilizado sob a forma de nanossílica, apresentando partículas com diâmetro médio entre 8,5 e 9,7 nm, concentração de Si equivalente a 168,3 g L⁻¹, pH inicial de 10,5 e viscosidade de 7 cP. As nanopartículas possuíam área superficial específica de 300 m² g⁻¹ e foram fornecidas em associação à solução nutritiva, a partir do sexto dia após o transplante. O valor do pH da solução foi corrigido em $6,0 \pm 0,5$, mediante ajustes realizados com solução de NaOH 0,1 M L⁻¹ ou HCl 0,1 M L⁻¹, aplicados com conta gota.

3.3 Análises experimentais

As análises realizadas no experimento foram extravasamento de eletrólitos celulares, fluorômetro da clorofila *a*, pigmentos fotossintéticos (clorifila *a* e *b*, carotenoides e feofitinas), produção de biomassa e concentrações de Ca e Si. As avaliações de fluorescência da clorofila foram realizadas 54 dias após o transplante, no período das 7h às 9h, empregando-se um fluorômetro (OS30P+, Opti-Sciences Inc., EUA) aplicado à primeira folha completamente expandida. As variáveis determinadas compreenderam a fluorescência inicial (F_0) e a fluorescência máxima (F_m). A partir desses dados, calcularam-se parâmetros fisiológicos relevantes, tais como a eficiência fotoquímica do fotossistema II ($(F_m - F_0)/F_m$), a eficiência de conversão da energia luminosa $((F_m - F_0)/F_0)$ e o

rendimento máximo de extinção não fotoquímica (F_0/F_m), conforme proposto por Lichtenthaler (1987).

Para a quantificação dos pigmentos fotossintéticos realizadas aos 55 dias após o transplante, foram retirados cinco discos foliares da região mediana da primeira folha totalmente expandida. As amostras foram imediatamente pesadas e submetidas ao processo de extração em solução de acetona a 80% e armazenado em 2 ± 1 °C por 72 horas. A leitura espectrofotométrica foi posteriormente realizada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA), seguindo a metodologia descrita por Dionisio-Sese e Tobita (1998).

Foi realizado o extravasamento de eletrólitos celulares após cinquenta e cinco dias do transplante. Foram retirados da primeira folha totalmente madura dez discos foliares (cada um medindo 26,4 mm²), os mesmos foram submersos em água deionizada por duas horas. Logo depois a condutividade elétrica inicial (CE1) da água foi medida usando um condutivímetro (AK51, AKso, BR). Depois da medição as amostras foram autoclavadas a 121 °C por 20 min. Depois de frio a condutividade elétrica final (CE2) da solução foi novamente mensurada. A porcentagem de vazamento de eletrólitos foi então determinada pela razão CE1 e CE2 e multiplicada por 100 (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

Para a análise da biomassa, foi coletado aos 55 dias após o transplante a parte aérea das plantas e submetidas a lavagens sucessivas em água corrente, solução detergente (0,1%), solução de HCl (0,3%) e água deionizada. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em estufa a 65 ± 5 °C até atingirem massa constante.

Posteriormente, foi realizado a determinação de Ca e de Si na parte aérea das plantas utilizando material seco. A determinação de Ca foi realizada a digestão nitroperclorica e a leitura em espectrofotômetro de chama (Bataglia et al, 1983). A determinação de Si foi realizada pela digestão alcalina e reação colorimétrica amarela com molibdato de amônio em espectrofotômetro óptico (Korndorfer et al., 2004; Kraska and Breitenbeck, 2010).

3.4 Processamento de dados

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software Python (versão 3.9.7). Inicialmente, verificou-se a aderência à normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Em seguida, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando pertinente, procedeu-se às comparações múltiplas por meio do teste de Tukey.

4 RESULTADOS

4.1 Teores de calcio e silicio em plantas de pimentão

A deficiência de Ca, na ausência do suprimento de Si, diminui o teor de Ca na parte aérea (Figura 2a). O suprimento de Si não alterou o teor de Ca na parte aérea em plantas deficientes de Ca e, plantas com suficiência de Ca, houve um aumento no teor de Ca (Figura 2a). O teor de Si, na ausência do suprimento do Si, aumentou com a deficiência de Ca, enquanto a aplicação do Si aumentou o teor deste elemento em plantas deficientes e com suficiência de Ca (Figura 2b).

