

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

**SILÍCIO AUMENTA EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA, MAS NÃO É SUFICIENTE PARA
ATENUAR A DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO EM PLANTAS DE AMENDOIM**

Antonio Braga Filho

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa



Jaboticabal - SP
2026

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

**SILÍCIO AUMENTA EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA, MAS NÃO É SUFICIENTE PARA
ATENUAR A DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO EM PLANTAS DE AMENDOIM**

Antonio Braga Filho

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias -
UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de ENGENHEIRO AGRÔNOMO.

Jaboticabal - SP
2026

B813s	Braga Filho, Antonio Silício aumenta eficiência fotoquímica, mas não é suficiente para atenuar a deficiência de nitrogênio em plantas de amendoim / Antonio Braga Filho. -- Jaboticabal, 2026 47 p. : il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Renato de Mello Prado Coorientador: Milton Garcia Costa 1. Engenharia Agrônômica. 2. Arachis hypogea. 3. Silício. 4. Leguminosa. 5. Nitrogênio. I. Título.
-------	---

Antonio Braga Filho

SILÍCIO AUMENTA EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA, MAS NÃO É SUFICIENTE PARA ATENUAR A DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO EM PLANTAS DE AMENDOIM

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 Agrônoma**.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador (se houver): M.Sc. Milton Garcia Costa

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Trabalho aprovado em 11/03/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATO DE MELLO PRADO
Data: 30/03/2026 13:21:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO MARCIO SOUZA ROCHA
Data: 24/03/2026 07:52:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antonio Márcio Souza Rocha

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

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCISCO SALES FERREIRA DOS SANTOS JUN
Data: 25/03/2026 16:14:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Francisco Sales Ferreira dos Santos Júnior

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

Documento assinado digitalmente
gov.br MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ
Data: 13/04/2026 08:43:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

OFERECIMENTOS

À minha família, à minha namorada e aos meus amigos, que foram essenciais para que eu conseguisse chegar até aqui e concluísse uma etapa muito importante de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A finalização dessa etapa somente foi possível graças a muitas pessoas que contribuíram de diversas formas para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço, primeiramente, à minha família, principalmente aos meus pais Antonio Braga e Juliana Aparecida Alves, e aos meus irmãos, por sempre estarem comigo independentemente da situação. Sempre acreditaram em mim e apoiaram-me incondicionalmente desde o início, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo de todo esse tempo.

Agradeço também à minha namorada Júlia, pelo companheirismo, apoio e incentivo em todos os momentos, sendo fundamental para que eu conseguisse seguir firme diante dos desafios e em busca de meus sonhos.

Registro meus agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, e ao meu coorientador, MSc. Milton Garcia Costa, pela orientação acadêmica, disponibilidade e aprendizados contínuos que foram essenciais para minha evolução durante a graduação. Obrigado pela paciência em todo esse período. Vocês são excelentes profissionais.

Queria deixar minha sincera gratidão à República Kibocanela, onde morei durante minha graduação e onde fiz amigos que levarei para sempre comigo. Queria agradecer imensamente à querida Regiane que, durante todo esse tempo, cuidou de mim e tratou-me como um filho.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	8
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Cultura do amendoim e demanda de nitrogênio	11
2.2 Silício nas plantas e seu papel atenuador de estresses	17
2.3 Papel do silício na eficiência fotoquímica das plantas estressadas	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Condições iniciais e instalação de experimento	22
3.2 Delineamento experimental	23
3.3 Manejo da solução nutritiva	23
3.4 Análises	24
3.4.1 Fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos	24
3.4.2 Acúmulo de biomassa e biometria de crescimento	25
3.4.3 Concentrações de nitrogênio e de silício	25
3.5 Análises estatísticas	25
4 RESULTADOS	27
4.1 Concentrações de nitrogênio e de silício	27
4.2 Concentrações dos pigmentos fotossintéticos	28
4.3 Eficiência fotoquímica do fotossistema II	29
4.4 Altura da planta, diâmetro do caule e acúmulo de biomassa	30
5 DISCUSSÃO	32
6 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

RESUMO

A deficiência de nitrogênio (N) é uma limitação recorrente no cultivo de diversas culturas agrícolas e pode ocorrer, inclusive, em espécies leguminosas quando não há estabelecimento eficiente da associação com bactérias fixadoras de N, como observado na cultura do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). O silício (Si) tem sido reconhecido como um elemento-chave na atenuação de condições de estresse, por promover melhorias nas respostas fisiológicas e nutricionais das plantas, incluindo aquelas associadas à privação de N. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar se a aplicação de Si é capaz de mitigar os efeitos negativos da deficiência de N sobre os pigmentos fotossintéticos, a eficiência fotoquímica, o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa em plantas de amendoim. O experimento foi conduzido em ambiente controlado, em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com duas concentrações de N (deficiência: 0 mmol L⁻¹ e suficiência: 9 mmol L⁻¹) e duas concentrações de Si (deficiência: 0 mmol L⁻¹ e suficiência: 2 mmol L⁻¹), com cinco repetições. Foram avaliadas as concentrações de clorofila total, feofitina total e carotenoides, a eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), a altura das plantas, o diâmetro do caule e o acúmulo de biomassa. A deficiência de N diminuiu a concentração de N nas plantas, os teores de clorofila total, feofitina total, carotenoides, eficiência quântica do PSII e a eficiência de conversão da energia absorvida. Esses prejuízos fisiológicos refletiram-se na redução do diâmetro do caule e da massa seca da parte aérea. A aplicação de Si sob condição de deficiência de N atenuou a degradação dos pigmentos fotossintéticos, aumentou a eficiência quântica do PSII, a altura e o diâmetro do caule da planta, mas não alterou a eficiência de conversão de energia absorvida. Os ganhos fisiológicos não foram convertidos em incremento na massa seca das plantas de amendoim. Conclui que o Si não teve importância agrônômica para mitigar a deficiência de N no amendoim para as condições deste cultivo.

Palavras-chave: *Arachis hypogaea* L., estresse nutricional, nanossílica, leguminosa, elemento benéfico.

ABSTRACT

Nitrogen (N) deficiency is a recurrent limitation in the cultivation of several agricultural crops and may occur, even, in leguminous species when efficient associations with N-fixing bacteria are not established, as observed in peanut (*Arachis hypogaea* L.). Silicon (Si) has been recognized as a key element in alleviating stress conditions by improving plant physiological and nutritional responses, including those associated with N deprivation. Thus, the objective of this study was to evaluate whether Si application can mitigate the negative effects of N deficiency on photosynthetic pigments, photochemical efficiency, vegetative growth, and biomass accumulation in peanut plants. The experiment was conducted under controlled conditions in a completely randomized design with a factorial arrangement, consisting of two N concentrations (deficiency: 0 mmol L⁻¹; sufficiency: 9 mmol L⁻¹) and two Si concentrations (deficiency: 0 mmol L⁻¹; sufficiency: 2 mmol L⁻¹), with five replicates. Total chlorophyll, total pheophytin, and carotenoid concentrations, the photochemical efficiency of photosystem II (PSII), plant height, stem diameter, and biomass accumulation were evaluated. Nitrogen deficiency reduced plant N concentration, total chlorophyll, total pheophytin, and carotenoid contents, PSII quantum efficiency, and the efficiency of absorbed energy conversion. These physiological impairments were reflected in reduced stem diameter and shoot dry mass. The application of Si under N deficiency conditions attenuated the degradation of photosynthetic pigments, increased the quantum efficiency of PSII, and the height and stem diameter of the plant, but did not alter the efficiency of conversion of absorbed energy. The physiological gains were not converted into an increase in the dry mass of peanut plants. It is concluded that Si was not of agronomic importance to mitigate N deficiency for peanuts under the conditions of this crop.

Keywords: *Arachis hypogaea* L., nutritional stress, nanosilica, legume, beneficial element.

1 INTRODUÇÃO

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma planta da família Fabaceae e essa oleaginosa tem ganhado destaque no cenário mundial, pelo aumento da área cultivada e pelos aumentos de pesquisas científicas voltadas para avanço e o desenvolvimento do sistema produtivo da cultura (Rodrigues, 2016). Estudos recentes têm demonstrado que a deficiência de N exerce efeitos expressivos sobre o crescimento e a fisiologia do amendoim, como Xu et al. (2025) observaram que a limitação de N reduz, significativamente, a biomassa foliar e a taxa fotossintética líquida, além de comprometer os teores de N e de clorofila nas folhas.

De forma semelhante, Li et al. (2021) relataram que a deficiência de N diminui de maneira acentuada a altura das plantas e a área foliar, resultando em menor eficiência fotossintética. Em contraste, Wang et al. (2023) demonstraram que a adubação nitrogenada, quando comparada à ausência de N, aumenta a fotossíntese líquida, a produtividade de vagens e promove melhorias significativas na qualidade da matéria seca do amendoim. Esses estudos reforçam o papel central do N na regulação do crescimento vegetativo, da atividade fotossintética e da produção de biomassa na cultura.

Apesar desses avanços, as pesquisas disponíveis concentram-se, predominantemente, nos efeitos diretos da deficiência ou do suprimento de N sobre parâmetros morfofisiológicos e produtivos, havendo ainda lacunas quanto aos mecanismos fisiológicos envolvidos, especialmente no que se refere à eficiência fotoquímica do fotossistema II sob condições de deficiência nutricional. Além disso, são escassos os estudos que avaliam estratégias complementares capazes de atenuar os impactos da deficiência de N no aparato fotossintético do amendoim.

