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

NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO ATENUA A DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO EM AMENDOIM AO AUMENTAR A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O CRESCIMENTO E O NÚMERO DE VAGENS

MARIA FERNANDA FRANÇA

JABOTICABAL – SP
2026

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

NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO ATENUA A DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO EM AMENDOIM AO AUMENTAR A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O CRESCIMENTO E O NÚMERO DE VAGENS

MARIA FERNANDA FRANÇA

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientadora: M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como requisito parcial para a conclusão do curso de ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal – SP
2º semestre/2026

F814n

França, Maria Fernanda

Nanopartículas de dióxido de silício atenua a deficiência de cálcio em amendoim ao aumentar a eficiência fotossintética, o crescimento e o número de vagens. / Maria Fernanda França. -- Jaboticabal, 2026

40 f. : tabs., fotos

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

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Deyvielen Maria Ramos Alves

1. Amendoim. 2. Nutrição de plantas. 3. Deficiência de cálcio. 4. Nanopartículas de dióxido de silício. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Maria Fernanda França

NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO ATENUA A DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO EM AMENDOIM AO AUMENTAR A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O CRESCIMENTO E O NÚMERO DE VAGENS

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

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador (se houver): M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves

Área de Concentração: Nutrição de plantas

Trabalho aprovado em 14/08/2026

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 31/08/2026 19:59:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

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

gov.br Documento assinado digitalmente
PATRICIA MESSIAS FERREIRA
Data: 01/09/2026 20:34:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Dra. Patrícia Messias Ferreira
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

gov.br Documento assinado digitalmente
FRANCISCO SALES FERREIRA DOS SANTOS JUN
Data: 07/09/2026 23:15:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Me. Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

gov.br Documento assinado digitalmente
MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ
Data: 22/09/2026 06:33:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. Mara Cristina Pessoa da Cruz
Chefe do Departamento

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio, amor e incentivo durante toda minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Chegar à conclusão deste trabalho representa a realização de um importante objetivo, construído com dedicação e o apoio de pessoas que fizeram parte dessa trajetória. Por isso, expresso minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para este momento.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta trajetória acadêmica. À minha família, namorado e amigos, expresso minha gratidão pelo amor, apoio constante, compreensão e incentivo em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e à minha coorientadora M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves, agradeço pela oportunidade de realização deste trabalho pelos ensinamentos que levarei para minha vida profissional.

.

ÍNDICE

RESUMO 7
SUMMARY 8
1. INTRODUÇÃO..... 9
2. REVISÃO DE LITERATURA 12
2.1 Origem, taxonomia, importância e características do amendoim.....12
2.2 Importância do cálcio na planta de amendoim.....15
2.3 Silício na nutrição de plantas e no alívio de deficiência de cálcio 18
3. MATERIAL E MÉTODOS 20
3.1 Material vegetal e condições de crescimento 20
3.2 Desenho experimental 21
3.3 Determinação de teores de elementos 22
3.4 Índice de extravasamento de eletrólitos 23
3.5 Eficiência da conversão de energia absorvida 23
3.6 Índice de flavonoides 23
3.7 Análise Estatísticas 23
4.0 RESULTADOS 24
5.0 DISCUSSÃO 30
6.0 CONCLUSÃO 34
7.0 REFERÊNCIAS 35

FIGURAS

Figura 1. Temperaturas e umidades relativas do ar máximas e mínimas registradas durante o período experimental na casa de vegetação da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP.

Figura 2. Acúmulo total do Ca (A), Acúmulo total do Si (B). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

Figura 3. Índice de flavonoides (A), clorofilas (B), índice de extravasamento de eletrólitos (C), eficiência da conversão de energia absorvida (Fv/F0). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

Figura 4. Número de folhas (A), altura da planta (B), diâmetro do caule (C), massa seca total (D). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

Figura 5. Número de flores (A), número de frutos (B), massa seca dos frutos (C). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

Figura 6. Plantas de amendoim que receberam solução nutritiva completa (+Ca), a solução nutritiva completa com o Si (+Ca+Si), as plantas que não receberam o Ca (-Ca) e as que não receberam o Ca na presença do Si (-Ca+Si).

NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO ATENUA A DEFICIÊNCIA DE CÁLCIO EM AMENDOIM AO AUMENTAR A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O CRESCIMENTO E O NÚMERO DE VAGENS

RESUMO

A deficiência de cálcio (Ca) compromete o crescimento e a produtividade do amendoim, enquanto o silício (Si) tem sido apontado como um elemento benéfico na mitigação de estresses abióticos. Entretanto, ainda são escassos os estudos sobre o uso de nanopartículas de Si para atenuar a deficiência de Ca nessa cultura. Para isso instalou esse experimento para investigar os efeitos da aplicação do Si no metabolismo das plantas de amendoim cultivadas sob condições de deficiência de Ca. O experimento foi realizado em casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com esquema fatorial 2x2, tendo duas condições do Ca adequado (3,5 mmol L^{-1}) e deficiente (0,0 mmol L^{-1}), combinadas com a ausência ou presença do Si (2 mmol L^{-1}), na forma de nanossílica, tendo quatro repetições. Foram analisados os teores do Ca e do Si nas folhas e nas raízes, índice de extravasamento de eletrólitos (IEE), teor de clorofila total (Chl total), índice de flavonóides (FIM), eficiência da conversão de energia absorvida (Fv/F0), número de folhas, altura da planta, diâmetro do caule, massa seca total, número de flores e vagens, massa seca dos grãos. O fornecimento de Si aumentou o acúmulo de Ca nas plantas cultivadas sob deficiência desse nutriente. Além disso, diminuiu o índice de extravasamento de eletrólitos e aumentou a eficiência fotoquímica (Fv/F0) indicando menor danos às membranas e melhor desempenho fotossintético. Esses efeitos refletiram-se no crescimento, promovendo aumento da massa seca total, do número de flores e do número de vagens em comparação às plantas deficientes em Ca sem Si. O fornecimento de nanopartículas de Si atenuou os efeitos da deficiência de Ca em plantas de amendoim, promovendo melhorias fisiológicas, e no crescimento da planta. Esses resultados evidenciam o potencial do Si como estratégia para mitigar a deficiência de Ca na cultura do amendoim.

Palavras-chave: Leguminosae; *Arachis hypogaea L*; Produtividade; Flavonoides; Elemento benéfico.

Silicon nanoparticles enhance flowering and peanut yield under calcium deficiency

SUMMARY

Calcium (Ca) deficiency compromises peanut growth and productivity, while silicon (Si) has been identified as a beneficial element in mitigating abiotic stresses. However, studies on the use of Si nanoparticles to alleviate Ca deficiency in this crop are still scarce. Therefore, this experiment was conducted to investigate the effects of Si application on the metabolism of peanut plants grown under Ca deficiency conditions. The experiment was carried out in a greenhouse. The experimental design was completely randomized in a 2 × 2 factorial scheme, with two Ca conditions: adequate (3.5 mmol L^{-1}) and deficient (0.0 mmol L^{-1}), combined with the absence or presence of Si (2 mmol L^{-1}), supplied in the form of nanosilica, with four replications. The following variables were analyzed: Ca and Si contents in leaves and roots, electrolyte leakage index (ELI), total chlorophyll content (total Chl), flavonoid index (FIM), efficiency of absorbed energy conversion (Fv/F0), number of leaves, plant height, stem diameter, total dry mass, number of flowers and pods, and grain dry mass. Si application increased Ca accumulation in plants grown under Ca deficiency. In addition, it reduced the electrolyte leakage index and increased photochemical efficiency (Fv/F0), indicating lower membrane damage and improved photosynthetic performance. These effects were reflected in plant growth, promoting increases in total dry mass, number of flowers, and number of pods compared with Ca-deficient plants without Si. The application of Si nanoparticles alleviated the effects of Ca deficiency in peanut plants, promoting physiological and growth improvements. These results highlight the potential of Si as a strategy for mitigating Ca deficiency in peanut crops.

Keywords: Leguminosae; *Arachis hypogaea L.*; Yield; Flavonoids; Beneficial element.

1. INTRODUÇÃO

A baixa resposta do amendoim à adubação era frequentemente atribuída ao limitado potencial produtivo das cultivares utilizadas no passado. Com a introdução de materiais genéticos de maior rendimento, passou a ser necessário adequar as recomendações de fertilização de acordo com a absorção e a exportação de nutrientes pela cultura (Cordeiro et al., 2025). Além disso, a disponibilidade equilibrada de nutrientes favorece incrementos praticamente lineares na produtividade, alcançando cerca de 70% do potencial produtivo do amendoim (Xie et al., 2020).

O amendoim é uma cultura de elevada exigência nutricional, especialmente de fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S), potássio (K) e magnésio (Mg), que promovem incremento no desenvolvimento das vagens, o enchimento dos grãos e a síntese de óleo, influenciando diretamente a produtividade e a qualidade da cultura (Kadirimangalam et al., 2022). Em se tratando de produtividade, é importante ressaltar que diferentemente de muitas culturas, o amendoim apresenta sua maior demanda por Ca para o enchimento das vagens, sendo que cerca de 90% do nutriente absorvido é direcionado para os grãos (El-Temsah et al., 2023).

Entretanto, diversos fatores podem reduzir a disponibilidade do Ca para as plantas, incluindo o baixo desenvolvimento radicular, a alta umidade relativa do ar, a salinidade, o déficit hídrico e os desequilíbrios nutricionais, especialmente o excesso de N, K, Mg e amônio (NH_4^+) que competem com o Ca durante a sua absorção pelas raízes (Olle e Bender, 2015).