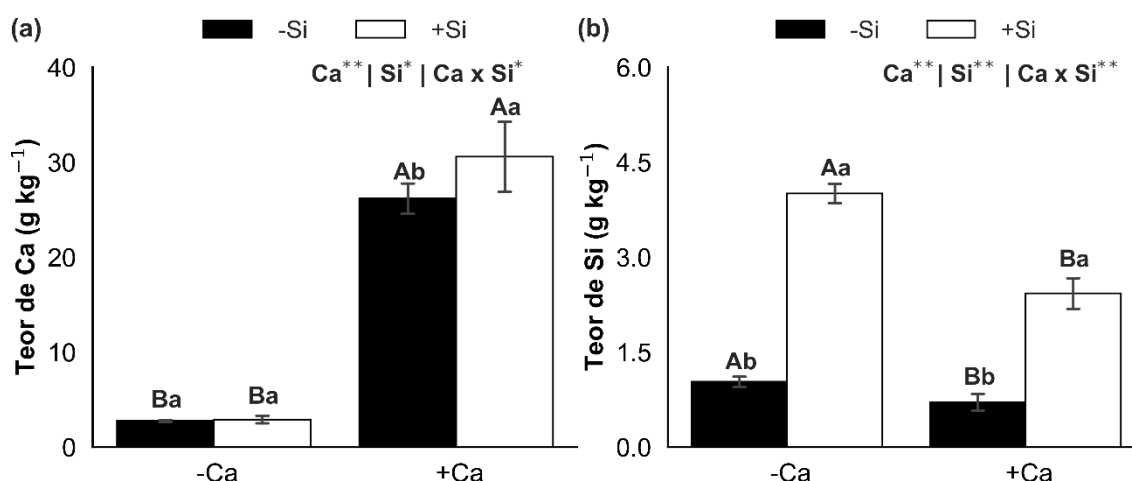


Figura 2. Teores de Ca (a) e de Si (b) na parte aérea de plantas de pimentão cultivada sob deficiência (-Ca) e suficiência de Ca (+Ca) combinado com suprimento de Si (ausência: -Si e presença: +Si). As barras representam a média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$). Letras maiúsculas distintas indicam diferenças significativas entre os níveis de Ca, enquanto letras minúsculas distintas indicam diferenças em relação ao suprimento de Si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Símbolos *, ** e NS indicam diferenças significativas a 5%, a 1% e ausência de significância, respectivamente, pelo teste F.

4.2 Extravasamento de eletrólitos celulares e pigmentos fotossintéticos em plantas de pimentão

A deficiência de Ca aumentou o extravasamento de eletrólitos na ausência de Si (Figura 3a), o que não ocorre nos pigmentos de clorofila, feofitina e carotenoides (Figura 3), os mesmos apresentam resultados de redução nestas condições. Nas condições de deficiência de Ca a presença de Si diminuiu o extravasamento, aumentou clorifla a e b, feoftinas e carotenoides (Figura 3).

