



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

EDUARDO WILLIAM DE ARAÚJO COSTA

SILÍCIO COMO MODULADOR DE PROCESSOS FOTOSSINTÉTICOS E
CRESCIMENTO INICIAL DO MARACUJAZEIRO-AMARELO CULTIVADO SOB
TOXICIDADE AMONÍACAL

Bom Jesus - PI

2024

EDUARDO WILLIAM DE ARAÚJO COSTA

**SILÍCIO COMO MODULADOR DE PROCESSOS FOTOSSINTÉTICOS E
CRESCIMENTO INICIAL DO MARACUJAZEIRO-AMARELO CULTIVADO SOB
TOXICIDADE AMONIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Coorientador: Rodrigo Fonseca da Silva

Bom Jesus – PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

- C837s** Costa, Eduardo William de Araújo.
 Silício como modulador de processos fotossintéticos e
 crescimento inicial do maracujazeiro-amarelo cultivado sob
 toxicidade amoniacal./ Eduardo William de Araújo Costa. –
 2024.
 50 f.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,
 Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-
 graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.
 Orientação: “Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior”.
1. Maracujá-cultivo. 2. Plantas-nutrição. 3. Passiflora
 edulis. I. Costa, Eduardo William de Araújo. II. Silva
 Júnior, Gabriel Barbosa da. III. Título.

CDD 634.42

Elaborado por Sérvulo Fernandes da Silva Neto – CRB-15/603

EDUARDO WILLIAM DE ARAÚJO COSTA

**SILÍCIO COMO MODULADOR DE PROCESSOS FOTOSSINTÉTICOS E
CRESCIMENTO INICIAL DO MARACUJAZEIRO-AMARELO CULTIVADO SOB
TOXICIDADE AMONÍACAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, do Campus Professora Cinobelina Elvas, da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de Concentração: Produção Vegetal

Linha de Pesquisa: Propagação e Manejo Cultural de Plantas.

Orientador: Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Coorientador: Rodrigo Fonseca da Silva

Aprovada em: 31 de julho de 2024

Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva (CPCE/UFPI)
(Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Silva (CPCE/UFPI)
(Coorientador)

Prof. Dr. Everaldo Moreira da Silva (CPCE/UFPI)
(Membro externo ao programa)

Dr. Jenilton Gomes da Cunha (CCA/UNIVASF)
(Membro externo a Instituição)

À minha mãe Valdirene e a toda minha família
que sempre me apoiaram.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu forças e disposição durante toda a minha vida, e permitiu que pudesse realizar essa jornada acadêmica.

A toda minha família que nunca mediu esforços para me ajudar e me apoiar em todos os momentos em especial a minha mãe Valdirene Silva, minha irmã Mariana Sousa, minha avó Maria Araújo e meu padrasto Marcos Sousa.

Agradeço aos amigos de graduação que sempre me motivaram e me influenciaram em minha jornada acadêmica em especial Paula Muniz, Lidia Ferreira, Vanessa Brito, Maurivan, Nilo Couto e Dario Sousa.

Aos novos amigos que além do apoio estiveram comigo durante minha jornada do mestrado que permitiram maior leveza tornando minha experiência ainda mais estimulante, principalmente ao Ramon, Gilvana e Claudiana Barroso.

Em especial, agradeço aos companheiros que estavam diretamente relacionados na concepção, manejo e organização do experimento aqui apresentado, cujo auxílio e apoio foram fundamentais pelos resultados positivos aqui obtidos, sendo eles Jenilton Gomes, Kamilla Dias e Maria Eduarda.

Aos membros do grupo de pesquisa Frutagro que se disponibilizaram a ajudar na obtenção dos resultados, no desmonte e apoio nas empreitadas em especial a Thais Santiago, Daniele Galvão, Ronaty Sousa, Taylor Victor, Matheus Ghilardi, Rickelmy Silva, Gustavo Jesus.

Ao meu orientador Gabriel Barbosa, pelo apoio e por ter acreditado em meu potencial permitindo o desenvolvimento e a qualidade do trabalho aqui apresentado, também por me inspirar a continuar na área acadêmica.

Ao meu coorientador Rodrigo Fonseca por toda ajuda durante todo o experimento, da concepção a interpretação dos resultados.

Ao viveiro Flora Brasil pelo fornecimento das sementes que possibilitou a realização deste experimento.

A Universidade Federal do Piauí (UFPI), Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), e a CAPES pela estrutura que permitiu a realização de minha formação acadêmica.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>A</i>	Taxa de assimilação de CO ₂
<i>A/Ci</i>	Eficiência instantânea da carboxilação
CE1	Condutividade elétrica inicial
CE2	Condutividade elétrica final
<i>Ci</i>	Concentração intercelular de CO ₂
CPCE	Campus Professora Cinobelina Elvas
<i>E</i>	Taxa de transpiração
EUA	Uso eficiente da água
Fm'	Estado de equilíbrio máximo
Fm	Fluorescência máxima
Fo'	Fluorescência basal
Fs	Estado de equilíbrio dinâmico
FV	Fluorescência variável
<i>g_s</i>	Condutância estomática
IRGA	Infra Red Gas Analyser
PPGCA	Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias
PSII	Fotossistema II
TCRAP	Taxas de crescimento relativo em altura do caule
TCRDC	Taxas de crescimento relativo em diâmetro do caule
UFPI	Universidade Federal do Piauí
VE	Vazamento de eletrólitos

LISTA DE SÍMBOLOS

H_3BO_3	Ácido Bórico
$\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Ácido Molíbdico Monohidratado
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cloreto de Calcio Di-hidratado
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Cloreto de Manganês Tetra-hidratado
KCl	Cloreto de Potássio
CO_2	Dióxido de Carbono
KH_2PO_4	Fosfato de Potássio
Micro*	Micronutrientes
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Nitrato de Cálcio Pentahidratado
Fe-EDDHMA**	Quelato de Ferro
Na_2SiO_3	Silicato de Sódio
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Cobre Pentahidratado
MgSO_4	Sulfato de Magnésio
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Zinco Heptahidratado

RESUMO

A produção do crescimento inicial de mudas com substrato inerte é uma prática que vem ganhando destaque nos últimos anos. No entanto, é limitado pelo equilíbrio ideal de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) no meio de cultivo. O excesso de NH_4^+ , aumenta o número de espécies de oxigênio que afeta a integridade da membrana e dos cloroplastos, gerando prejuízos ao fotossistema. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o efeito mitigador do Si sobre o estado nutricional, bioquímico, fisiológico e crescimento do maracujazeiro-amarelo cultivado sob toxicidade amoniacal em solução nutritiva. Para isso, foi realizado testes com mudas de maracujazeiro-amarelo cultivado em substrato inerte com delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial $3 \times 2 + 1$, sendo o primeiro fator: proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, de 50/50, 70/30 e 100/0 sob a concentração de 13 mmol L^{-1} ; o segundo fator: ii) presença e ausência de silício (2 mmol L^{-1}), enquanto o tratamento adicional com proporção de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 100/0 sob a concentração de 20 mmol L^{-1} de N com a presença de silício 2 mmol L^{-1} . Os resultados demonstram o efeito benéfico do Si, quando a plantas são submetidas a condições estressante, melhorando a eficiência da fotossíntese e amenizando a injurias foliares desencadeadas pelo excesso de NH_4^+ . O aumento das proporções de amônio em relação ao nitrato causa danos no maquinário fotossintético, produção de massa seca e nos pigmentos fotossintéticos de plantas de maracujazeiro-amarelo. Concentrações de amônio acima de $6,5 \text{ mmol L}^{-1}$ diminuem severamente o crescimento inicial das plantas de maracujazeiro-amarelo. O silício atenuou os efeitos adversos nas plantas nas concentrações de $6,5$ a 20 mmol L^{-1} , amenizando a sintomatologia, melhorando o desempenho fotossintético.

Palavras-chaves: *Passiflora edulis*. Nutrição de plantas. Fluorescência de clorofila. Si

ABSTRACT

The production of initial growth of seedlings with inert substrate is a practice that has been gaining prominence in recent years; however, it is limited by the ideal balance of ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) in the culture medium. Excess NH_4^+ increases the number of oxygen species that affect the integrity of the membrane and chloroplasts, causing damage to the photosystem. Given the above, the objective of this study was to evaluate the mitigating effect of Si on the nutritional, biochemical, physiological status and growth of yellow passion fruit grown under ammonia toxicity in nutrient solution. For this, tests were carried out with yellow passion fruit seedlings grown in inert substrate with a randomized block design in a $3 \times 2 + 1$ factorial scheme, with the first factor being: $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ proportions of 50/50, 70/30 and 100/0 under the concentration of 13 mmol L^{-1} ; the second factor: ii) presence and absence of silicon (2 mmol L^{-1}), while the additional treatment with a ratio of 100/0 under the concentration of 20 mmol L^{-1} with the presence of silicon. The results demonstrate the beneficial effect of Si, when plants are subjected to stressful conditions, improving the efficiency of photosynthesis and alleviating leaf injuries triggered by excess NH_4^+ . The increase in the proportions of ammonium in relation to nitrate causes damage to the photosynthetic machinery, dry mass production and photosynthetic pigments of yellow passion fruit plants. Ammonium concentrations above 6.5 mmol L^{-1} severely reduce the initial growth of yellow passion fruit plants. Silicon attenuated the adverse effects on plants at concentrations of 6.5 to 20 mmol L^{-1} , alleviating symptoms and improving photosynthetic performance.

Keywords: *Passiflora edulis*. Plant nutrition. Chlorophyll fluorescence. Si

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espécies vegetais sensíveis e tolerantes ao amônio de acordo com diferentes autores e seus principais efeitos.....	20
Tabela 2 - Efeitos do Si contra a toxicidade amoniacal em diferentes culturas.....	24
Tabela 3 - Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^-	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Clorofila <i>a</i> , clorofila <i>b</i> , clorofila total, carotenoides, área foliar, razão de área foliar de plantas de maracujá-amarelo.....	32
Figura 2 - Imagens ilustrando a mitigação dos sintomas de toxicidade de amônio em folhas velhas de plantas de maracujazeiro-amarelo.....	33
Figura 3 - F_v/F_m : rendimento quântico máximo do PSII, Φ_{PSII} : rendimento quântico efetivo de PSII, qP : dissipação fotoquímica, NPQ: dissipação não fotoquímica, EXC: energia relativa excesso no nível PSII e, ETR: taxa de transporte de elétrons de plantas de maracujá-amarelo.....	35
Figura 4 - A : Fotossíntese líquida, E : transpiração, g_s : condutância estomática, C_i : concentração interna de CO_2 , A/C_i : eficiência de carboxilação e, A/g_s : eficiência de uso da água de plantas de maracujá-amarelo.....	36
Figura 5 - Nitrato redutase na folha, na raiz, vazamento de eletrólito na folha e na raiz, de plantas de maracujá-amarelo.....	37
Figura 6 - Taxa de crescimento de altura relativa e diâmetro do caule de plantas de maracujá-amarelo.....	38
Figura 7 - Massa seca foliar, massa seca do caule, massa seca de raiz, massa seca total de plantas de maracujá-amarelo.....	39
Figura 8 - Teor e acúmulo de N em folhas jovens; em folhas velhas e raiz de plantas de maracujá-amarelo.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Adubação nitrogenada na cultura do maracujazeiro.....	15
2.2	Relação nitrato/amônio em cultivos com uso de solução nutritiva.....	16
2.3	Toxicidade por excesso de NH_4^+.....	18
2.4	Efeito mitigador do Si em condições de toxicidade amoniacal.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Local de desenvolvimento do experimento.....	25
3.2	Delineamento experimental e tratamentos.....	25
3.3	Condições de crescimento das mudas.....	25
3.4	Variáveis não destrutivas.....	27
3.4.1	Taxa de crescimento relativo.....	27
3.4.2	Trocas gasosas e fluorescência da clorofila.....	28
3.5	Variáveis destrutivas.....	28
3.5.1	Área foliar, massa seca da parte aérea e raiz.....	28
3.5.2	Pigmentos fotossintéticos.....	29
3.5.3	Atividade da nitrato redutase.....	29
3.5.4	Teor e acúmulo de N.....	30
3.6	Análise estatística.....	30
3.6.1	Análise de variancia e teste de médias.....	30
3.6.2	Recursos computacionais.....	30
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Pigmentos fotossintético, área foliar e razão foliar.....	31
4.2	Diagnose foliar.....	33
4.3	Eficiência no maquinário fotossintético.....	34
4.4	Nitrato redutase e danos de membrana.....	37
4.5	Taxa de crescimento e produção de massa seca.....	38
5	DISCUSSÃO.....	41
6	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O uso de solução nutritiva em substrato inerte vem tendo destaque por sua eficiência em manter o balanço nutricional, fornecendo as quantidades ideais dos elementos essenciais, prevenindo perdas de nutrientes e economia com substratos comerciais. No entanto, a escassez de estudos mais aprofundados, dificulta o emprego desta técnica em maior escala, principalmente pela necessidade de conhecimento acerca das técnicas de aplicação.