No entanto, a deficiência do Ca pode resultar em vagens vazias, sementes com má formação e redução significativa da produtividade (El-Temsah et al., 2023). Esses efeitos estão relacionados às funções, porque o Ca é imprescindível para a formação da parede celular, principal componente da estrutura das plantas, justificando sua elevada demanda durante o crescimento e desenvolvimento vegetal (Prado, 2021).

A deficiência de Ca também está envolvida na diminuição do teor de clorofilas, e da fotossíntese e da biomassa das plantas (Silva et al., 2021). No amendoim, a deficiência do Ca também reduz a produtividade, diminui a qualidade das sementes, reduz a germinação e provoca o aparecimento de vagens chochas, sementes abortadas, menor porcentagem de grãos maduros e desenvolvimento incompleto do embrião (Kadirimangalam et al., 2022).

Uma alternativa para auxiliar as espécies em situação de deficiência do Ca é a utilização de elementos benéficos, como o silício (Si), pois embora não seja um nutriente, pode atuar no desenvolvimento das plantas, principalmente sob estresses, ao melhorar o metabolismo primário, aumentando a fotossíntese e a absorção de nutrientes (Araújo et al., 2022).

Segundo Silva e Prado (2023) na deficiência do Ca, especificamente, o Si, contribui para restaurar parcialmente a integridade das membranas celulares, pois também estimula a produção de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. Além disso, o Si na deficiência de Ca melhora a eficiência fotossintética, favorece a arquitetura foliar, aumenta o teor de pigmentos fotossintéticos e estimula o crescimento do sistema radicular, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes.

No entanto, esses benefícios são descritos, principalmente em fontes convencionais do elemento, como os silicatos de sódio e silicato de potássio (Prado et al., 2024). Por outro lado, a nanotecnologia surge como uma estratégia promissora entre os diferentes nanomateriais, a exemplo das nanopartículas de sílica que têm recebido grande atenção por apresentarem elevada área superficial, alta reatividade, baixa toxicidade e maior capacidade de absorção pelos tecidos vegetais (Grewal et al., 2024). Apesar dos recentes avanços em pesquisas envolvendo esse tipo de tecnologia, ainda são necessárias mais evidencias que demonstrem os benefícios em diferentes espécies e condições (Li et al., 2025).

Especificamente para o amendoim, ainda são escassos os estudos que investigam os efeitos do Si sob deficiência de nutrientes, restringindo-se, por exemplo, à deficiência de K (Patel et al., 2022). A maior parte das pesquisas concentra-se em outros tipos de estresse, principalmente aqueles induzidos por elementos potencialmente tóxicos (Shi et al., 2010; Shen et al., 2014; Li et al., 2017; Dong et al., 2018).

Portanto, objetivou-se nessa pesquisa avaliar a atuação de nanopartículas do Si no crescimento e desenvolvimento do amendoim cultivado sob deficiência do Ca. Como hipótese, consideramos que o Si atenuará a deficiência do Ca, especialmente reduzindo danos na membrana celular e promovendo também maior manutenção da floração.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Origem, taxonomia, importância e características do amendoim

Acredita-se que o amendoim tenha se originado na América do Sul, sendo sua domesticação atribuída às regiões do antigo Peru e do Brasil (Hammons et al., 2016). O amendoim cultivado pertence à família Leguminosae, subfamília Faboideae e ao gênero *Arachis*. Dentre as espécies desse gênero, *Arachis hypogaea* L. é a única cultivada comercialmente para produção de grãos (Stalker, 2017).

O amendoim ocupa posição de destaque entre as oleaginosas de maior importância econômica em nível mundial (Wu et al, 2022), a semente de amendoim também é rica em compostos bioativos, como: i) compostos fenólicos, ii) ácido ascórbico e iii) flavonoides. Além disso, é composta por aproximadamente 52% de óleo, 28% de proteína, 13% do Carboidratos, 6% de umidade, 2% de fibra e 2% de cinzas (Cobb e Jhonson, 1973). Portanto, devido ao seu elevado valor nutricional, contribui para a segurança alimentar e para a promoção da saúde humana (Variath e Janila, 2017).

Atualmente, o amendoim é uma importante *commodity* agrícola, com a China, a Índia, os Estados Unidos e a Nigéria entre os principais produtores mundiais (FAO, 2025). No Brasil, a produção desse grão tem crescido na última década, especialmente na primeira safra. O estado de São Paulo lidera esse cenário, respondendo por mais de 90% da produção nacional e registrando produtividade média de cerca de 4.000 kg ha^{-1} na safra 2024/25 (CONAB, 2025).

Esse sucesso do cultivo do amendoim em regiões de clima tropical está diretamente relacionado às suas exigências ambientais. Conforme Chalwe (2020), trata-se de uma espécie adaptada a condições tropicais, apresentando crescimento ideal em temperaturas entre 18 e 27 °C. Além disso, a cultura requer plena exposição solar, necessitando de aproximadamente seis horas de luz direta por dia para seu adequado desenvolvimento. Essas características tornam o amendoim especialmente apto ao cultivo em regiões com precipitação moderada e longas estações de crescimento.

A produtividade do amendoim depende do padrão de floração, sendo que as flores produzidas durante o pico de florescimento (6 a 10 semanas após a semeadura) apresentam maior probabilidade de originar vagens maduras; em contraste, flores emitidas após cerca de 70 dias contribuem pouco para o rendimento, pois não completam o desenvolvimento das vagens antes da maturação da planta (Kaba, 2014).

No amendoim, o pólen amadurece de 6 a 8 horas antes da antese, que ocorre pela manhã. Após a fecundação, o ginóforo cresce em direção ao solo, onde ocorre o desenvolvimento das vagens, que atingem a maturidade entre 60 e 80 dias. Como a planta apresenta crescimento indeterminado, é comum a presença de vagens em diferentes estágios de maturação na colheita (Coolbear, 1994).

Portanto, o sucesso do amendoim como cultura agrícola está diretamente relacionado à sua biologia singular, especialmente à geocarpia, ao desenvolvimento do ginóforo, à origem por poliploidização e à grande diversidade existente entre suas espécies silvestres, que constituem uma

importante fonte de características úteis para o melhoramento genético (Bertioli et al., 2011) e o manejo da cultura.

2.2. Importância do cálcio na planta de amendoim

Nas plantas, o Ca é absorvido na forma de cátion divalente (Ca^{2+}), principalmente por fluxo de massa e interceptação radicular, posteriormente transportado pelo xilema das raízes para a parte aérea e, por ser imóvel no floema, apresenta redistribuição limitada (Prado, 2021).

Entretanto, essa baixa concentração e solubilidade desse nutriente no floema resultam em sua reduzida mobilidade, tornando órgãos com baixa taxa de transpiração, como folhas e frutos, mais suscetíveis à deficiência do Ca (Prado, 2021). Além disso, o Ca participa da formação da lamela média, fundamental para a integridade e a firmeza dos tecidos vegetais, logo, a sua deficiência pode provocar redução da firmeza dos tecidos, aumento da perda de água e comprometimento do crescimento radicular (Yamamoto et al., 2011).

No amendoim, o Ca constitui cerca de 5% da massa seca, devido a sua necessidade na manutenção da integridade estrutural das membranas celulares e para a tolerância a estresses abióticos, especialmente aqueles que causam danos aos cloroplastos e desestabilizam a membrana plasmática (Schleier et al, 2014).

Durante o crescimento vegetativo do amendoim, a exigência por Ca é relativamente baixa, aumentando durante o florescimento e atingindo seu máximo no desenvolvimento do ginóforo e no enchimento das vagens. Aproximadamente 92% do cálcio absorvido pelas vagens é acumulado entre 20 e 80 dias após a penetração do ginóforo no solo, sendo que cerca de 69%

desse total é absorvido nos primeiros 20 a 30 dias desse período (Kadirimangalam et al., 2022).

Segundo Yang et al. (2017), no desenvolvimento dos ginóforos, o amendoim absorve diretamente o Ca e outros sais inorgânicos, essenciais para a formação e o desenvolvimento das vagens. Em condições de deficiência do Ca, ocorre interrupção da expansão das vagens, aborto embrionário precoce e redução do número de grãos maduros e sadios.

Além disso, a deficiência do Ca reduz o acúmulo de biomassa fresca nas raízes e na parte aérea, afeta a expressão de genes relacionados à conversão de energia, ao sistema redox, às membranas celulares e à manutenção de embriões jovens, ocasionando ausência da formação das vagens, redução da germinação das sementes, produção de grãos subdesenvolvidos e, consequentemente, perdas na produtividade (Pegues et al., 2019).

Estudos demonstraram redução na altura das plantas de amendoim, no diâmetro do caule, no número de folhas, no teor de clorofilas (índice SPAD) e na produção de massa seca da parte aérea e das raízes em relação às plantas cultivadas em solução nutritiva completa (Correia et al., 2012). Além da redução no crescimento, plantas deficientes em Ca apresentam folhas pequenas e irregulares, bem como pontos necróticos nos tecidos (Rodrigues Filho et al., 1988). O sistema radicular também é severamente afetado, apresentando redução de aproximadamente 69% na massa seca das raízes, em estudo realizado por Correia et al. (2012).

