

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

**NANO-SILÍCIO AO MODULAR METABOLISMO
ANTIOXIDANTE NÃO ENZIMÁTICO E FLUORESCÊNCIA DA
CLOROFILA AUMENTA A TOLERÂNCIA DO AMENDOIM A
DEFICIÊNCIA DE ENXOFRE**

Maria Victória Negrão de Oliveira

**Jaboticabal – SP
1º Semestre/2026**

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

**NANO-SILÍCIO AO MODULAR METABOLISMO
ANTIOXIDANTE NÃO ENZIMÁTICO E FLUORESCÊNCIA DA
CLOROFILA AUMENTA A TOLERÂNCIA DO AMENDOIM A
DEFICIÊNCIA DE ENXOFRE**

Maria Victória Negrão de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves

**Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Campus de Jaboticabal para graduação em
ENGENHARIA AGRONÔMICA.**

Jaboticabal – SP

1º Semestre/2026

O48n	Oliveira, Maria Victória Negrão de Nano-silício ao modular metabolismo antioxidante não enzimático e fluorescência da clorofila aumenta a tolerância do amendoim à deficiência de enxofre / Maria Victória Negrão de Oliveira. -- Jaboticabal, 2026 41 f. : 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 Coorientadora: Deyvielen Maria Ramos Alves 1. Estresse vegetal. 2. Plantas Nutrição. 3. Plantas Efeito do silício. I. Título.
------	--

Maria Victória Negrão de Oliveira

**NANO-SILÍCIO AO MODULAR METABOLISMO ANTIOXIDANTE NÃO
ENZIMÁTICO E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA AUMENTA A
TOLERÂNCIA DO AMENDOIM A DEFICIÊNCIA DE ENXOFRE.**

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 Agrônômica**.

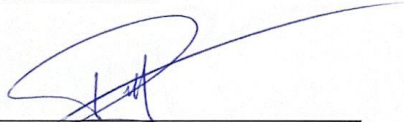
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Trabalho aprovado em 07/05/2026

Banca Examinadora:



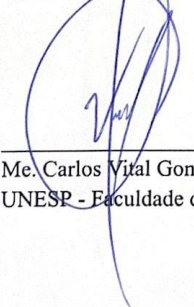
Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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



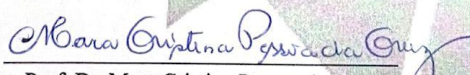
Dr.ª Patricia Messias Ferreira

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



Me. Carlos Vital Gonzalez Porras

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



Prof. Dr. Mara Cristina Pessoa da Cruz

Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, por nunca soltar a minha mão. Por estar presente em cada momento, principalmente nos mais difíceis, quando mais precisei. Por me sustentar, me proteger e me abençoar ao longo de toda a minha jornada acadêmica. É a Ele que devo minha força para continuar e minha fé para acreditar que tudo sempre tem um propósito.

Agradeço, com todo o meu coração, aos meus pais, Jane e João, e ao meu irmão, João Victor, por serem minha base em todos os momentos. Por segurarem minhas mãos quando eu mais precisei, pelo apoio constante e por nunca deixarem que eu desistisse, mesmo diante das dificuldades. Vocês foram minha força, meu incentivo e meu porto seguro em toda essa caminhada.

Às minhas amigas Ana Luísa, Carolina, Julia, Maria Clara e Thaisa, meu mais sincero agradecimento por caminharem ao meu lado em cada etapa. Por serem abrigo nos dias difíceis, leveza nos momentos de cansaço e força quando eu precisei seguir. Ter vocês por perto tornou tudo mais suportável, mais bonito e muito mais especial.

À minha segunda família, República Dama de Copos, deixo minha gratidão mais profunda por todo o acolhimento e carinho ao longo desses cinco anos. Vocês foram muito mais do que companhia, foram presença constante, apoio verdadeiro e aquele sentimento de lar mesmo longe de casa. Levo comigo cada momento, cada risada e tudo o que vivemos juntos.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (Genplant), registro meus sinceros agradecimentos pelo apoio e pelas valiosas contribuições ao longo desta trajetória em especial ao meu orientador, Professor Renato de Mello Prado, e à minha coorientadora M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves pela orientação, paciência e cuidado em cada etapa. O apoio de vocês foi essencial para o meu crescimento e para que este trabalho fosse concluído com qualidade. Levo comigo não só o conhecimento adquirido, mas também a forma atenciosa e comprometida com que me conduziram até aqui.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal, expresso meus sinceros agradecimentos pela excelência no ensino e pela sólida formação proporcionada, que foram fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, da qual tenho orgulho em ter feito parte.

E a todas as pessoas que contribuíram nesta jornada,

Muito obrigada!

Sumário

1. INTRODUÇÃO	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1. Amendoim: aspectos produtivos, importância socioeconômica, composição e manejo nutricional	8
2.2. Deficiência de enxofre em sistemas agrícolas: causas, funções e implicações no metabolismo antioxidante e no desenvolvimento vegetal	11
2.3. Silício na nutrição vegetal e sua atuação na atenuação da deficiência de enxofre	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Desenho experimental e tratamentos	17
3.2. Índice de clorofilas e antocianinas	18
3.3. Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)	18
3.4. Índice de extravasamento de eletrólitos	19
3.5. Fenóis totais	19
3.6. Variáveis de crescimento	20
3.7. Determinação de teor de nutrientes e acúmulos	21
3.8. Análise estatística	21
4. RESULTADOS	22
5. DISCUSSÃO	27
6. CONCLUSÕES	32
7. REFERÊNCIAS	32

RESUMO

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) possui elevada demanda por enxofre (S), nutriente necessário para a síntese de aminoácidos sulfurados e proteínas. No entanto, o baixo suprimento desse nutriente acarreta distúrbios fisiológicos e bioquímicos nas plantas. O silício (Si) surge como um elemento benéfico capaz de atenuar estresses abióticos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de Si na forma nano na atenuação dos efeitos da deficiência de S em plantas de amendoim. Por meio de um experimento em casa de vegetação com delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x2, avaliou-se a interação entre S adequado e deficiente, combinados com a presença ou ausência de Si, avaliando algumas variáveis fisiológicas (índice de extravasamento de eletrólitos e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)), bioquímicas (clorofilas, antocianinas e fenóis totais), biométricas (altura da planta, número de folhas, diâmetro do caule, massa seca da parte aérea e massa seca das raízes) e nutricionais (acúmulo de S e de Si). Os resultados demonstraram que, sob condições de deficiência de S, a aplicação de Si atuou como um atenuante do provável dano celular, atribuído aos danos em membrana, dos quais o elemento atuou reduzindo o índice de extravasamento de eletrólitos. Redução está associada ao incremento de compostos antioxidantes como fenólicos e antocianinas. Esta redução de danos também foi refletida na manutenção do aparato fotossintético, evidenciada pelo aumento nas concentrações de clorofilas, antocianinas e na melhoria da eficiência quântica do fotossistema II. Além disso, é importante ressaltar que o Si incrementou compostos antioxidantes na suficiência de S, além de outros parâmetros como aumento no diâmetro dos caules. Portanto, o nano-silício pode favorecer o desempenho metabólico em condições ideais, conferir à cultura do amendoim uma maior resiliência fisiológica contra danos causados por limitações nutricionais, como a deficiência de S.

Palavras-chave: Fluorescência da clorofila, Estresse abiótico, Desbalanço nutricional, Estabilidade da membrana.

ABSTRACT

Peanuts (*Arachis hypogaea* L.) have a high demand for sulfur (S), a nutrient necessary for the synthesis of sulfur-containing amino acids and proteins. However, low supply of this nutrient leads to physiological and biochemical disorders in plants. Silicon (Si) emerges as a beneficial element capable of mitigating abiotic stresses. The objective of this work was to evaluate the effect of applying Si in nano form to mitigate the effects of S deficiency in peanut plants. Through a completely randomized greenhouse experiment in a 2x2 factorial scheme, the interaction between adequate and deficient sulfur (S), combined with the presence or absence of silicon (Si), was evaluated, assessing several physiological (electrolyte leakage index and quantum efficiency of photosystem II (Fv/Fm)), biochemical (chlorophylls, anthocyanins, and total phenols), biometric (plant height, number of leaves, stem diameter, shoot dry mass, and root dry mass), and nutritional (accumulation of S and Si) variables. The results demonstrated that, under S deficiency conditions, the application of Si acted as an attenuator of probable cell damage, attributed to membrane damage, in which the element acted by reducing the electrolyte leakage index. This reduction is associated with an increase in antioxidant compounds such as total phenols and anthocyanins. This reduction in damage was also reflected in the maintenance of the photosynthetic apparatus, evidenced by the increase in chlorophyll and anthocyanin concentrations and the improvement in the quantum efficiency of photosystem II. Furthermore, it is important to highlight that Si increased antioxidant compounds to the extent of S deficiency, in addition to other parameters such as increased stem diameter. Therefore, nano-silicon can favor metabolic performance under ideal conditions, conferring greater physiological resilience to peanut crops against damage caused by nutritional limitations, such as S deficiency.

Keywords: Chlorophyll fluorescence, Abiotic stress, Nutritional imbalance, Membrane stability.

1. INTRODUÇÃO

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma leguminosa e, atualmente a China, a Índia e a Nigéria, são os maiores produtores globais, representando respectivamente 37%, 13% e 9% da produção mundial (FAO, 2026; Oliveira et al., 2025). No Brasil, o maior estado produtor desta cultura é São Paulo, que representa cerca de 80% de toda a produção nacional (CONAB, 2026).