A tolerância das plantas à deficiência de N poderia ser minimizada pelo uso do silício (Si), um elemento benéfico que mitiga o estresse e reduz danos no metabolismo da cultura (Alves et al., 2023; Debona et al., 2017; da Silva Liber Lopes et al., 2023). O Si pode diminuir o estresse oxidativo por meio da ativação de vias metabólicas para síntese de compostos antioxidantes (Kim et al., 2017; Mostofa et al., 2021). Estudos comprovam que o Si contribui para aumento na absorção e no aproveitamento do N em situações de baixo suprimento, resultando em maior crescimento e produtividade das plantas (Campos e Silva, 2023). O Si exerce função importante nas paredes celulares de várias plantas, formando estruturas cristalinas conhecidas como fitólitos; assim, ocupa espaços que seriam preenchidos por componentes ricos em carbono, como hemicelulose, celulose e lignina (Costa et al., 2024; Kido et al., 2015; Sheng e Chen., 2020).

O Si tem desempenhado papel importante na preservação de pigmentos fotossintéticos em plantas deficientes de N, e isso ocorre devido à diminuição do estresse oxidativo e, conseqüentemente, à menor degradação desses pigmentos (Costa et al., 2024). A maior preservação dos pigmentos

fotossintéticos pode modificar, diretamente, a eficiência fotoquímica das plantas e, por consequência, melhorar os parâmetros, como índice de desempenho fotossistema II (FSII), rendimento quântico máximo da atividade fotoquímica do FSII e fluxo de absorção por centro de reação ativo (Khatam et al., 2024). Esses parâmetros fotoquímicos permitirão compreender o efeito da falta do N na eficiência fotoquímica das plantas de amendoim deficiente de N e como o Si pode influenciar na eficiência fotoquímica das plantas. Entretanto, os efeitos benéficos do Si sobre a eficiência fotoquímica não são universais e podem variar conforme a espécie, a intensidade e tipo de estresse e as condições ambientais.

Nesse cenário, faz-se necessário testar as hipóteses de que (i) a deficiência de N aumenta a degradação de pigmentos fotossintéticos e prejudica o índice de desempenho do FSII e a eficiência quântica do FSII. (ii) A adição do Si preserva os pigmentos fotossintéticos e aumenta a eficiência fotoquímica das plantas de amendoim. Com base nessas hipóteses, buscou-se compreender melhor o papel do Si em condições de baixo suprimento de N e seu papel na melhoria do FSII. Para isso, o objetivo deste estudo é compreender o impacto do baixo suprimento de N na degradação de pigmentos fotossintéticos e na eficiência fotoquímica e como o Si pode beneficiar os pigmentos fotossintéticos e a eficiência fotoquímica do FSII e o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do amendoim e demanda de nitrogênio

O amendoim (*A. hypogaea* L.) caracteriza-se pela produção de vagens médias e constrição moderada, que abrigam duas sementes arredondadas, possui grande importância econômica com uma produtividade média de 3.738 kg ha⁻¹. Além disso, possui alto valor nutricional, sendo utilizado amplamente na alimentação humana (Vasconcelos et al., 2015).

O amendoim é a única cultura de importância econômica caracterizada pela formação do fruto subterrâneo, ou seja, apresenta desenvolvimento geocárpico das vagens (Zhang et al., 2016; Yang et al., 2020; Zhao et al., 2020). Em 2020, o amendoim foi cultivado mundialmente em 32 milhões de hectares, rendendo próximo de 54 milhões de toneladas métricas (Wu Y et al., 2022). Segundo o 5º levantamento da safra de 25/26, a área cultivada de amendoim no Brasil foi de 281,3 mil hectares, com uma produção de 1.203,3 mil toneladas e uma produtividade de 4.278 kg/ha (CONAB, 2026).

Essa cultura é de grande importância econômica, pois há a concentração de óleo entre 40-60% em seus grãos; além disso, servem como um alimento básico na indústria alimentícia, utilizado para manteiga, chocolates, espessantes para sopa, graças ao seu teor elevado de proteínas (20-40%), carboidratos (10-20%) e compostos bioativos (Zhou et al., 2021; Guo et al., 2020; Attree et al., 2015). O Estado de São Paulo retém mais de 90% da produção nacional, sendo as regiões de Marília, Tupã e Presidente as mais produtivas (CONAB, 2022). Considera-se que a cultura ocupa 80% das reformas de canavial no estado (Oliveira et al., 2022; Sampaio, 2023).

O N consolida-se como um nutriente indispensável na agricultura, uma vez que sua disponibilidade no solo, frequentemente, determina o sucesso produtivo das lavouras em escala mundial (Fageria e Baligar, 2005). A deficiência de N pode resultar em folhas menores, ou seja, menor área fotossintética, como consequência, diminui a capacidade da planta de receber luz solar e de realizar a fotossíntese com eficácia (Araújo et al., 2022; Buchelt et al., 2020). Também é comprometida a resistência da planta a pragas e a doenças, pois são prejudicados compostos secundários e proteínas utilizados na defesa da planta (Prado, 2021).

No cultivo do amendoim, é prática frequente aplicar todo o N necessário na fase de plantio, garantindo nutrição inicial para a planta, enquanto a fixação simbiótica ainda não está plenamente funcional (Tubbs et al., 2012). A fase final de desenvolvimento das vagens coincide com um período de menor eficiência no aproveitamento de N, devido ao declínio na capacidade de absorção radicular e na atividade de fixação dos nódulos, restringindo o potencial produtivo da

cultura (Zhang et al., 2017). Além de agregar N ao solo, os restos culturais do amendoim são ricos em matéria orgânica, favorecendo a melhoria da estrutura do solo e a disponibilidade do nutriente para culturas subsequentes (Shen et al., 2019).

O amendoim adquire nitrogênio (N) do solo por meio de suas raízes e da fixação de N atmosférico por meio de nódulos, e essa fixação biológica de nitrogênio (FBN) no amendoim pode contribuir com mais de 60% da necessidade total de N em condições de baixa fertilidade do solo e cerca de 40% em cultivo de alto rendimento (Palmero et al., 2022; Mondal et al., 2020). No entanto, são necessárias quantidades de N exógeno para que a leguminosa atinja rendimentos máximos (Zheng et al., 2016; Zhang et al., 2017).

A aplicação de N em plantas de amendoim permite alcançar o potencial produtivo da cultura (Rathore et al., 2021). Estudo recente com plantas de amendoim indicou que aplicação da dose de 144 kg ha⁻¹ potencializou a máxima resposta produtiva da cultura do amendoim (Mekdad et al., 2021). Nesse sentido, a FBN na cultura do amendoim não é capaz de suprir a demanda total de N, de modo que a insuficiência de N provoca a desaceleração da divisão celular, menor atividade enzimática, menor sínteses de pigmentos fotossintéticos e, consequentemente, menor crescimento vegetativo das plantas (Li et al., 2021).

A principal fonte de N para leguminosas é a fixação biológica de N (FBN), e estudos demonstram que, no caso do amendoim, esse processo responde por cerca de 62% do total de N absorvido mundialmente pela cultura (Peoples et al., 2009). A FBN é mais eficiente em solos pobres em N, pois o excesso de N mineral inibe as bactérias fixadoras (Zuo et al., 2003; Wang et al., 2016). É

importante destacar a existência de tecnologias que aumentam a sobrevivência das bactérias e a eficiência da FBN, com destaque para o uso de substâncias protetoras e de pulverização diretamente no sulco de plantio (Betiol et al., 2021).

Embora o amendoim possua a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico via simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, essa fonte biológica de nutriente não é suficiente para suprir a demanda total da cultura, tornando a complementação nitrogenada um fator crítico para evitar limitações nutricionais durante o ciclo da planta (Hardarson, 1993). Por essa razão, é comum o uso de fertilizantes nitrogenados no cultivo convencional do amendoim como complemento, na intenção de suprir o déficit de N deixado pela fixação biológica (Ang et al., 1994). Assim, faz-se necessário a combinação da atividade da FBN com o aporte exógeno de nitrogênio para se alcançar a produtividade máxima da cultura (Wang et al., 2016; Zhang et al., 2017). Recentemente, estudos demonstraram que o aumento da aplicação de fertilizantes nitrogenados resultou em ganho de massa de vagens e de sementes por planta, além dos rendimentos de vagens, sementes, óleo e proteína em *A. hypogaea* L. (El-Habbasha et al., 2013; Bekele et al., 2019).

Conforme demonstrado por Xu et al. (2025), a deficiência de N diminuiu, significativamente, a biomassa foliar e a fotossíntese líquida do amendoim. O desenvolvimento radicular do amendoim, o teor de N e a atividade enzimática foram prejudicados ou inibidos em situações de déficit nutricional de N (Li et al., 2023). A massa seca da parte aérea, da raiz e a área foliar foram diminuídas quando o suprimento com nitrogênio não foi adequado, evidenciando crescimento inicial comprometido (Li et al., 2021). A aplicação de nitrogênio na

zona das vagens aumentou o acúmulo de matéria seca, o teor de N de toda planta, o teor de proteína das sementes, a atividade enzimática e a produtividade (Li et al., 2024).

A aplicação de 60 kg/ha de N na região de vagens resultou em maior produtividade de vagens, em taxa de frutos cheios e no teor de nitrogênio no amendoim (Hou et al., 2022). A aplicação de N também aumentou a capacidade fotossintética, a matéria seca, o acúmulo de N e a produtividade do amendoim, concluindo-se que a aplicação adequada do nutriente melhora a atividade do centro de reação do fotossistema II e a transferência de elétrons fotossintéticos (Guo et al., 2024). O estresse por baixo teor de N reduziu, significativamente, a área foliar, o comprimento total da raiz e a altura da planta de amendoim após 10 dias de tratamento, também diminuiu a expressão de genes relacionados à fotossíntese, a assimilação de nitrogênio e a fixação de carbono no amendoim (Kong et al., 2025).