Os efeitos da deficiência do Ca estendem-se também ao desenvolvimento reprodutivo da cultura, observado na ausência desse

nutriente na região dos ginóforos que impede o desenvolvimento normal das vagens, uma vez que o Ca absorvido pelas raízes não é translocado em quantidade suficiente para suprir a demanda dos frutos em desenvolvimento (Harris, 1949). Além disso, a emissão de flores foi reduzida cerca de dez dias após a retirada do nutriente da solução nutritiva, sendo completamente interrompida antes do final do experimento (Bledsoe e Harris, 1950). Entretanto, essas pesquisas concentraram-se predominantemente na avaliação de características morfológicas, de crescimento e produção, permanecendo escassas as informações sobre os efeitos desse estresse em variáveis fisiológicas e bioquímicas.

Portanto, a deficiência desse nutriente compromete a qualidade das sementes ao inibir o desenvolvimento do botão primário do embrião e provocar distúrbios fisiológicos, como: i) manchas necróticas, ii) rachaduras na base do caule e iii) morte regressiva dos brotos nos estágios finais de crescimento (Kadirimangalam et al., 2022).

2.3. Silício na nutrição vegetal e na mitigação dos efeitos da deficiência de cálcio

O Si é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, sendo superado em abundância apenas pelo oxigênio e ocorrendo principalmente associado a minerais silicatados (Schleier et al, 2014). Embora não seja considerado um nutriente, o Si pode favorecer diferentes processos fisiológicos, especialmente em plantas sob estresses bióticos ou abióticos (Prado et al., 2024).

No solo, o Si encontra-se predominantemente associado aos minerais silicatados, além de ocorrer em formas adsorvidas. Na solução do solo, sua principal forma solúvel e adsorvida pelas plantas é o ácido monossilícico (Santos et al., 2021). Após, a absorção predominantemente na forma de ácido monossilícico, o Si é transportado pelo xilema e depositado na forma de dupla camada de sílica especialmente em regiões sujeitas à transpiração. Após sua deposição, sua redistribuição para outros órgãos da planta é geralmente limitada (Camargo et al., 2010).

A capacidade de absorção do Si varia entre as espécies e está relacionada, entre outros fatores, à presença e atividade de transportadores específicos nas raízes (Barreto e Barão, 2023). Além disso, é importante ressaltar que o Si é o único elemento que quando absorvido em excesso pelas plantas não acarreta prejuízos no seu desenvolvimento (Camargo et al., 2016).

Com base na capacidade de absorção e acúmulo do Si, as plantas são classificadas em três categorias: i) acumuladoras, como o caso das gramíneas que apresentam grande capacidade de acúmulo com concentrações entre 100 a 150 g kg^{-1}; ii) intermediárias com teores variando de 10 a 50 g kg^{-1}, e as iii) não acumuladoras, cuja as concentrações são inferiores a 5 g kg^{-1} (Santos et al., 2021).

Em plantas não acumuladoras do elemento, como o amendoim, durante o desenvolvimento reprodutivo, se houver deficiência do Ca, há diversos prejuízos fisiológicos desencadeados (Kadirimangalam et al., 2022), tornando-se necessária a busca por estratégias capazes de minimizar esses efeitos. Nesse contexto, o Si tem se destacado por contribuir para a

manutenção da integridade estrutural das membranas, da atividade fotossintética e do metabolismo antioxidante (Prado et al., 2024), podendo atenuar os danos provocados pela deficiência do Ca (Silva e Prado, 2023).

Silva e Prado (2023), relataram que assim como o Ca, o Si também atenua contra estresses bióticos ou abióticos, pois diminui o estresse oxidativo, reduz o extravasamento celular nas membranas dos tecidos vegetais e aumenta a eficiência fotossintética. O efeito do Si atenuando plantas com deficiência em Ca apresenta diversos benefícios, pois a principal função do Ca é a estruturação das paredes celulares e as plantas deficientes apresentam danos estruturais nas membranas, podendo levar ao aumento da perda de água por transpiração dos tecidos e a suplementação do Si nessas plantas pode diminuir a taxa de perda de água.

No entanto, a maioria dos efeitos desse elemento está associado às fontes silicatadas, como silicatos de sódio e de K (Teixeira et al. 2024). No entanto, ainda existe uma lacuna de conhecimento quanto à eficiência relativa das diferentes fontes do Si e enfatizam a necessidade de ampliar as pesquisas nessa área (Barão, 2023). Mais recentemente, a nanotecnologia passou a ser considerada uma ferramenta promissora para aumentar a tolerância das plantas aos estresses ambientais, entre os nanomateriais utilizados, destacam-se as nanopartículas de sílica (Bulfa et al., 2025).

As nanopartículas do Si apresentam reduzido tamanho (aproximadamente 7 nm) e elevada área superficial (400 m_2 g^{-1}), o que facilita sua passagem pelas biomembranas em comparação ao Si cristalino, apresentando também facilidade de síntese, elevado volume de poros,

superfície passível de modificação, alta estabilidade, excelente biocompatibilidade e baixa toxicidade (Bhat et al., 2021).

Portanto, o avanço dessa área depende da integração de diferentes áreas do conhecimento, como: i) nanotecnologia e ii) fisiologia vegetal, sendo necessário aprofundar o entendimento sobre os mecanismos de interação das nanopartículas de sílica com as plantas (Li et al., 2025).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material vegetal e condições de crescimento

As plantas foram cultivadas em casa de vegetação localizada na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), em Jaboticabal, São Paulo, Brasil, nas coordenadas 21°14'47,46"S e 48°17'44,70"W. As sementes de amendoim foram semeadas em vasos de polietileno (1,5 dm^3) contendo areia lavada como substrato. A areia foi previamente peneirada, lavada e tratada com ácido clorídrico (HCl, 0,1 M) por 24 horas, seguida de sucessivas lavagens com água deionizada até que a condutividade elétrica da solução drenada atingisse < 0,010 mS cm^{-1}. Durante o período experimental, foram registradas as temperaturas e umidades relativas do ar máximas e mínimas por meio de um sensor termo-higrômetro (Fig. 1).

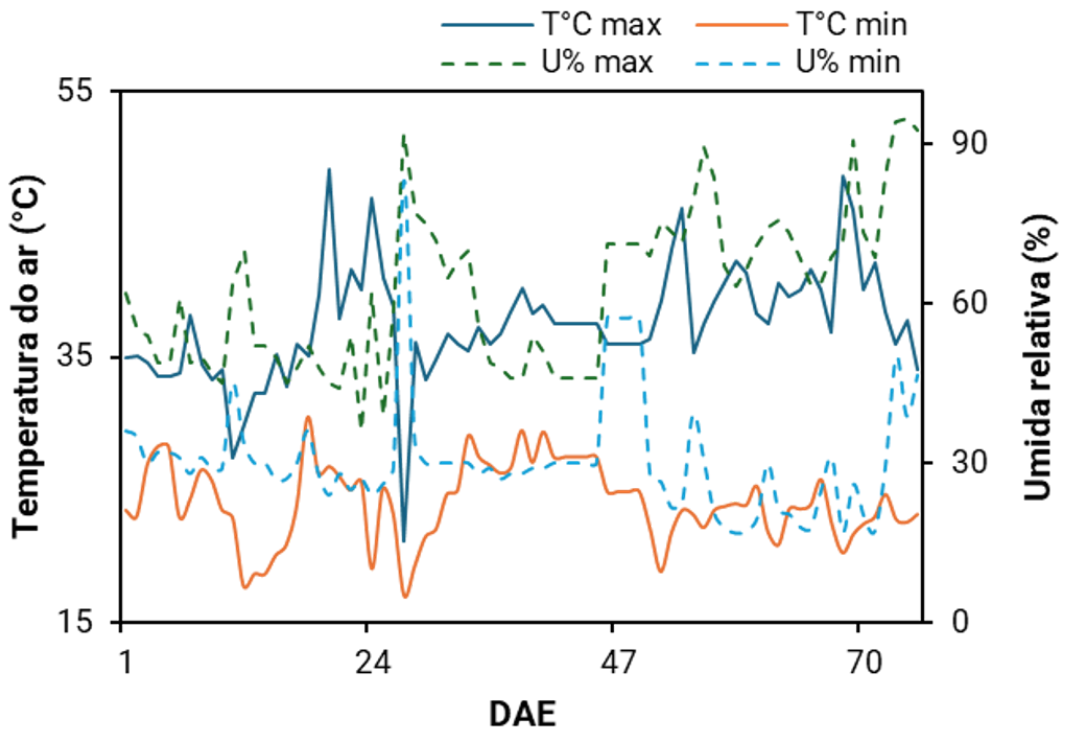


Figura 1. Temperaturas e umidades relativas do ar máximas e mínimas registradas durante o período experimental na casa de vegetação da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP.

3.2 Delineamento experimental

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x2, considerando duas condições de disponibilidade do Ca (adequada e deficiente) e duas condições de fornecimento do Si (presença e ausência), totalizando quatro tratamentos, com cinco repetições cada. Nos seis primeiros dias após a emergência (DAE), as plântulas foram irrigadas apenas com água deionizada, ou seja, livre de íons. Após esse período, iniciou-se o fornecimento da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), preparada inicialmente com 5% da força iônica, sendo a concentração aumentada gradativamente, semana após semana, até atingir 70%.