Além de ser uma cultura de importância econômica, o amendoim, também é necessário para garantia da segurança alimentar (Valentine et al., 2016). Devido apresentar em sua composição proteínas, gorduras e vitaminas essenciais, como a do complexo E e D (Arya et al., 2016). A sua semente contém cerca de 25 a 30% de proteína absorvível, 45 a 50% de óleo, 20% de carboidratos e 5% de fibras e resíduos, tornando-se uma importante fonte de nutrição para os seres humanos (El-Sherbeny et al., 2023). O amendoim também é utilizado em uma variedade de produtos, desde alimentos até aplicações industriais, ressaltando sua versatilidade e importância econômica (Zhao et al., 2023).

Entretanto, a manutenção da qualidade do produto colhido está diretamente condicionada ao manejo nutricional adotado ao longo do ciclo do cultivo, uma vez que o amendoim apresenta elevada demanda por nutrientes, conforme evidenciado pela expressiva exportação de elementos minerais durante a colheita (Wang et al., 2021). Nesse contexto, o enxofre (S) desponta como um dos nutrientes de maior exigência pela cultura (Correia et al., 2012), com demandas estimadas entre 15 e 30 kg ha⁻¹ (Dawar et al., 2023).

Dados recentes demonstram que 40 a 45% de áreas agrícolas apresentam deficiência do enxofre (S) (Thirunavukkarasu et al. 2024). Na deficiência desse nutriente, é observada a diminuição de compostos antioxidantes como os fenóis totais, aumento do índice de extravasamento de eletrólitos das células, indicando comprometimento severo das membranas celulares (Costa et al. 2025).

No amendoim, a deficiência deste nutriente manifesta-se em folhas mais jovens apresentando amarelecimento evidenciado, devido à participação do mesmo na síntese de clorofilas, assim como, os caules ficam mais finos, as folhas encurvadas e surgimento de outros sintomas (Ningthi et al. 2024). Portanto, gera prejuízos diretos ao crescimento (Prado, 2021), e também diminuição na nodulação, o que compromete negativamente a fixação biológica de nitrogênio (N) e a produtividade (Dawar et al., 2023). No entanto, a disponibilidade de nitrogênio (N) torna-se insuficiente na ausência de enxofre (S), uma vez que esse nutriente é essencial para a síntese de aminoácidos sulfurados e, conseqüentemente, para a adequada formação de proteínas (Silva e Prado, 2023). Porém, o S precisa ser manejado de forma integrada e sustentável, assim como já ocorre com o nitrogênio (N) e com o fósforo (P) (Gerson e Hinckley, 2023). Para isso, o uso de elementos benéficos, como o silício (Si), tem sido apontado como uma alternativa para atenuação de múltiplos estresses, incluindo as de desordens nutricionais (Prado et al. 2024).

Em amendoim, estudos demonstram que a aplicação de Si promove aumento no crescimento vegetativo (Shen et al., 2014), incremento na produção de vagens e maior produtividade de grãos (Crusciol et al., 2013; Fernandes et al., 2020). Os mecanismos associados a isso, incluem melhorias em: i) clorofilas, ii) compostos

antioxidantes, iii) eficiência fotossintética e iv) biomassa das plantas (Silva e Prado, 2023).

Embora os efeitos do Si sob diferentes condições de estresse sejam amplamente estudados (Prado et al., 2024), as investigações que abordam especificamente sua interação com a nutrição sulfurada dependem da espécie (Silva e Prado, 2023), sendo ainda escassas para a cultura do amendoim. Nesse contexto, um desafio adicional deve ser considerado, uma vez que se trata de uma espécie não acumuladora de Si; portanto, o uso de fontes inovadoras torna-se relevante para potencializar a absorção desse elemento e, conseqüentemente, seus efeitos benéficos na planta. Especialmente com fontes nanoparticuladas de Si (nano-Si), consideradas inovadoras devido ao seu tamanho de partícula em escala nanométrica (1–100 nm), que confere elevada relação superfície/volume, maior reatividade e comportamento físico-químico distinto em comparação ao Nano-silício a granel (Naaz et al. 2023).

Essa fonte, tem promovido excelentes resultados em espécies consideradas não acumuladoras do Si (Costa et al. 2024, Alves et al. 2023, Alves et al. 2024), como é o caso do amendoim, inclusive com deficiência de S, conforme observado em plantas de pimentão (Costa et al. 2025). Essas espécies que não acumulam o Si, não possuem todos os transportadores específicos do elemento, o que dificulta a entrada dele na planta (Barreto e Barão, 2023) e por consequência, as plantas podem ser menos beneficiadas devido a pouca concentração do Si nos tecidos (Kaur e Greger, 2019).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de nano-Si na atenuação da deficiência de S em plantas de amendoim. Como hipótese,

considera-se que o elemento seja capaz de atenuar os danos oxidativos e aumentar a tolerância do amendoim e deficiência de enxofre (S).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Amendoim: aspectos produtivos, importância socioeconômica, composição e manejo nutricional

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) tem como centro de origem a América do Sul, especialmente na região do Brasil e Bolívia, mas hoje a sua produção está concentrada em outras partes do mundo (Basuchaudhuri, 2022). Dentre os principais produtores desta cultura, destacam-se: i) a China, ii) a Índia e iii) a Nigéria; juntos estes países são responsáveis por aproximadamente 60% da produção mundial, liderados pela China (USDA, 2026; Oliveira et al., 2025). Por outro lado, ainda que esteja como centro de origem, o Brasil, oscila entre o décimo e décimo-primeiro colocado entre os maiores produtores globais da leguminosa, representando cerca de 2% da produção (USDA, 2026).

Diante disso, de acordo com dados da CONAB (2026), a produção nacional de amendoim apresentou um crescimento expressivo entre as safras de 2010 e 2026, visto que a produção, que era de 226 mil toneladas, alcançou 1159 mil toneladas na safra 2025/26, com uma projeção de 1205 mil toneladas para a safra 2025/26. No Brasil, o estado de São Paulo foi responsável por cerca de 88% da produção nacional nos últimos 16 anos e concentra, em média, 85% da área total cultivada nas safras recentes (CONAB, 2026). Neste estado, o cultivo do amendoim está associado ao manejo da cana-de-açúcar, devido a reforma do canavial, processo que consiste na substituição temporária da cana-de-açúcar por uma leguminosa; esse manejo visa, principalmente, a recuperação da fertilidade do solo por meio da fixação biológica de nitrogênio (FBN) proporcionada pelo amendoim (Paungfoo-Lonhienne et al., 2017).

Além disso, o amendoim é necessário para garantia da segurança alimentar e nutricional (Valentine, 2016), essa relevância está associada principalmente ao elevado teor de proteína, que é de aproximadamente 27,2 g por 100 g e ainda conta com valores aproximados de 20 g de carboidratos e 50 g de gordura totais (Taveira, 2024). Apesar do alto teor de gordura, a porcentagem de ácidos graxos monoinsaturados pode trazer benefícios à saúde cardíaca (Bonku & Yu, 2020). O amendoim também é rico em ácidos fenólicos, apresentando uma concentração de aproximadamente 22% (Arya et al., 2016). Esses compostos já foram associados com a prevenção de ganho de peso em homens induzido por dietas com alto teor de gordura, pois tem um efeito de inibição da lipase pancreática (Birari & Bhutani, 2007).

Com relação a concentração de antocianinas presentes no amendoim, de maneira similar ao conteúdo fenólico, a casca do amendoim apresenta uma maior capacidade de acúmulo desses compostos (Nepote et al., 2010). De modo geral, o conteúdo total de antocianinas presentes no amendoim varia de $0,23 \pm 0,00$ a $6,3 \pm 1,00$ mg g⁻¹, mas a variação dependerá do tipo de cultivar (Kim et al., 2020) e do manejo (Makoi e Ndakidemi, 2011).

O amendoim também é rico em vitaminas e minerais, como, por exemplo, a vitamina B3, magnésio (Mg), zinco (Zn), fósforo (P) e potássio (K) (Syed et al., 2020). Portanto, ele é uma importante fonte de energia e é considerado um alimento capaz de contribuir para o crescimento e manutenção do organismo, tornando-o relevante para uma grande parte da população mundial que ainda sofre de desnutrição, principalmente por falta de calorias e proteína. Nesse sentido, o amendoim pode ajudar a combater esse problema por ser uma fonte acessível e rica em nutrientes (Settaluri et al. 2012). Neste cenário, destaca-se ainda que muitas das regiões que

sofrem com insegurança alimentar e desnutrição fazem parte daquelas onde o amendoim é produzido, o que representa uma oportunidade estratégica de intervenção (Valentine, 2016).

Por outro lado, o potencial econômico do amendoim também é amplificado pela alta qualidade nutricional de seu óleo, comparável ao azeite de oliva, o que viabiliza seu uso tanto para o consumo direto quanto para aplicações industriais (Parmar et al., 2022). Contudo, para explorar plenamente essas aplicações, é fundamental garantir a qualidade do grão, o que depende rigorosamente do manejo da cultura, com destaque para a nutrição mineral (Abbas et al., 2018).