Estudos recentes, como o de Li et al. (2021), evidenciam que a deficiência de N compromete o desenvolvimento estrutural do amendoim, resultando em clorose foliar, no desenvolvimento vegetativo reduzido e pelos radiculares curtos, fatores que diminuem o rendimento e os padrões de qualidade da cultura. Na fase de plântula, o déficit de N leva ao crescimento atrofiado da planta (Guo et al., 2024), na fase de enchimento das vagens, a insuficiência de N restringe o tamanho das vagens e acelera o processo de senescência das folhas (Zang et al., 2017). Consequentemente, o índice de área foliar é reduzido, promovendo a degradação dos pigmentos fotossintéticos e afetando a eficiência fotossintética (Wu et al., 2018). O teor de clorofila é diminuído quando há deficiência de N

(Lobo et al., 2012). A omissão do nitrogênio reduziu em 78% a matéria seca, em 81% a altura da planta e diminuiu o teor de magnésio e de potássio no amendoim (Rodrigues et al., 1988).

Essa problemática é agravada diante das mudanças climáticas que estão ameaçando a segurança alimentar global, devido à carência de nutrientes, diminuindo a produtividade (Sunil et al., 2024). A necessidade de fertilizantes nitrogenados para assegurar a produção agrícola evidencia a urgência de aumentar a eficiência com que as plantas utilizam o N (Gao e Cabrera Serrenho, 2023), O N é reconhecido em escala global como um elemento essencial e um fator que limita o desenvolvimento dos sistemas agrícolas (Maaz et al., 2021).

O N é um dos nutrientes principais para a síntese de proteínas, aminoácidos e ácidos nucleicos, essenciais para o desenvolvimento e o crescimento da planta (Kawade et al., 2023; Rahman et al., 2024). Sua deficiência afeta a síntese de pigmentos fotossintéticos, diminuindo a eficiência fotossintética das plantas (Liu et al., 2022; Ye et al., 2022) e também afeta processos como a divisão celular e crescimento dos tecidos (Mahbooh et al., 2023; Tariq et al., 2023). Entretanto, a falta de adubação de N nas culturas leguminosas, como o amendoim, pode levar ao menor crescimento e à perda de produtividade.

Atualmente, observa-se uma escassez severa de estudos focados nos danos na eficiência fotoquímica das plantas causados pela deficiência de N. Pesquisas atuais abordam efeitos do nutriente diretamente sobre o crescimento vegetativo e a produtividade, mas ainda persiste uma lacuna crítica sobre como essa limitação nutricional pode afetar o aparato fotossintético das culturas.

2.2 Silício nas plantas e seu papel atenuador de estresses

O Si é o segundo elemento mais encontrado na crosta terrestre e, apesar de não ser essencial, é reconhecido como elemento benéfico para o crescimento de diversas plantas (Zhang et al., 2013), atuando na redução dos efeitos dos estresses bióticos e abióticos e promovendo aumento da produtividade em condições ideais e em situações de estresse (Frew et al., 2018). O Si está associado com o fortalecimento das plantas, contribuindo para diminuir a incidência de pragas, doenças e fungos, e mitiga o déficit hídrico, a salinidade do solo e a contaminação por metais pesados (Vilela., 2009; Islam et al., 2020; Huang., 2021). As modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas causadas pela presença do Si são significativas, favorecendo a atividade de enzimas antioxidantes, como a dismutase de superóxido (SOD) e a glutathione redutase (GRS), induzindo melhoria no sistema antioxidante da planta (Curvelo et al., 2013).

O Si é capaz de influenciar ativamente no metabolismo, regulando processos bioquímicos e fisiológicos, sendo altamente responsivo ao estresse (Isa et al., 2010). Na parede celular, forma fitólitos – estruturas cristalinas de sílica e carbono – que se depositam, onde, normalmente, seria preenchido por celulose, hemicelulose e lignina, componentes abundantes em carbono (C) (Costa et al., 2024; Kido et al., 2015; Sheng e Chen, 2020).

O Si é encontrado na natureza na forma de dióxido de silício (SiO_2), exceto na forma de nanopartículas (Ranjan et al., 2021). A absorção de Si ocorre na forma passiva, junto com a água, sendo transportado como ácido monossilícico (H_4SiO_4) (Santi et al., 2018). Após a absorção, o Si é transportado pelo xilema

até à parte aérea, pela mesma forma química que é absorvido, ficando na parede celular das células da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos espaços intercelulares (Buchelt et al., 2020). No entanto, devido à transpiração da água após o transporte do ácido monossilício, tem-se a formação da sílica gel polimerizada e, conseqüentemente, torna-se imóvel no processo de redistribuição (Ma et al., 2001).

A aplicação foliar de Si (Teodoro et al., 2015) ou via solo (Moro et al., 2015) contribuiu, significativamente, na mitigação dos efeitos adversos de estresses em plantas. A utilização de Si no tratamento de sementes é uma estratégia promissora para o aumento da produtividade das plantas, pois relaciona-se com a indução de tolerância aos estresses (Teodoro et al., 2015). A deficiência nutricional é minimizada com o aumento da concentração de Si no tecido foliar (Santos, 2017).

O Si beneficia a nodulação em leguminosas, o que aumenta a taxa de fixação de N (Bent, 2014), favorece a ativação enzimática, é eficaz na composição mineral e diminui as taxas de evapotranspiração (Malavolta, 2006). Adicionalmente, o elemento tem a funcionalidade de estimular a síntese de compostos metabólicos secundários, como, por exemplo, os polifenóis e as enzimas atreladas aos mecanismos de defesa, concedendo uma resposta acelerada contra prováveis estresses (Gaur et al., 2020).

Adicionalmente, existem três grupos das plantas relacionados ao potencial de absorção de Si em seus tecidos: acumuladoras (100 a 150 g/kg de Si), intermediárias (10 a 50 g/kg de Si) e não acumuladoras (< 5 g/kg de Si), sendo o amendoim uma planta não acumuladora (Ma et al., 2001). No entanto,

ainda existem dúvidas se o Si, em plantas não acumuladoras, teria benefícios robustos na preservação do aparato fotossintético da planta, especialmente quando cultivada sob deficiência de N. Desse modo, é importante compreender os efeitos do Si na eficiência fotoquímica de plantas estressadas.

2.3 Papel do silício na eficiência fotoquímica das plantas estressadas

Considerada um fenômeno vital, a fotossíntese é fundamental para a produção de biomassa e influencia, diretamente, no crescimento e no desenvolvimento das plantas (Kalaji et al., 2018; Hajhashemi et al., 2018; Rastogi et al., 2020). Contudo, trata-se de um mecanismo fisiológico vulnerável a estresses, em que, diferentes fatores de estresses, podem prejudicar a estrutura e o funcionamento do aparato fotossintético (Kalaji et al., 2018; Hajhashemi et al., 2018; Rastogi et al., 2020). O Si tem um impacto favorável no desenvolvimento e no crescimento das culturas, como o aumento da fotossíntese (Abdelaal et al., 2020), a absorção e a deposição de minerais nos tecidos (Al Murad et al., 2020) e o sistema de defesa antioxidante (Farouk et al., 2020).

Observou-se que o Si exerce um efeito benéfico na mitigação de estresses abióticos e bióticos em plantas, promovendo a eficiência fotossintética por meio de diversos mecanismos: proteção do aparato fotossintético contra espécies reativas de oxigênio (EROs), aumento da eficiência hídrica, melhoria no transporte de elétrons fotossintéticos, regulação de genes fotossintéticos e a interação com outros processos fisiológicos, como a absorção de nutrientes e a sinalização hormonal, favorecendo a atividade fotossintética (Song et al., 2014; Debona et al., 2017; Avila et al., 2020; Hussain et al., 2021).

O Si demonstrou ser eficaz na prevenção da degradação dos pigmentos fotossintéticos (Liu et al., 2019). É importante destacar, também, que a aplicação de Si pode favorecer a expressão de genes-chave relacionado à fotossíntese, aumentando o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e melhorando a absorção de CO₂ (Li et al., 2018). O elemento atua, indiretamente, em processos bioquímicos e fisiológicos, como dissipação de energia luminosa, fluxo de transpiração e índice de clorofila, além da maior atividade de enzimas antioxidantes (Tatagiba et al., 2017; Santos et al., 2020). Dentre os processos fisiológicos, a análise da fluorescência da clorofila α pode contribuir para avaliar impactos das alterações ambientais sobre as plantas (Kalaji et al., 2016).

Foi relatado que o acréscimo de Si incrementou o conteúdo de pigmento fotossintético, a fotossíntese líquida, a taxa de transpiração, a condutância estomática, o citocromo b 6/f e o complexo ATP-sintase sob estresse salino (Muneer et al., 2014), além de aumentar o conteúdo total de proteína, a atividade da ribulose-1-5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RuBPCase), a atividade fotossintética e o nível de N, P e K em plantas de milho (Moussa e Galad, 2015). O acúmulo do Si nos tecidos foliares das plantas é máximo, ou seja, protege o aparato fotossintético das plantas e fornece proteção contra a radiação UV-B (Tripathi et al., 2017).

Em geral, os benefícios do Si no aparato fotossintético estão relacionados à indução do sistema de defesa da planta, contribuindo para ajustes morfológicos, anatômicos e ultraestruturais no aparelho fotossintético, ou ainda para menor absorção de metais prejudiciais às plantas, o que, consequentemente, reduz os danos ao sistema fotossintético (Nwugo e Huerta,

2008). Há relatos de que o Si preveniu danos aos tilacóides e à membrana do cloroplasto sob condições de estresse (Feng et al., 2010; Song et al., 2014).

Assim, é possível compreender como o Si é importante para as plantas em estresse, tendo diversos benefícios para o processo da fotossíntese e, conseqüentemente, aumentar a produtividade de inúmeras culturas em campo, mesmo não sendo um elemento essencial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições iniciais e instalação de experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação com cobertura de vidro, no Departamento de Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas diariamente utilizando um termo-higrômetro portátil (Figura 1).