No tratamento com disponibilidade adequada do Ca, foi utilizada a concentração de 3,5 mmol L^{-1}, correspondente a 70% da concentração

recomendada por Hoagland e Arnon (1950). A condição de deficiência do Ca foi estabelecida pela omissão desse nutriente na solução nutritiva, mantendo-se a concentração em 0 mmol L^{-1} a partir da terceira semana após a emergência. Para os tratamentos com o Si, foi aplicada a concentração de 2 mmol L^{-1}, utilizando como fonte a nanossílica Bindizil®. Além disso, visando reduzir o acúmulo de sais no sistema, foram realizadas lixiviações a cada sete dias com água deionizada, até que a condutividade elétrica da solução drenada apresentasse valores inferiores a 0,010 mS cm^{-1}.

3.3 Avaliações de crescimento

Os números de folhas, flores e vagens foram obtidos por contagem, o diâmetro do caule foi mensurado com paquímetro digital e a altura das plantas com régua graduada. A massa seca das folhas e grãos foram determinadas utilizando balança analítica de precisão.

3.4 Determinação de teores de elementos

Após a colheita do experimento, aos 81 DAE. A parte aérea e as raízes foram lavadas em três etapas, utilizando detergente neutro (0,1%), ácido clorídrico (0,3%) e água deionizada. Em seguida, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65,5°C até atingirem massa constante. Após a secagem, foi determinada a massa seca, e o material vegetal foi triturado em moinho de facas do tipo Willey.

Para a determinação da concentração do Ca, 0,300 g do tecido vegetal moído foram pesados e transferidos para tubos digestores, aos quais foram adicionados 4 mL de solução nítrico-perclórica (2:1, ácido nítrico:ácido perclórico). As amostras foram submetidas à digestão em bloco digestor, com aquecimento gradual de 80 até 210 °C. Após o resfriamento, foram adicionados

30 mL de água deionizada quente, e as amostras permaneceram em repouso por 12 horas para a sedimentação das fibras. Em seguida, uma alíquota de 0,5 mL do sobrenadante foi transferida para um frasco plástico, adicionando-se 22 mL de água e 2,5 mL de solução de óxido de lantânio a 5%. Por fim, a concentração do Ca foi determinada em espectrofotômetro de absorção atômica. Os teores do Si foram determinados por meio da extração descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e da quantificação segundo Korndörfer et al. (2004). O acúmulo do Si e do Ca foram calculados com base nos teores do elemento e na massa seca da parte aérea das plantas.

3.5 Índice de extravasamento de eletrólitos

O índice de extravasamento de eletrólitos foi determinado utilizando discos foliares acondicionados em béqueres contendo 20 mL de água deionizada. Após 2 horas de incubação, foi medida a condutividade elétrica inicial (CEI) com auxílio de um condutivímetro. Em seguida, as amostras foram autoclavadas a 121 °C por 30 minutos para promover o extravasamento total dos eletrólitos, posteriormente determinada a condutividade elétrica final (CEF) (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

3.6 Pigmentos fotossintetizantes

Foram coletadas amostras frescas de folhas, as quais foram imediatamente acondicionadas em tubos contendo 1,5 mL de solução de acetona a 80% e mantidas ao abrigo da luz. Posteriormente, os teores de clorofila a, clorofila b e carotenoides foram determinados em espectrofotômetro (DU 640, Beckman, EUA), por meio de leituras nos comprimentos de onda de 663, 647 e 470 nm, respectivamente, conforme metodologia descrita por Lichtenthaler et al. (1987).

3.7 Eficiência da conversão de energia absorvida

A fluorescência da clorofila foi avaliada entre 7h e 9h da manhã, utilizando um fluorômetro portátil em uma folha completamente expandida e previamente adaptada ao escuro. Foram obtidos os valores de fluorescência inicial (F0) e fluorescência máxima (Fm). A partir desses parâmetros, foi calculada a fluorescência variável (Fv = Fm – F0) e, posteriormente, a eficiência da conversão da energia absorvida pelo fotossistema II (Fv/F0) conforme Lichtenthaler et al. (2005).

3.8 Índice de flavonoides

Os flavonoides foram estimados utilizando um sensor multipigmentos portátil, com as leituras realizadas em folhas completamente expandidas. O equipamento estima o teor de flavonoides de forma não destrutiva.

3.9 Análise Estatísticas

Os dados serão submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Levene para verificar, respectivamente, a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias. Atendidas essas pressuposições, será realizada a análise de variância (ANOVA) pelo teste F. Quando constatado efeito significativo, as médias serão comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas serão realizadas utilizando o programa AgroEstat (Barbosa e Maldonado, 2015).

4. RESULTADOS

O maior acúmulo total do Ca foi observado no tratamento adequado em relação à sua deficiência. O fornecimento do Si no Ca adequado proporcionou um aumento no acúmulo total do Ca em relação a mesma condição sem o

elemento. Na deficiência do Ca, o fornecimento do Si incrementou o acúmulo total do Ca quando comparado a mesma condição sem o elemento (Fig. 2A).

O acúmulo total do Si fora maior nas plantas que receberam o elemento. As plantas com Ca deficiente e com o Si obtiveram maior acúmulo do elemento em relação ao Ca suficiente com o Si (Fig. 2B).

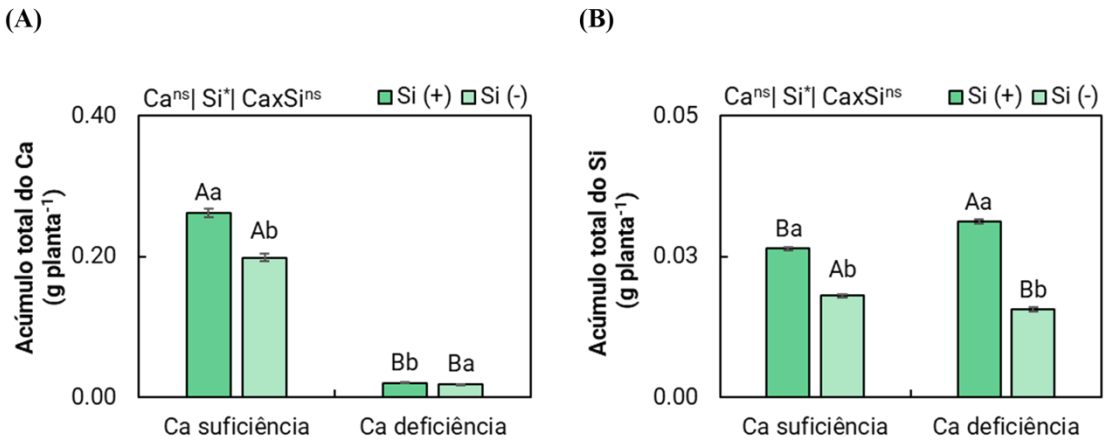


Figura 2. Acúmulo total do Ca (A), Acúmulo total do Si (B). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

O fornecimento do Si no tratamento com Ca deficiente proporcionou um aumento no índice de flavonoides em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 3A). Na suficiência do Ca, o uso do Si também apresentou um maior índice de flavonoides em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 3A).

As plantas que apresentaram maior concentração de clorofila total foram as plantas submetidas aos tratamentos com o Ca suficiente (Fig. 3B). Com o fornecimento do Si na solução nutritiva houve um aumento na clorofila total na suficiência em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 3B). Por outro lado, no Ca deficiente, o fornecimento do Si não diferiu das plantas que não receberam o elemento sob a mesma condição do Ca (Fig. 3B).

Na ausência do Si, as plantas sob deficiência do Ca apresentaram maior índice de extravasamento de eletrólitos do que àquelas com suprimento adequado do Ca (Fig. 3C). Por outro lado, quanto ao efeito do Si, na condição do Ca adequado não foi observada diferença entre a presença e a ausência do Si (Fig. 3C). Entretanto, sob deficiência do Ca, a aplicação do Si reduziu o índice de extravasamento de eletrólitos (Fig. 3C).

A maior Fv/F0 foi em tratamentos com o Ca adequado em relação à sua deficiência (Fig. 3D). No tratamento do Ca adequado com o Si houve maior Fv/F0 que o Ca adequado sem o Si (Fig. 3D). Os tratamentos com o Ca deficiente deferiram entre si, com maior Fv/F0 no tratamento com o Si em relação ao sem o elemento (Fig. 3D).