Ao considerar a nutrição mineral do amendoim, é tido que a demanda por nutrientes é mais acentuada durante o período reprodutivo, fase que coincide com o maior crescimento vegetativo, a formação de frutos e o enchimento de grãos (Silva et al., 2017). A cultura do amendoim apresenta elevada exigência nutricional, o que resulta em uma exportação significativa de nutrientes ao final do ciclo produtivo. Estima-se que a planta inteira contenha, por tonelada colhida, aproximadamente 87 kg de nitrogênio (N), 8 kg de P, 48 kg de K e 8 kg de S. Em relação à matéria seca, os teores variam entre 30 e 45 g de N kg⁻¹, 2 a 5 g de P kg⁻¹, 17 a 30 g de K kg⁻¹ e 2 a 3,5 g de S kg⁻¹ (Raij et al.). A ordem de acúmulo de macronutrientes na planta pode ser de N > K > cálcio (Ca) > Mg > S > P, enquanto para alguns dos micronutrientes a sequência é ferro (Fe) > Zn > manganês (Mn) > cobre (Cu) > boro (B) (Silva et al., 2017), ressaltando que essa ordem pode variar conforme a cultivar.

O aumento na absorção equilibrada de nutrientes resulta no aumento proporcional da produtividade, considerando cerca de 60% e 70% do potencial produtivo, mas acima desse nível, a resposta da planta diminui, indicando que o

excesso de fertilização não traz ganhos significativos (Xie et al. 2020). Do ponto de vista genético, o amendoim cultivado apresenta uma base genética relativamente estreita, o que limita o avanço do melhoramento, principalmente em relação à resistência a estresses bióticos e abióticos (Basuchaudhuri, 2022). Portanto, é necessário estudar alternativas que minimizem os danos causados por estresses, como as desordens nutricionais, que afetam o desempenho da cultura.

2.2. Deficiência de enxofre em sistemas agrícolas: causas, funções e implicações no metabolismo antioxidante e no desenvolvimento vegetal

A demanda das culturas por enxofre (S), em grande parte, era suprida nos sistemas agrícolas pela deposição atmosférica de dióxido de S (SO_2) e pelo uso de fertilizantes com menores teores de pureza. Entre os anos 1990 e 2011, a concentração atmosférica de SO_2 foi reduzida em cerca de 20 teragramas, em decorrência da adoção de tecnologias de emissão mais limpas e da implementação de legislações ambientais mais rigorosas (Klimont et al., 2013; Dhillon et al., 2019). De forma simultânea, o uso de cultivares de alto potencial produtivo intensificou a exportação de nutrientes nas colheitas, acelerando a remoção de S do solo (Li et al., 2020). Diante desse cenário e da redução dessa fonte indireta de deposição, a reposição de S via adubação mineral tornou-se uma prática indispensável para a manutenção da produtividade (Grzebisz et al., 2022).

O enxofre (S) no metabolismo vegetal participa da biossíntese de aminoácidos sulfurados e na formação de diversos compostos metabólicos. O mesmo, atua na constituição de centros ferro-S (Fe-S), relacionados ao transporte de elétrons, e compõe moléculas como a tiamina e a S-adenosilmetionina, indispensáveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Koprivova; Kopriva, 2014). Diante da

deficiência de S, as plantas inicialmente ativam mecanismos adaptativos, como a expressão de genes relacionados à absorção e ao transporte desse nutriente, aumentando sua captação, mas sob deficiência prolongada, esses mecanismos tornam-se insuficientes, levando à redução da atividade fotossintética, à diminuição da síntese de proteínas e à aceleração do envelhecimento vegetal (Réthoré et al., 2020).

Na fotossíntese, a deficiência de S compromete diretamente a atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), reduzindo as taxas de assimilação de dióxido de carbono (CO_2) e retardando a síntese de carboidratos, o que resulta em menor eficiência fotossintética (Etienne et al., 2018), a exemplo da redução da eficiência quântica do fotossistema II, descrita no pimentão (Costa et al. 2025). Embora não seja constituinte direto da clorofila, o S é indispensável aos processos bioquímicos da fotossíntese, pois participa da formação de proteínas e enzimas, do transporte de elétrons via ferredoxina e de reações de oxirredução associadas à fixação de CO_2 (Abd El-Kade, 2013). Por consequência, a deficiência de enxofre (S) é observada a redução de clorofilas e pigmentos associados à fotossíntese nas plantas (Costa et al. 2025). Isto implica, que a deficiência de enxofre induz a planta ficar sobre estresse oxidativo, devido ao aumento de espécies reativas de oxigênio. Essas moléculas causam a degradação da membrana, aumentando o extravasamento de eletrólitos e a da degradação da clorofila.

Como consequência, o crescimento vegetal é prejudicado, especialmente da parte aérea, onde os sintomas visuais de deficiência de S surgem como amarelecimento inicialmente nas folhas mais jovens (Kumar et al., 2021). Sendo este amarelecimento em folhas novas um dos principais indicadores diagnósticos, como

também a descoloração de tecidos internos, o desenvolvimento atrofiado de brotos, o nanismo, o encurvamento das folhas, atraso na maturação e a redução da condutividade hidráulica das raízes (Singh et al., 2025).

Foi observado em um experimento conduzido em casa de vegetação com solução nutritiva, que a omissão de S afetou a altura e diâmetro do caule, comparado com o tratamento controle (Correia et al., 2012). Além disso, outros estudos relataram uma redução significativa na matéria seca das plantas que estão sob essa condição de deficiência (Rodrigues Filho et al., 1988).

Mesmo em condições de deficiência leve, a produtividade pode não ser severamente afetada; contudo, a qualidade do produto tende a ser comprometida, uma vez que ocorre a síntese de proteínas de armazenamento com menor teor de S (Yu et al., 2021). Além disso, a demanda por S varia conforme a espécie e o estágio fenológico, sendo geralmente mais elevada durante as fases de crescimento e desenvolvimento vegetativo em comparação ao período reprodutivo (Borpatragohain et al., 2019).

Diante disso, a deficiência de S nos sistemas agrícolas pode ser corrigida por meio de diferentes estratégias de manejo nutricional (Narayan et al., 2022). A aplicação de fertilizantes contendo o macronutriente deve ser criteriosamente planejada, considerando a demanda específica da cultura, a fim de evitar perdas por lixiviação na zona radicular e garantir maior eficiência no uso do nutriente (Singh et al., 2025).

2.3. Silício na nutrição vegetal e sua atuação na atenuação da deficiência de enxofre

O Si, embora não seja considerado um nutriente para a maioria das plantas, desempenha funções benéficas importantes, especialmente em condições de estresse (Prado et al. 2023). Na agricultura, esse elemento é fornecido principalmente por fontes silicatadas, como silicatos de Ca e K, além de escórias siderúrgicas, que liberam o Si gradualmente (Haynes, 2017; Siam et al., 2022). Mais recentemente, o uso de nanopartículas de Si tem ganhado destaque por apresentar propriedades diferenciadas, como tamanho reduzido e elevada área superficial, o que favorece a absorção pelas plantas (Sharma et al., 2024).

Esta absorção de Si que ocorre predominantemente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), e logo após sua entrada na planta, o elemento é transportado via xilema até a parte aérea, sem alteração em sua forma química (Barreto e Barão, 2023). No entanto, a capacidade de absorção e acúmulo do elemento varia amplamente entre as espécies, refletindo diferenças genéticas nos sistemas de transporte (Kovács et al., 2022).

Com base nessa capacidade, as plantas podem ser classificadas em três grupos: i) não acumuladoras, apresentando teores inferiores a 5 g kg^{-1} ; ii) intermediárias, com teores entre 5 e 10 g kg^{-1} ; e iii) acumuladoras, que apresentam teores superiores a 10 g kg^{-1} (Barreto e Barão, 2023). Geralmente as espécies acumuladoras são predominantemente monocotiledôneas, como as pertencentes à família Poaceae, que possuem transporte ativo mediado por transportadores específicos, permitindo elevado acúmulo do elemento (Trejo-Téllez et al. 2022).

Apesar dos estudos com o Si se concentrarem em espécies acumuladoras, há evidências recentes que mostram potenciais em algumas leguminosas, como soja e feijão comum que podem acumular quantidades relativamente elevadas de Si em seus tecidos, o que reforça a necessidade de uma maior investigação sobre o papel funcional desse elemento nesse grupo de plantas (Putra et al. 2020).

Mesmo em plantas não acumuladoras, o Si pode exercer efeitos positivos, contribuindo para o aumento da tolerância a estresses (Kovács et al., 2022). Nestas condições estressantes, geralmente ocorre a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio, que causam danos celulares, mas o Si, especialmente na forma de nano sílica, atua potencializando o sistema antioxidante, reduzindo esses danos e favorecendo a manutenção do desempenho fisiológico das plantas (Garza-Alonso et al., 2024).

Portanto, a atuação do Si pode ser observada em diferentes tipos de estresse, incluindo condições abióticas, bióticas e desordens nutricionais (Ali et al., 2020). Em situações de deficiência de nutrientes, por exemplo, a planta pode aumentar a absorção de Si como resposta ao estresse, ativando mecanismos radiculares que facilitam sua entrada. Além disso, o elemento pode estimular a expressão de genes relacionados à absorção e ao transporte de nutrientes (Barreto et al., 2022).

Por outro lado, entre as interações nutricionais, ainda há poucos estudos envolvendo o Si e o S, mas evidências indicam que esse elemento pode atenuar os efeitos da deficiência de S, não estando associado à correção direta da deficiência, mas melhorando a tolerância da planta ao estresse (Réthoré et al., 2020). Um dos mecanismos descritos é que o elemento pode influenciar a expressão de genes

relacionados ao transporte de S, favorecendo a absorção de sulfato pelas raízes (Silva e Prado, 2023).