O nitrogênio (N) é um dos principais nutrientes requeridos pelas plantas, sendo o elemento central como constituinte de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos dentre outros constituintes essenciais para o crescimento e desenvolvimento de biomassa, cuja absorção é fortemente influenciada pela cultura e a fonte disponível durante o cultivo (Zhang *et al.*, 2022).

Para as plantas, as principais fontes requeridas são na forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+), cujas proporções e concentrações ideais variam de acordo com a espécie, a fisiologia e a capacidade da planta em assimilar e responder positivamente ao elemento. No entanto, o uso desbalanceado das formas iônicas resulta em distúrbios metabólicos severos e irreversíveis, sobretudo quando a fonte é o amônio, sendo o principal causador de toxicidade pelo excesso de N no meio de cultivo.

Quando submetida a altas concentrações de NH_4^+ , a planta pode desenvolver estratégias intrínsecas para minimizar os danos, sendo um deles a compartimentalização vacuolar em que o excesso do elemento pode ser armazenado para posteriormente ser utilizado ou para minimizar os danos da acidez. Entretanto, as altas dosagens desencadeiam no rompimento das estruturas celulares resultando em necroses na estrutura vegetal minimizando o desenvolvimento (Cunha *et al.*, 2024).

O maracujazeiro-amarelo, apesar da rusticidade, tem seu crescimento e desenvolvimento afetado quando submetido a ambientes com altas concentrações de amônio, com danos nas estruturas celular e redução da produção de massa seca (Silva Junior *et al.*, 2020). Neste sentido, a adição de elementos benéficos como o silício (Si) no meio de cultivo pode atenuar o efeito toxico, promovendo assimilação equilibrada de amônio e nitrato (Silva Júnior *et al.*, 2019).

O uso do Si na nutrição, possibilita melhor arranjo e arquitetura das folhas permitindo uma maior captação da luminosidade, além disso a presença na planta é frequentemente associado ao aumento dos pigmentos fotossintéticos, e na atividade de enzimas importantes para o metabolismo, e preservação da integridade celular (Singh *et al.*, 2022).

Estudos apontam que o Si tem a capacidade de manter a integridade de membranas do tilacoide, evitando a desintegração e danos nas estruturas celulares. Além disso, é observado a indução de genes específicos essenciais no PSI e PSII, que protegem a eficiência do fotossistema mediante a condições de estresse (Basu; Kumar, 2021), permitindo a manutenção dos centros de reação permitindo maior uso de energia de excitação na cadeia transportadora de elétrons, melhorando a eficiência fotoquímica (Rastogi *et al.*, 2021).

Embora o uso do silício seja amplamente estudado em plantas da família *Poaceae*, pelos incrementos na produção de massa seca e incremento na absorção de N e P, observado em estudos com cana de açúcar (Frazão *et al.*, 2020). O efeito benéfico para espécies frutíferas ainda não é amplamente discutido, embora estudos realizados por Silva Junior *et al.* (2019) demonstre maiores acúmulos de nitrogênio em plantas de *Passiflora ssp.*

O uso do si em condições de toxicidade moderada por amônio promove incrementos nos parâmetros fotoquímicos e crescimento inicial das plantas de maracujazeiro-amarelo, resultando em maior produção de matéria seca e crescimento inicial das plantas.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o efeito mitigador do Si sobre o estado nutricional, bioquímico, fisiológico e crescimento do maracujazeiro-amarelo cultivado sob toxicidade amoniacal em solução nutritiva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Adubação nitrogenada na cultura do maracujazeiro

Pertencente à família *Passifloraceae*, o maracujá corresponde a uma espécie frutífera composta por 12 gêneros, sendo o gênero *Passiflora* de maior expressividade com cerca de 500 espécies. No Brasil o número de espécies nativas pode chegar a 150, com distribuição principalmente na região Centro-Oeste do país (Junghans, 2022).

Grande parte das espécies do gênero *Passiflora* se distribuem no continente americano principalmente nos trópicos e regiões temperadas quentes. No bioma Cerrado é registrado uma produtividade acima da média nacional, com a região nordeste detendo cerca de 69,8% de produção nacional (IBGE, 2022).

Embora a região nordeste tenha um grande destaque na produção, sobretudo para os estados da Bahia e Ceará pelos maiores rendimentos da cultura, Piauí e Maranhão apresentam os menores rendimentos dentre todos os estados do Brasil (IBGE, 2022).

Frutos de maracujá são comercializados principalmente na forma *in natura* ou industrializada como sucos processados, em que as características organolépticas são acentuadas no processo de maturação, no qual é observado alterações na coloração da casca e na composição química dos frutos com o acúmulo de açúcares e redução da acidez, processo pelo qual os frutos adquirem seu aroma e sabor característico influenciada pela adubação, genética e características ambientais afetado pela temperatura, umidade e precipitação (Carvalho *et al.*, 2018; Dantas *et al.*, 2018).

Para o desenvolvimento normal das plantas é necessário o fornecimento de nutrientes para o seu desenvolvimento, definidos como elementos essenciais os macro e os micronutrientes são requeridos principalmente nas etapas iniciais do desenvolvimento da cultura podendo ser fornecidos na forma de soluções, adubos orgânicos e químicos, que possibilita o crescimento vigoroso das plantas e do sistema radicular refletindo na produtividade e no ciclo de vida (Epstein; Bloom, 2006; Cabral *et al.*, 2023).

A boa qualidade de frutos de maracujá, é afetada diretamente pelo equilíbrio da nutrição mineral que favorece o desenvolvimento da planta, além de minimizar as perdas na pós-colheita. O N é um dos principais nutrientes requerido para o desenvolvimento da cultura

influenciado pelas formas de aplicação, fonte nitrogenada e fase de desenvolvimento da cultura (Diniz *et al.*, 2022).

A adubação nitrogenada corresponde a uma importante forma de estimular o desenvolvimento e a qualidade de diversas mudas de plantas, especialmente o maracujá (Silva Junior *et al.*, 2020), prática importante a ser estudada principalmente em condições semiáridas cuja elevada temperatura e baixa precipitação acabam contribuindo para perda de nutrientes (Dantas *et al.*, 2019).

Pela análise foliar é possível determinar os teores de nutrientes que melhor represente o estado nutricional da cultura. Para o maracujazeiro-amarelo, as folhas que melhor representa esse estado nutricional são a 3-4 completamente expandida a partir do ápice, com teores de N entorno de 40-50 g/kg⁻¹ que melhor expressa a relação entre o estado nutricional e a produtividade (Malavolta *et al.*, 1989).

Atualmente, tem se utilizado substratos inertes como alternativa para a produção de mudas e crescimento inicial de diversas culturas, assim é possível realizar o balanço nutricional de acordo com as necessidades da cultura, como por exemplo o N em proporções equilibradas de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺). Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de estudos nesta área ainda é escasso, sendo necessário mais estudo para a melhoria na qualidade da produção de mudas (Barreto *et al.*, 2016; Silva Júnior *et al.*, 2019).

2.2 Relação nitrato/amônio em cultivos com uso de solução nutritiva

O N requerido pelas plantas pode estar disponível nas formas de NO₃⁻, NH₄⁺, e outras moléculas orgânicas que variam em quantidade e proporção dependendo do tipo de solo, condições climáticas e da espécie vegetal (Jin *et al.*, 2015). O nitrato geralmente possui maior disponibilidade com alta solubilidade e movimento na solução do solo, sendo absorvido pela planta através das raízes e transportado pela planta através de carregadores específicos (Xu; Fan; Miller, 2012).

Um conhecimento mais detalhado a respeito da absorção mineral de N é essencial para compreender os processos de assimilação do elemento e como influencia no metabolismo e processos fisiológicos das plantas que, dependendo da fonte do nutriente, como o amônio, pode provocar um efeito toxico na cultura, resultando em distúrbios na fotossíntese, respiração radicular e alterar as relações hídricas (Cui *et al.*, 2017).

Neste sentido, dependendo da espécie vegetal, ela pode apresentar preferência pela absorção de N na forma de nitrato e apresentar toxicidade ao amônio, enquanto as que preferem o amônio podem apresentar um sistema de absorção de nitrato atrofiado, embora o custo energético para a absorção e assimilação do NO_3^- da maioria das espécies ser consideravelmente maior que do NH_4^+ (Muratore; Espen; Prinsi, 2021).

Assim o balanceamento das fontes de N promove maiores rendimentos as culturas, quando comparadas a espécies com apenas uma fonte, que ocasiona em incrementos na biomassa, melhoria na interação com outros nutrientes como fosforo e potássio, além do aumento da produção de grãos de milho (Masood *et al.*, 2023).

Estudo desenvolvidos com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) observou-se uma melhor eficiência no transporte e absorção de NH_4^+ do que as plantas ofertadas com o NO_3^- , no entanto, plantas cultivadas exclusivamente com o amônio, apresentaram uma redução na área foliar, no rendimento de biomassa seca, teor de nutrientes e atividade fotossintética em contraste quando as plantas são cultivadas em apenas nitrato, em que os mesmo parâmetros foram maiores além de melhorar o desempenho de N (Boschiero *et al.*, 2019).

No entanto, esta relação assim como as dosagens ideais variam de acordo com a espécie envolvida. Observou-se que concentrações crescentes de amônio apresentam aumento na capacidade fotossintética de ervilha (*Pisum sativum*), sendo parcialmente responsável pelo aumento da parte aérea, com resultados máximos com a dosagem de 10mmol L^{-1} (Cruz *et al.*, 2011).

Outras espécies, por outro lado, apresentam um melhor desempenho com a disponibilidade das duas fontes de N ao mesmo tempo, cuja proporção dependerá das características da própria espécie. Estudos com (*Capsicum annuum* L.), observou-se que a relação de 25/75 de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, afeta o crescimento favorecendo o desenvolvimento radicular e acúmulo de N, fósforo e potássio, conseqüentemente aumentando o acúmulo de matéria seca. Além disto, ocorreu uma melhoria na qualidade dos frutos elevando os teores de vitamina C, açúcar solúvel, proteína solúvel dentre outras características, que aumentam sua qualidade (Zhang *et al.*, 2019).

Em pesquisas com alface tipo Iceberg cultivada com técnica de flutuação profunda a 30°C , em sistema hidropônico, a aplicação de soluções nutritivas com $15,0\text{ mmol L}^{-1}$ com fonte de nitrato, aumenta a produtividade da cultura, sendo que a utilização de cerca de 23% de N na forma de amônio melhora o desempenho da cultura para a massa fresca e número de folhas, no entanto, com o aumento da concentração de amônio acima de $3,45\text{ mmol L}^{-1}$ ocorre sintomas de toxicidade com a conseqüente redução da produtividade (Wenceslau *et al.*, 2021).

Avaliações no metabolismo de N em videira (*Vitis vinifera* cv.) cultivar Cabernet Sauvignon, verificou-se que a relação de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ na proporção 25/75, aumenta a atividade enzimática e reduz a competição entre o metabolismo da sacarose, aumentando os níveis de frutose refletindo na qualidade final do vinho, além disso, favorece o crescimento e o desenvolvimento da uva por melhorar a interação entre a fonte-dreno maximizando o desempenho quando a fonte de N não é única (Yin *et al.*, 2020).