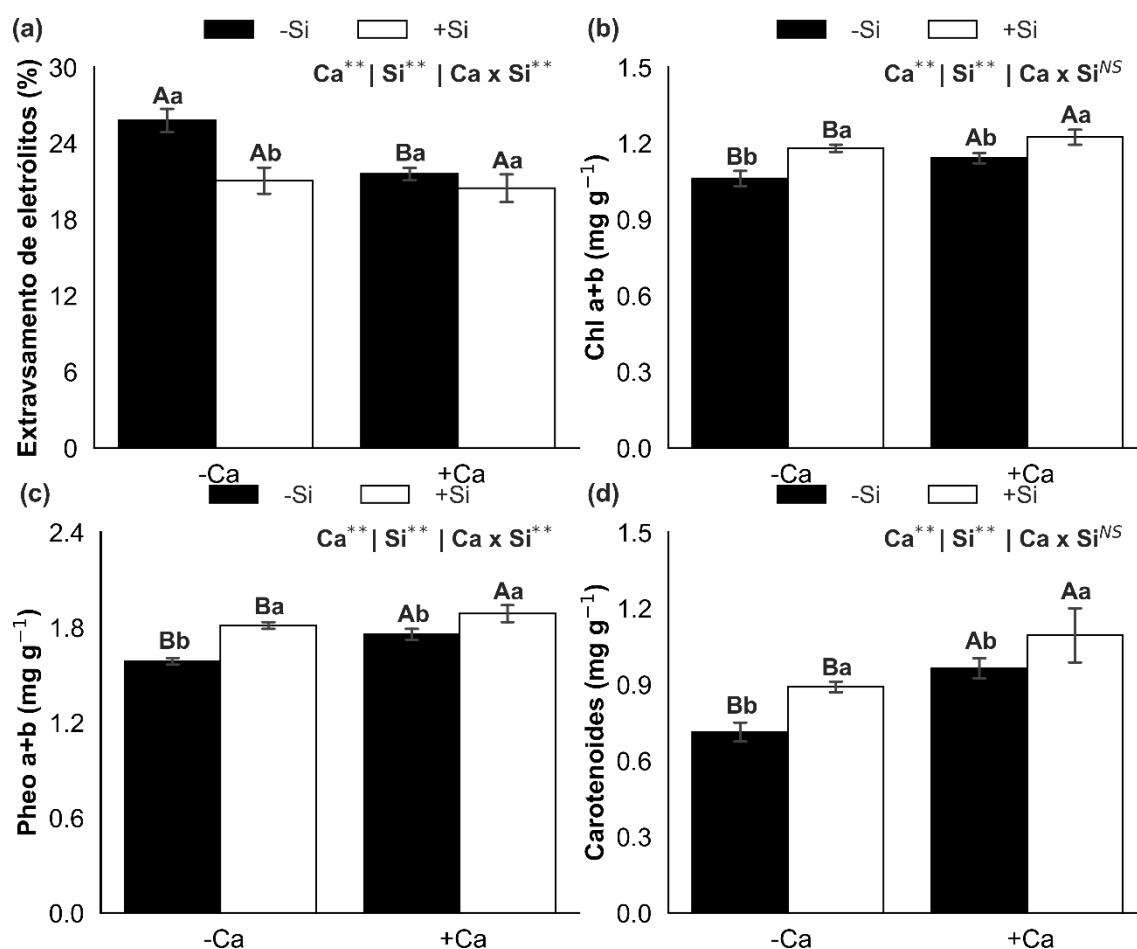


Figura 3. Extravasamento de eletrólitos celulares (a), concentração de clorofila total (b), feofitina total (c) e carotenoides (d) em folhas de plantas de pimentão cultivada sob deficiência (-Ca) e suficiência de Ca (+Ca) combinado com suprimento de Si (ausência: -Si e presença: +Si). As barras representam a média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$). Letras maiúsculas distintas indicam diferenças significativas entre os níveis de Ca, enquanto letras minúsculas distintas indicam diferenças em relação ao suprimento de Si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Símbolos *, ** e NS indicam diferenças significativas a 5%, a 1% e ausência de significância, respectivamente, pelo teste F.

Em condições de suficiência de Ca, não houve diferença no extravasamento de eletrólitos independente da presença ou ausência de Si (Figura 3a), contudo em relação aos pigmentos de clorofila, feofitina e carotenoides, todos apresentaram resultados superiores na presença de Si (Figura 3).

4.3 Eficiência fotoquímica e acúmulo de biomassa em plantas de pimentão

A fluorescência inicial sob efeito de deficiência de Ca, na ausência de Si, apresentou um aumento, enquanto no suprimento de Si, na deficiência e suficiência do Ca, houve uma diminuição da na fluorescência inicial (figura 4a). No caso da fluorescência máxima, a deficiência de Ca foi reduzida, entretanto, houve aumento da fluorescência máxima na presença de Si (Figura 4b). Em plantas com suficiência de Ca, não houve diferenciação em relação a presença e ausência de Si (figura 4b).

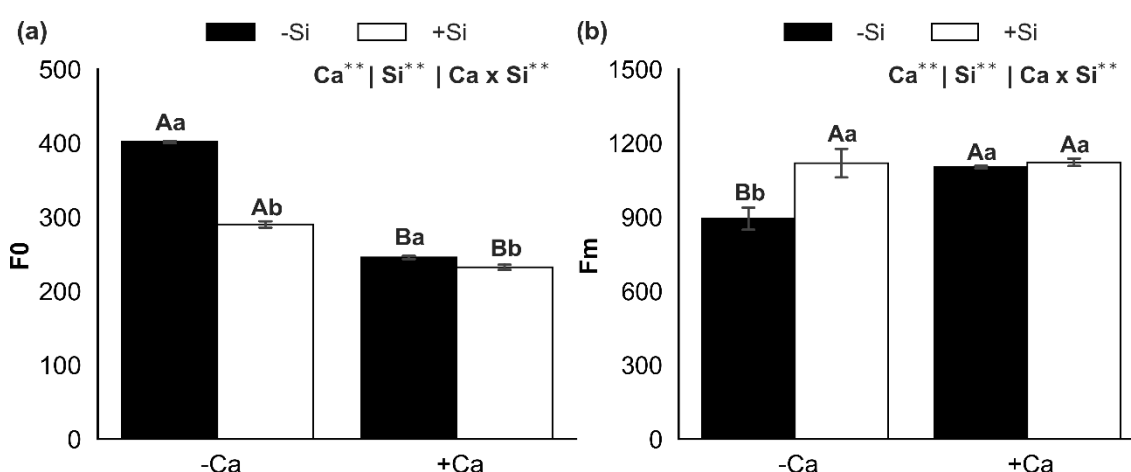


Figura 4. Fluorescência inicial (a) e fluorescência máxima (b) da clorofila a folhas de plantas de pimentão cultivada sob deficiência (-Ca) e suficiência de Ca (+Ca) combinado com suprimento de Si (ausência: -Si e presença: +Si). As barras representam a média $\pm$ desvio padrão (n = 4). Letras maiúsculas distintas indicam diferenças significativas entre os níveis de Ca, enquanto letras minúsculas distintas indicam diferenças em relação ao suprimento de Si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Símbolos *, ** e NS indicam diferenças significativas a 5%, a 1% e ausência de significância, respectivamente, pelo teste F.

A eficiência quântica do fotossistema II, na deficiência de Ca, reduziu em comparação à suficiência de Ca (Figura 5a). E relação ao suprimento de Si, aumentou a eficiência quântica do fotossistema II em plantas deficientes de Ca, entretanto não houve diferença em plantas com suficiência de Ca (Figura 5a). Para eficiência da conversão de energia absorvida houve diminuição provocado

pela deficiência de Ca, entretanto, a aplicação do Si incrementou a eficiência de conversão de energia absorvida em plantas deficientes e com suficiência de Ca (Figura 5b).