Após ser absorvido e distribuído na planta, o Si pode se depositar na forma de sílica entre a cutícula e a parede celular, contribuindo para a integridade estrutural dos tecidos. Além disso, em plantas de pimentão submetidas à deficiência de S e ao suprimento de Si, observou-se o fortalecimento do sistema antioxidante, com aumento na produção de compostos como fenóis e ácido ascórbico, diminuindo os danos causados por espécies reativas de oxigênio e preservando a integridade das membranas celulares (Costa et al., 2025).

Além disso, sob deficiência de S, o Si pode contribuir para a manutenção de maiores níveis de clorofila, indicando menor comprometimento da fotossíntese, o que resulta em melhor crescimento de raízes e parte aérea (Maillard et al., 2018). Em condições de estresse combinado, como deficiência de S associada ao estresse osmótico, o Si também apresentou redução na senescência foliar, ao melhorar o estado hídrico e aumentar o teor de clorofila (Silva e Prado, 2023).

Embora o Si não seja considerado essencial para os seres humanos, a alimentação constitui sua principal fonte, sendo associados a esse elemento efeitos benéficos, especialmente para a saúde óssea, da pele e dos tecidos (D'Imperio et al., 2024). Nesse contexto, ao considerar o amendoim como uma cultura relevante para a redução da insegurança alimentar (Valentine, 2016). Aliada aos efeitos positivos do elemento na atenuação de danos metabólicos em plantas sob deficiência de S (Silva e Prado, 2023), configura-se como uma estratégia promissora tanto do ponto de vista agrônomo quanto nutricional para alimentação humana.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenho experimental e tratamentos

O experimento foi realizado em uma casa de vegetação telada, localizada na Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus Jaboticabal-SP. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x2. Os fatores consistiram no ajuste da solução nutritiva (Tabela 1) em duas concentrações de S (adequado e deficiente) e duas condições de Si (presença e ausência), sendo o nano-silício Bindizil® a fonte de Si utilizada. O experimento foi composto por quatro tratamentos (Tabela 1), cada um com cinco repetições. As sementes de amendoim foram semeadas em vasos de polietileno preenchidos com areia de textura média, previamente peneirada e lavada em água corrente até a remoção visual de todas as impurezas. Em seguida, a areia foi submetida à imersão em solução de ácido clorídrico (HCl) 0,1 M por 24 horas, com o objetivo de eliminar possíveis contaminantes iônicos do substrato. Após esse período, procedeu-se à lixiviação do ácido com água deionizada, em lavagens sucessivas, até que a condutividade elétrica do efluente atingisse valor inferior a $0,010 \text{ mS cm}^{-1}$, indicando baixa concentração iônica residual no substrato. As plantas receberam a solução nutritiva proposta por Hoagland e Arnon (1950), modificada de acordo com os tratamentos.

Tabela 1. Solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) modificada de acordo com os tratamentos

Fertilizantes	Tratamentos			
	S-adequado	S-adequado	S deficiência	S deficiência
	(-Si)	(+Si)	(-Si)	(+Si)
	-----mL L ⁻¹ -----			
KH ₂ PO ₄ (Mol L ⁻¹)	1	1	1	1
KNO ₃ (Mol L ⁻¹)	5	5	3	3
Ca (NO ₃) ₂ .4H ₂ O (Mol L ⁻¹)	5	5	4	4
MgSO ₄ .7H ₂ O (Mol L ⁻¹)	2	2	-	-
CaCl ₂ .2H ₂ O (Mol L ⁻¹)	-	-	1	1
Mg(NO ₃) ₂ .H ₂ O (Mol L ⁻¹)	-	-	2	2
Solução de micros (*)	1	1	1	1
Solução Fe EDTA (**)	1	1	1	1
Nano-Si	-	2	-	2
(*) - Em 1L: 2,86 g H ₃ BO ₃ ; 1,81 g MnCl ₂ .4H ₂ O; 0,22 g ZnSO ₄ .7H ₂ O; 0,04 g CuCl ₂ ; 0,02 g H ₂ MoO ₄ .H ₂ O.				
(**) - Fe-EDDHA com 6% de Fe (83,33 g L ⁻¹).				

3.2. Índice de clorofilas e antocianinas

A determinação dos índices de clorofilas e antocianinas foi realizada de forma não destrutiva por meio da avaliação direta do tecido vivo das folhas utilizando um sensor multipigmentos portátil (SPAD-502). As medições foram aferidas em 10 diferentes pontos da lâmina foliar a fim de obter uma média representativa para a planta. Os valores obtidos pelo sensor corresponderam à concentração relativa de clorofilas e antocianinas no tecido vegetal.

3.3. Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)

Uma folha totalmente desenvolvida das plantas foi utilizada para realização das medições que quantificaram a eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) dada pela

razão da fluorescência variável (Fv) com a fluorescência máxima (Fm) (Lichtenthaler et al., 2005). Utilizou-se um fluorômetro portátil (modelo OS30P+, OPTI-SCIENCES) para medir a fluorescência da clorofila em folhas totalmente desenvolvidas, mantendo-as no escuro por 30 minutos mediante o fechamento de pinças específicas do equipamento, após esse período de adaptação a leitura foi realizada com o aparelho e os dados de Fv/Fm foram adquiridos diretamente do equipamento.

3.4. Índice de extravasamento de eletrólitos

Foram utilizados cinco discos foliares de tecido vivo de folhas totalmente desenvolvidas, adicionados em Beckers com 20 mL de água deionizada, após duas horas em repouso, sob temperatura ambiente, a condutividade elétrica inicial da solução foi medida utilizando um condutivímetro portátil. Logo após isso, as amostras foram colocadas em uma autoclave e submetidos a 120 °C por 20 minutos, assim que ficaram em uma temperatura de aproximadamente 25°C uma nova leitura de condutividade foi realizada. O índice de extravasamento de eletrólitos então foi calculado pela relação entre a condutividade inicial e a final, multiplicada por 100, fornecendo uma porcentagem como resultado (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

3.5. Fenóis totais

Amostras de 50 mg de folhas frescas e completamente desenvolvidas foram colocadas em um tubo Falcon envolvido com papel alumínio e preenchido com 2 mL de metanol, iniciando-se o processo de extração. Durante esta etapa, as amostras foram mantidas no escuro por 3 horas em temperatura de 25°C. Após esse período, foram adicionados mais 3 mL de metanol. Na sequência, retirou-se 1 mL da alíquota

do extrato e adicionado em outro tubo Falcon também coberto com papel alumínio, nesse mesmo tubo foram adicionados 10 mL de água destilada e deionizada e 0,5 mL de Folin-Ciocalteu (2N), deixando-os em repouso por 3 minutos. Após isso, uma reação colorimétrica foi realizada com a adição de 1,5 mL de carbonato de sódio a 20%, repousando por 2h em local sem luminosidade com temperatura com média de 25°C. Após esse período, realizou-se a leitura na absorvância de 765 nanômetros (nm) no espectrofotômetro. Os teores obtidos foram calculados com equivalente de Ácido Gálico (Singleton e Rossi, 1965).

3.6. Variáveis de crescimento

Ao final do experimento, procedeu-se à contagem manual do número de folhas, registrando-se o total de folhas totalmente desenvolvidas por planta. O diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital, esse equipamento foi posicionado na base do caule, aproximadamente 2 a 3 cm acima do colo da raiz.

Na colheita do experimento, as plantas de cada parcela foram coletadas e separadas em parte aérea (folhas e caule) e raízes. As plantas foram coletadas e com auxílio de uma balança analítica de precisão, obteve-se a massa fresca da parte aérea. Sequencialmente as plantas foram lavadas em água com solução detergente (0,1%), solução de HCl (0,3%) e água deionizada (Prado, 2021). Em seguida, após as plantas escorrem o excesso de água, o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65°C) até obter massa constante e obteve-se a massa seca da parte aérea e das raízes balança analítica de precisão.

3.7. Determinação de teor de nutrientes e acúmulos

As amostras secas referentes à parte aérea da planta foram moídas em moinho de facas tipo Wiley (Modelo MA 340) e 0,300 g do material foi transferido para tubos de digestão. Adicionaram-se 4 mL de solução nítrico-perclórica. Os tubos foram aquecidos a 80°C, com incrementos de 40°C a cada 30 minutos, até atingirem 210°C. Após o resfriamento, adicionaram-se 30 mL de água deionizada aquecida para diluição do extrato. A solução foi transferida para frascos de 50 mL e mantida em repouso por 12 horas para sedimentação das fibras. Em seguida, retiraram-se 10 mL do extrato, que foram transferidos para Erlenmeyer de 100 mL, aos quais se adicionou 1 mL de ácido SEED e 0,5 mL de cloreto de bário. Após homogeneização e 2 minutos de reação, foi realizada a leitura da absorbância a 420 nm em espectrofotômetro.

A determinação do teor de Si foi realizada após a extração do elemento seguindo o método descrito por Kraska e Breitenbech (2010). Após, o Si reagir com molibdato de amônio em meio ácido, na presença de ácido oxálico e ácido clorídrico. A intensidade da coloração foi medida em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) no comprimento de onda de 420 nm, conforme procedimento descrito por Korndörfer et al. (2004).

3.8. Análise estatística

A partir da coleta de amostras foram calculadas médias para cada tratamento. As médias foram submetidas à análise de variância com medidas repetidas no tempo (teste F) para se obter o erro-padrão da média. Simultaneamente, foram testados os pressupostos básicos da análise de variância, normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias, para todas as variáveis avaliadas pelo método de

Shapiro-Wilk. Posteriormente as médias foram submetidas a análise de diferenças de médias pelo método de Tukey.