O desenvolvimento experimental em área de monções de planalto de clima temperado semiárido, com plantas de cevada das terras altas (*Hordeum vulgare* L. Zangqing 320), aveia forrageira (*Avena sativa* L. Qinghai 444), alfafa (*Medicago sativa* L. Alfking) e ervilhaca (*Vicia sativa* L. Ximu324) verificou-se que leguminosas durante o seu ciclo de desenvolvimento apresentavam preferência por nitrato, enquanto que as gramíneas manifestavam preferência pelo amônio, em estágios iniciais, cuja preferência muda para o nitrato posteriormente. Sendo assim a escolha de absorção de N pelas plantas varia significativamente durante os distintos estágios de seu desenvolvimento bem como o grupo a qual faz parte (Cui *et al.*, 2017).

Diante disto, observa-se que o crescimento das plantas está intrinsecamente relacionado com as quantidades de N, suas fontes e proporções que são incorporadas no cultivo, destacando diferentes respostas dependendo das espécies cultivadas. É válido salientar que estudo específicos para determinadas culturas e regiões ainda são muito limitados e os efeitos de diferentes concentrações e proporções adequadas de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, em diferentes estágios e culturas ainda são desconhecidos. Nesse sentido, investigações futuras que abordem essa questão específica podem contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e desenvolvimento da área agrícola.

2.3 Toxicidade por excesso de NH_4^+

O amônio desempenha um papel importante nas plantas como uma forma de N que pode ser absorvida na solução do solo, sendo uma etapa muito importante na nutrição das plantas e uma etapa crucial no ciclo do N. Embora este íon seja de grande importância para as plantas, por ser uma fonte significativa de N, cuja forma em que se encontra dispensa a necessidade de transformações nas células vegetais, é o principal responsável pelo desenvolvimento de sintomas de toxicidade, distúrbios fisiológicos e inibição do crescimento quando usado como única fonte do elemento (Prado, 2020).

Mesmo antes da revolução verde, já se tinha conhecimento do possível efeito inibitório na germinação de sementes pelo uso de fertilizantes iniciais e como fontes nitrogenadas contribuem para isto (Pan *et al.*, 2016). Embora muitas espécies vegetais tenham um melhor desempenho com uma significativa parte de amônio juntamente com o nitrato, outras espécies apresentam uma grande sensibilidade, e mesmo com pequenas proporções de amônio, já é suficiente para desencadear uma série de sintomas que inibe o desenvolvimento vegetal com características que variam de acordo com a espécie como exposto na tabela 1.

Em pesquisas realizadas com plantas jovens de seringueira, com diferentes fontes de N foi observado que a presença do amônio influencia nos processos respiratório, diminuindo a assimilação e aumentando da enzima catalase (CAT) indicando uma relação na produção e degradação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), durante a fotorrespiração, que poderá desencadear efeitos tóxicos na planta quando a concentração é alta (Carneiro *et al.*, 2015).

Tabela 1: Espécies vegetais sensíveis e tolerantes ao amônio de acordo com diferentes autores e seus principais efeitos

Espécie sensível	Principais efeitos	Concentração crítica	Autores
<i>Triticum aestivum</i> L.	Diminuição da relação parte aérea/raiz; Menor teor de água nas folhas;	2,5 mmol L ⁻¹	Horchani, Hajri e Aschi- -Smiti (2011)
<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Aumento de N orgânico nas raízes e nas folhas;	2,5 mmol L ⁻¹	Horchani, Hajri e Aschi- -Smiti (2011)
<i>Spinacia oleracea</i> L.	Paralisação acentuada do crescimento; Redução da biomassa;	1,5 mmol L ⁻¹	Domínguez-Valdivia <i>et al.</i> , (2007)
Espécies tolerantes	Principais efeitos	Concentração crítica	Autores
<i>Passiflora edulis</i>	Concentrações de 10 e 20 mmol L ⁻¹ , só de NH ₄ ⁺ prejudicam a fotossíntese resultando em necrose foliar	10 mmol L ⁻¹	Cunha <i>et al.</i> , (2024)
	Concentrações acima de 5,7 mmol L ⁻¹ de NH ₄ ⁺ , prejudica a absorção catiônica e a produção de massa seca.	5,7 mmol L ⁻¹	Silva Junior <i>et al.</i> , 2020
<i>Citrus sinensis</i> L.	Redução da produção de massa seca, da área e do índice de qualidade de Dickson.	12 mmol L ⁻¹	Moda <i>et al.</i> , (2021)
<i>Citrus reticulata</i> Blanco	Inibição do crescimento e declínio da massa seca; Redução da atividade das enzimas NR, GS e GOGAT.	8 mmol L ⁻¹	Chen <i>et al.</i> , (2020)

2.4 Efeito mitigador do Si em condições de toxicidade amoniacal

Além dos elementos essenciais existe os benéficos, que são aqueles que ajudam no crescimento e desenvolvimento de certas espécies vegetais em determinadas condições, no entanto, a planta pode se desenvolver perfeitamente na sua ausência, sendo um exemplo desses nutrientes o silício e o sódio (Prado, 2020).

As plantas possuem uma ampla vulnerabilidade a condições bióticas e abiótica, sendo assim, é necessário o fornecimento correto e eficiente de macro e micronutriente que a mantenha saudável, permitindo a resistir a condições adversas. Neste sentido o silício assume um importante papel no desenvolvimento de muitas culturas com melhorias significativas na estrutura e na morfologia, principalmente em gramíneas no qual o elemento é frequentemente acumulado (Kaushik; Saini, 2019).

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, estando principalmente na forma de ácido silícico, cuja concentrações são normalmente em torno de 0,1 a 0,6 mM, que é absorvido pelas plantas e transportado através da raiz até a parte aérea na forma de ácido monossilícico, e depositado na forma de sílica vegetal hidratada, amorfa e sólida (Epstein; Bloom, 2006).

A quantidade do Si no tecido vegetal varia em função da espécie envolvida, com valores entre 0,1 a 10% da massa seca, a depender dos mecanismos fisiológicos de absorção e transporte pela planta podendo ser acumulados em áreas de crescimento, conferindo proteção tanto para plantas acumuladoras como não acumuladoras em condições de estresse abiótico e biótico (Souri *et al.*, 2020).

Estudo apontam que o acúmulo de Si aumenta e melhora as características adaptativas nas plantas, além disso o elemento requer menos energia que outras moléculas como a lignina e prolina, sendo uma forma alternativa da planta se protegem contra compostos tóxicos, realizar os ajustes osmóticos e ainda desempenha uma função estrutural (Li *et al.*, 2018).

Embora não exclua por completo a sintomatologia da adversidade do ambiente, seu efeito mitigador retarda e minimiza os possíveis danos com o fortalecimento das estruturas, regulando expressões genéticas, aumentando a taxa fotossintética, o rendimento quântico basal (F_v/F_0) e o rendimento quântico máximo do PSII (F_v/F_m) (Rastogi *et al.*, 2021).

De um ponto de vista filogenético, as *Poales*, compõem um distinto grupo de plantas que naturalmente acumulam mais silício do que outros, no entanto, estudos vem demonstrando

um substancial acúmulo de silício, em outras culturas. Esta característica de acumular o silício, é ancestral de todas as plantas e, provavelmente, evoluiu em conjunto pelas pressões e condições específicas do ambiente (Tombeur *et al.*, 2023).

Em ambientes protegidos, a aplicação de Si é realizada por meio da aplicação via solução, ou ainda na forma de pulverização na forma de adubação foliar, no entanto esta forma pode ter seu desempenho prejudicado por barreiras na estrutura da folha como as camadas cerosas que dificulta a entrada do elemento na planta, sendo necessário estudos mais aprofundados para a comprovação da real eficiência do método (Kaushik; Saini, 2019).

Estudo recente desenvolvido por Frazão *et al.*, (2020), demonstrou que o uso do silício na cana-de-açúcar aumenta a produção de biomassa, com o aumento da absorção de N e P, devido em parte pela cultura ser altamente responsiva a aplicação do elemento. Estas respostas são similares às encontradas por Neu, Schaller e Dudel (2017), na cultura do trigo reduzindo a quantidade de carbono e mudando o arranjo estequiométrico destes elementos.

O aumento da demanda de silício pelas plantas pode ocorrer quando submetida a estresse ou a cenários ambientais mais competitivos. Além disto, fatores ambientais possuem grande impacto na absorção de silício pelas plantas como a composição e o grau de intemperismo do solo, fatores estes que também podem explicar a adaptação de certo grupo de plantas ao processo de silicificação (Tombeur *et al.*, 2023).

O silício desempenha um papel crucial como ferramenta para aumentar a tolerância das plantas ao estresse abiótico, especialmente em ambientes de cultivo protegido. Sua aplicação promove um aumento significativo na resistência das plantas à salinização do meio de cultivo, resultando em maiores acúmulos de compostos nitrogenados, promovendo um aumento substancial da produção (Gou *et al.*, 2020).

O Si compete com o NH_4^+ , pelos sítios de ligação nas raízes das plantas pela semelhança do raio iônico dos compostos, que alivia diversos sintomas ocasionados pelo excesso de N. Ao mesmo tempo o silício é frequentemente associado a produção de compostos antioxidantes, principalmente de enzimas que desempenham funções de neutralizar espécies reativas de oxigênio (ERO), que aumentam em resposta ao estresse (Campos *et al.*, 2020; Viciado *et al.*, 2019).

As fontes de N, tem forte influência na qualidade e no desenvolvimento das plantas, refletindo na produção e no crescimento, no entanto, ocorre riscos com intoxicação quando os fertilizantes se acumulam. Como alternativa o silício é um importante mediador destas condições sendo que diferentes espécies podem apresentar respostas distintas a ação do silício quando o meio de cultivo não é favorável como resumidos na tabela 2.

As respostas de plantas variam de acordo com as concentrações de N, isso influencia diretamente na capacidade dos vegetais em atenuar os estresses sofridos, geralmente pelo amônio, que pode ocorrer pelo uso indiscriminados de fertilizantes minerais ou adubos orgânicos. O que se observa é que a aplicação do silício aumenta a defesa antioxidante, combatendo e neutralizando compostos nocivos como as espécies reativas de oxigênio (ERO) como peróxidos, radicais hidroxilas dentre outros tipos de radicais (Ahire *et al.*, 2021).

A rigidez conferida pelo Si nas paredes celulares forma uma camada na epiderme foliar, além de conferir uma melhor arquitetura na planta, possibilita uma maior capacidade de absorver a luz solar, diminuindo a condutância estomática e a transpiração, favorecendo diretamente a fotossíntese e reduzindo ação adversa ocasionado pela toxicidade do amônio (Campos *et al.*, 2020).

Esta toxicidade é responsável pela degradação dos cloroplastos, e menor acúmulo de outros íons, na tentativa da planta de manter o seu equilíbrio hormonal, gerando custos energéticos a planta e sendo um potencial risco a morte celular quando ultrapassa os níveis de máxima tolerância (Cunha *et al.*, 2024).

Neste sentido, é importante salientar que o uso do Si não tem a capacidade de recuperar por completo a planta, principalmente quando os sintomas já se expressam visualmente, no entanto se torna uma importante ferramenta quando se deseja diminuir os efeitos tóxicos do amônio (Prado, 2020).

Tabela 2 - Resumo dos efeitos do Si contra a toxicidade amoniacal em diferentes culturas.