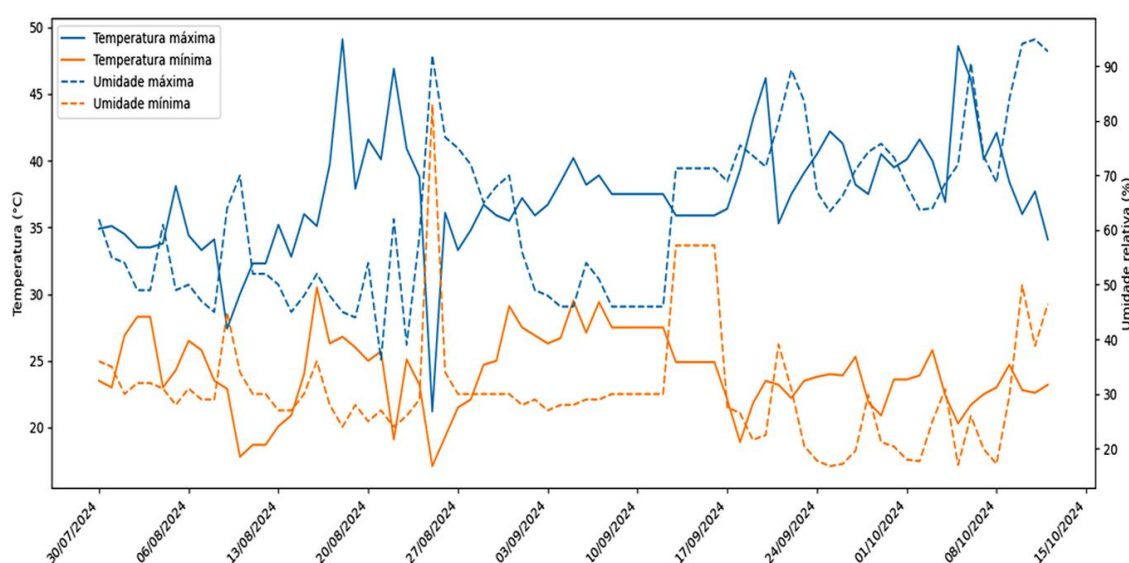


Figura 1. Monitoramento climático (temperatura e umidade) no período experimental.

No início do experimento, as sementes foram distribuídas em vasos com capacidade de $1,5 \text{ dm}^3$, previamente, com areia lavada até à completa remoção de resíduos orgânicos e peneirada ($<2 \text{ mm}$). Após, $1,5 \text{ dm}^3$ de areia lavada foi transferido para o vaso de polietileno. Posteriormente, cada vaso recebeu $0,5 \text{ L}$ de HCl , permanecendo em contato com o substrato por 24h. Em seguida, o ácido foi removido por lixiviação com água deionizada, até que a água drenada apresentasse condutividade elétrica inferior a $0,010 \text{ mS/cm}$. Finalmente, com a areia lavada, foram semeadas 10 sementes por vaso e, após a emergência, foram deixadas apenas três plântulas por recipiente.

3.2 Delineamento experimental

O experimento utilizou delineamento inteiramente casualizado, em esquema bifatorial 2×2 , constituído por duas condições de N (deficiência: 0 mmol L^{-1} e suficiência: 9 mmol L^{-1}) e duas condições de Si (deficiência: $0,0 \text{ mmol L}^{-1}$ e suficiência: $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$), com cinco repetições. O Si foi fornecido na forma de nanopartículas, por meio do produto comercial Levasil CS30-130, com densidade de $1,3 \text{ g/L}$ ($168,3 \text{ g L}^{-1}$ de Si; partículas de $8,5$ a $9,7 \text{ nm}$). Diariamente, o elemento foi adicionado à solução nutritiva, mantendo-se a concentração de 2 mmol L^{-1} nos tratamentos que previam suprimento de Si.

3.3 Manejo da solução nutritiva

Nos primeiros seis dias após a emergência das plântulas, aplicaram-se apenas água deionizada e Si para os tratamentos preestabelecidos. A partir desse período, ocorreu a aplicação da solução nutritiva completa a 5% (incluindo N), seguindo a formulação de Hoagland e Arnon (1950). Aos 7 dias após a

emergência, a concentração da solução foi aumentada para 20% (incluindo N), e aos 20 dias, para 50%, ocasião em que a omissão de N foi realizada para os tratamentos preestabelecidos. Enquanto aos 27 dias de emergência, a concentração da solução foi alterada para 70%, até ao término do experimento (com omissão de N para os tratamentos preestabelecidos). A aplicação de Si foi realizada com a solução nutritiva em todos os períodos do experimento.

Com a solução na concentração a 70%, procedeu-se à lixiviação com água deionizada nos vasos, em intervalos de 10 dias, assegurando que a condutividade elétrica da água drenada ficasse abaixo de 0.010 mS/cm.

3.4 Análises

As análises foram realizadas 60 dias após a emergência da planta de amendoim, no início do período reprodutivo, realizando análise de pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila *a*, biometria de crescimento vegetativo, acúmulo de biomassa e teores nutricionais.

3.4.1 Fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos

A fluorescência inicial (F_0), a fluorescência máxima (F_m) e a fluorescência variável (F_v) foram mensuradas com um fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., EUA), entre 7h e 9h, utilizando a terceira folha de cada planta adaptada ao escuro. Com base nesses dados, calcularam-se a eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) e a eficiência de conversão da energia luminosa absorvida (F_v/F_0) (Lichtenthaler et al., 2005).

Para a determinação dos pigmentos fotossintéticos, foram coletadas da folha completamente expandida amostras do terço médio da planta. De cada amostra, para a obtenção da massa fresca, cinco discos foliares com área de

26,4 mm² foram removidos e pesados. As amostras foram despigmentadas com acetona a 80% e analisadas por espectrofotometria (DU640, Beckman, EUA) para a determinação de clorofila total, feofitina total e carotenoides, conforme proposto por Lichtenthaler (1987).

3.4.2 Acúmulo de biomassa e biometria de crescimento

Foi realizada a mensuração da altura das plantas com auxílio de régua graduada, e o diâmetro do caule foi medido com auxílio de paquímetro digital. Para determinar a produção de biomassa, a parte aérea das plantas foi colhida, e as amostras foram submetidas à secagem em uma estufa com circulação forçada de ar (TE-394/3 MP, Tecnal, BR) 65±5 °C, até atingirem massa constante. Finalmente, a massa seca foi determinada com balança semi-analítica.

3.4.3 Concentrações de nitrogênio e de silício

A determinação de N foi realizada pelo método de digestão úmida, à base de ácido sulfúrico, realizando destilação e, posteriormente, titulado com ácido sulfúrico (Bataglia et al., 1983). A determinação de Si foi realizada por digestão alcalina com hidróxido de sódio a 50% e peróxido de hidrogênio a 38% (Kraska e Breitenbeck, 2010); posteriormente, realizou-se a leitura em espectrofotômetro pelo método de colorimetria amarelo de molibdato de amônio (100g L⁻¹) (Korndorfer et al., 2004).

3.5 Análises estatísticas

Os dados foram processados no software Python (versão 3.9.7). A normalidade e a homogeneidade das variâncias foram analisadas pelos testes

de Shapiro-Wilk e Levene ($p > 0,05$) (Royston, 1995). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para detectar diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$). Quando identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste post-hoc de Tukey para comparação de médias, mantendo o nível de significância ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Concentrações de nitrogênio e de silício

A deficiência de N, na ausência do suprimento de Si, diminuiu o teor de N na parte aérea das plantas, enquanto a aplicação do Si aumentou o teor de N nas plantas, na suficiência de N, e, na deficiência de N, não houve resposta significativa (Figura 1a). O teor de Si nas plantas, na ausência do suprimento de Si, não foi modificado com a deficiência de N, enquanto o suprimento de Si aumentou o teor de Si nas plantas, tanto na condição de deficiência quanto na de suficiência de N (Figura 1b).

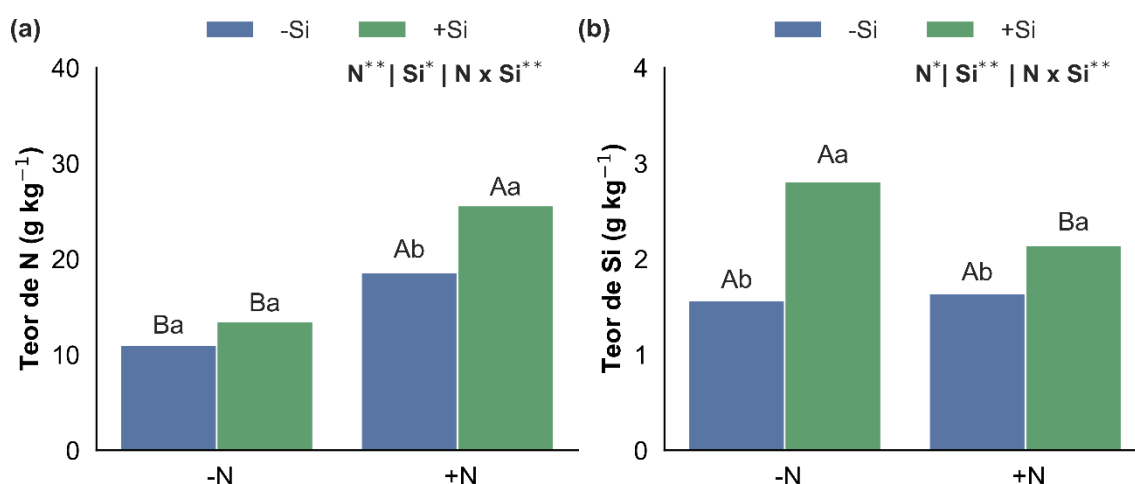


Figura 2. Teores de N e de Si na parte aérea das plantas de amendoim cultivadas com deficiência (-N) e suficiência de N (+N) combinadas ao suprimento de Si (-Si: 0 mM L⁻¹ e +Si: 2,0 mM). Letras maiúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre as condições de N e letras minúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre o suprimento de Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.2 Concentrações dos pigmentos fotossintéticos

A deficiência de N, na ausência de Si, reduziu o teor de clorofila total nas plantas. Contudo, a aplicação de Si promoveu aumento desse pigmento em condição de deficiência de N e, em condição de suficiência, não teve interação significativa (Figura 2a). Na ausência de suprimento de Si, a deficiência de N levou à diminuição do teor de feofitina total. Entretanto, na presença do Si, obteve-se aumento no teor de feofitina total nas plantas em condição de deficiência de N e, na condição de suficiência de N, não houve interação significativa (Figura 2b). A deficiência de N, na ausência de Si, diminuiu o teor de carotenoides nas plantas. O suprimento de Si aumentou esse teor apenas na situação de suficiência de N, sem efeito significativo na deficiência (Figura 2c).