4. RESULTADOS

Na condição de suficiência de S, as plantas apresentaram maior acúmulo desse nutriente em comparação à deficiência ($p < 0,05$). Na parte aérea, o acúmulo de S foi superior na suficiência com aplicação de Si em relação às plantas que não receberam o elemento ($p < 0,05$). De forma semelhante, sob deficiência de S, a aplicação de Si promoveu maior acúmulo de S na parte aérea quando comparada à mesma condição sem o elemento (Fig. 1A, $p < 0,05$). Nas raízes, em condição de suficiência de S, a adição de Si aumentou o acúmulo de S em relação às plantas sem Si. Entretanto, sob deficiência de S, a aplicação de Si não promoveu incremento no acúmulo de S nas raízes (Fig. 1B, $p > 0,05$). O acúmulo de Si na parte aérea foi maior nas plantas que receberam o elemento. Além disso, na condição de suficiência de S, esse acúmulo foi superior ao observado na deficiência de S (Fig. 1C). Todas as diferenças significativas reportadas foram considerando um nível de probabilidade de 5% no teste de Tukey.

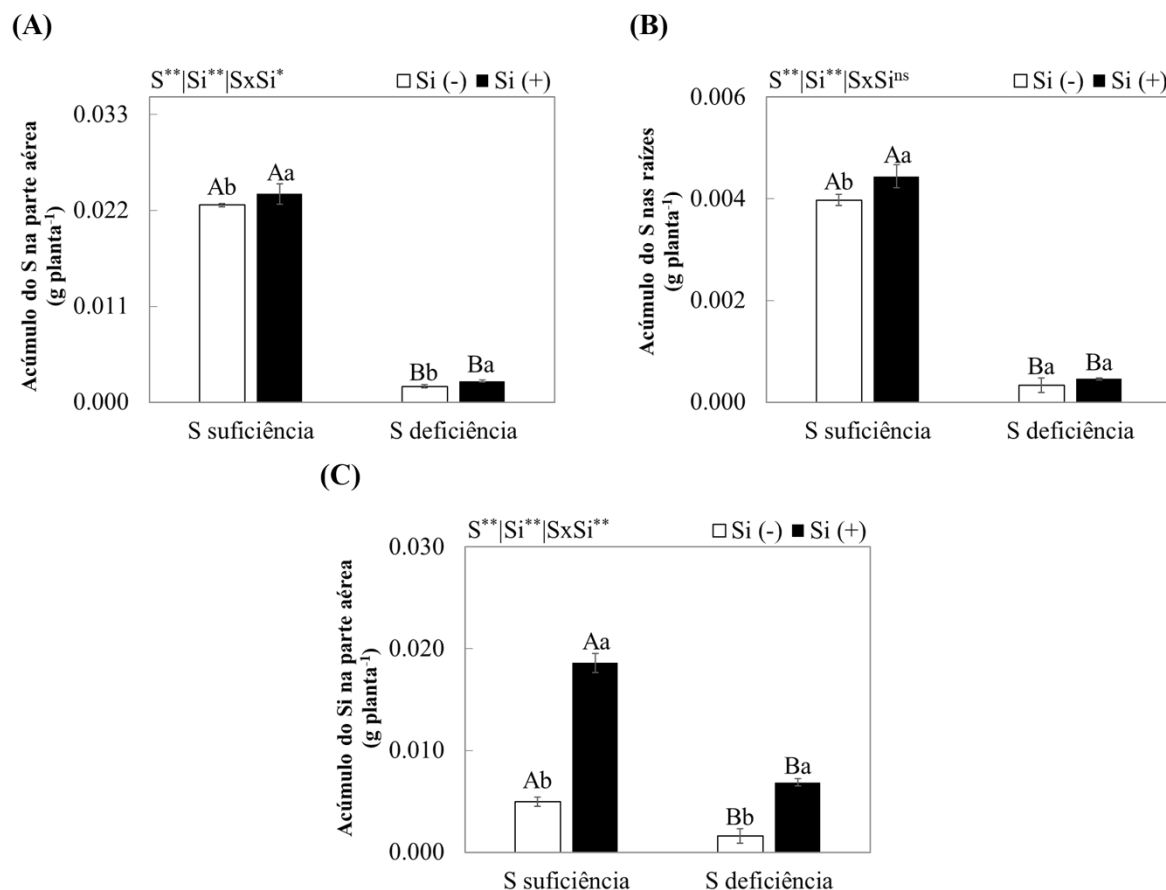


Figura 1. Acúmulo de S na parte aérea (A) e nas raízes (B), e acúmulo de Si na parte aérea (C) de plantas de amendoim cultivadas sob suficiência e deficiência de S, na presença (+) ou ausência (-) de silício (Si). As barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas indicam diferenças entre as condições de suficiência e deficiência de S dentro de um mesmo tratamento com o Si ($p < 0,05$), enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre a presença e a ausência de Si dentro da mesma condição de S ($p < 0,05$). O teste F (ANOVA) foi aplicado para verificar a existência de diferenças entre os tratamentos. Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os níveis de significância adotados foram: * $p \leq 0,05$ e ** $p \leq 0,01$.

O índice de extravasamento de eletrólitos foi maior nas plantas sob deficiência de S em comparação àquelas em condição de suficiência. Na suficiência de S, a aplicação de Si não promoveu diferença nesse índice em relação às plantas que não receberam o elemento (Fig. 2A). Nos fenóis totais, na suficiência de S o fornecimento de Si resultou em aumento quando comparado à mesma condição sem o elemento. Por outro lado, na deficiência de S, as plantas sem o Si apresentaram menores teores

de fenóis totais em relação àquelas que receberam o elemento (Fig. 2B). As antocianinas foram mais elevadas na suficiência de S em comparação à deficiência. Na suficiência, a aplicação de Si não diferiu das plantas sem o elemento. Na deficiência de S, as plantas com Si apresentaram maiores teores de antocianinas em relação às sem o Si (Fig. 2C).

Quanto às clorofilas, na suficiência de S, o uso de Si promoveu aumento em relação à ausência do elemento. De forma semelhante, na deficiência de S, as plantas que receberam Si apresentaram maiores teores de clorofila em comparação às que não receberam. A condição de deficiência de S sem Si resultou nos menores valores de clorofila (Fig. 2D). A razão F_v/F_m foi maior tanto na deficiência quanto na suficiência de S quando associada à aplicação de Si, em comparação às respectivas condições sem o elemento (Fig. 2E).