Espécie	Fonte e concentração de Si	Principais efeitos	Autores
<i>Brassica campestris</i> L. ssp. <i>Pekinensis</i>	Silicato de potássio (1,0 mmol L ⁻¹)	Melhor desenvolvimento do crescimento e no influxo líquido de K e Ca; Expressão de enzimas antioxidantes (SOD e CAT), levando ao rápido declínio de ERO;	Song <i>et al.</i> (2022a)
<i>Salvia splendens</i> 'Vista Red'	Silicato de potássio (1,0 mmol L ⁻¹)	Alívio de sintomas de toxicidade do NH ₄ ⁺ Melhoria da fotossíntese e da absorção de cátions; Melhor desempenho para eliminar a superprodução de ERO.	Song <i>et al.</i> (2022b)
<i>Cucumis sativus</i> 'Jinyou 1'	Silicato de sódio (1,0 mmol L ⁻¹)	A aplicação de Si na raiz melhorou o crescimento de plantas sob estresse; Concentração de Si proporcionou maiores valores do peso seco e fresco;	Gou <i>et al.</i> (2020)
<i>Passiflora edulis</i> Sims f. <i>flavicarpa</i> O. Deg	Ácido monossilícico (2,0 mmol L ⁻¹)	Aumento do acúmulo e da eficiência do nitrogênio; Aumento do comprimento e da massa seca da raiz; Redução do índice de extravasamento de eletrólitos nas folhas.	Silva Júnior <i>et al.</i> (2019)
<i>Beta vulgaris</i> L.	Ácido monossilícico (2 mmol L ⁻¹)	Respostas positivas do Si quando a concentração de NH ₄ ⁺ não ultrapassa 15 mmol L ⁻¹ ; Plantas menos afetada pelo NH ₄ ⁺ na transpiração e condutância estomática; Mitigação dos efeitos inibitórios da raiz na presença do NH ₄ ⁺ .	Viciedo <i>et al.</i> (2019)
<i>Solanum lycopersicum</i> cv. Moneymaker	Ácido monossilícico (1,0 mmol L ⁻¹)	Aumento no acúmulo de nitrogênio; A oferta de Si aumentou o teor do total de clorofila e carotenoides.	Barreto <i>et al.</i> (2016)
<i>Zea mays</i> L.	Silicato de potássio (10 mmol L ⁻¹)	O maior acúmulo de N ocorreu nos tratamentos com presença de Si; O efeito do silício na mitigação da toxicidade pelo NH ₄ ⁺ , foi maior na concentração de 30 mmol L ⁻¹	Campos <i>et al.</i> (2015)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de desenvolvimento do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação situada na Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas (UFPI/CPCE), no município de Bom Jesus, Piauí, localizado 287 metros de altitude, nas coordenadas geográficas 09°04'59,9" de latitude Sul e 44°19'36,8" de longitude Oeste.

A estrutura da casa de vegetação era composta, por cobertura plástica transparente, sombrite de cor branca com 50% de luminosidade nas laterais e bancadas de madeira de $9 \times 3 \times 5,5 \times 0,3$ m, em um espaço de aproximadamente 90 m².

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, arranjos em esquema fatorial $3 \times 2 + 1$, correspondendo a três proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, (50/50, sem toxicidade amoniacal; 70/30, toxicidade amoniacal moderada e 100/0, alta toxicidade amoniacal) sob a concentração de 13 mmol L⁻¹, na ausência e presença de Si (2,0 mmol L⁻¹), conforme Silva Júnior *et al.* (2020). Já tratamento adicional seguiu a proporção de 100/0, sob a concentração de 20 mmol L⁻¹ de N, considerada como toxicidade severa, na presença de Si (2,0 mmol L⁻¹), cujos tratamentos estão descritos na Tabela 3. Cada parcela experimental foi composta por 3 plantas, totalizando 84 plantas.

3.3 Condições de crescimento das mudas

Foi utilizada a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA e dos tratamentos com N e silício. Para a composição das referidas proporções de NH_4^+ e NO_3^- foram utilizados o NH_4Cl e o $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como fontes de N

amoniacal e nítrica, respectivamente, e o silício, na forma de silicato de sódio. Os tratamentos foram balanceados para as concentrações de cálcio, na forma de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Os demais macronutrientes foram fornecidos nas fontes de KH_2PO_4 , KCl e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; os micronutrientes utilizados estão descritos na Tabela 3. A solução nutritiva estoque foi mantida com valor $\text{pH } 6,0 \pm 0,2$.

Sementes de maracujazeiro-amarelo da cultivar FB 200 Yellow Master, foram plantadas em bandejas de germinação com substrato comercial inerte, a base de fibra e pó de coco, casca de pinus, eucalipto e carvão vegetal, até a emissão de um par de folhas verdadeira, observados aos 48 dias após a semeadura. Em seguida, as quando foram transplantadas para vasos de 2 litros preenchidos com areia de granulometria média, previamente lavada para a eliminação de excesso de sais. Os nutrientes foram fornecidos via solução nutritiva padrão, com proporção de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ de 50/50, sem excesso de amônio (Cunha *et al.*, 2024), com 13 mmol L^{-1} de N (Silva Júnior *et al.*, 2020). Inicialmente, aplicou-se solução nutritiva com 25% da força iônica, após o transplantio no qual as plantas foram aclimatadas em vasos por 14 dias com intervalo de 1 dia entre aplicação, alternando com o fornecimento de solução e água.

O fornecimento do silício ocorreu a partir dos 30 dias após o transplantio, fornecidos diariamente separado dos demais nutrientes, com a finalidade de fortalecer a estrutura celular tornando a planta mais resistente ao ser submetida a concentrações elevadas de N. Após 30 dias de fornecimento de Si, foi iniciado os tratamentos com o N, com solução nutritiva a 50% da força iônica, durante uma semana, e logo após, utilizou-se força concentração de 100% diariamente, observando-se a evolução dos tratamentos e da sintomatologia pela diagnose visual das folhas.

Tabela 3 - Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

Proporções de NH ₄ ⁺ e NO ₃ ⁻							
Concent. de N (mmol L ⁻¹)	Proporções de NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻				KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	KCl
	50/50	70/30	100/0				
-----mmol L ⁻¹ -----							
Sem Silício							
13	NH ₄ ⁺	6,5	9,1	13	1	2	4
	NO ₃ ⁻	6,5	3,9	0			
Com Silício							
13	NH ₄ ⁺	6,5	9,1	13	1	2	4
	NO ₃ ⁻	6,5	3,9	0			
20	NH ₄ ⁺	-	-	20	1	2	4
	NO ₃ ⁻	-	-	0			

Micronutrientes utilizados (g L⁻¹): 2,86 g H_3BO_3 ; 1,81 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0,2 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,04 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0,02 g $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e $\text{Fe-EDDHMA} = 0,082 \text{ g}$ (Hoagland; Arnon, 1950).

3.4 Variáveis não destrutivas

Durante a condução do experimento, foram realizadas avaliações do crescimento relativo das plantas experimentais, assim como as trocas gasosas e o teor de clorofila presente nas folhas, monitorando os efeitos dos tratamentos até a definição do ponto de coleta do material vegetal para análises destrutivas, realizadas aos 60; 75 e 90 dias após a aplicação dos tratamentos com N.

3.4.1 Taxa de crescimento relativo

A cada 15 dias, em todas as plantas da parcela, a partir do início da aplicação dos tratamentos, foram mensurados o diâmetro do caule a 2 cm da base da planta empregando-se paquímetro digital (MPD-200 – Metrotools® capacidade de 200 mm e precisão de 0,01 mm). A altura de planta foi medida entre a base do caule até a inserção da folha mais jovem com uma trena milimetrada. A partir da obtenção dos dados, foram obtidas as taxas de crescimento relativo em altura (TCRAP) e diâmetro do caule (TCRDC) determinadas (equações 1 e 2) segundo Benincasa (2003):

$$TCRAP = \frac{\ln \ln AP2 - \ln \ln AP1}{T2 - T1} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$TCRDC = \frac{\ln \ln DC2 - \ln \ln DC1}{T2 - T1} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo: TCRAP - taxa de crescimento relativo em altura de plantas ($\text{cm cm}^{-1} \text{d}^{-1}$); AP1 - altura da planta no tempo T^1 (cm); AP2 - altura da planta no tempo T^2 (cm); TCRDC - taxa de crescimento relativo caulinar em diâmetro ($\text{mm mm}^{-1} \text{d}^{-1}$); DC1 - diâmetro do caule no tempo T^1 (mm) DC2 - diâmetro do caule no tempo T^2 (mm); T^1 - início do período de determinação da taxa de crescimento relativo; T^2 - final do período de determinação da taxa de crescimento relativo; ln - logaritmo neperiano.

3.4.2 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila

As trocas gasosas foram realizadas na terceira folha, completamente desenvolvida, a partir do ápice, em cada unidade experimental. Foi utilizado um analisador de gás por radiação infravermelho (IRGA), acoplado com um fluorômetro (IRGA, mod. LI – 6400XT, LI – COR Inc., Lincoln, Nebraska, EUA). As medições foram realizadas sob concentração constante de CO₂ e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (~400 µmol CO₂ mol⁻¹ ar e 1.000 µmol fótons m⁻² s⁻¹, respectivamente) no período das 09:00h às 11:00h.

Foram mensuradas: taxa de assimilação de CO₂ (*A*), condutância estomática (*g_s*), taxa de transpiração (*E*) e a concentração intercelular de CO₂ (*C_i*). Além disso, a eficiência instantânea da carboxilação (*A/C_i*) medida pela razão *A/C_i* e eficiência do uso de água (EUA), pela razão *A/E*. Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* foram medidos com um fluorômetro (LI, 6400-40, LI-COR, Lincoln, EUA) acoplado ao IRGA em plantas previamente adaptadas ao escuro.

Alguns parâmetros fotoquímicos estimados a partir da clorofila *a* fluorescência [fluorescência máxima (*F_m*) e variável (*F_v*) em folhas adaptadas ao escuro, estado de equilíbrio máximo (*F_m'*) e dinâmico (*F_s*) na presença de luz e fluorescência basal (*F_o'*) após estado de excitação do fotossistema II]. Os parâmetros fotoquímicos estimados do rendimento quântico máximo de PSII [*F_v/F_m* = (*F_m* – *F_o*)/*F_m*], rendimento quântico efetivo de PSII [*ΦPSII* = (*F_m'* – *F_s*)/*F_m'*], extinção fotoquímica [*qP* = (*F_m'* – *F_s*)/(*F_m'* – *F_o'*)] e não fotoquímica [*NPQ* = (*F_m* – *F_m'*)/*F_m'*] taxa de transporte de elétrons (*ETR* = *ΦPSII* × PPFD × 0,5 × 0,84) e excesso de energia ao longo do PSII [*Exc* = *F_v/F_m* - (*ΦPSII*/ *F_v/F_m*)] (Baker, 2008).

3.5 Variáveis destrutivas

3.5.1 Área foliar, massa seca da parte aérea e raiz

Todas as plantas coletadas, foram separadas em raiz e parte aérea. A determinação da área foliar foi realizada por meio do integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR), com uma resolução de 1 mm². As raízes foram lavadas em água corrente, enxaguadas em água

destilada, secadas e levadas para o Scanner de Raiz CI-600 para obtenção das imagens. Logo após, parâmetros como área, volume, diâmetro e comprimento foram determinados por meio do programa RhizoVision Explorer versão 2.0.3 (Seethepalli *et al.*, 2021). A massa fresca de cada órgão foi obtida com uso de balança analítica. Em seguida, os mesmos foram levados à estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65 ± 2 °C, durante 96 horas, determinando-se a massa seca da parte aérea e da raiz.

3.5.2 Pigmentos fotossintéticos

Ainda durante o momento da coleta, foram escolhidas folhas expandidas, maduras e sadias para determinação dos pigmentos fotossintéticos, clorofila *a*, *b*, total e carotenoides, conforme descrito por Wellburn (1994). Foram preparados extratos, incubando três discos foliares em dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com carbonato de cálcio (CaCO_3). Após 48 h no escuro, as amostras foram incubadas a 65 °C durante 45 min e depois submetidas a leituras de absorbância a 665, 649 e 480 nm. A determinação dos pigmentos foi através das equações: Clorofila *a* = $12,47 (A_{665}) - 3,62 (A_{649})$; Clorofila *b* = $25,06 (A_{649}) - 6,50 (A_{665})$; Clorofila (*a* + *b*) = $7,15 (A_{665}) - 18,71 (A_{649})$; Carotenóides = $[1000 (A_{480}) - 1,29 (\text{clorofila } a) - 53,78 (\text{clorofila } b)]/220$.

3.5.3 Atividade da nitrato redutase

A nitrato redutase foi obtida após incubação de tecidos vegetais frescos com tampão [tampão K^+ - fosfato 0,1 mM (pH 7,5), KNO_3 50 mM; 1% (v:v) de isopropanol e 15 mg L^{-1} de cloranfenicol]. A atividade da NR foi medida *in vivo*, sendo quantificada a partir da concentração de nitrito (NO_2^-) do meio reacional, colorimetricamente por leitura em 540 nm e comparação com uma curva padrão usando NaNO_2 como padrão (Snell; Snell, 1949; Silveira *et al.*, 1998).

3.5.4 Teor e acúmulo de N

O material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e, em seguida, determinaram-se os teores de N seguindo a metodologia descrita por Bataglia *et al.* (1983). Em função do teor desse nutriente e da matéria seca, calculou-se o acúmulo de N em folha jovens, velhas e na raiz (mg por planta).