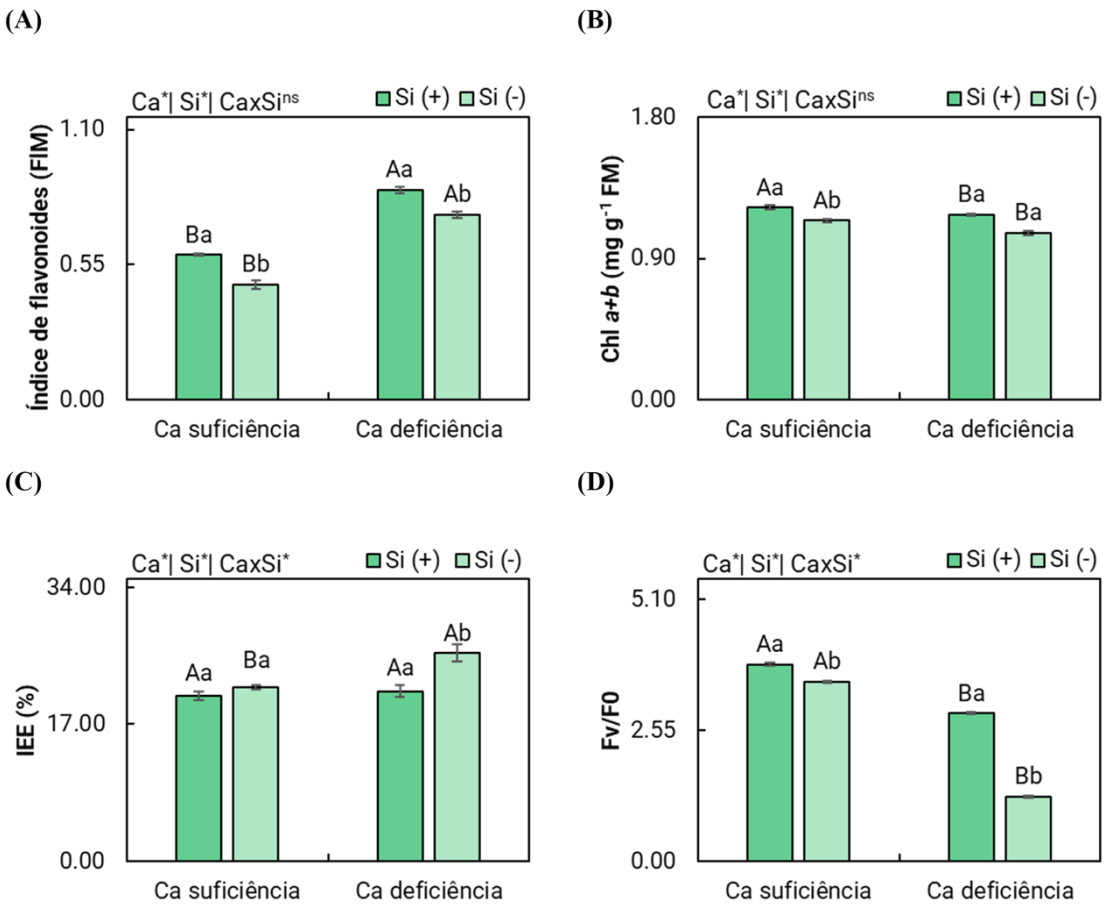


Figura 3. Índice de flavonoides (A), clorofilas (B), índice de extravasamento de eletrólitos (IEE) (C), eficiência da conversão de energia absorvida (Fv/F0). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

As plantas que apresentaram maiores números de folhas foram as plantas tratadas com o Si. O uso do Si na solução nutritiva aumentou o número de folhas nas plantas com o Ca suficiente em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 4A). Nas plantas deficientes em Ca, o uso do Si também aumentou o número de folhas comparado as plantas sem o Si (Fig. 4A).

As maiores alturas de plantas foram observadas em plantas de amendoim submetidas aos tratamentos com o Ca suficiente em relação ao Ca deficiente (Fig. 4B). No entanto, o fornecimento do Si na suficiência e na deficiência do Ca não apresentou diferenças em relação às plantas que não receberam o elemento (Fig. 4B).

A adição do Si na solução nutritiva de plantas de amendoim deficientes em Ca proporcionou um incremento no diâmetro dos caules (Fig. 4C). Assim como, o fornecimento do Si na suficiência do Ca proporcionou um aumento no diâmetro dos caules das plantas (Fig. 4C).

As plantas com suficiência do Ca apresentaram maior massa seca total em relação às com deficiência do nutriente (Fig. 4D). As plantas com suficiência do Ca com o Si, apresentaram maior massa seca total comparadas às que não receberam o elemento, o mesmo ocorreu na deficiência (Fig. 4D).

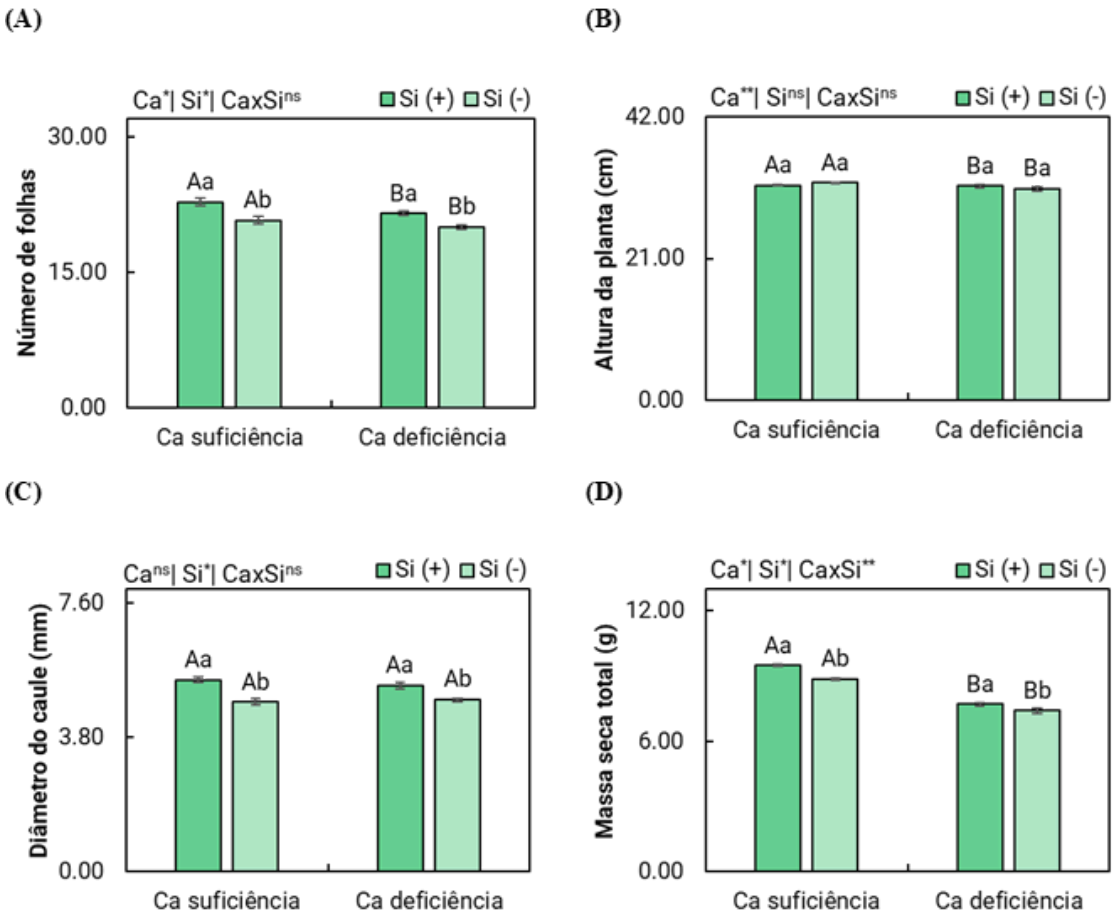


Figura 4. Número de folhas (A), altura da planta (B), diâmetro do caule (C), massa seca total (D). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

O maior número de flores foi encontrado nas plantas submetidas ao tratamento com o Ca suficiente em relação à deficiência (Fig. 5A). Por outro lado, fornecer a suficiência do Ca com o Si, proporcionou um aumento no número de flores nas plantas em relação à mesma condição do Ca sem o Si. Assim como na deficiência, em que as plantas que receberam o Si obtiveram maior número de flores em relação à mesma condição sem o elemento (Fig. 5A).

A deficiência do Ca reduziu o número de vagens em relação à suficiência do Ca. Não foram observadas diferenças entre o Ca adequado com o Si em relação ao Ca adequado sem o Si para o número de vagens. Quando

foi fornecido o Si na solução nutritiva com o Ca deficiente, observou-se um incremento do número de vagens em relação às plantas que não receberam o elemento na mesma condição do Ca (Fig. 5B).

A massa seca dos grãos foi reduzida na deficiência do Ca quando comparadas à suficiência (Fig. 5C). Na suficiência do Ca com o Si a massa seca dos grãos foi maior em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 5C). A massa seca dos grãos na deficiência do Ca com o Si foi maior quando comparadas a mesma condição do Ca sem o Si (Fig. 5C).