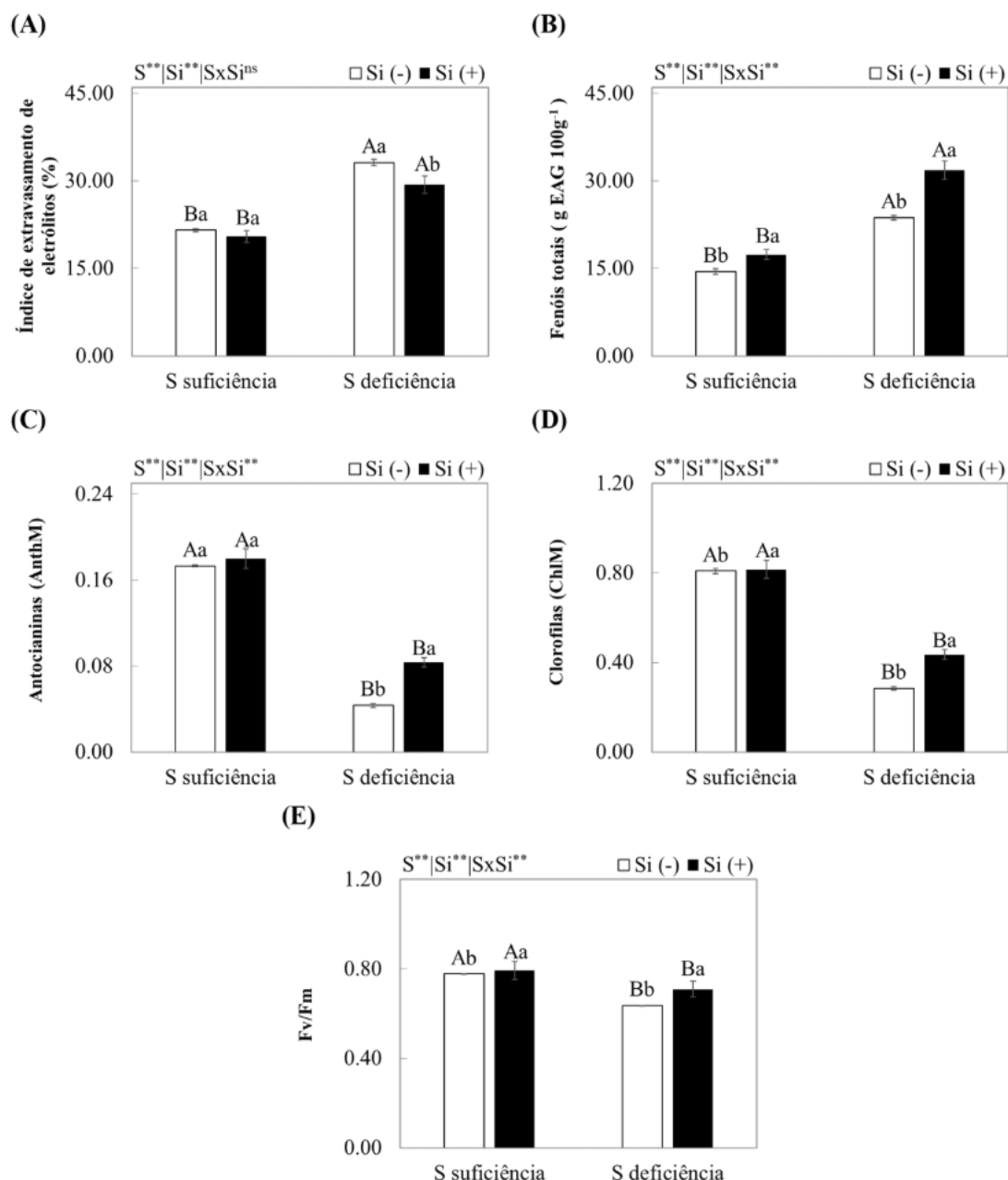


Figura 2. Índice de extravasamento de eletrólitos (A), fenóis totais (B), antocianinas (C), clorofilas (D) e Fv/Fm (E) do amendoim cultivado sob suficiência e deficiência de S e presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas indicam diferenças entre as condições de suficiência e deficiência de S dentro de um mesmo tratamento com o Si ($p < 0,05$), enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre a presença e a ausência de Si dentro da mesma condição de S ($p < 0,05$). O teste F (ANOVA) foi aplicado para verificar a existência de diferenças entre os tratamentos. Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os níveis de significância adotados foram: * $p \leq 0,05$ e ** $p \leq 0,01$.

O número de folhas foi maior na suficiência de S com o Si em relação á mesma condição sem o elemento. Por outro lado, a deficiência de S com o Si não diferiu para o número de folhas na deficiência sem o elemento (Fig. 3A). O diâmetro do caule foi maior na suficiência de S com o Si em relação á suficiência sem o elemento. Na deficiência o fornecimento de Si não influenciou no diâmetro do caule (Fig. 3B). A massa seca da parte aérea das plantas foi maior na suficiência de S com o Si em relação á mesma condição sem o elemento. Na deficiência do S o fornecimento do Si apresentou maior massa seca da parte aérea em relação ás plantas que não receberam o elemento (Fig. 3C). A massa seca das raízes foi maior na suficiência do S com o Si em relação á mesma condição sem o elemento. Na deficiência de S com o Si a massa seca das raízes foi menor em relação a mesma condição de S sem o elemento (Fig. 3D).

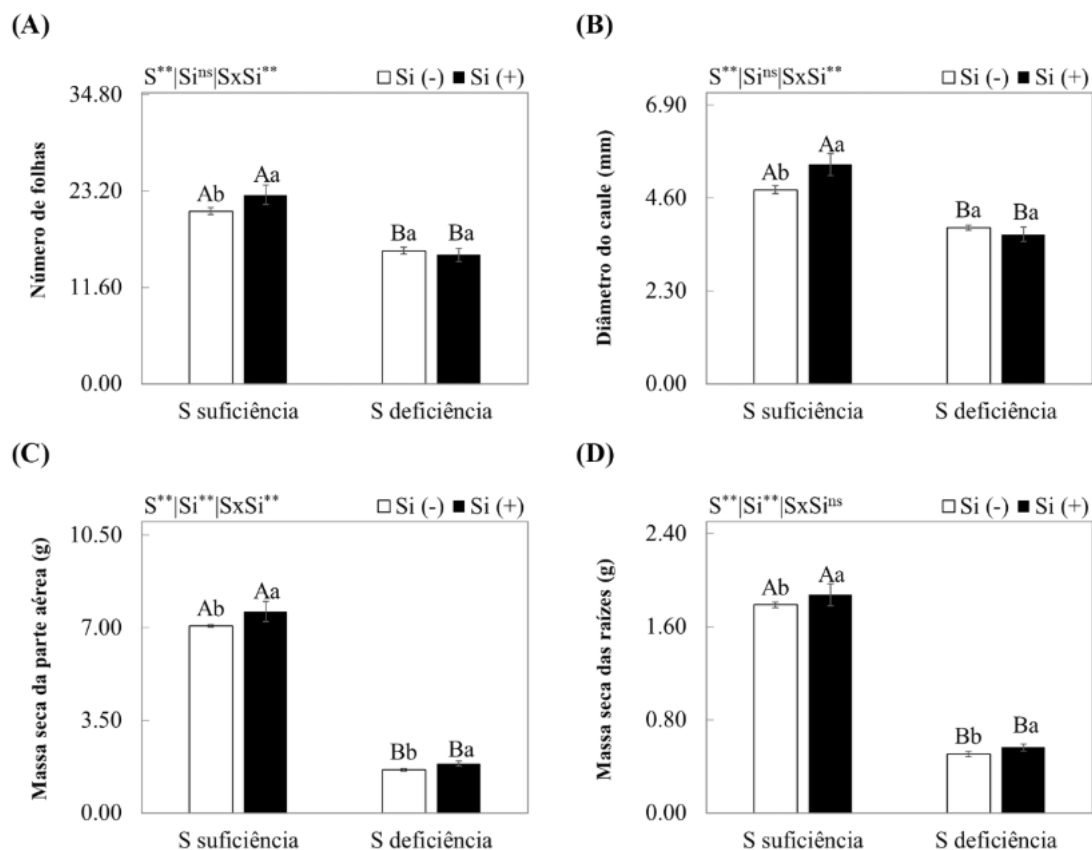


Figura 3. Número de folhas (A), diâmetro do caule (B), massa seca da parte aérea (C), massa seca das raízes (D) do amendoim cultivado sob suficiência e deficiência de S e presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas indicam diferenças entre as condições de suficiência e deficiência de S dentro de um mesmo tratamento com o Si ($p < 0,05$), enquanto letras minúsculas indicam diferenças entre a presença e a ausência de Si dentro da mesma condição de S ($p < 0,05$). O teste F (ANOVA) foi aplicado para verificar a existência de diferenças entre os tratamentos. Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os níveis de significância adotados foram: * $p \leq 0,05$ e ** $p \leq 0,01$.

5. DISCUSSÃO

O acúmulo corresponde à quantidade total de nutrientes presentes na planta ou em seus órgãos (Prado, 2021). Esse acúmulo está diretamente relacionado à disponibilidade do nutriente para a planta; assim, em condições de deficiência, ocorre redução na absorção e, conseqüentemente, na quantidade acumulada nos tecidos

vegetais (Abbas et al., 2021), como observado no amendoim sob deficiência de S em comparação à condição de suficiência. Por outro lado, a adição de Si na solução nutritiva, tanto em condições de suficiência quanto de deficiência de S, proporcionou incremento no acúmulo desse elemento (Fig. 1A e B). Esse efeito pode ser explicado pela capacidade do Si de regular a expressão de genes envolvidos no transporte de S (Lainé et al., 2022), o que resulta em maior acúmulo do nutriente tanto na parte aérea quanto nas raízes do amendoim (Fig. 1A e B).

Além disso, o acúmulo de Si foi maior nas plantas que receberam esse elemento em comparação àquelas que não o receberam (Fig. 1C). Embora o amendoim não seja considerado uma planta acumuladora de Si (Patel et al., 2022), observou-se incremento desse elemento quando fornecido na forma de nanosílica. Esse resultado pode ser explicado, principalmente, pelas características físico-químicas dessa fonte, especialmente o reduzido tamanho das partículas, que favorece a absorção e o transporte do Si na planta (Pan et al., 2023).

Diante desse cenário, em que o amendoim enfrenta o estresse por deficiência de S, deve-se compreender que quando uma planta passa por algum tipo de estresse ela começa a perder íons importantes das suas células, esses íons são chamados de eletrólitos, a saída deles do meio celular é descrita como extravasamento de eletrólitos (Hryvusevich et al. 2022), mas pode-se reduzir esses danos ao adicionar o Si, isso porque esse elemento pode manter a integridade das membranas celulares por diversos ajustes no metabolismo, como: i) redução do estresse oxidativo pelo aumento de compostos antioxidantes nas plantas, ii) melhora do estado hídrico, mantendo as células hidratadas e iii) um possível efeito físico ao ser depositado em forma de sílica atuando como uma barreira e aumentando a estabilidade das membranas (Maghsoudi

et al. 2016). No amendoim, considera-se que o aumento de fenóis totais e antocianinas (Fig. 2 B e C) tenham contribuído para a redução do índice de extravasamento de eletrólitos (Fig. 2A).

Por outro lado, quando o S é limitado, ocorre um desequilíbrio metabólico que compromete a síntese de proteínas e enzimas envolvidas nos mecanismos de defesa, reduzindo a eficiência das respostas ao estresse e a ativação do sistema antioxidante (Capaldi et al., 2015). Nesse contexto, compostos fenólicos desempenham papel fundamental, uma vez que são metabólitos secundários formados principalmente pelas vias do ácido chiquímico e dos fenilpropanoides, atuando como antioxidantes na redução dos danos causados pelo estresse oxidativo (Kumar et al., 2020). O estresse oxidativo, trata-se do aumento de espécies reativas de oxigênio que degradam a membrana (Capaldi et al., 2015). No amendoim, esses compostos foram acrescidos quando receberam o Si na solução nutritiva, tanto na suficiência de S quanto na deficiência de S em relação às mesmas condições sem o elemento (Fig. 2B). Há evidências de que o Si estimula a atividade da enzima fenilalanina amônia-liase (PAL), promovendo a via dos fenilpropanoides e, conseqüentemente, a biossíntese de compostos fenólicos (Costa et al., 2025; Capaldi et al., 2015).