3.6 Análise estatística

3.6.1 Análise variância e teste de médias

Os dados qualitativos foram avaliados quanto à sua normalidade pelo teste de shapiro-wilk, homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett, independência dos erros por análise gráfica dos resíduos e após cumpridos esses requisitos submetidos à análise de variância. As médias foram agrupadas pelo teste de Skott-Knott a um nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) (Borges e Ferreira, 2003).

3.6.2 Recursos computacionais

As análises estatísticas, confecção de gráficos e demais análises de dados foram realizadas com auxílio do software R versão 4.4.0 (R Core Team, 2024).

4. RESULTADOS

4.1 Pigmentos fotossintético, área foliar e razão foliar

Concentrações equilibradas de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, favoreceram o acúmulo de pigmentos fotossintéticos, no entanto, à medida que proporções de amônio aumentam é observado redução nos teores enquanto o Si favorece no incremento quando comparado com plantas não tratadas (Figura 1a, b, c, d).

Os resultados para a área foliar foram maiores em proporções equilibradas de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (50/50) e quedas à medida que estas proporções aumentam (Figura 1e). Inversamente, a razão de área foliar (RAF), em todas as proporções testadas foi maior para os tratamentos sem o fornecimento de Si (Figura 1f).

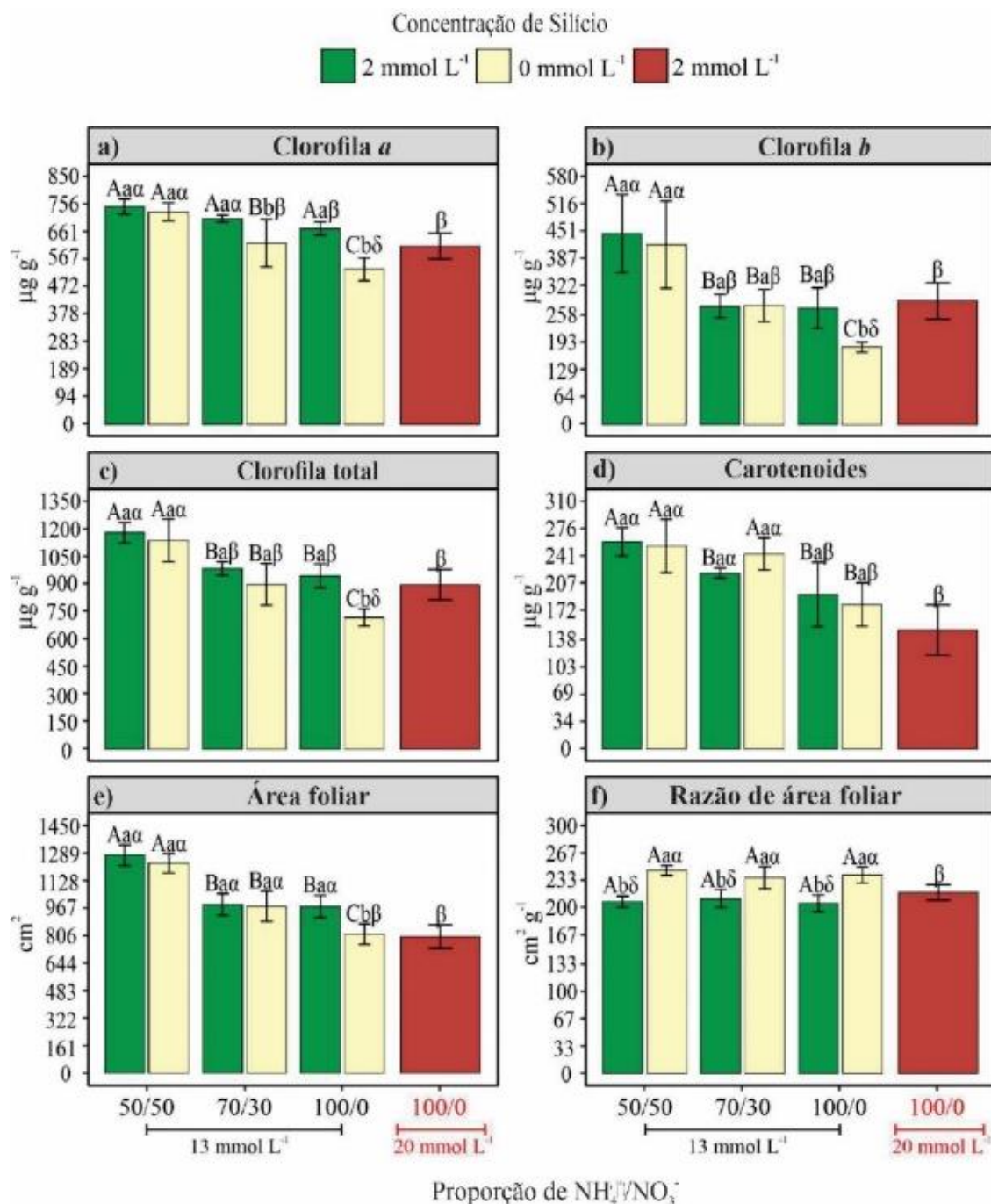


Figura 1 - Clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila total (c), carotenoides (d), área foliar (e), razão de área foliar (f) de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻ na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, p<0,05); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, p<0,05); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (Dunnet's p<0,05).

4.2 Diagnose foliar

A alta mobilidade do N na planta, pode causar sintomas de toxicidade, particularmente nas folhas jovens e intermediárias, devido ao acúmulo excessivo do elemento em órgãos em expansão. Para a cultura do maracujá-amarelo, é verificado sintomas de toxidez por NH_4^+ na 3ª ou 4ª folha completamente expandida a partir do ápice, caracterizada pelo surgimento de manchas cloróticas irregulares ao longo da área foliar que evoluem rapidamente para necroses observado na figura 2.

O surgimento de necroses ao longo da área foliar foi mais intenso para os tratamentos cuja única fonte é o NH_4^+ , no entanto, o uso Si reduziu significativamente o surgimento de necroses. A intensidade dos sintomas ocorreu principalmente para plantas tratadas com 13 mmol L⁻¹ de N, apenas na forma amoniacal sem a adição de Si. Em contrapartidas, 20 mmol L⁻¹ de N apenas na forma de NH_4^+ na presença de Si ocorreu uma significativa redução da sintomatologia quando comparado a tratamentos de igual proporção sob concentração de 13 mmol L⁻¹ sem adição Si.

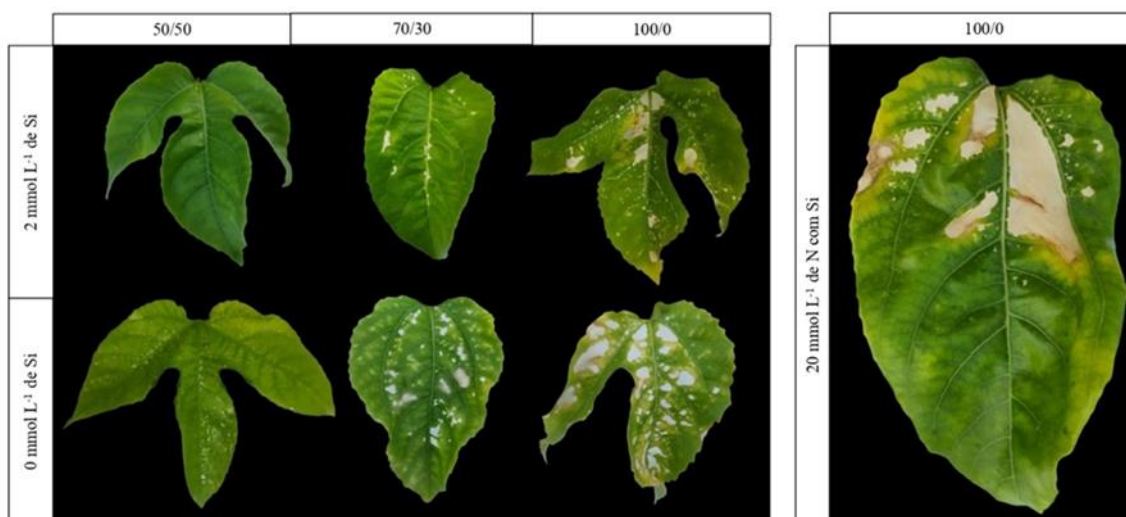


Figura 2 - Imagens ilustrando a mitigação dos sintomas de toxicidade de amônio em folhas velhas de plantas de maracujazeiro-amarelo que receberam aplicação de 2 mmol L⁻¹ de Si, quando comparadas com a ausência de Si, com destaque para as proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ de 70/30 e 100/0.

4.3 Eficiência no maquinário fotossintético

O rendimento quântico máximo do PSII (Figura 3a), mostrou uma significativa diferença entre as proporções mais altas de amônio, o que chama atenção é rendimentos relativamente maiores com a maior concentração de N (20 mmol L^{-1}) em comparação com a mesma proporção, mas com uma concentração na ausência de silício.

O rendimento quântico efetivo do PSII (ΦPSII) e a dissipação fotoquímica (qP), tiveram quedas significativas à medida que as concentrações de amônio aumentavam (70/30 e 100/0), ao mesmo tempo plantas tratadas com silício, tiveram melhor desempenho que as não tratadas. Plantas tratadas com concentrações de 13 mmol L^{-1} sem silício, com o amônio como única fonte teve o menor rendimento dentre todos os tratamentos (Figura 4b, c).

Apoiado nos valores anteriores, a dissipação não fotoquímica (NPQ) e do excesso de energia no nível do PSII (EXC), foi evidente para plantas estressadas por proporções maiores de amônio na ausência de silício. No entanto, plantas tratadas com 20 mmol L^{-1} com silício tiveram mesmo desempenho na NPQ que plantas tratadas com 13 mmol L^{-1} com silício na mesma proporção.

Por outro lado, a taxa de transporte de elétrons demonstra um comportamento inverso, no qual plantas tratadas com 13 mmol L^{-1} com proporção 100/0 sem silício tiveram menores taxas, diferença mais evidente quando comparado com o tratamento de 20 mmol L^{-1} com silício, em que o elemento amenizou esse efeito mesmo com concentrações mais altas.

Os resultados demonstram uma similaridade dos resultados para a fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e eficiência de carboxilação (Figura 4a, b, c, e) em que maiores proporções de NH_4^+ foram prejudiciais para o rendimento da fotossíntese, no entanto, o uso do silício atenuou o efeito do estresse, quando comparada com o mesmo tratamento na ausência do elemento. Observa-se ainda que mesmo com uma concentração de 20 mmol L^{-1} , o mesmo se equiparou com a concentração de 13 mmol L^{-1} , sob a mesma proporção na ausência de silício.

Para o parâmetro de concentração interna de CO_2 (Figura 4d), os resultados corroboram com resultados de A , E e g_s . As taxas elevadas de C_i , resultam de plantas estressada com menor eficiência na fotossíntese. O uso do silício, proporcionou em uma redução de mais de 30% da concentração de CO_2 em plantas sob a proporção de 70/30 em relação a plantas não tratadas

Na eficiência de uso da água (Figura 4f), de modo geral, os resultados foram similares para todos os tratamentos, no entanto, a proporção de 100/0 apresentou discrepância quanto aos demais tratamentos, observando-se que a concentrações maiores de N de 20 mmol L⁻¹ para A/g_s foi a mesma para a concentração de 13 mmol L⁻¹ sem silício.