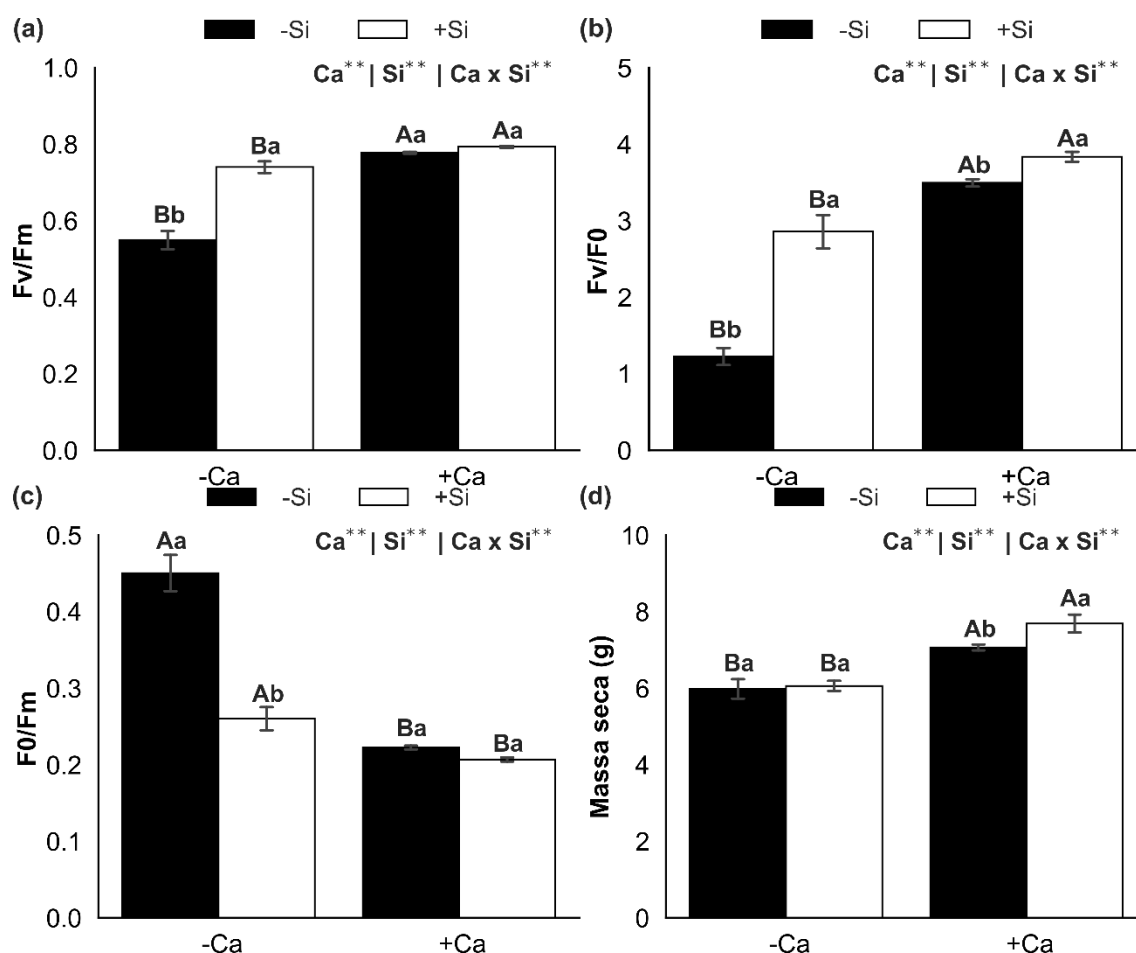


Figura 5. Eficiência quântica do fotossistema II (a), eficiência de conversão de energia absorvida (b), rendimento máximo não fotoquímico (c) e massa seca da parte aérea (d) em plantas de pimentão cultivada sob deficiência (-Ca) e suficiência de Ca (+Ca) combinado com suprimento de Si (ausência: -Si e presença: +Si). As barras representam a média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$). Letras maiúsculas distintas indicam diferenças significativas entre os níveis de Ca, enquanto letras minúsculas distintas indicam diferenças em relação ao suprimento de Si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Símbolos *, ** e NS indicam diferenças significativas a 5%, a 1% e ausência de significância, respectivamente, pelo teste F.

A deficiência de Ca aumentou o rendimento máximo não fotoquímico, entretanto a aplicação do Si melhorou o rendimento máximo não fotoquímico em plantas deficientes de Ca, entretanto, não houve resposta significativa para plantas com suficiência de Ca (Figura 5c). Em relação a produção de biomassa, houve a

diminuição em plantas deficiente de Ca, enquanto a aplicação do não alterou a massa seca em plantas deficientes de Ca e, em plantas com suficiência de Ca, houve incremento na biomassa na presença do Si (Figura 5d).

5 DISCUSSÃO

Os prejuízos da deficiência de Ca é pouco estudada e compreendido na vida das plantas de pimentão. Os resultados deste estudo demonstraram que plantas de pimentão cultivada em baixo suprimento de Ca apresentaram diminuição dos teores de Ca na parte área (Figura 2a), conseqüentemente isso provocou um aumento do estresse oxidativo e do extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 3a). A deficiência de Ca aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), gerando estresse oxidativo, provocando danos às membranas e aumentando o vazamento de eletrólitos celulares (White e Broadley, 2003; Yan et al., 2006).

O acúmulo elevado de espécies reativas de oxigênio (ROS), durante o estresse, provoca peroxidação lipídica das membranas e aumento do vazamento de eletrólitos, ambos reconhecidos como indicadores confiáveis de estresse oxidativo (El-Sappah et al., 2021). Porém, verificou-se que o extravasamento de eletrólitos na presença de Si, foi menor em plantas deficientes de Ca, fato também observado em plantas com suficiência de Ca. Isso evidencia que os benefícios do Si extrapolam as condições estressantes, como provado nos resultados deste estudo.