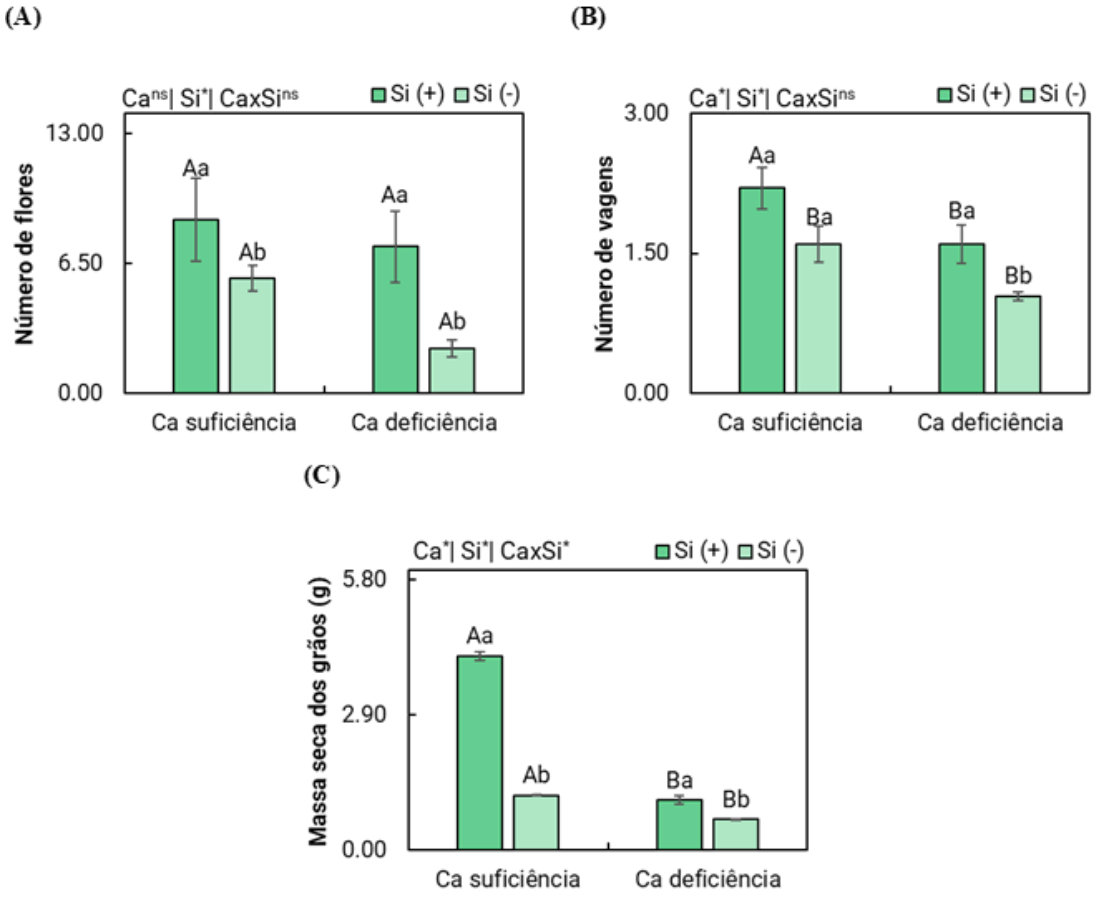


Figura 5. Número de flores (A), número de vagens (B), massa seca dos grãos (C). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do Ca dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) as minúsculas diferenças entre presença ou ausência do Si no mesmo nível do Ca ($p < 0,05$).

A massa seca dos grãos foi reduzida na deficiência do Ca quando comparadas à suficiência (Fig. 6C). Na suficiência do Ca com o Si a massa seca dos grãos foi maior em relação a mesma condição sem o elemento (Fig. 6C). A massa seca dos grãos na deficiência do Ca com o Si foi maior quando comparadas a mesma condição do Ca sem o Si (Fig. 6C).

Na parte aérea (Figura 6A), a deficiência do Ca (-Ca) reduziu o desenvolvimento dos folíolos e alterou a coloração das folhas, enquanto a aplicação do Si (-Ca+Si) favoreceu o desenvolvimento da parte aérea. Nas plantas sem folhas (Figura 6B), a deficiência do Ca reduziu o desenvolvimento e as estruturas reprodutivas, como ginóforos e vagens, enquanto o Si promoveu maior desenvolvimento. Nas plantas inteiras (Figura 6C), observou-se menor crescimento sob deficiência do Ca, com maior desenvolvimento no tratamento com o Si (-Ca+Si).

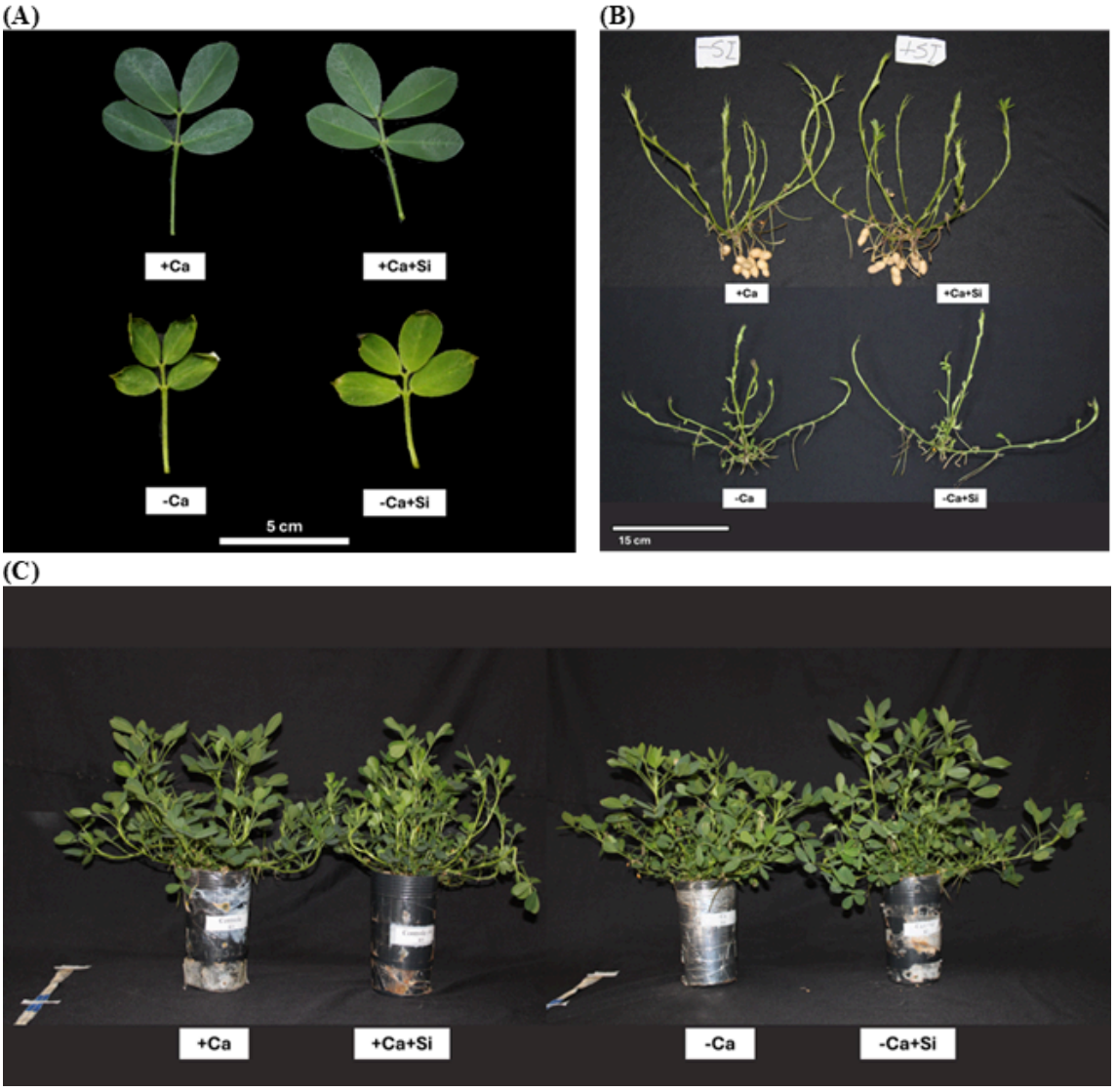


Figura 6. Plantas de amendoim que receberam solução nutritiva completa (+Ca), a solução nutritiva completa com o Si (+Ca+Si), as plantas que não receberam o Ca (-Ca) e as que não receberam o Ca na presença do Si (-Ca+Si).

5. DISCUSSÃO

Na deficiência do Ca no amendoim, observou-se redução no acúmulo do nutriente em plantas com a sua deficiência (Fig. 1A). O acúmulo reflete a eficiência da planta em absorver o nutriente do solo ou da solução nutritiva e incorporá-lo aos seus tecidos durante o crescimento (Rengel et al., 2022). As plantas de amendoim com deficiência do Ca, mas que receberam o Si, apresentaram maior acúmulo do nutriente em relação às que não o receberam (Fig. 1A). Isso ocorre devido ao efeito sinérgico do Si no aumento da absorção

do Ca, devido ao fato do Si favorecer a taxa de crescimento do sistema radicular e ao efeito molecular do elemento no aumento da atividade da ATPase nas membranas envolvidas na absorção do Ca (Silva, 2021).

Por outro lado, as plantas que absorveram o Si foram aquelas que receberam o elemento, especialmente àquela sob deficiência do Ca em relação à suficiência (Fig. 1B). A fonte aplicada permitiu que as plantas absorvessem o elemento, devido a sua produção produzida a partir do dióxido do Si (SiO_2), formando partículas extremamente pequenas, com tamanho entre 5 e 100 nm e essa dimensão reduzida favorece sua absorção pelas plantas, contribuindo também para a absorção de outros nutrientes (Teixeira et al., 2024).

Quando a planta está sob estresse nutricional, o acúmulo de determinados compostos fenólicos representa uma resposta sensível e pode ser utilizado como um indicador precoce de deficiências minerais (Chishaki e Horiguchi, 1997). Dentre os compostos fenólicos, os flavonoides são uma classe de metabólitos secundários sintetizados por plantas, que desempenham papéis biológicos na produção de pigmentos vegetais e nas respostas a estresses bióticos e abióticos (Mao et al., 2025).

As plantas que apresentaram maiores concentrações de flavonoides foram as plantas submetidas a deficiência do Ca com a adição do Si na solução nutritiva (Fig. 2A). Esse aumento está diretamente associado ao Si estimular a atividade de enzimas relacionadas à defesa, especialmente a fenilalanina amônia-liase (PAL), considerada a principal enzima da via dos fenilpropanoides; a ativação da PAL aumenta a produção de compostos fenólicos, lignina, flavonoides e fitoalexinas (Gulzar et al., 2024).