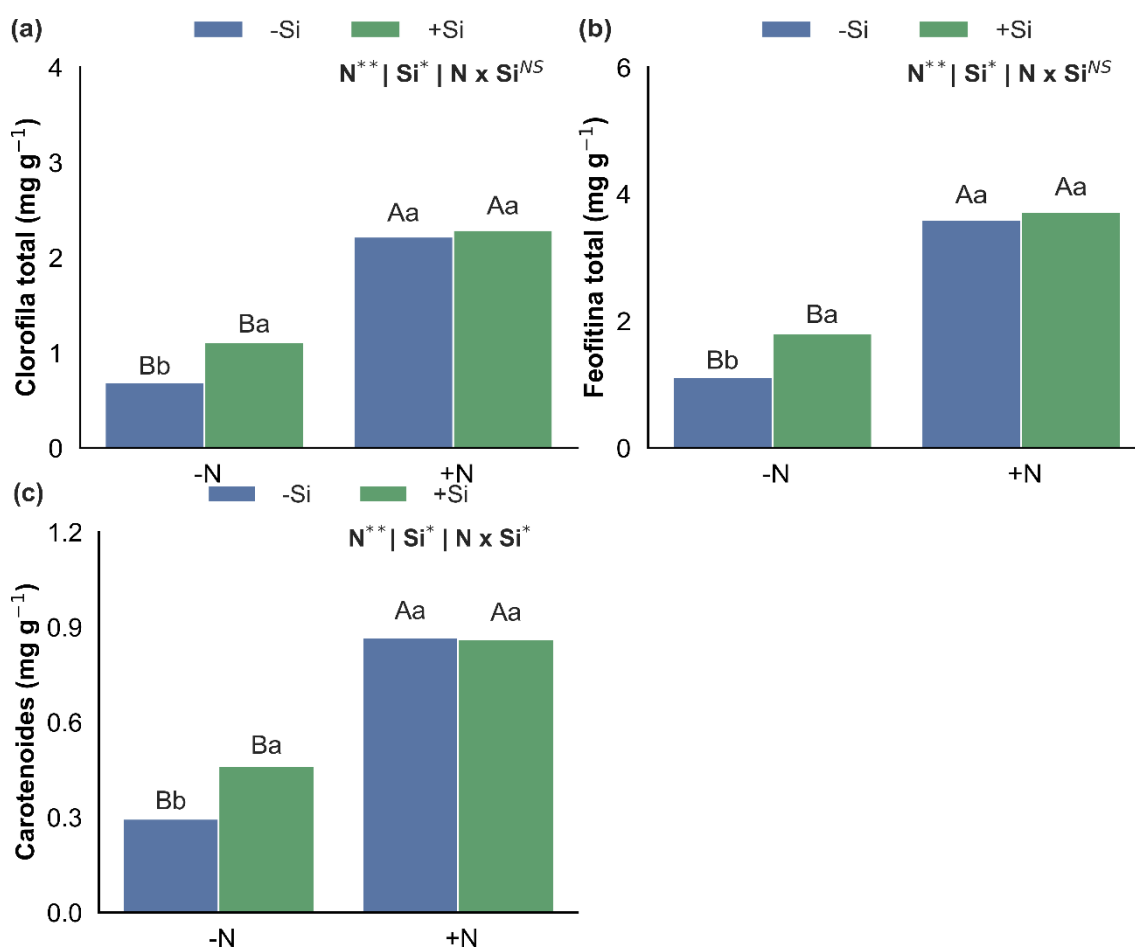


Figura 3. Concentrações de clorofila total (a), feofitina total (b) e carotenoides (c) em plantas de amendoim cultivadas com deficiência (-N) e suficiência de N (+N) combinadas ao suprimento de Si (-Si: 0 mM L⁻¹ e +Si: 2,0 mM). Letras maiúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre as condições de N e letras minúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre o suprimento de Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.3 Eficiência fotoquímica do fotossistema II

A deficiência de N, sem o suprimento de Si, diminuiu a eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm). A aplicação de Si aumentou esse fator sob deficiência de N e, na situação de suficiência de N não houve efeito significativo (Figura 3a). Porém, quando se fala na eficiência de conversão de energia absorvida (Fv/F0), não houve interação significativa do suprimento de Si nas duas situações, de deficiência e de suficiência do N (Figura 3b).

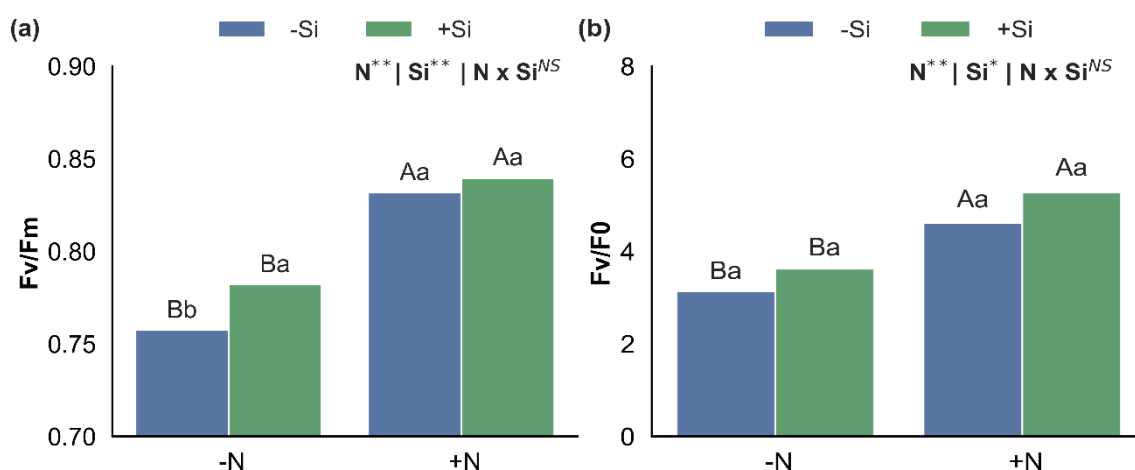


Figura 4. Eficiência quântica do fotossistema II (a) e eficiência de conversão de energia absorvida (b) em plantas de amendoim cultivadas com deficiência (-N) e suficiência de N (+N) combinadas ao suprimento de Si (-Si: 0 mM L⁻¹ e +Si: 2,0 mM). Letras maiúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre as condições de N e letras minúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre o suprimento de Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

4.4 Altura da planta, diâmetro do caule e acúmulo de biomassa

A deficiência de N, na ausência do suprimento de Si, não alterou a altura da planta. Porém, a aplicação de Si aumentou a altura da planta na situação de deficiência de N e, na situação de suficiência de N, não houve interação significativa (Figura 4a). A deficiência de N, na ausência do suprimento de Si, diminuiu o diâmetro do caule. Porém, a aplicação de Si aumentou o diâmetro do caule na situação de deficiência de N e, na situação de suficiência de N, não houve efeito significativo (Figura 4b). A deficiência de N, na ausência do suprimento do Si, diminuiu a massa seca total das plantas. Em contrapartida, com a aplicação de Si, obteve-se diminuição da massa seca total na condição de suficiência de N e, na condição de deficiência de N, não houve interação significativa (Figura 4c).