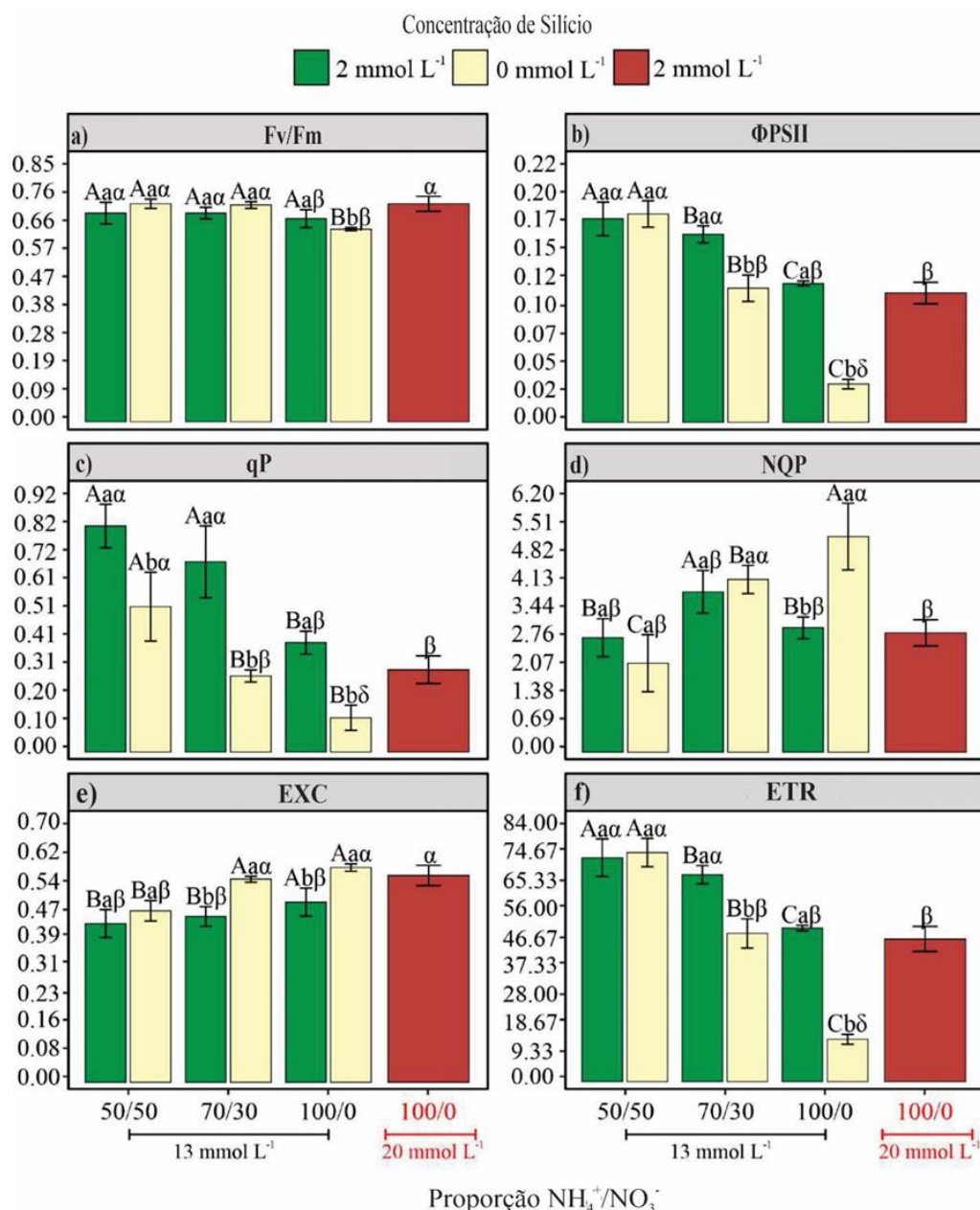


Figura 3 - Fv/Fm: rendimento quântico máximo do PSII (a), ΦPSII: rendimento quântico efetivo de PSII (b), qP: dissipação fotoquímica (c), NPQ: dissipação não fotoquímica (d), EXC: energia relativa excesso no nível PSII (e) e, ETR: taxa de transporte de elétrons (f) de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻ na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, p<0,05); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, p<0,05); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's p.<0,05).

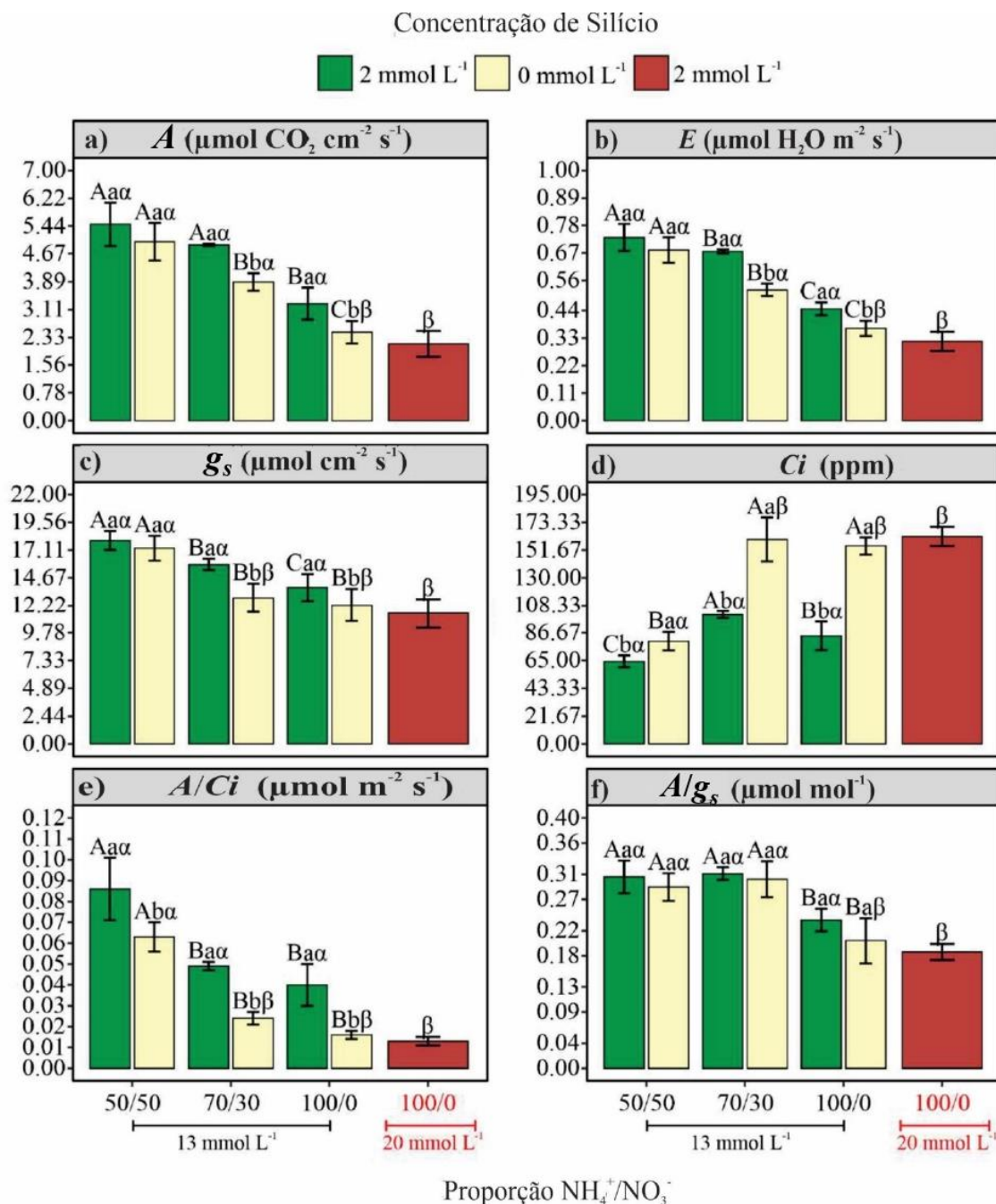


Figura 4 - A : Fotossíntese líquida (a), E : transpiração (b), g_s : condutância estomática (c), C_i : concentração interna de CO_2 (d), A/C_i : eficiência de carboxilação (e) e A/g_s : eficiência de uso da água (f) de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH_4^+ e NO_3^- na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva.. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's $p < 0,05$).

4.4 Nitrato redutase e danos de membrana

Na análise da enzima nitrato redutase da folha, constatou-se que a atividade foi 87% superior no tratamento com a proporção 70/30 contendo Si, em comparação com o tratamento sem a presença do elemento (Figura 5a), comportamento similar, foi observado na raiz, que atividade foi 50% maior sob a mesma proporção (Figura 5b).

Inversamente é observado valores crescentes no vazamento de eletrólitos da folha e da raiz, sendo mais acentuado em proporções com única fonte o NH_4^+ , esse dano reflete no dano da membrana celular, evidenciado nos tratamentos sem a proteção do Si (Figura 5c, d).

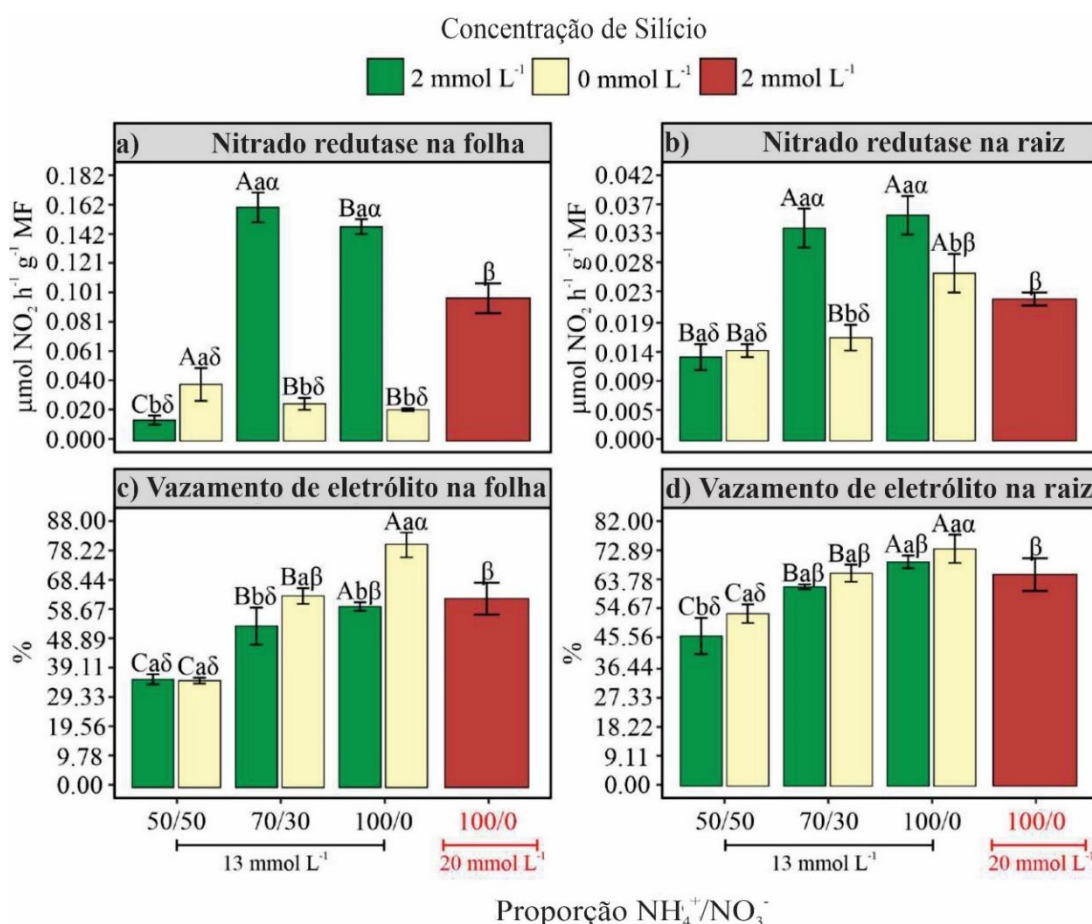


Figura 5 - Nitrato redutase na folha (a), na raiz (b), vazamento de eletrólito na folha (c) e na raiz (d), de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH_4^+ e NO_3^- na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's $p < 0,05$).

4.5 Taxa de crescimento e produção de massa seca

Não houve diferença significativa dos tratamentos nos primeiros 15 dias de aplicação dos tratamentos, para a taxa de crescimento relativo de altura (Figura 6a), mas houve diferença para o diâmetro do caule (Figura 6b), com maior espessamento na proporção 70/30. No período de 15-30 dias é observado uma variação da altura e do diâmetro, sendo menor à medida que a proporção de amônio aumenta evidenciado por uma redução de até 50% na altura observado nas concentrações testadas (Figura 6c, d).