Além disso, as antocianinas, embora conhecidas por sua função na coloração dos tecidos, atuam como importantes antioxidantes nos vacúolos, onde não há sistemas antioxidantes enzimáticos, contribuindo para o controle de espécies reativas de oxigênio (Zhao et al., 2021). No amendoim, as plantas com deficiência de S que receberam o Si apresentaram maiores quantidades de antocianinas em relação às que não receberam o elemento (Fig. 2C). Nesse sentido, o Si exerce efeito mitigador do estresse ao estimular diferentes rotas de defesa, tanto enzimáticas quanto não

enzimáticas (Prado et al., 2023), reduzindo o estresse oxidativo e favorecendo a estabilidade e o acúmulo de antocianinas (Afifi et al., 2023).

O estresse causado pela deficiência de S também afeta diretamente a fotossíntese, uma vez que reduz a síntese de proteínas e clorofila (Capaldi et al., 2015), que foi observado no amendoim, onde as clorofilas foram reduzidas na deficiência de S em relação à suficiência (Fig. 2D). A clorofila, além de imprescindível para a absorção de luz e condução de elétrons na fotossíntese (Rabinowitch, 1965), pode ter sua integridade comprometida sob estresse oxidativo. Nesse contexto, o Si contribui indiretamente para a manutenção dos teores de clorofila ao reduzir os danos oxidativos por meio do aumento de compostos antioxidantes (Alves et al., 2024), o que também pode ser observado no incremento de clorofilas em plantas com deficiência de S que receberam o Si em relação à mesma condição sem o elemento (Fig. 2D).

A eficiência fotossintética pode ser avaliada pela fluorescência da clorofila, especialmente no fotossistema II (PSII), onde a energia luminosa absorvida pode ser utilizada na fotossíntese, dissipada como calor ou reemitida como fluorescência (Krause e Weis, 1991; Garab et al., 2023). No amendoim, a eficiência quântica do PSII (F_v/F_m) foi aumentada ao ser fornecido o Si para as plantas, tanto na suficiência quanto na deficiência, em relação às plantas sem o elemento (Fig. 2E). O Si auxilia na manutenção do funcionamento do PSII ao preservar a integridade dos cloroplastos e reduzir o estresse oxidativo, evitando a queda de parâmetros de fluorescência mesmo sob condições de deficiência nutricional (Alves et al., 2023).

Esses efeitos fisiológicos refletem no crescimento vegetal (Pearcy e Björkman, 2019). Nesse contexto, as folhas, principais órgãos fotossintéticos das

plantas, possuem papel fundamental, sendo sua forma e estrutura determinantes para a eficiência fotossintética (Wang et al., 2021). Em condições de deficiência de S, observou-se redução no número de folhas de amendoim em comparação à condição de suficiência. No entanto, a aplicação de Si não alterou esse parâmetro, tanto na suficiência quanto na deficiência de S (Fig. 3A).

O diâmetro do caule é um fator extremamente importante, pois controla a quantidade de água que a planta consegue transportar, logo, pequenos aumentos nesse diâmetro podem resultar em grandes incrementos na condução hídrica (Hacke et al. 2016). Em leguminosa sob deficiência de S, observa-se redução no diâmetro do caule (Zhou et al. 2024), o que também foi verificado no amendoim.

Portanto, a distribuição de massa seca nas plantas não é determinada por um único fator, mas resulta da interação entre mecanismos internos e condições ambientais; dentre os fatores internos, destacam-se a disponibilidade de nutrientes e de água (Brouwer, 1962). A deficiência de S reduz o crescimento e a produtividade (Capaldi et al. 2015), o que também foi evidenciado no amendoim. A limitação de nutrientes leva a planta a reorganizar seu metabolismo, o transporte de açúcares e o crescimento dos órgãos, especialmente das raízes, como estratégia para aumentar a absorção de recursos e sobreviver em condições adversas (Hermans et al. 2006). Logo, na deficiência de S, tanto a raiz principal quanto as raízes laterais apresentam redução de crescimento, sendo as raízes laterais mais severamente afetadas (Houhou et al. 2018). No amendoim, observou-se um incremento na massa seca da parte aérea e na massa seca das raízes das plantas que receberam o Si tanto na suficiência quanto na deficiência de S em relação àquelas que não receberam o elemento (Fig. 3C e 3D). É notório, portanto, que a aplicação de Si atenua os efeitos do estresse

causado pela deficiência de S, permitindo a manutenção do crescimento e o aumento da biomassa, principalmente por melhorar a eficiência fisiológica e o uso do S disponível (Silva e Prado, 2023).

6. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o Si na forma nano é eficaz na atenuação dos efeitos da deficiência de S, promovendo maior resiliência das plantas ao estresse nutricional. Sua atuação parece estar associada à melhoria da estabilidade fisiológica e à ativação de mecanismos de defesa antioxidante não enzimática, permitindo que as plantas mantenham sua funcionalidade diante da restrição de S. Os resultados reforçam o papel do Si como elemento benéfico no manejo de estresses abióticos e destacam seu potencial como estratégia para otimizar o desempenho vegetal em ambientes com baixa disponibilidade de S. Do ponto de vista prático, a aplicação de nano Si pode representar uma alternativa promissora para a manutenção da produtividade em sistemas agrícolas sujeitos a limitações nutricionais. Estudos futuros com a cultura do amendoim devem considerar diferentes doses e formas de aplicação, bem como a interação com outros nutrientes, a fim de elucidar os mecanismos envolvidos e ampliar sua eficiência em condições de campo.

7. REFERÊNCIAS

ABBAS, S. et al. Nutrient deficiency stress and relation with plant growth and development. In: **Engineering tolerance in crop plants against abiotic stress**. CRC Press, p. 239-262, 2021.

ABBAS, Z.; KUMAR, A.; KUMAR, A. Peanut agriculture and production technology: integrated nutrient management. **Apple Academic Press**, [S. I.], 2018

ABD EL-KADER, M. G. Effect of sulfur application and foliar spraying with zinc and boron on yield, yield components, and seed quality of peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Agriculture and Biological Sciences**, [S. I.], v. 9, n. 4, p. 127-135, 2013.

AFIFI, M. et al. Vineyard light manipulation and silicon enhance ethylene-induced anthocyanin accumulation in red table grapes. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1060377, 2023.

ALI, N. et al. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 1779, 2020

ALVES, D. M. R. et al. Silicon in the form of nanosilica mitigates P toxicity in scarlet eggplant. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 9190, 2023.

ALVES, D. M. R. et al. Silicon in the form of nanosilica mitigates P toxicity in scarlet eggplant. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 9190, 2023.

APARECIDO, L. E. O. et al. Climate risk to peanut cultivation in Brazil across different planting seasons. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 12, p. 5002-5015, 2021.

ARYA, S. S.; SALVE, A. R.; CHAUHAN, S. Peanuts as functional food: a review. **J Food Sci Technol**, [S. l.], v. 53, p. 31–41, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2007-9>

BARRETO, R. F. et al. Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. **Scientia Horticulturae**, [S. l.], v. 291, p. 110616, 2022.

BARRETO, R. F.; BARÃO, L. Silicon: Transcellular and apoplastic absorption and transport in the xylem. In: **Benefits of silicon in the nutrition of plants**. Cham: Springer International Publishing, [S. l.], p. 17-25, 2023.

BASUCHAUDHURI, P. **Physiology of the Peanut Plant**. CRC Press, 2022.

BIRARI, R. B.; BHUTANI, K. K. Pancreatic lipase inhibitors from natural sources: unexplored potential. **Drug discovery today**, [S. l.], v. 12, n. 19-20, p. 879-889, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2007.07.024>

BONKU, R.; YU, J. Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition. **Food Science and Human Wellness**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 21-30, 2020.

BORPATRAGOHHAIN, P. et al. Remobilization and fate of sulphur in mustard. **Annals of Botany**, [S. l.], v. 124, n. 3, p. 471–480, 2019.

BROUWER, R. Distribution of dry matter in the plant. **Netherlands journal of agricultural science**, v. 10, n. 5, p. 361-376, 1962.

CAPALDI, F. R. et al. Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. **Tropical plant biology**, v. 8, n. 3, p. 60-73, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos, Safra 2025/2026, Sexto Levantamento: março/2026**; CONAB: Brasília, Brasil, 2026. Disponível online: <https://www.conab.gov.br/info->

agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?limitstart=0 (acessado em 6 de março de 2026).

CORREIA, M. A. R. et al. Avaliação da desordem nutricional de plantas de amendoim cultivadas em solução nutritiva suprimidas de macronutrientes. **Scientia agraria**, v. 13, n. 1, 21-28, 2012.

COSTA, M. G. et al. (2025). The role of nanosilica in antioxidant production, nutrition and photochemical efficiency to mitigate sulfur deficiency in *Capsicum annuum* L. **Plant Science**, p. 112665, 2025.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404–410, 2013.

D'IMPERIO, M.; PALMITESSA, D. O.; SÉRIO, F. (2024). Optimized Plant Nutrition for Precision Biofortification to Meet Nutrition Custom Human. In: **Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 415-433.

DA SILVA, A. P. R. et al. (2023). Silicon application methods influence the nutrient uptake of maize plants in tropical soil. **Silicon**, v. 15, n. 17, p. 7327-7334.