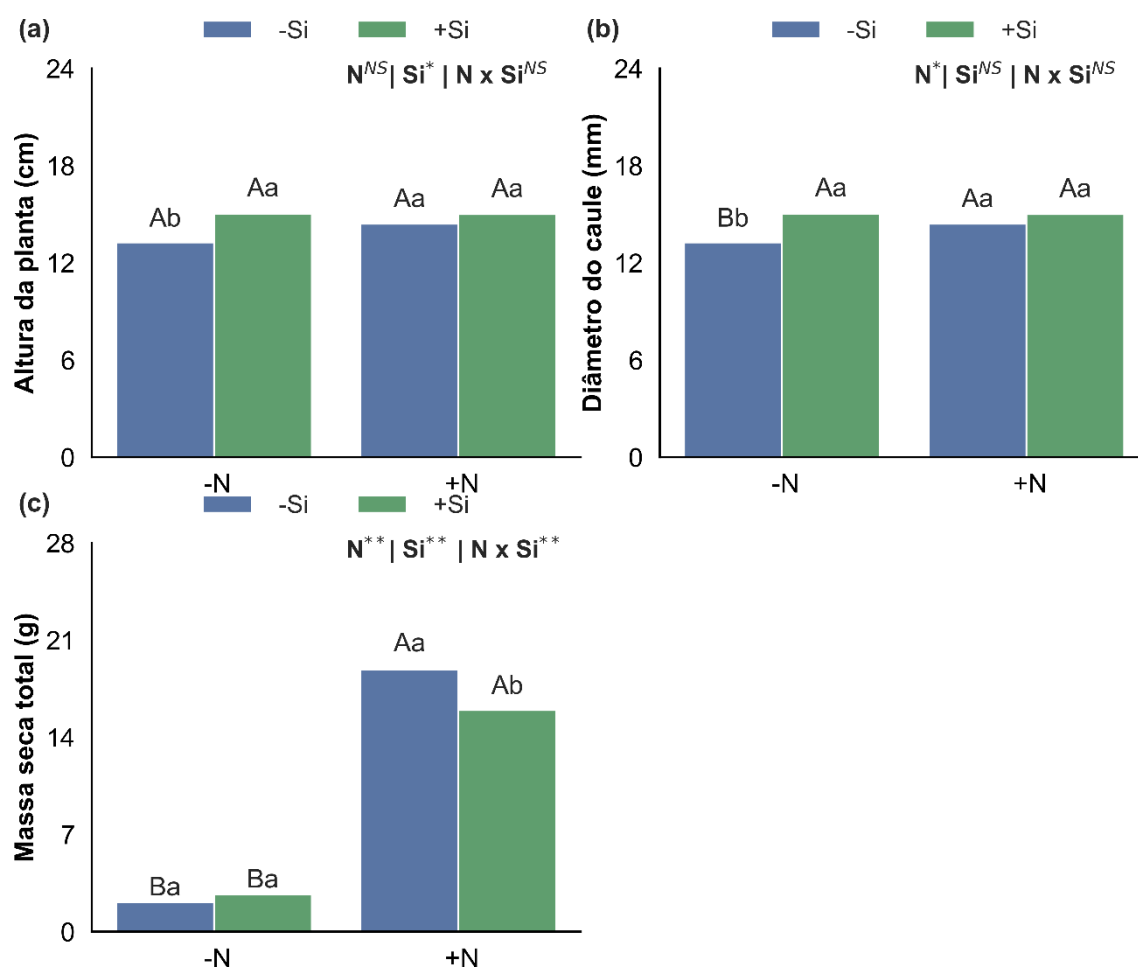


Figura 5. Altura das plantas (a), diâmetro do caule (b) e massa seca total (c) em plantas de amendoim cultivadas com deficiência (-N) e suficiência de N (+N) combinadas ao suprimento de Si (-Si: 0 mM L⁻¹ e +Si: 2,0 mM). Letras maiúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre as condições de N e letras minúsculas diferentes representam diferenças estatísticas entre o suprimento de Si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

5 DISCUSSÃO

A deficiência de N é amplamente reconhecida como um fator limitante ao crescimento, ao metabolismo e ao desempenho produtivo da cultura do amendoim. Estudos prévios demonstram que a omissão desse nutriente resulta em reduções significativas na altura das plantas, no diâmetro do caule, no índice SPAD e na massa seca, evidenciando o papel central do N no desenvolvimento vegetativo (Correia et al., 2012; Li et al., 2021).

Além disso, Guo et al. (2024) relataram que o suprimento adequado de N aumenta o funcionamento do fotossistema II (PSII), a capacidade fotossintética, o acúmulo de N e a produtividade do amendoim, reforçando que esse nutriente influencia, diretamente, no desempenho do aparato fotossintético. Alterações visuais e morfológicas, como redução da área foliar, alteração da coloração foliar, menor número de folhas e redução da altura das plantas, também são, frequentemente, observadas sob diferentes níveis de deficiência de N (Azimi., et al., 2021).

Além dos efeitos morfológicos, a deficiência de N compromete processos fisiológicos fundamentais. Baixos teores de N estão associados ao maior acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), decorrente da menor

atividade de enzimas antioxidantes, o que intensifica o estresse oxidativo nas plantas (Shi et al., 2017). Esse aumento do estresse oxidativo contribui para a degradação de pigmentos fotossintéticos e para a desestabilização do aparato fotossintético, afetando, diretamente, a eficiência fotossintética e o crescimento das plantas.

Os resultados do presente estudo corroboram esses achados da literatura. A deficiência de N reduziu o teor desse nutriente na parte aérea do amendoim quando as plantas não receberam suprimento adequado, evidenciando limitação na absorção e na translocação de N sob condições de deficiência (Figura 1a). Essa restrição nutricional refletiu-se, diretamente, na síntese e na manutenção dos pigmentos fotossintéticos. Na ausência do suprimento de Si, a deficiência de N diminuiu o teor de clorofila total (Figura 2a), feofitina total (Figura 2b) e carotenoides (Figura 2c), pigmentos essenciais para a absorção, transferência e dissipação da energia luminosa no processo fotossintético. A diminuição desses pigmentos sugere maior degradação do aparato fotossintético e maior sensibilidade das plantas à elevada intensidade luminosa, comportamento típico de ambientes tropicais sob deficiência de N (Vieira, 1996).

A diminuição dos pigmentos fotossintéticos comprometeu o funcionamento do complexo antena, reduzindo a capacidade de captação de energia luminosa e resultando em menor F_v/F_m (Figura 3a). Esse efeito é característico de estresses nutricionais que desestabilizam o aparato fotossintético e reduzem o desempenho fotoquímico das plantas (Kalaji et al., 2016). Portanto, os resultados deste estudo evidenciaram que a deficiência de

N nas plantas de amendoim, ao diminuir pigmentos fotossintéticos e a eficiência fotoquímica, resultou na diminuição do diâmetro do caule e da massa seca da planta (Figuras 4b e 4c). Esses resultados reforçam que a deficiência de N afeta, simultaneamente, processos fisiológicos e morfológicos, culminando em menor crescimento vegetal e acúmulo de biomassa, conforme já descrito por Mu et al. (2016) e Mu e Chen (2021).

Diante desse cenário de limitação nutricional, o Si mostrou-se uma ferramenta importante na atenuação dos efeitos fisiológicos da deficiência de N. Embora a aplicação de Si não tenha aumentado o teor de N nas plantas sob deficiência (Figura 1a), houve elevação significativa do teor de Si nos tecidos vegetais em condições de deficiência e de suficiência de N (Figura 1b). Esse acúmulo de Si esteve associado à maior preservação dos pigmentos fotossintéticos, especialmente sob deficiência de N. A aplicação de Si promoveu aumento do teor de carotenoides, de clorofila total e de feofitina total em plantas deficientes em N (Figuras 2a, 2b e 2c), indicando menor degradação dos pigmentos e maior estabilidade do aparato fotossintético.

Essa preservação dos pigmentos refletiu-se em melhorias funcionais no desempenho fotoquímico. A aplicação de Si aumentou a eficiência quântica do fotossistema II em plantas sob deficiência de N (Figura 3a), evidenciando que o elemento contribui para a manutenção do funcionamento do PSII sob estresse nutricional. Considerando que os fotossistemas são importantes locais de produção de EROs nas plantas (Pospíšil, 2009), a redução do estresse oxidativo, mediada pelo Si, pode explicar a menor ocorrência de danos fotoquímicos, conforme descrito por Miao et al. (2010) e Kim et al. (2017). Contudo, a eficiência

de conversão da energia absorvida não foi influenciada pelo suprimento de Si, independentemente da condição de N (Figura 3b), indicando que o efeito do Si esteve relacionado, principalmente, à proteção estrutural e funcional do aparato fotossintético.

Apesar das melhorias fisiológicas observadas, os efeitos do Si não foram plenamente convertidos em incrementos consistentes de crescimento e de biomassa. Embora a aplicação de Si tenha aumentado a altura e o diâmetro do caule em plantas sob deficiência de N (Figuras 4a e 4b), não houve aumento significativo da massa seca total nessa condição (Figura 4c). Esses resultados indicam que, embora o Si seja eficaz na atenuação dos danos fisiológicos causados pela deficiência de N, ele não substitui as funções metabólicas essenciais desempenhadas pelo N, como a síntese de proteínas, aminoácidos e ácidos nucleicos, fundamentais para o crescimento e a formação de tecidos (Kawade et al., 2023; Rahman et al., 2024).

Uma hipótese mecanística para explicar por que o Si melhorou variáveis fotoquímicas/pigmentares e, até, altura das plantas e diâmetro do caule, mas não aumentou a massa seca sob deficiência de N, é que o Si atuou, principalmente, como agente fotoprotetor/antioxidante, enquanto a limitação primária para conversão de carbono em biomassa permaneceu sendo a escassez de N. Sob baixa disponibilidade de N, a planta reduz o investimento em proteínas do aparato fotossintético (especialmente Rubisco e componentes ligados a V_{cmax}), o que impõe uma limitação bioquímica à assimilação de CO_2 e à geração de fotoassimilados, além de favorecer desequilíbrios redox e aumento de ROS; isso costuma refletir-se em queda de clorofilas, em alteração

do status de carboidratos e em redução de biomassa (Boussadia et al., 2010; Gao et al., 2018).

Adicionalmente, a ausência de incremento na massa seca, possivelmente, está relacionada com o período de avaliação adotado no presente estudo. As plantas foram avaliadas aos 60 dias após a emergência, no início da fase reprodutiva do amendoim, momento em que o acúmulo de biomassa ainda se encontra em desenvolvimento, e a redistribuição de assimilados para as estruturas reprodutivas está apenas iniciando-se. Nesse contexto, os efeitos benéficos do Si sobre a eficiência fotoquímica e a preservação dos pigmentos podem não ter sido, suficientemente, expressivos em termos de acúmulo de matéria seca, pois a conversão de ganhos fisiológicos em biomassa é um processo dependente do tempo. Dessa forma, é possível que avaliações em estágios mais avançados do ciclo da cultura evidenciem respostas mais consistentes do Si sobre a produção de biomassa.

Nessa condição, mesmo que o Si preserve a integridade do PSII e atenuar danos oxidativos (mantendo pigmentos e melhorando $Y(II)/\Phi PSII$), ele não supre N nem restaura plenamente a capacidade de síntese de proteínas, aminoácidos e ácidos nucleicos, necessária para expansão estrutural e acúmulo de massa seca (Kim et al., 2017; Rastogi et al., 2021). Além disso, sob deficiência de N, parte do C pode ser direcionada para custos de manutenção/ajuste metabólico e processos de reparo, reduzindo a fração efetivamente convertida em biomassa, mesmo quando o estresse foto-oxidativo é mitigado (Lehmeier et al., 2010).