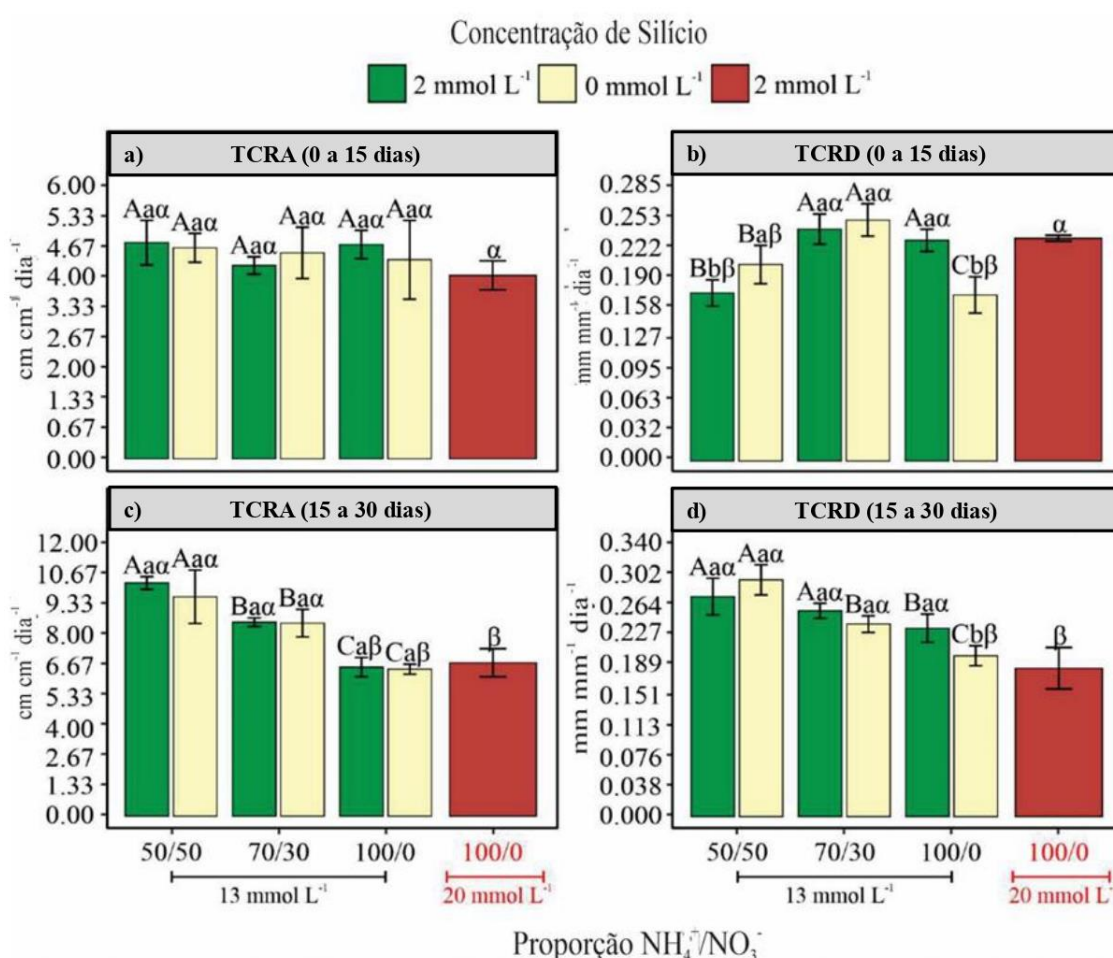


Figura 6 - Taxa de crescimento de altura relativa e diâmetro do caule de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻ na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. As figuras (a) e (b) correspondem ao período de 0 a 15 dias após a aplicação dos tratamentos; as figuras (c) e (d) correspondem ao período de 15 a 30 dias após a aplicação dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, p<0,05); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, p<0,05); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's p.<0,05).

Os resultados em geral demonstram uma diminuição significativa da produção de massa seca das folhas, caule, raiz à medida que as proporções de NH_4^+ (Figura 7a, b, c). Estes resultados corroboram com os observados no crescimento (Figura 6) em que ocorreu uma queda significativa das taxas de crescimento e consequentemente da massa seca total (Figura 7d).

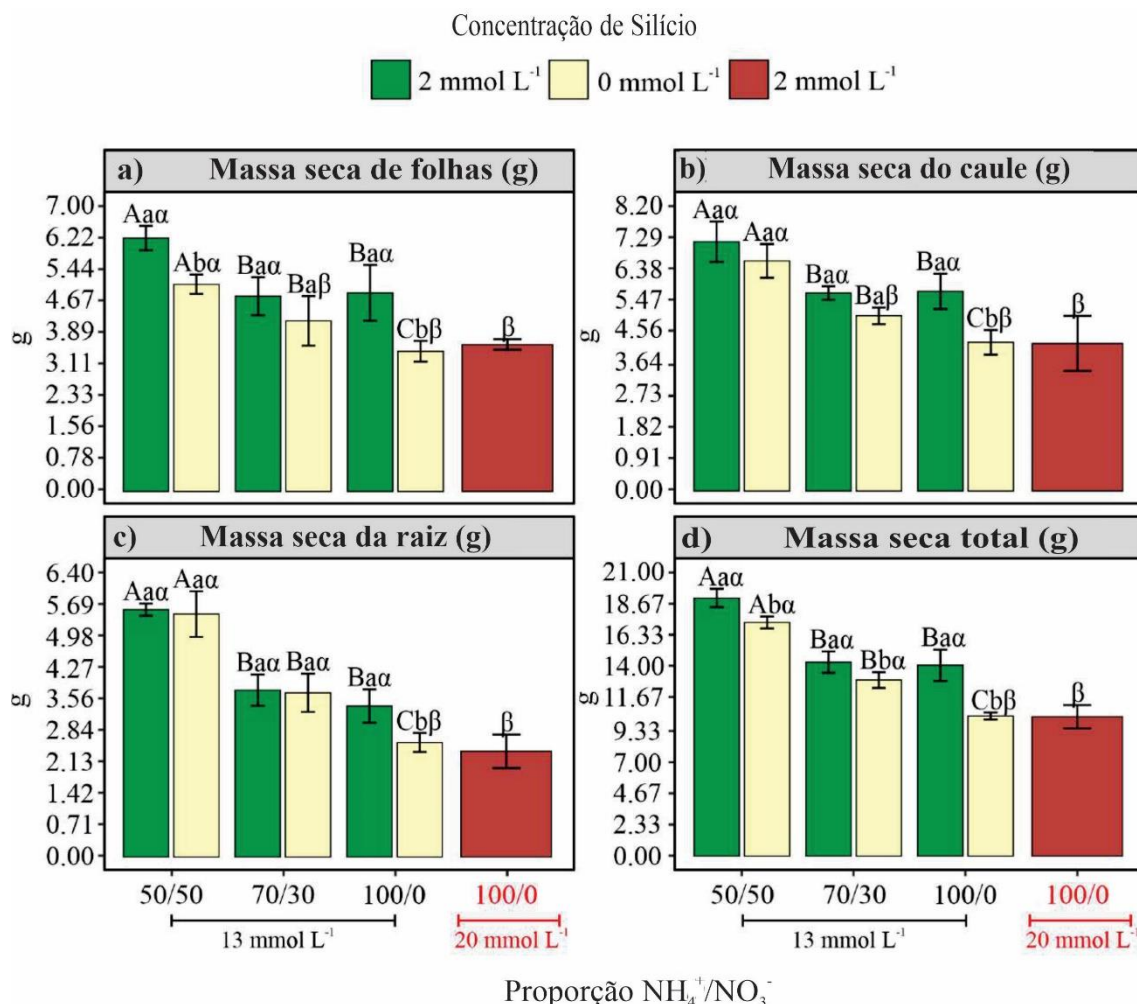


Figura 7 - Massa seca foliar (a), Massa seca do caule (b), Massa seca de raiz (c), Massa seca total (d) de plantas de maracujá-amarelo cultivado com concentrações de N, proporções de NH_4^+ e NO_3^- na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's $p < 0,05$).

O conteúdo de N em folhas jovens cresceu a medida que as proporções de NH_4^+ aumentaram, com maiores taxas em tratamentos com concentração de 20 mmol L⁻¹. Em contrapartida, o acúmulo do elemento para esse tipo de folha foi maior para maior em tratamentos com Si, sendo maior em plantas com concentrações maiores de NH_4^+ (Figura 8b).

Em folhas velhas, o teor e o acúmulo de N variou com os tratamentos, com maiores resultados na concentração de 13 mmol L⁻¹ sem Si (Figura 8c, d). Na raiz o teor de N foi maior

para todos os tratamentos suplementados com Si, em comparação aos que não receberam (Figura 8e).

O acúmulo de nitrogênio na raiz decresceu à medida que o NH_4^+ aumentou, em contrapartida, plantas tratadas com Si apresentaram maiores acúmulos quando comparados a plantas sem adição do elemento (Figura 8f).

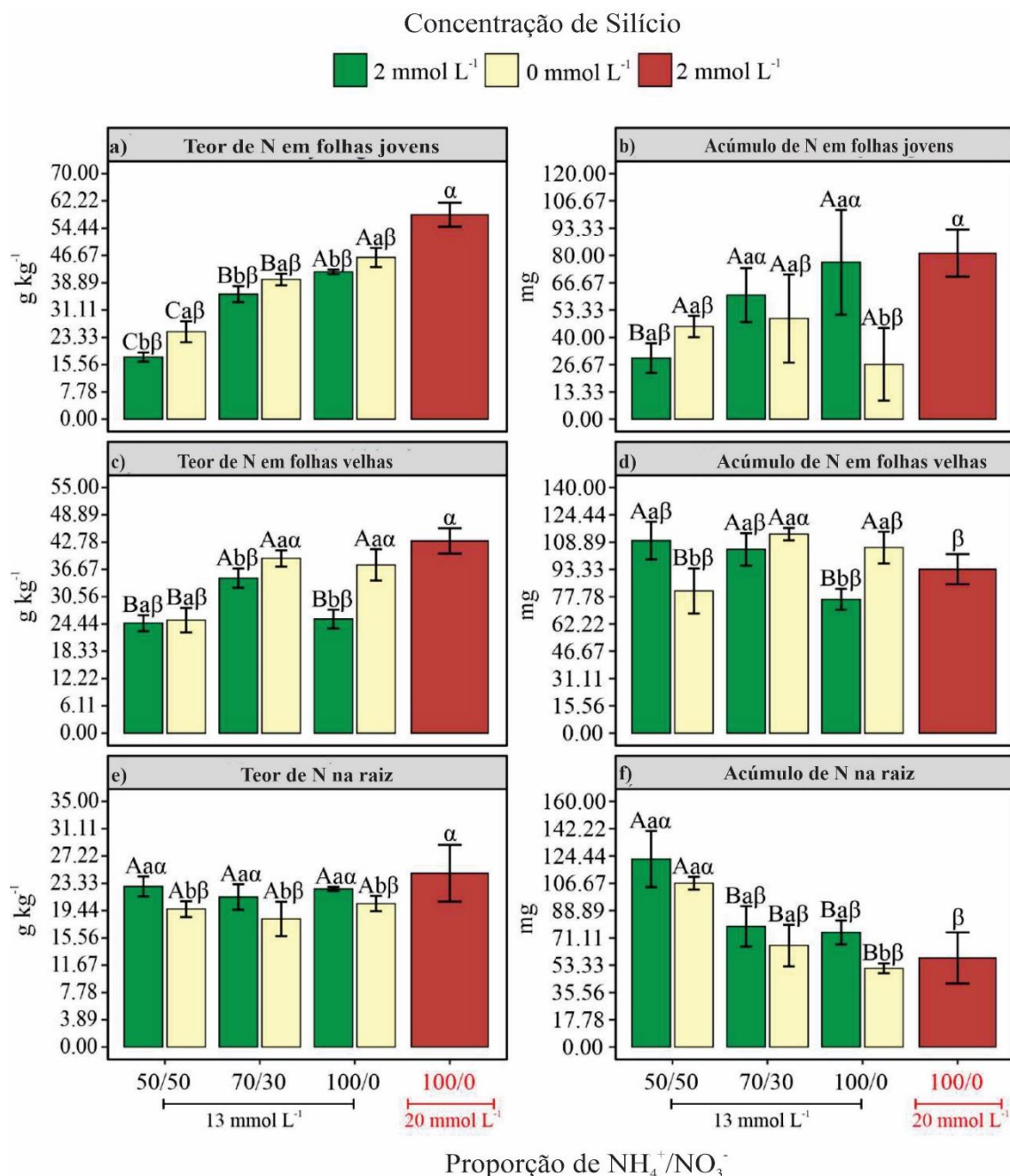


Figura 8 - Teor e acúmulo de N em folhas jovens (a,b); em folhas velhas (c,d) e raiz (e,f) de plantas de maracujá-amarelo cultivado concentrações de N, proporções de NH_4^+ e NO_3^- na ausência e presença de Si em substrato inerte irrigado com solução nutritiva. Letras maiúsculas comparam as relações amônio/nitrato dentro dos níveis de silício (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras minúsculas comparam os níveis de silício com as proporções amônio/nitrato (Scott Knott, $p < 0,05$); Letras gregas comparam o tratamento adicional com o fatorial (dunnet's $p < 0,05$).