Esse resultado pode estar associado à suplementação de Si, a qual promove a diminuição do acúmulo de espécies reativas de oxigênio (Barreto et al., 2017), conseqüentemente atenuando o estresse oxidativo. O acúmulo de

antioxidantes contribui para a melhoria do estado fisiológico das plantas e, consequentemente, para a redução do extravasamento de eletrólitos nas células (Silva et al., 2021).

No espinafre, foi relatado que a privação de Ca inibiu expressivamente a formação de clorofila (Chao *et al.*, 2008), portanto podemos inferir sobre a deficiência de Ca afeta pigmentos fotossintetizantes. Isso ficou claro nos resultados apresentados neste estudo (Figura 3b, 3c e 3d), nas quais os teores de clorofila, feofitina e carotenoide são inferiores em plantas deficientes de Ca e, paralelamente, o aumento do estresse oxidativo pode levar a degradação de pigmentos fotossintéticos nas plantas (Kumar *et al.*, 2023). Enquanto na presença do Si em plantas deficientes e com suficiência de Ca, observou-se um aumento dos teores de clorofila, feofitina e carotenoides (Figuras 3b, 3c e 3d). O Si diminui a quantidade de espécies reativas de oxigênio (Barreto, et al., 2017) e como consequência à redução do dano oxidativo no aparato fotossintético das plantas. Em plantas de trigo sob a deficiência de Ca, o Si demonstrou aumentar a produção de antioxidantes (Ma et al., 2016), melhorando a capacidade das plantas a responder as condições estressantes.

A fluorescência da clorofila *a* pode revelar informações relevantes o balanço entre uso fotoquímico da energia e sua dissipação no aparato fotossintético (Krause e Jahns, 2004). Dessa forma, em folhas adaptadas ao escuro, F_o e F_m são parâmetros-base a partir dos quais se calcula F_v/F_m , indicador da eficiência quântica máxima do PSII (Kalaji et al., 2017). No presente estudo, F_o aumentou na omissão de Ca (Figura 4a), sugerindo inativação parcial de centros de reação do PSII, desacoplamento antena-RC e comprometimento

do complexo de evolução de O₂, alterações típicas que elevam a emissão basal e reduzem o potencial fotoquímico (Jan et al. 2025). A ocorrência de perda de energia nesse estágio sugere danos nas clorofilas do complexo antena e nas feofitinas (Kalaji et al., 2014). O estresse causado pela deficiência de Ca afeta diretamente o processo fotossintético, interferindo no fluxo de elétrons e promovendo a desestabilização do complexo de evolução de oxigênio, essa condição resulta em maior dissipação de energia na forma de calor pelos complexos antena, conforme verificado em estudos com plantas de milho e tomate (Kalaji et al.; 2014).

Na fluorescência máxima da clorofila *a* (F_m), foi influenciada pela disponibilidade de Ca e de Si na solução nutritiva (Figura 3b). O menor valor de F_m foi observado na ausência de ambos os elementos, o que indica persistência de quenching não-fotoquímico após a adaptação ao escuro e/ou reduções na organização efetiva da antena do PSII, coerentes com estresse estrutural de membranas tilacoidais (Jan et al. 2025). A utilização de Si em culturas de tecidos vegetais contribui para a proteção da parede celular, reduzindo o estresse oxidativo e favorecendo o desenvolvimento e os ciclos de crescimento das plantas (Sivanesan, Park 2014). Quando o Ca estava presente, os valores de F_m permaneceram elevados, com ou sem Si, indicando que o Ca exerce papel primário na manutenção do PSII. Esses dados reforçam a hipótese do Si pode mitigar os efeitos do estresse causado pela deficiência de Ca, contribuindo para preservar a funcionalidade do PSII.

A deficiência de Ca diminui a eficiência fotoquímica do fotossistema II, evidenciada pela diminuição nos valores de F_v/F_m e F_v/F_0 , e pelo aumento de

F_0/F_m , indicando fotoinibição e maior quenching não-fotoquímico residual, compatíveis com comprometimento estrutural do aparato fotossintético. A aplicação de Si, entretanto, atenuou esses efeitos negativos, elevando os valores de F_v/F_m e F_v/F_0 e reduzindo F_0/F_m nas plantas cultivadas sob omissão de Ca (Figuras 5a, 5b e 5c). A produção de massa seca também foi superior nas plantas tratadas com Si, na presença e na ausência de Ca, embora o efeito tenha sido mais pronunciado sob suficiência do nutriente. Portanto, o Si atuou como elemento mitigador do estresse por deficiência de cálcio.

Na literatura tem relatos do Si aumentando a eficiência quântica do fotossistema II e os teores de clorofila e de carotenoides (Lemos Neto *et al.*, 2020) e diminui o extravasamento de eletrólitos em couve-flor e brócolis (Barreto *et al.*, 2017) favorecendo a defesa antioxidante da couve (Wu *et al.*, 2017).