Dessa forma, os dados deste estudo demonstram que o Si atua como um mitigador parcial dos efeitos da deficiência de N em plantas de amendoim, contribuindo principalmente para a preservação dos pigmentos fotossintéticos e para a manutenção do funcionamento do aparato fotoquímico. No entanto, mesmo reduzindo os danos fisiológicos associados ao estresse nutricional, o Si não restabelece plenamente o crescimento e a produção de biomassa em ambientes com limitação de N. Desse modo, confirma-se que a magnitude desses benefícios foi insuficiente para aumentar a conversão de massa seca no amendoim (planta não acumuladora de Si), tendo pouca importância agronômica para mitigar a deficiência de N. Portanto, em planta deficiente de N, é primordial o uso de fertilizantes nitrogenados e/ou estratégias para potencializar a fixação biológica de N na cultura do amendoim.

6 CONCLUSÃO

O menor suprimento de N reduziu, significativamente a concentração de N nas plantas de amendoim, desencadeando a degradação de clorofilas, feofitinas e carotenoides e comprometendo a eficiência fotoquímica do fotossistema II. Esses efeitos fisiológicos refletiram-se em menor altura da planta, menor diâmetro do caule e redução no acúmulo de biomassa.

A aplicação de Si promoveu o aumento da concentração de Si na parte aérea das plantas, atenuando a degradação dos pigmentos fotossintéticos e melhorando a eficiência fotoquímica do fotossistema II, além de aumentar a altura e o diâmetro do caule das plantas de amendoim. No entanto, esses benefícios fisiológicos e morfológicos não foram convertidos em incrementos no acúmulo de biomassa; portanto, o Si não apresentou relevância agronômica na atenuação da deficiência de N para a cultura do amendoim. Adicionalmente, os resultados demonstram que o Si também não induziu benefícios em plantas de amendoim sob suprimento adequado de N.

REFERÊNCIAS

- Abdelaal, K.A.A., Mazrou, Y.S.A., Hafez, Y.M.: Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. **Plants-Basel**, 9: 733, 2020.
- Al Murad, M., Khan, A. L., Muneer, S. Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. **Plants**, 9: 460, 2020.
- Alves, D. M. R. et al. Silicon in the form of nanosilica mitigates P toxicity in scarlet eggplant. **Scientific Reports**, 13: 9190, 2023.
- Ang, et al. Relationship of pod damage by southern corn rootworm and soil drainage to peanut yield. **Peanut Science**, 21: 68-74, 1994.
- Araújo, W. B. S. et al. Silicon mitigates nutritional stress of nitrogen, phosphorus, and calcium deficiency in two forages plants. **Scientific Reports**, 12: 6611, 2022.
- Attree, R., Du, B., Xu, B. Distribution of phenolic compounds in seed coat and cotyledon, and their contribution to antioxidant capacities of red and black seed coat peanuts (*Arachis hypogaea* L.). **Industrial Crops and Products**, 67: 448-456, 2015.
- Avila, R. G. et al. Silicon supplementation improves tolerance to water deficiency in sorghum plants by increasing root system growth and improving photosynthesis. **Silicon**, 12: 2545-2554, 2020.
- Azimi, S., Kaur, T., Gandhi, T. K. A deep learning approach to measure stress level in plants due to nitrogen deficiency. **Measurement**, 173: 108650, 2021.
- Bataglia, O. C. et al. Métodos de análise química de plantas. **Boletim Técnico**, 78: 48, 1983.
- Bekele, G. et al. Effects of nitrogen, phosphorus and vermicompost fertilizers on productivity of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Babile, Eastern Ethiopia. **Department of Plant Sciences Bedele College of Agriculture and Forestry, Mettu University**, Ethiopia, 2019.
- Bent, E. Silicon solutions: helping plants to help themselves: an holistic review. **Sestante**, 2014.
- Boussadia, O. et al. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars 'Meski' and 'Koroneiki'. **Scientia Horticulturae**, 123: 336-342, 2010.
- Betiol, O. et al. Biofertilizantes pulverizados nas folhas e no sulco de semeadura na cultura do amendoim. **South American Sciences**, 2: e21140-e21140, 2021.
- Buchelt, A. C. et al. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20: 1532-1548, 2020.

Campos, C. N. S., da Silva, B. C. Silicon mitigates the effects of nitrogen deficiency in plants. In Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants. **Cham: Springer International Publishing**, 87-100, 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra brasileira de grãos. **CONAB**, 13: 11, 2026.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de amendoim cresce mais de 100% nos últimos 8 anos. Brasília: **CONAB**, 2022.

Correia, M. A. R. et al. Avaliação da desordem nutricional de plantas de amendoim cultivadas em solução nutritiva suprimidas de macronutrientes. **Scientia Agraria**, 13: 21-28, 2012.

Coskun, D. et al. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, 221: 67-85, 2019.

Costa, M. G. et al. Elucidating the underlying mechanisms of silicon to suppress the effects of nitrogen deficiency in pepper plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 216: 109113, 2024.

Costa, M. G. et al. The effect of abiotic stresses on plant C: N: P homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, 12: 340-353, 2024.

Curvêlo, C. R. D. S. et al. Mecanismos bioquímicos da defesa do algodoeiro à mancha de ramulária mediados pelo silício. **Bragantia**, 72: 41-51, 2013.

Da Silva Liber Lopes, P. M. et al. The synergistic effects of soil-applied boron and foliar-applied silicon on cotton fiber quality and yield. **BMC Plant Biology**, 23: 520, 2023.

Debona, D., Rodrigues, F. A., Datnoff, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**, 55: 85-107, 2017.

El-Habbasha, S. F., Taha, M. H., Jafar, N. A. Effect of nitrogen fertilizer levels and zinc foliar application on yield, yield attributes and some chemical traits of groundnut. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, 9: 1-7, 2013.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, 88: 97-185, 2005.

Farouk, S., Elhindi, K. M., Alotaibi, M. A. Silicon supplementation mitigates salinity stress on *Ocimum basilicum* L. via improving water balance, ion homeostasis, and antioxidant defense system. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 206: 111396, 2020.

Feng, J. et al. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, 123: 521-530, 2010.

Frew, A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, 121: 1265-1273, 2018.

Gao, Y., Cabrera Serrenho, A. Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. **Nature Food**, 4: 170-178, 2023.

Gao, J. et al. Enhanced Rubisco activation associated with maintenance of electron transport alleviates inhibition of photosynthesis under low nitrogen conditions in winter wheat seedlings. **Journal of Experimental Botany**, 69: 5477-5488, 2018.

Gaur, S. et al. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 202: 110885, 2020.

Gericó, T. G. Efeitos da utilização de bactérias promotoras do crescimento de plantas no desenvolvimento e na produtividade do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Agronegócio e Desenvolvimento, Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Tupã**, 2019.

Guo, C. et al. Influence of different cooking methods on the nutritional and potentially harmful components of peanuts. **Food Chemistry**, 316: 126269, 2020.

Guo, P. et al. Optimized nitrogen application ameliorates the photosynthetic performance and yield potential in peanuts as revealed by OJIP chlorophyll fluorescence kinetics. **BMC Plant Biology**, 24: 774, 2024.

Hajihashemi, S. et al. Effect of cold stress on photosynthetic traits, carbohydrates, morphology, and anatomy in nine cultivars of *Stevia rebaudiana*. **Frontiers in Plant Science**, 9: 1430, 2018.

Hardarson, G. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. **Plant and Soil**, 152: 1-17, 1993.

Hou, L. et al. The mechanisms of pod zone nitrogen application on peanut pod yield. **Russian Journal of Plant Physiology**, 69: 51, 2022.

Huang, H. et al. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants. **Journal of Hazardous Materials**, 401: 123393, 2021.

Hussain, S. et al. Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **Journal of Hazardous Materials**, 401: 123256, 2021.

Isa, M. et al. Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, *Isi1*. **Plant and Soil**, 331: 361-375, 2010.

Islam, W. et al. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 168: 104641, 2020.

Kalaji, H. M. et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, 38: 102, 2016.

Kalaji, H. M. et al. Prompt chlorophyll fluorescence as a tool for crop phenotyping: an example of barley landraces exposed to various abiotic stress factors. **Photosynthetica**, 56: 953-961, 2018.

Kawade, K. et al. The roles of functional amino acids in plant growth and development. **Plant and Cell Physiology**, 64: 1482-493, 2023.

Khatam, A. S., Rastegar, S., Khankahdani, H. H. Modulating cold tolerance in Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle): A combined approach using melatonin, acetic acid and mannitol. **Scientia Horticulturae**, 338: 113634, 2024.

Kido, N. et al. The matrix polysaccharide (1; 3, 1; 4)- β -D-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. **Plant and Cell Physiology**, 56: 268-276, 2015.

Kim, Y. H. et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, 8: 256717, 2017.

Kong, X. et al. Physio-biochemical and molecular mechanisms of low nitrogen stress tolerance in peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Plant Molecular Biology**, 115: 19, 2025.

Korndorfer, G. H., Pereira, H. S., Nolla, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico**, 2, 2004.

Kraska, J. E., Breitenbeck, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41: 2075-2085, 2010.

Lehmeier, C. A. et al. Nitrogen deficiency increases the residence time of respiratory carbon in the respiratory substrate supply system of perennial ryegrass. **Plant, Cell & Environment**, 33: 76-87, 2010.

Li, G. et al. Nitrogen application in pod zone improves yield and quality of two peanut cultivars by modulating nitrogen accumulation and metabolism. **BMC Plant Biology**, 24: 48, 2024.

Li, L. et al. Comparative transcriptomic analysis reveals the negative response mechanism of peanut root morphology and nitrate assimilation to nitrogen deficiency. **Plants**, 12: 732, 2023.

Li, L. et al. Response of root growth and development to nitrogen and potassium deficiency as well as microRNA-mediated mechanism in peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Frontiers in Plant Science**, 12: 695243, 2021.

Li, Z. et al. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, 38: 26, 2018.