DA SILVA, D. L. et al. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1770, 2021.

DA SILVA, D. L.; DE MELLO PRADO, R. 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.

DE MELLO PRADO, Renato. **Mineral nutrition of tropical plants**. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

DHILLON, J. et al. In-season application of nitrogen and sulfur in winter wheat. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1-8, 2019.

DUTRA, A. C. et al. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, art. 19338, 2023.

EL-SHERBENY, T. M. S.; MOUSA, A. M.; ZHRAN, M. A. Response of peanut (*Arachis hypogaea* L.) plant to bio-fertilizer and plant residues in sandy soil. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 45, n. 2, p. 253-265, 2023.

ETIENNE, P. et al. Assessment of sulfur deficiency under field conditions by single measurements of sulfur, chloride and phosphorus in mature leaves. **Plants**, v. 7, n. 2, p. 37, 2018.

FERNANDES, S. et al. Aplicação de silício aumenta a produtividade de grãos de amendoim. **South American Sciences**, v. 1, n. 1, p. e2046-e2046, 2020.

GARAB, G. et al. New foundations for the physical mechanism of variable chlorophyll a fluorescence. Quantum efficiency versus the light-adapted state of photosystem II. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 18, p. 5458-5471, 2023.

GARZA-ALONSO, C. A. et al. (2024). Mechanisms of action of nanosilica to reduce oxidative stress in plants. In: **Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention**. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 325-348, 2024.

GRZEBISZ, W.; ZIELEWICZ, W.; PRZYGOCKA-CYNA, K. Deficiencies of secondary nutrients in crop plants—A real challenge to improve nitrogen management. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 66, 2022.

HACKE, U. G. et al. An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. **Plant, cell & environment**, v. 40, n. 6, p. 831-845, 2017.

HAYNES, R. J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017.

HERMANS, C. et al. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? **Trends in plant science**, v. 11, n. 12, p. 610-617, 2006.

HOANG, T. T. H. et al. Sulfur management strategies to improve partial sulfur balance with irrigated peanut production on deep sands. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 11, p. 1465-1478, 2021.

HOUHOU, M.; JOUTEI, K. A.; LOUHALIA, S.. Biomass Production, Chlorophyll Content and Morphological Parameters Are Affected by Sulfur Deficiency in *Eruca sativa* L. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 44, n. 1, p. 67-75, 2018.

HRVYUSEVICH, P. V.; SAMOKHINA, V. V.; DEMIDCHIK, V. V. Stress-induced electrolyte leakage from root cells of higher plants: background, mechanism and physiological role. **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**, p. 5, 2022.

KIM, M. Y., et al. Antioxidant and anti-inflammatory effects of Peanut (*Arachis hypogaea* L.) skin extracts of various cultivars in oxidative-damaged HepG2 cells and LPS-induced raw 264.7 macrophages. **Food Sci Nutr**. v. 9, p. 973–984, 2021. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2064>

KLIMONT, Z.; SMITH, S. J.; COFALA, J. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 014003, 2013.

KOPRIVOVA, A.; KOPRIVA, S. Molecular mechanisms of regulation of sulfate assimilation: first steps on a long road. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 589, 2014.

KOVÁCS, S. et al. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1223, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11091223>

KRAUSE, a GH; WEIS, E1. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual review of plant biology**, v. 42, n. 1, p. 313-349, 1991.

KUMAR, S; KUMAR, S; MOHAPATRA, T. Interaction between macro- and micro-nutrients in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 665583, 2021.

KUMAR, S. et al. Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. In: **Plant phenolics in sustainable agriculture: volume 1**. Singapore: Springer Singapore, p. 517-532, 2020.

LI, Q.; GAO, Y.; YANG, A. Sulfur homeostasis in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 23, p. 8926, 2020.

LOPES, R. M. et al. Chemical composition and biological activities of Arachis species. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 59, n. 9, p. 4321-4330, 2011.

MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; PESSARAKLI, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 7, p. 1001-1015, 2016.

MAILLARD, Anne et al. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**

MAKOI, J. H.; NDAKIDEMI, P. A. Changes in plant growth, nutrient dynamics and accumulation of flavonoids and anthocyanins by manipulating the cropping systems involving legumes and cereals-a review. **Australian Journal of Agricultural Engineering**, v. 2, n.3, p. 56-65, 2011.

MARSCHNER H. Functions of mineral nutrientes micronutrients. In: **ineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press; p. 313–404, 1995.**

NARAYAN, O. P. et al. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. **Plant Signaling & Behavior**, v. 18, n. 1, p. 2030082, 2023.

NEPOTE, V.; GROSSO, N. R.; GUZMÁN, C. A. Optimization of extraction of phenolic antioxidants from peanut skins. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, n. 1, p. 33–38, 2010.

OLIVEIRA, T. C. M. et al. Combining Artificial Intelligence and Remote Sensing to Enhance the Estimation of Peanut Pod Maturity. **AgriEngineering**, v. 7, n. 11, p. 368, 2025.

PAN, W. et al. Silica nanoparticle accumulation in plants: current state and future perspectives. **Nanoscale**, v. 15, n. 37, p. 15079-15091, 2023.

PARMAR, S. et al. Recent advances in genetics, genomics, and breeding for nutritional quality in groundnut. **Accelerated Plant Breeding, Volume 4: Oil Crops**, p. 111-137, 2022.

PATEL, M.; FATNANI, D.; PARIDA, A. K. 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.

PAUNGFOO-LONHIENNE, C. et al. Legume crop rotation suppressed nitrifying microbial community in a sugarcane cropping soil. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 16707, 2017.

PEARCY, R. W.; BJÖRKMAN, O. **Physiological effects. In CO₂ and Plants**. CRC Press, p. 65-105, 2021

POISSON, E. et al. Seed yield components and seed quality of oilseed rape are impacted by sulfur fertilization and its interactions with nitrogen fertilization. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 458, 2019.

PRADO, R. M. (Ed.). **Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants**. Springer, 2023.

PUTRA, R. et al. Is it time to include legumes in plant silicon research?. **Functional Ecology**, v. 34, n. 6, p. 1142-1157, 2020.

RABINOWITCH, E. I. The role of chlorophyll in photosynthesis. **Scientific American**, v. 213, n. 1, p. 74-83, 1965.

RÉTHORÉ, E. et al. Silicon regulates source to sink metabolic homeostasis and promotes growth of rice plants under sulfur deficiency. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 10, p. 3677, 2020.

REYES-CABRERA, J. et al. Differences in biomass and water dynamics between a cotton-peanut rotation and a sweet sorghum bioenergy crop with and without biochar and vinasse as soil amendments. **Field Crops Research**, v. 214, p. 123-130, 2017.

RODRIGUES FILHO, F. S. D. O.; FEITOSA, C. T.; GERIN, M. A. N. Omissão de macronutrientes em plantas de amendoim. **Bragantia**, v. 47, n. 2, p. 305-312, 1998.

SETTALURI, V. S. Peanuts and their nutritional aspects-a review. **Food and nutrition Sciences**, v. 3, n. 12, p. 1644-1650, 2012.

SHARMA, R. K. et al. Revisiting the role of sulfur in crop production: a narrative review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 101013, 2024.

SHEN, X. et al. 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.

SIAM, A. et al. Ameliorative effect of silicate in soil and plant: a review. **Current Science International**, v. 11, n. 1, p. 27-42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36632/csi/2022.11.1.3>

SILVA, D. L.; PRADO, R. M. Silicon mitigates the effects of calcium, magnesium, and sulfur in plants. In: **Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants**. Cham: Springer International Publishing, p. 113-128, 2023

Silva, E. D. B. et al. Peanut plant nutrient absorption and growth. **Revista caatinga**, v. 30, p. 653-661, 2017.

SINGH, A. et al. Bio-emerging strategy of nano-sulphur fertilization: a pathway to sustainable and climate resilient agriculture. **Plant Nano Biology**, p. 100192, 2025.

SYED, F. et al. Groundnut (peanut)(*Arachis hypogaea*). In: **Oilseeds: health attributes and food applications**. Singapore: Springer Singapore, p. 93-122, 2020.

TAVEIRA, R. Genre Trouble: Netflix's Lady Dynamite and Self-Help Television. In: **Adapting Television and Literature**. Cham: Springer International Publishing, p. 63-81, 2024.

TREJO-TÉLLEZ, L. I.; GÓMEZ-MERINO, F. C.; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, H. The genetics of silicon accumulation in plants. In: **Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement**. Elsevier, 2022.

USDA. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Disponível online: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2221000> (Acessado em 6 de março de 2026).

Valentine, H. The role of peanuts in global food security. In: **Peanuts**. AOCS Press. p. 447-461, 2016.

WANG, H.; KONG, F.; ZHOU, C. From genes to networks: The genetic control of leaf development. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 7, p. 1181-1196, 2021.

WANG, M. et al. Functions of silicon in plant drought stress responses. **Horticulture research**, v. 8, 2021.

XIE, M. Quantitative estimation of the nutrient uptake requirements of peanut. **Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 119, 2020.

YU, Z. et al. Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content. **Communications Biology**, v. 4, n. 1, p. 945, 2021.

ZHAO, Y.W. et al. Anthocyanin stability and degradation in plants. **Plant signaling & behavior**, v. 16, n. 12, p. 1987767, 2021.

ZHOU, J. et al. Impact of sulfur deficiency and excess on the growth and development of soybean seedlings. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 20, p. 11253, 2024.