Além desses compostos, um dos mais importantes para as plantas em termos de fotossíntese são as clorofilas (Pareek et al., 2017). A clorofila é o pigmento mais abundante no sistema fotossintético de plantas sendo indispensável para a absorção de energia luminosa e transferência de elétrons durante a fotossíntese (Hu et al., 2021). No amendoim, observou-se que a deficiência do Ca reduz as clorofilas totais em relação à deficiência, mas adicionar o Si na solução nutritiva deficiente em Ca proporciona uma manutenção dessas clorofilas (Fig. 2B). Essa manutenção dos pigmentos se deve a capacidade que o Si possui em atenuar os efeitos de estresses sobre a fotossíntese, protegendo o aparato fotossintético e mantendo a integridade das membranas dos tilacóides (Rastogi et al., 2021).

O incremento desses pigmentos amplia a capacidade do Captura de luz e protege o aparato fotossintético contra danos oxidativos, contribuindo para uma fotossíntese mais eficiente (El-Sayed et al., 2025).

Por outro lado, nota-se que as plantas apresentaram redução em danos em membrana, observadas pelo índice de extravasamento de eletrólitos, àquelas deficientes em Ca, mas que receberam o Si (Fig. 2 C). O índice de extravasamento de eletrólitos é uma medida indireta da integridade das membranas celulares, atuando como um indicador de danos provocados por estresses bióticos e abióticos, onde valores elevados de IEE indicam menor estabilidade da membrana plasmática e maior comprometimento celular (Parkash V et al., 2020). Com o incremento de compostos antioxidantes, como os flavonoides, observa-se que há redução nesse tipo de dano nas plantas que receberam o Si (Fig. 2A), os flavonoides, como descrito anteriormente, auxiliam as plantas na redução de estresse oxidativo (Gulzar et al., 2024).

Confirmando a redução desses danos, considera-se que os parâmetros de fluorescência da clorofila, como Fv/F0, são utilizados para avaliar alterações na eficiência fotoquímica e a funcionalidade do fotossistema II (PSII), e as reduções nesses valores indicam comprometimento dos centros de reação do PSII e menor capacidade potencial de conversão da energia luminosa em química (Lichtenthaler et al., 2005).

Dessa forma, a maior Fv/F0 foi em tratamentos com o Ca adequado em relação à sua deficiência, porém a adição do Si na solução com Ca deficiente e suficiente melhorou a Fv/F0 (Fig. 2D). Melhorias estas, associadas à capacidade do Si em melhorar a taxa de fotossíntese e transpiração, o rendimento quântico basal e o rendimento quântico máximo da fotoquímica do PSII (RASTOGI et al., 2021).

Os efeitos benéficos do Si refletiram-se no crescimento das plantas. A aplicação do Si aumentou o número de folhas (Fig. 3A) e o diâmetro do caule (Fig. 3C) em plantas de amendoim sob deficiência do Ca, em comparação às plantas não tratadas com Si na mesma condição. Além disso, o Si promoveu maior massa seca total em plantas cultivadas com suprimento adequado do Ca (Fig. 3D). Esses resultados podem ser atribuídos à capacidade do Si de otimizar o metabolismo fisiológico das plantas, favorecendo o acúmulo de clorofila, a eficiência fotossintética e, consequentemente, a produção de biomassa (Trejo-Téllez et al., 2020). Adicionalmente, o Si pode promover alterações na anatomia foliar, aumentando a densidade, o tamanho e a simetria dos estômatos, o que favorece a difusão de CO_2 e eleva a eficiência fotossintética, refletindo em maior crescimento vegetal (Mukarram et al., 2025).

No amendoim, as flores constituem a unidade reprodutiva responsável pela formação das vagens, mas a planta produz muito mais flores do que consegue transformar em frutos maduros, sendo que apenas cerca de 15 a 20% das flores originam vagens (Kaba, 2014). Houve um aumento no número de flores das plantas após a aplicação do Si em plantas de amendoim com deficiência do Ca em relação as que não receberam o Si (Fig. 4A). Esses efeitos do Si sobre a floração ocorrem principalmente de forma indireta, como consequência das melhorias fisiológicas e nutricionais promovidas pelo elemento, e não por uma ação direta sobre os mecanismos que controlam a indução floral (Attia e Elhawat, 2021). Consequentemente, o Si aumentou o número de vagens nas plantas (Fig. 4B) e a massa seca dos grãos em relação as plantas de amendoim sem o elemento (Fig. 4C).

6. CONCLUSÃO

A deficiência do Ca comprometeu o acúmulo do nutriente, a eficiência fotoquímica, o crescimento e a produção de plantas de amendoim, além de aumentar os danos às membranas celulares. Por outro lado, o fornecimento das nanopartículas do Si atenuou esses efeitos, promovendo maior acúmulo do Ca, reduzindo danos em membrana e favorecendo o desempenho fotossintético. Como consequência, observou-se um incremento no crescimento das plantas, na floração e na produção de vagens, evidenciando o potencial das nanopartículas do Si como estratégia para mitigar os efeitos da deficiência do Ca em plantas de amendoim.

7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. B. S., Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., & Rocha, A. M. S. O silício atenua o estresse nutricional da deficiência de nitrogênio, fósforo e cálcio em duas plantas forrageiras. Scientific Reports , v. 12, n. 1, p. 6611, 2022.

ATTIA, Eman A.; ELHAWAT, Nevien. Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (Tagetes erecta L.). Scientia Horticulturae, v. 282, p. 110015, 2021.

BARBOSA, José Carlos; MALDONADO JUNIOR, Wagner. AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal, FCAV/UNESP. 396p, 2015.

BARRETO, Rafael Ferreira; BARÃO, Lúcia. Silício: Absorção e transporte transcelular e apoplástico no xilema. In: Benefícios do silício na nutrição das plantas. Cham: Springer International Publishing, p. 17-25, 2023.

BERTIOLI, D. J., Seijo, G., Freitas, F. O., Valls, J. F., Leal-Bertioli, S. C., & Moretzsohn, M. C. An overview of peanut and its wild relatives. Plant Genetic Resources, 9(1), 134-149, 2011.

BHAT, J. A., Rajora, N., Raturi, G., Sharma, S., Dhiman, P., Sanand, S., ... & Deshmukh, R. Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: major emphasis on the practicality, efficacy and concerns. *Nanoscale Advances*, *3*(14), 4019-4028, 2021.

BLEDSOE, R. W., & Harris, H. C. The influence of mineral deficiency on vegetative growth, flower and fruit production, and mineral composition of the peanut plant. Plant Physiology, 25(1), 63, 1950.

BULFA JR, A. D., Alvarado, M. C., Sanchez, P. B., Edaño, M. L. S., Cruz, P. C. S., & Ocampo, E. T. M. Sustainable synthesis of silica nanoparticles (SNPs) from agricultural residues: A review on plant stress mitigation and the sustainability triangle. Green Technologies and Sustainability, 3(4), 100221, 2025.

DE CAMARGO, Mônica Sartori. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. 2016.

CAMARGO, M. S. D., Korndörfer, G. H., Foltran, D. E., Henrique, C. M., & Rossetto, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de Diatraea saccharalis em cultivares de cana-de-açúcar. Bragantia, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010.

CHALWE, Hendrix M. Modeling pre-harvest aflatoxin incidence in groundnut (arachis hypogaea l.) using selected soil properties and ambient temperature. The University of Zambia, 2020.

CHISHAKI, Naoya; HORIGUCHI, Tsuyosi. Responses of secondary metabolism in plants to nutrient deficiency. Soil Science and Plant Nutrition, v. 43, n. sup1, p. 987-991, 1997.

COBB, W. Y.; JOHNSON, B. R. *Peanuts: Culture and Uses*. Roanoke, VA: American Peanut Research and Education Association Publication, 1973.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2025) Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos – Safra 2024/2025. Brasília: CONAB.

COOLBEAR, Peter. Reproductive biology and development. In: The Groundnut Crop: A scientific basis for improvement. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 138-172, 1994.

CORREIA, M. A. R., de Mello Prado, R., Almeida, T. B. F., Puga, A. P., & Barbosa, J. C. Avaliação da desordem nutricional de plantas de amendoim cultivadas em solução nutritiva suprimidas de macronutrientes. Scientia Agraria, v. 13, n. 1, p. 21-28, 2012.

CORDEIRO, Carlos Felipe dos Santos; GALDI, Leonardo Vesco; ECHER, Fábio Rafael. Nutrient uptake and removal by runner peanut cultivars of different maturity groups. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 49, p. e0240088, 2025.

DA SILVA, DL, de Mello Prado, R., Tenesaca, LFL *et al.* O silício atenua a deficiência de cálcio aumentando o teor de ácido ascórbico, o crescimento e a qualidade das folhas de repolho. *Sci Rep* **11** , 1770 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-020-80934-6

D'IMPERIO, M., Renna, M., Cardinali, A., Buttaro, D., Santamaria, P., & Serio, F. (2016). Silicon biofortification of leafy vegetables and its bioaccessibility in the edible parts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 3, p. 751-756, 2016.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. Plant Science, v. 135, n. 1, p. 1–9, 1998.

DONG, Z., Li, Y., Xiao, X., Chen, Y., & Shen, X. Silicon effect on growth, nutrient uptake, and yield of peanut (Arachis hypogaea L.) under aluminum stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 15, p. 2001-2008, 2018.

DOS SANTOS, L. C., da Silva, G. A. M., de Oliveira Abranches, M., Rocha, J. L. A., de Araújo Silva, S. T., Ribeiro, M. D. S., ... & de Sousa, F. Q. . O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247-e3810716247, 2021.