Liu, B., Soundararajan, P., Manivannan, A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. **Plants**, 8: 307, 2019.

Liu, X., Hu, B., Chu, C. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects. **Journal of Genetics and Genomics**, 49: 394-404, 2022.

Lobo, D. M. et al. Características de deficiência nutricional do amendoineiro submetido à omissão de N, P, K. **Bioscience Journal**, 28: 69-76, 2012.

Ma, J. F., Miyake, Y., Takahashi, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in Plant Science**, 8: 17-39, 2001.

Maaz, T. M. et al. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. **Global Change Biology**, 27: 2343-2360, 2021.

Mahboob, W., Yang, G., Irfan, M. Crop nitrogen (N) utilization mechanism and strategies to improve N use efficiency. **Acta Physiologiae Plantarum**, 45: 52, 2023.

Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. **Editora Ceres**, 2006.

Mekdad, A. A. et al. Impact of level of nitrogen fertilization and critical period for weed control in peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Agronomy**, 11: 909, 2021.

Miao, B. et al. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, 105: 967-973, 2010.

Mondal, M. et al. Supplementing nitrogen in combination with rhizobium inoculation and soil mulch in peanut (*Arachis hypogaea* L.) production system: part I - effects on productivity, soil moisture, and nutrient dynamics. **Agronomy**, 10: 1582, 2020.

Moro, A. L., Broetto, F., Moro, E. Relação hídrica e teor de clorofila em dois cultivares de arroz submetido à deficiência hídrica e adubação silicatada. **Irriga**, 20: 570-586, 2015.

Mostofa, M. G. et al. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, 41: 918-934, 2021.

Moussa, H. R., Galad, M. A. R. Comparative response of salt tolerant and salt sensitive maize (*Zea mays* L.) cultivars to silicon. **European Journal of Academic Essays**, 2: 1-5, 2015.

Mu, X. et al. Within-leaf nitrogen allocation in adaptation to low nitrogen supply in maize during grain-filling stage. **Frontiers in Plant Science**, 7: 699, 2016.

Mu, X., Chen, Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, 158: 76-82, 2021.

Mukarram, M. et al. Beyond essentiality: silicon as a systems regulator of photosynthesis under stress scenarios. **Frontiers in Plant Science**, 16: 1690421, 2025.

Muneer, S. et al. Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress. **International Journal of Molecular Sciences**, 15: 21803-21824, 2014.

Nwugo, C. C., Huerta, A. J. Silicon-induced cadmium resistance in rice (*Oryza sativa*). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 171: 841-848, 2008.

Oliveira, S. C. et al. Effect of Production Costs on the Price per Ton of Sugarcane: The Case of Brazil. **International Journal of Social Science Studies**, 10: 15-27, 2022.

Palmero, F. et al. A quantitative review into the contributions of biological nitrogen fixation to agricultural systems by grain legumes. **European Journal of Agronomy**, 136: 126514, 2022.

Peoples, M. B. et al. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, 48: 1-17, 2009.

Pospíšil, P. Production of reactive oxygen species by photosystem II. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, 1787: 1151-1160, 2009.

Prado, R. M. Mineral nutrition of tropical plants. **Springer**, 2021.

Rahman, S., Mehta, S., Husen, A. Use of amino acids in plant growth, photosynthetic assimilation, and nutrient availability. **Biostimulants in Plant Protection and Performance**, Elsevier: 117-127, 2024.

Ranjan, A. et al. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. **Plant Physiology and Biochemistry**, 163: 15-25, 2021.

Rastogi, A. et al. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...? **Plant Physiology and Biochemistry**, 169: 40-48, 2021.

Rastogi, A. et al. JIP-test as a tool to identify salinity tolerance in sweet sorghum genotypes. **Photosynthetica**, 58, 2020.

Rathore, V. S, Nathawat, N. S., Bhardwai, S. et al. Optimization of deficit irrigation and nitrogen fertilizer management for peanut production in an arid region. **Scientific Reports**, 11: 5456, 2021.

Rodrigues, E. V. Eficiência de herbicidas no controle de plantas daninhas no cultivo do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Acta Iguazu**, 7: 95-105, 2018.

Rodrigues Filho, F. S. D. O., Feitosa, C. T., Gerin, M. A. N. Omissão de macronutrientes em plantas de amendoim. **Bragantia**, 47: 305-312, 1988.

Sampaio, R. M. Amendoim: em 2022, as exportações do grão fortaleceram novos mercados, enquanto as do óleo registraram alta. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, 18: 1-7, 2023.

Santi, L. P., Nurhaimi, H., Mulyanto, D. Effect of bio-silica on drought tolerance in plants. In IOP conference series: **Earth and Environmental Science**, 183: 012014, 2018.

Santos, G. A. Silício na produção de cana-de-açúcar. **Tese para Obtenção do Título de Doutor em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2017.

Santos, A. F. B. et al. Silicon increases chlorophyll and photosynthesis and improves height and NDVI of cotton (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch). **Research, Society and Development**, 9: e548973826-e548973826, 2020.

Sheng, H., Chen, S. Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. **Plant Physiology and Biochemistry**, 155: 13-19, 2020.

Shen, X. F., Zhao, Z. H., Chen, Y. Effects of intercropping with peanut and silicon application on sugarcane growth, yield and quality. **Sugar Tech**, 21: 437-443, 2019.

Shi, H. et al. Physiological and transcriptional responses of *Catalpa bungei* to drought stress under sufficient-and deficient-nitrogen conditions. **Tree Physiology**, 37: 1457-1468, 2017.

Song, A. et al. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high-zinc stress. **Plos One**, 9: e113782, 2014.

Sunil, C. et al. Comparative assessment of nano nitrogen and nano zing nutrition on growth, yield and profitability of chilli (*Capsicum annuum* L.). **Journal of Plant Nutrition**, 47: 1916-1930, 2024.

Tariq, A. et al. Regulation of metabolites by nutrients in plants. **Plant Ionomics: sensing, signaling, and regulation**, 1-18, 2023.

Tatagiba, S. D., Figueiredo, A. P., Rodrigues, F. Á. O silício potencializa o desempenho fotoquímico em folhas de arroz. **XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, 2017.

Teodoro, P. E. et al. Acúmulo de massa seca na soja em resposta a aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. **Bioscience Journal**, 31: 161-170, 2015.

Tripathi, D. K. et al. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, 110: 70-81, 2017.

Tubbs, R. S. et al. Effect of inoculant and nitrogen application at planting on peanut production in Georgia. **Crop Management**, 11: 1-11, 2012.

Vasconcelos, F. M. T. D. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos eretos de amendoim cultivados nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. **Ciência Rural**, 45: 1375-1380, 2015.

Vieira, G. Gap dynamics in managed Amazonian forest: structural and ecophysiological aspects. **Doctoral dissertation, University of Oxford**, Inglaterra, 1996.

Vilela, H. As fontes de silício (silicatos). **Agronomia: Artigos Científicos**, 2009.

- Wang C. B. et al. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope ^{15}N . **Journal of Integrative Agriculture**, 15: 432-439, 2016.
- Wang, J. et al. Increasing calcium and decreasing nitrogen fertilizers improves peanut growth and productivity by enhancing photosynthetic efficiency and nutrient accumulation in acidic red soil. **Agronomy**, 13: 1924, 2023.
- Wang, Y. et al. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, 158: 117-124, 2019.
- Wu, L. et al. Comparative proteomic analysis of the maize responses to early leaf senescence induced by preventing pollination. **Journal of Proteomics**, 177: 75-87, 2018.
- Wu, Y. et al. Comparative transcriptomics analysis of developing peanut (*Arachis hypogaea* L.) pods reveals candidate genes affecting peanut seed size. **Frontiers in Plant Science**, 13: 958808, 2022.
- Xu, Y. et al. Effects of nitrogen allocation and photosynthetic proteins response in peanut leaves on photosynthesis under conditions of water scarcity and nitrogen deficiency. **BMC Plant Biology**, 25: 1-14, 2025.
- Yang, S., et al. Transcriptome of peanut kernel and shell reveals the mechanism of calcium on peanut pod development. **Scientific Reports**, 10: 15723, 2020.
- Ye, J. Y., Tian, W. H., Jin, C. W. Nitrogen in plants: From nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. **Stress Biology**, 2: 4, 2022.
- Zhang, C. et al. Do lignification and silicification of the cell wall precede silicon deposition in the silica cell of the rice (*Oryza sativa* L.) leaf epidermis? **Plant and Soil**, 372: 137-149, 2013.
- Zhang, M, et al. Rational nitrogen strategies can improve peanut source supply capacity and pod yield. **Agronomy Journal**, 109: 2927-2935, 2017.
- Zhang, Y et al. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, 17: 2151-2159, 2018.
- Zhang, Y. et al. Comparative transcriptome analysis of basal and zygote-located tip regions of peanut ovaries provides insight into the mechanism of light regulation in peanut embryo and pod development. **BMC Genomics**, 17: 606, 2016.
- Zhang, X. et al. Silicon Enhances Antioxidant Capacity and Photochemical Efficiency in Drought-Stressed Creeping Bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) Putting Greens. **Horticulturae**, 11: 664, 2025.
- Zhao, X. et al. Alternative splicing profiling provides insights into the molecular mechanisms of peanut peg development. **BMC Plant Biology**, 20: 488, 2020.

Zheng, Y. M. et al. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope ^{15}N . **Journal of Integrative Agriculture**, 15: 432-439, 2016.

Zhou, Z. et al. Impact of germination time on resveratrol, phenolic acids, and antioxidant capacities of different varieties of peanut (*Arachis hypogaea* L.) from China. **Antioxidants**, 10: 1714, 2021.

Zuo, Y. M., Liu, Y. X., Zhang, F. S. Effects of improvement of iron nutrition by mixed cropping with maize on nodule microstructure and leghaemoglobin content of peanut. **Journal of Plant Physiology and Molecular Biology**, 29: 33-38, 2003.