A deficiência de Ca provoca a degradação de pigmentos fotossintéticos e a diminuição da eficiência fotossintética, reduzindo a biomassa das plantas, portanto, aceitando-se a primeira hipótese deste estudo. E os resultados deste estudo, evidenciou que a aplicação do Si pode atenuar os danos causados nos pigmentos fotossintéticos e na eficiência fotoquímica do PSII, porém não foi capaz de diminuir a perda de biomassa, aceitando parcialmente a segunda hipótese. O efeito do silício não foi expressivo na solução nutritiva com cálcio, possivelmente porque a deficiência de Ca foi moderada embora tenha sido havido a omissão de uso de reagentes com cálcio para compor a solução. É possível que houve pequena contaminação de Ca na solução nutritiva com omissão de Ca provindo de resíduos deste elemento presente nos reagentes empregados embora tenha utilizado reagentes PA. A possível contaminação de

Ca pode ser provada pela deficiência moderada de Ca (Prado, 2008), ocorrendo uma redução somente em 15,34% da massa seca. E por fim, os efeitos do Si não restringue em condições de estresse, evidenciando efeitos benéficos do Si em condições ótimas de cultivo de plantas de pimentão, aceitando a terceira hipótese. Portanto, os achados deste estudo podem auxiliar no cultivo de pimentão em sistema protegido, disponibilizando ferramentas importante para o sucesso do cultivo do pimentão.

5 CONCLUSÃO

A deficiência de Ca na planta foi moderada, mas diminuiu os teores de pigmentos fotossintéticos e comprometeu a eficiência do fotossistema II e diminuiu a biomassa. A aplicação de Si atenuou os danos oxidativos, preservando os pigmentos e melhorando a eficiência fotoquímica, mas não foi suficiente para incrementar a produção de massa seca possivelmente pelo fato que a deficiência de Ca foi moderada. E curiosamente os efeitos benéficos do Si em plantas com suficiência de Ca favoreceu a estabilidade fotossintética incrementando os teores de pigmentos e a produção de massa seca das plantas de pimentão. A deficiência de Ca compromete aspectos fisiológicos e o crescimento do pimentão, mas o uso do Si se destacou na hortaliça cultivada em solução nutritiva com suficiência de Ca.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, R.; DAREZZO, R.; ROZANE, D.; AGUILERA, G.; SILVA, D. Cultivo em ambiente protegido: histórico, tecnologia e perspectivas. Viçosa: UFV. p. 159–174. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/abc123>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; MEDEIROS, J. F.; DIAS NETO, J.; SILVA, M. M.; NOBRE, R. G. Nutrientes minerais em pimentão fertirrigado sob lâminas de irrigação e doses de potássio. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 261–266, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000400019>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ALVES, D. M. R.; OLIVEIRA, J. N.; PRADO, R. M.; FERREIRA, P. M. Silicon in the form of nanosilica mitigates P toxicity in scarlet eggplant. **Scientific Reports**, v. 13, 9190, 2023.

ALVES, G. S.. Nutrição mineral e produtividade de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em resposta a diferentes biofertilizantes líquidos no solo. 2006. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

ALVES, G. S.; SANTOS, D.; SILVA, J. A.; NASCIMENTO, J. A. M.; CAVALCANTE, L. F.; DANTAS, T. A. G.. Estado nutricional do pimentão cultivado em solo tratado com diferentes tipos de biofertilizantes. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 31, n. 4, p. 661–665, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i4.731>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ANSARI, W. A.; SHARMA, S.; SINGH, R. K.; KHAN, N.; SINGH, P.; TIWARI, I. K.; SINGH, A. K. Silicon foliar treatment modulates *Capsicum annuum* L. growth and stress responses under Cd and Pb stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 1590148, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1590148>. Acesso em: 4 nov. 2025.

AVALHÃES, C. C.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M.; ROZANE, D. E.; CORREIA, M. A. R.. Omission of macronutrients on the growth and nutritional status of cabbage plants grown in nutrient solution. **Bioscience Journal**, v. **25**, p. 21–28, 2009.

BABELLAHI, F.; PALIWAL, J.; ERKINBAEV, C.; AMODIO, M. L.; CHAUDHRY, M. M. A.; COLELLI, G.. Early detection of chilling injury in green bell peppers by hyperspectral imaging and chemometrics. **Postharvest Biology and Technology**, v. **162**, **111100**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111100>. Acesso em: 4 nov. 2025.

BARRETO, R. F.; SCHIAVON JÚNIOR, A. A.; MAGGIO, M. A.; PRADO, R. M. Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and broccoli. **Scientia Horticulturae**, v. **225**, p. 743–750, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>. Acesso em: 4 nov. 2025.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônômico, (Boletim Técnico, n. 78). 48 p. 1983. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br>. Acesso em: 4 nov. 2025.

BRAGA, M. B.; MAROUELLI, W. A.; SILVA, S. C. T. Produção integrada de pimentão (PIP): irrigação e fertirrigação na cultura do pimentão. Brasília: Embrapa Hortaliças. 31 p. 2017.

BRANDÃO FILHO, J. U. T.; SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. Solanáceas: podridão apical e transporte de cálcio. In: Hortaliças-fruto: fisiologia, nutrição e manejo. Brasília: Embrapa, p. 87–112. 2018.