EL-SAYED, I. M., Othman, E. Z., Hewidy, M., Saudy, H. S., & El-Ziat, R. A. Modulation of biochemical constituents, nutritional status, growth and flowering of Brunfelsia grandiflora via supplying diverse silicon sources. Scientific Reports, 15(1), 34293, 2025.

EPSTEIN, Emanuel. Silicon: its manifold roles in plants. Annals of applied Biology, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2025) FAOSTAT Statistical Database. Roma: FAO.

GELAYE, Yohannes; LUO, Huaiyong. Optimizing peanut (Arachis hypogaea L.) production: genetic insights, climate adaptation, and efficient management practices: systematic review. Plants, v. 13, n. 21, p. 2988, 2024.

GULZAR, N., Lone, R., Al-Sadi, A. M., & Azeez, A. Interactive role of silicon and phenolics in biotic stress regulation in plants and expression of phenylpropanoid pathway genes. In: Plant phenolics in biotic stress management. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 305-324.2024.

HAMMONS, R. O., Herman, D., & Stalker, H. T. Origin and early history of the peanut. In Peanuts (pp. 1-26). Aocs Press, 2016.

Harris, H. C. The effect on the growth of peanuts of nutrient deficiencies in the root and the pegging zone. Plant Physiology, 24(1), 150, 1949.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment Station, v. 347, n. 2nd edit, 1950.

HU X, Gu T, Khan I, Zada A, Jia T. Research progress in the interconversion, turnover and degradation of chlorophyll. Cells, v. 10, n. 11, p. 3134, 2021.

KABA, James. Effect of flower production and time of flowering on pod yield of peanut (Arachis hypogaea L) genotypes. 2014.

KADIRIMANGALAM, Sai Rekha; SAWARGAONKAR, Gajanan; CHOUDHARI, Pushpajeet. Morphological and molecular insights of calcium in peanut pod development. Journal of Agriculture and Food Research, v. 9, p. 100320, 2022.

PEGUES, K. D., Tubbs, R. S., Harris, G. H., & Monfort, W. S. Effect of calcium source and irrigation on soil and plant cation concentrations in peanut (Arachis hypogaea L.). Peanut Science, v. 46, n. 2, p. 206-212, 2019.

KORNDÖRFER, G. H. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

KRASKA, Joseph E.; BREITENBECK, Gary A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

LI, F., Hou, Y., Chen, L., & Qiu, Y. Advances in silica nanoparticles for agricultural applications and biosynthesis. Advanced Biotechnology, v. 3, n. 2, p. 14, 2025.

LI, Y., Xiao, X., Chen, Y., & Shen, X. Silicon effect on nutrient acquisition of peanut (Arachis hypogaea L.) under aluminum stress. 2017.

LICHTENTHALER, Hartmut K. [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: Methods in enzymology. Academic Press, 1987. p. 350-382.

LICHTENTHALER, H. K., Buschmann, C., & Knapp, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. Photosynthetica, v. 43, n. 3, p. 379-393, 2005.

MAO, Yuye; LUO, Jiajia; CAI, Zeping. Biosynthesis and regulatory mechanisms of plant flavonoids: a review. Plants, v. 14, n. 12, p. 1847, 2025.

MUKARRAM M, Zehra A, Afzal S, Sliacka Konôpková A, Khan KA, Alqahtani AR, El-Mekkawy HI, Kurjak D, Lux A, Chen R and Li Q. Beyond essentiality: silicon as a systems regulator of photosynthesis under stress scenarios. Frontiers in Plant Science, v. 16, p. 1690421, 2025.

NETO, Jayme Ferrari; DA COSTA, Claudio Hideo Martins; CASTRO, Gustavo Spadotti Amaral. Ecofisiologia do amendoim. Scientia Agraria Paranaensis, v. 11, n. 4, p. 01-13, 2012.

OLLE, Margit; BENDER, Ingrid. Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: A review. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, v. 84, n. 6, p. 577-584, 2009.

PAREEK, S., Sagar, N. A., Sharma, S., Kumar, V., Agarwal, T., González-Aguilar, G. A., & Yahia, E. M. Chemistry and biological functions. Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health, 2nd Edition, p. 269-284, 2017.

PARKASH, Ved; SINGH, Sukhbir. A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. Sustainability, v. 12, n. 10, p. 3945, 2020.

PATEL, Monika; FATNANI, Dhara; PARIDA, Asish Kumar. Potassium deficiency stress tolerance in peanut (Arachis hypogaea) through ion homeostasis, activation of antioxidant defense, and metabolic dynamics: Alleviatory role of silicon supplementation. Plant Physiology and Biochemistry, v. 182, p. 55-75, 2022.

PRADO, R. DE MELLO, Alves, D. M. R., & de Aquino Vidal Lacerda Soares, A. Silicon: the only element in plant nutrition with a mitigating effect on multiple stresses. In: Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 41-64.

RASTOGI, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajihashemi, S., Kumari, P., ... & Brestic, M. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants…?. Plant Physiology and Biochemistry, v. 169, p. 40-48, 2021.

RENGEL, Zed; CAKMAK, Ismail; WHITE, Philip John (Ed.). Marschner's mineral nutrition of plants. Academic press, 2022.

ROBSON, A. D., & Pitman, M. G. Interactions between nutrients in higher plants. In: Inorganic plant nutrition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983. p. 147-180.

RODRIGUES FILHO, Francisco Solano de Oliveira; FEITOSA, Celi Teixeira; GERIN, Marcelo Aparecido Nunes. Omissão de macronutrientes em plantas de amendoim. Bragantia, v. 47, n. 2, p. 305-312, 1988.

SCHLEIER, Rodolfo; GALITESI, Célia Regina Lulo; FERREIRA, Esmeralda Cristina Morau. Silício e cálcio–uma abordagem antroposófica. Arte Médica Ampliada, v. 34, n. 3, p. 102-113, 2014.

SHEN, X., Xiao, X., Dong, Z., & Chen, Y. Silicon effects on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of peanut under aluminum stress. Acta Physiologiae Plantarum, v. 36, n. 11, p. 3063-3069, 2014.

SHI, G., Cai, Q., Liu, C., & Wu, L. Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. Plant Growth Regulation, v. 61, n. 1, p. 45-52, 2010.

DA SILVA, Dalila Lopes; DE MELLO PRADO, Renato. Silicon mitigates the effects of calcium, magnesium, and sulfur in plants. In: Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 113-128.

DA SILVA, Dalila Lopes; DE MELLO PRADO, Renato: Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. Scientific reports, v. 11, n. 1, p. 1770, 2021.

SINGLETON V.L., ROSSI J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. American journal of Enology and Viticulture, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.

SORATTO, R. P., Crusciol, C. A. C., Costa, C. H. M. D., Ferrari Neto, J., & Castro, G. S. A. (2012). Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalária e milheto, cultivados solteiros e consorciados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, p. 1462-1470, 2012.

SOUZA JUNIOR, Jonas Pereira DE., Frazão, J. J., de Morais, T. C. B., Espoti, C. D., dos Santos Sarah, M. M., & de Mello Prado, R. Foliar spraying of silicon associated with salicylic acid increases silicon absorption and peanut growth. Silicon, v. 13, n. 4, p. 1269-1275, 2021.

STALKER, H. Thomas. Peanut (*Arachis hypogaea* L.). Field crops research, v. 53, n. 1-3, p. 205-217, 1997.

STALKER, H. Thomas. Utilizing wild species for peanut improvement. Crop Science, v. 57, n. 3, p. 1102-1120, 2017.

SU, H., Foster, T., Hogeboom, R. J., Luna-Gonzalez, D. V., Mialyk, O., Willaarts, B., ... & Krol, M. S. Nutrient production, water consumption, and stresses of

large-scale versus small-scale agriculture: A global comparative analysis based on a gridded crop model. Global Food Security, v. 45, p. 100844, 2025.

TEIXEIRA, G. C. M., Porras, C. V. G., Ferreira, P. M., Rocha, J. R., & de Mello Prado, R. Silicon and Nano-Silicon in Water Use Efficiency. Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention, p. 265-286, 2024.

TREJO-TÉLLEZ LI, García-Jiménez A, Escobar-Sepúlveda HF, Ramírez-Olvera SM, Bello-Bello JJ, Gómez-Merino FC. Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. PeerJ, v. 8, p. e9224, 2020.

WANG, Q., Yang, S., Wan, S., & Li, X. The significance of calcium in photosynthesis. International journal of molecular sciences, v. 20, n. 6, p. 1353, 2019.

WU, Y., Sun, Z., Qi, F., Tian, M., Wang, J., Zhao, R., ... & Zhang, X. Comparative transcriptomics analysis of developing peanut (*Arachis hypogaea* L.) pods reveals candidate genes affecting peanut seed size. Frontiers in plant science, v. 13, p. 958808, 2022.

XIE, M., Wang, Z., Xu, X., Zheng, X., Liu, H., & Shi, P. Quantitative estimation of the nutrient uptake requirements of peanut. Agronomy, v. 10, n. 1, p. 119, 2020.

YANG S, Li L, Zhang J, Geng Y, Guo F, Wang J, Meng J, Sui N, Wan S and Li X. Transcriptome and differential expression profiling analysis of the mechanism of Ca2+ regulation in peanut (*Arachis hypogaea*) pod development. Frontiers in plant science, v. 8, p. 1609, 2017.