BUCHELT, A. C.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA, K. S.; ROCHA, A. M. S.; PRADO, R. M.; CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nutrient deficiency. **Journal of Soil Science and Plant**

Nutrition, v. 20, p. 1532–1548, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00245-7>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CANTUÁRIO, F. S.; MENEZES, C. H.; RIBEIRO, T. A.; SOARES, D. F.; CARVALHO, R. P. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 215–219, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CARVALHO, J. S.; FRAZÃO, J. J.; PRADO, R. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P.; COSTA, M. G. Silicon modifies C:N:P stoichiometry and improves physiological efficiency of sorghum. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 16082, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20431-9>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CHAO, L.; BOFU, P.; WEIQIAN, C. Influences of calcium deficiency and cerium on the growth of spinach plants. **Biological Trace Element Research**, v. 121, p. 266–275, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12011-007-8054-y>. Acesso em: 4 nov. 2025.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Respostas antioxidantes de mudas de arroz ao estresse salino. **Plant Science**, v. 135, p. 1–9, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9). Acesso em: 4 nov. 2025.

EL-SAPPAH, H. M.; ALI, M. A.; MANSOUR, M. T.; TAWFIK, M. M.; EL-TAYEB, M. A. Silicon mediates antioxidant defense system in plants under abiotic stresses. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 2353, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10112353>. Acesso em: 4 nov. 2025.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J.. Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2006.

FARIA MELO, A. S.; MENDES, C. M.; OLIVEIRA, L. A.; PRADO, R. M.. Silício na agricultura: da pesquisa à prática. Botucatu: FEPAF, 2023.

FERNANDES, D. M.; PRADO, R. M. Nutrição mineral de plantas. Jaboticabal: FUNEP, 2020.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. Viçosa: UFV, 2008. Disponível em: <https://www.editoraufv.br>. Acesso em: 4 nov. 2025.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. Disponível em: <https://fealq.com.br>. Acesso em: 4 nov. 2025.

GONÇALVES, A. C. M.; PRADO, R. M. Uso de silício em culturas agrícolas: fundamentos e aplicações. Jaboticabal: FUNEP, 2021.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J.; LEGAY, S.. Silicon and the plant extracellular matrix. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 463, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>. Acesso em: 4 nov. 2025.

HARIZANOVA, A.; KOLEVA-VALKOVA, L. Effect of silicon on yield and fruit quality of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) cultivated under protected conditions. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 25, n. 2, p. 289–294, 2019.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, T.; GÓMEZ-GARCÍA, M. D. R.; VALVERDE, M. E.; PAREDES-LÓPEZ, O. *Capsicum annuum*: bioactive compounds and nutraceutical potential. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, p. 1–22, 2020.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, T.; GÓMEZ-GARCÍA, M. D. R.; VALVERDE, M. E.; PAREDES-LÓPEZ, O.. *Capsicum annuum* (hot pepper): an ancient Latin-

American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, p. 1–22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>. Acesso em: 4 nov. 2025.

KALAJI, H. M.; JAMMAL, A.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; MITSUYA, S.; GOLTSEV, V.; BRESTIC, M. Efficiency of photosystem II in plants under stress. *Photosynthetica*, v. **55**, n. 2, p. 356–368, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0231-6>. Acesso em: 4 nov. 2025.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Silício na agricultura. Uberlândia: UFU, 2004.

LEMONS NETO, H. F.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; TEIXEIRA, G. C. M.; CAIONE, G.; SOUSA, A. C. Silicon as a mitigator of calcium deficiency in zucchini plants. *Scientia Horticulturae*, v. **261**, 108933, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108933>. Acesso em: 4 nov. 2025.

LI, Q.; ZHANG, Y.; ZHOU, J.; CHEN, W.; WANG, J.; WANG, S. Interactive effects of silicon and calcium on fruit quality and calcium deficiency symptoms in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. **216**, p. 107413, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.107413>. Acesso em: 4 nov. 2025.

LIANG, Y.-C.; SUN, W.-C.; SI, J.-P.; RÖMHELD, V.. Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*, v. **54**, n. 5, p. 678–685, 2005.

MA, D.; SUN, D.; WANG, C.; DING, H.; WU, C.; YU, H. Silicon application alleviates calcium deficiency in wheat by regulating antioxidant metabolism and ion homeostasis. *Journal of Plant Physiology*, v. **204**, p. 1–8, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.06.015>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. **11**, n. 8, p. 392–397, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MARCUSSI, F. F. N.. Uso da fertirrigação e teores de macronutrientes em planta de pimentão. Engenharia Agrícola, **Jaboticabal**, v. **25**, n. 3, p. 642–650, 2005.

MATHUR, P.; ROY, S. Nanosilica facilitates silica uptake, growth and stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. **157**, p. 114–127, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/plant-physiology-and-biochemistry>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MELO, R. A. C.; SILVA, T. G.; PEREIRA, V. L.; SANTANA, J. M.; GOMES, F. R.. Desempenho produtivo de pimentão cultivado em vasos com substrato utilizando mudas com hidrogel nanocompósito. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2019.

MENDES, L. S.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J. Adubação com silício: influência sobre o solo, planta, pragas e patógenos. **Cerrado Agrociências**, v. **2**, p. 51–63, 2011. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=%22Cerrado+Agroci%C3%A4ncias%22+sil%C3%ADcio+2011>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MENICHINI, F.; TUNDIS, R.; BONESI, M.; LOIZZO, M. R.; CONDO, C.; STATI, G. A.; MENICHINI, F. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. **Food Chemistry**, v. **114**, n. 2, p. 553–560, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MOURA, W. M.; PRADO, R. M.; SOUZA, P. P.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M. Efeitos de doses de cálcio no crescimento e na nutrição mineral de mudas de pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. **30**, n. 1, p. 45–50, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb>. Acesso em: 4 nov. 2025.

OLIVEIRA, K. S.; PRADO, R. M.; CAIONE, G.. Effects of calcium and magnesium deficiency on growth and nutritional status of cowpea plants grown in nutrient solution. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 3, p. 395–405, 2020.

PEDROSO, M.; FERREIRA, Z. Caracterização dos polos de produção e de produtores de pimentão no Brasil. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2023.

PRADO, R. M. Mineral nutrition of tropical plants. Cham: Springer, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>. Acesso em: 4 nov. 2025.

QUEIROZ, D. L.; SOUZA, J. A.; OLIVEIRA, F. N.; CAVALCANTE, C. A. R.; LIMA, R. H.. Absorção e translocação de silício em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 632–637, 2013.

REDDY, A. S. N.; RANJAN, A.; PANDA, P.; GUPTA, S.; SINGH, R. K.. Coping with stresses: roles of calcium- and calmodulin-regulated gene expression. **The Plant Cell**, v. 23, n. 6, p. 2010–2032, 2011.

SAJA-GARBARZ, D.; LIBIK-KONIECZNY, M.; JANOWIAK, F.. Silicon improves root functioning and alleviates oxidative stress in oilseed rape. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1359747, 2024.

SEDIYAMA, M. A.; SOUZA, N. M.; SILVA, F. O.; ANDRADE, J. H.. Rendimento de pimentão em função da adubação orgânica e mineral. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 1, p. 30–34, 2009.

SILVA, D. L.; COSTA, F. M.; GONÇALVES, R. H.; MOURA, J. A.; LIMA, C. E. O silício atenua a deficiência de cálcio em plantas de rúcula. **Scientia Horticulturae**, v. 283, p. 110169, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/journal/scientia-horticulturae>. Acesso em: 4 nov. 2025.

SIVANESAN, I.; PARK, S. W.. O papel do silício na cultura de tecidos vegetais. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, art. 571, 2014.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; OLIVEIRA, K. S.; D'AMICO-DAMIÃO, V.; SOUSA JÚNIOR, G. S.. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1311–1320, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>. Acesso em: 4 nov. 2025.

TONIN, F. B.. Atividade de enzimas antioxidativas e absorção de silício em plantas de pimentão submetidas a estresse salino. 2005. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R.. Calcium in plants. **Annals of Botany**, v. 92, n. 4, p. 487–511, 2003.

YAN, L.; SHI, W.; LI, S.. The role of silicon in the regulation of plant growth and development. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 52, p. 79–84, 2006.

ZAMBROSI, F. C. B.; PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C.; TEIXEIRA, G. C. M. Interação entre silício e cálcio no desenvolvimento de plantas e qualidade de frutos de hortaliças. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0230069, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230069>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZANCHIM, B. O.; PRADO, R. M.; SILVA, K.; TEIXEIRA, G. C. M.. Efeitos da adubação com silício e cálcio no crescimento e qualidade de frutos de pimentão cultivado em substrato. **Horticultura Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 349–356, 2024.

ZHANG, Y.; HUANG, B.; LI, Q.; ZHOU, J.; YANG, J.. Silicon application enhances chlorophyll fluorescence and photosynthetic performance under calcium deficiency. **Plant Physiology Reports**, v. 30, p. 511–521, 2025.

ZHANG, Y.; WANG, X.; LI, H.; XU, L.; CHEN, W.. Calcium-silicon synergistic regulation of plant defense responses under abiotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 217, p. 105093, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105093>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZHAO, X.; XU, L.; WANG, Y.; JIANG, J.; LI, H.. Integrative effects of silicon and calcium on antioxidative enzymes and fruit firmness in *Capsicum annuum* L. **Scientia Horticulturae**, v. 327, 112512, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.112512>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZHOU, J.; LI, Q.; WANG, S.; LIU, F.. Calcium–silicon interactions modulate ROS balance and membrane stability in pepper plants under stress. **Plant Stress Biology**, v. 5, n. 1, e00621, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/psb2.00621>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIN, P.. Silicon alleviates oxidative stress induced by calcium deficiency in cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant and Soil**, v. 483, p. 267–278, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05758-z>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZINSLY, C. R.; PRADO, R. M.. Manejo nutricional do pimentão em ambiente protegido. *Informações Agronômicas*, n. 187, p. 1–5, 2022.

ZULLO, M. A. T.; CANTARELLA, H.; ROZANE, D. E.. Manejo da adubação e fertirrigação em hortaliças sob cultivo protegido. *Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas*, n. 235, p. 45–78, 2022.

ZÚÑIGA, G. E.; MÁRQUEZ, R.; JARAMILLO, C. A.; TORRES, L. A.. Physiological mechanisms of silicon-calcium interactions in stress tolerance of horticultural crops: a review. **Horticultural Research**, v. **12**, n. 18, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/hr/uhad018>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZWIENER, P.; TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M.; SILVA, K. C. Respostas fisiológicas e bioquímicas de pimentão à aplicação combinada de cálcio e silício em diferentes fases fenológicas. **Frontiers in Plant Science**, v. **16**, p. 1600523, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1600523>. Acesso em: 4 nov. 2025.