5 DISCUSSÃO

Vários estudos relatam a importância do equilíbrio nutricional para o desenvolvimento de plantas e o papel que os elementos benéficos tem no desenvolvimento da cultura, quando submetida a diversas condições de estresse abióticos. De modo geral, proporções de 70/30 e 100/0 com a presença de silício o efeito toxico foi atenuado, visto que o silício atua como proteção e compete com NH_4^+ pelos sítios de absorção nas raízes (Figura 2).

Para o preparo de soluções as principais fontes de N, estão na forma nítrica somando 15 mmol L⁻¹ do elemento que deve ser fornecido para o desenvolvimento adequado da maioria das culturas proposto por Hoagland e Arnon (1950). No entanto, os menores custos de fontes amoniacais bem como melhores respostas no desenvolvimento a certas proporções de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ geram maiores interesse na pesquisa.

A absorção e a assimilação do N está associado a eficiência das plantas em utilizar o elemento na síntese de aminoácidos e o equilíbrio entre a assimilação e o gasto de energia para os processos metabolitos. O menor custo energético para incorporação do NH_4^+ em relação ao NO_3^- apoiam o uso em conjunto das duas fontes melhorando taxas fotossintéticas e de crescimento em dosagens corretas (Cunha *et al.*, 2024).

Mesmo diante de condições adversas que podem acometer a integridade da cultura pelo uso de fontes amoniacais na composição de soluções nutritiva, estratégias com uso do silício como agente mitigador, se torna uma solução promissora que contorna a adversidade do uso de NH_4^+ e possibilita uma maior exploração e manejo da produção agrícola.

Em concordância com diversos estudos, o equilíbrio nutricional, é o principal regulador do crescimento e consequente incremento da massa seca para várias culturas (Moda *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2024). O efeito inibitório no desenvolvimento de plantas pelo excesso de NH_4^+ se deve ao desbalanceamento e redução da absorção de K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , além disso a sob estresse a planta realiza a abscisão foliar como medida de contenção a sobrecarga do elemento.

Na planta, um dos principais centros para a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) ocorre no fotossistema, resultando em desequilíbrios e danos celulares. A aplicação de Si, aumenta a ação de moléculas antioxidantes e fatores enzimáticos e não-enzimáticos, ao mesmo tempo que fortalece a parede celular e reduz e imobiliza a absorção de íons tóxicos (Das *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017).

Sob estresse oxidativo, as plantas podem modificar a atividade fotossintética reduzindo a transpiração e a condutância estomática para manter o seu funcionamento (Cunha *et al.*,

2024). Simultaneamente, ao ser absorvido, o Si pode ser depositado nas paredes celulares dos estômatos, reduzindo a abertura quando estressadas. Além disto, o elemento confere melhor arranjo das folhas para a captação solar que influencia na formação de clorofilas e na eficiência do fotossistema.

Este suporte conferido nas células vegetais permite rigidez e suporte favorecendo uma interceptação e absorção luminosa melhorando a formação de pigmentos fotossintéticos e estabilidade da clorofila (Singh *et al.*, 2022), além disso, a suplementação com Si melhora a resposta da planta ao estresse nutricional.

Em estudos realizados por Silva Júnior *et al.* (2019), verificou-se que concentrações acima de 5,7 mmol L⁻¹ de amônio ocasiona em prejuízos para a cultura do maracujazeiro-amarelo, ao passo que a presença de Si no meio de cultivo melhora o desempenho diante de concentrações mais elevadas quando comparada com aquela que não recebem.

A deposição de Si, ocorre principalmente nas folhas, facilitada pela interação do elemento com o tecido vegetal, que leva a modificações na composição das estruturas celulares e formação de barreiras protetoras que aumentam a resistência diante do estresse que reduz significativamente o surgimento de necrose foliar e queima das estruturas foliares.

O aumento da área foliar é proporcionado por concentrações equilibradas de N, o excesso de amônio é frequentemente associado a inibição do crescimento, resultando em taxas de crescimento menores. Além disso o silício possibilita o espessamento da folha, que torna a planta mais apta a resistir às mudanças no ambiente, observado em melhores taxas da razão da área foliar quando comparado com plantas sem a adição do elemento.

O rendimento quântico máximo do PSII, é essencial para indicar a capacidade e eficiência da planta em converter energia luminosa em energia química e é fortemente influenciada pelas condições ambientais principalmente temperatura e disponibilidade de nutrientes.

O Φ PSII reflete a eficiência do fotossistema, em que valores mais altos demonstram a eficácia de converter energia luminosa em química, especificamente, ATP e NADPH, enquanto valores baixos indicam condições de estresse desencadeado pelo excesso de amônio (Podgórska *et al.*, 2020). O excesso de NH₄⁺, é uma das principais causas da redução dos valores para a dissipação fotoquímica (Song *et al.*, 2022b), sinalizado pela redução na eficiência do PSII. Ao mesmo tempo a presença do Si proporciona aumento nos valores de qP melhorando a saúde da planta de modo geral para diversas culturas quando submetidas a diversos estresses nutricionais e amenizando os sintomas (Rastogi *et al.*, 2021).

A atuação do silício no fortalecimento das paredes celulares, atenua o efeito tóxico do NH_4^+ , ao preservar a integridade celular e proteção do aparato fotossintético. Sob a proporção 100/0 a concentração de 13 mmol L^{-1} teve um excesso de energia de 45% no tratamento sem a adição de Si.

O Si depositado em diferentes componentes celulares, contribui para a estruturação e integridade da membrana, além disso em conjunto com o aumento da fotossíntese e nos pigmentos, reduz significativamente o extravasamento celular e permite a planta manter sua funcionalidade, atenuando os danos na membrana mediante o estresse nutricional.

A absorção facilitada do NH_4^+ pelo menor gasto de energia proporcionou em maiores teores de N, nos tecidos foliares, sendo mais evidentes nos órgãos em crescimento e expansão (folhas jovens). Foi observado que o Si proporciona no aumento do acúmulo de N em detrimento a plantas não tratadas com o elemento. Na raiz foi observado uma queda significativa do acúmulo do elemento a medida que as concentrações de NH_4^+ , muito provavelmente pelo efeito inibitório no crescimento da raiz desencadeado pela toxidez, (Viciado *et al.*, 2019). Estes incrementos no acúmulo resultam de uma maior produção de massa seca e de crescimento, especificamente em plantas tratadas com Si, no qual o efeito tóxico é reduzido.

Neste estudo, verificou-se uma alta atividade da nitrato redutase na folha com concentrações mais altas de amônio, especificamente os tratamentos com Si. Esta enzima é essencial no metabolismo do N, responsável pela redução do NO_3^- em NO_2^- , podendo ter sua atividade fortemente influenciada pelo excesso de amônio. Embora o papel do Si na enzima ainda não seja claro, estudos com canola desenvolvido por Bybordi, 2012, verificou-se que a atividade enzimática melhorou.

No geral, as descobertas feitas no presente trabalho revelam importantes informações acerca do efeito mitigador do Si, mediante ao estresse amoniacal no desenvolvimento inicial de mudas de *Passiflora ssp.* Os resultados indicam que concentrações acima de $6,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de amônio compromete o maquinário fotossintético e restringi o crescimento e desenvolvimento vegetal, em contrapartida a adição de Si no meio de cultivo, os efeitos nocivos do excesso de amônio são atenuados.

6 CONCLUSÕES

O aumento das proporções de amônio em relação ao nitrato causa danos no maquinário fotossintético, produção de massa seca e nos pigmentos fotossintéticos de plantas de maracujazeiro-amarelo. Concentrações de amônio acima de $6,5 \text{ mmol L}^{-1}$ diminuem severamente o crescimento inicial das plantas de maracujazeiro-amarelo.

O silício atenuou os efeitos adversos nas plantas nas concentrações de 6,5 a 20 mmol L^{-1} , amenizando a sintomatologia de toxicidade amoniacal e melhorando o desempenho fotossintético das plantas.

REFERÊNCIAS

- AHIRE, M. L.; MUNDADA, P. S.; NIKAM, T. D.; BAPAT, V. A.; PENNA, S. Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 169, p. 291-310, 2021.
- BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 89-113, 2008.
- BARRETO, R. F.; PRADO, R. M.; LEAL, A. J. F.; TROLEIS, M. J. B.; SILVA JUNIOR, G. B.; MONTEIRO, C. C.; SANTOS, L. C. N.; CARVALHO, R. F. Mitigation of ammonium toxicity by silicon in tomato depends on the ammonium concentration. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 66, n. 6, p. 483-488, 2016.
- BASU, S.; KUMAR, G. Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 393-404, 2021.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP. 1988.
- BORGES, L. C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-newman-keuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 21, n.1, 2003.
- BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; AZEVEDO, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Influence of nitrate - ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. **Plant Physiology and Biochemistry**. v. 139, p. 246-255, 2019.
- BYBORDI, A. Effect of Ascorbic Acid and Silicium on Photosynthesis, Antioxidant Enzyme Activity, and Fatty Acid Contents in Canola Exposure to Salt Stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 11, n. 10, p. 1610-1620, 2012.
- CABRAL, R. G.; PACHECO, A.; ADORIAN, G. C.; SILVA, R. Z.; LEÃO, E. U.; MARTINS, A. L. L. Efeitos de diferentes substratos no desenvolvimento de mudas de maracujá. **Agri-Environmental Sciences**, v. 9, n. 2, p. 1-5, 2023.
- CAMPOS, C. N. S.; PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; LIMA NETO, A. J.; MARQUES, L. J. P.; CHAVES, A. P.; CRUZ, C. A. Use of silicon in mitigating ammonium toxicity in maize plants. **American Journal of Plant Sciences**, v. 06, n. 11, p. 1780-1784, 2015.
- CAMPOS, C. N. S.; SILVA JÚNIOR, G. B.; PRADO, R. M.; DAVID, C. H. O.; SOUZA JUNIOR, J. P.; TEODORO, P. E. Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 635-647, 2020.

CARNEIRO, M. M. L. C.; GOMES, M. P.; SANTOS, H. R. B.; REIS, M. V.; MENDONÇA, A. M. C.; OLIVEIRA, L. M. Fotorrespiração e metabolismo antioxidante em plantas jovens de seringueira cultivadas sob diferentes fontes de nitrogênio (NO_3^- e NH_4^+). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 66-73, 2015.

CARVALHO, M. V. O.; OLIVEIRA, L. L.; MELO, L.; COSTA, A. M. Pre-harvest factors related to sensory profile of *Passiflora setacea* nectars, a wild passion fruit from Brazilian savannah. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 15, p. 5711-5722, 2018.

CHEN, H.; JIA, Y.; XU, H.; WANG, Y.; ZHOU, Y.; HUANG, Z.; YANG, L.; LI, Y.; CHEN, L.; GUO, J. Ammonium nutrition inhibits plant growth and nitrogen uptake in citrus seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 272, p. 109526, 2020.

CRUZ, C.; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; BIO, A.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Intra-specific variation in pea responses to ammonium nutrition leads to different degrees of tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 70, n. 2, p. 233-243, 2011.

CUI, J.; YU, C.; QIAO, N.; XU, X.; TIAN, Y.; OUYANG, H. Plant preference for NH_4^+ versus NO_3^- at different growth stages in an alpine agroecosystem. **Field Crops Research**, v. 201, p. 192-199, 2017.

CUNHA, J. G.; SILVA, R. F.; MIRANDA, R. S.; PEREIRA, G. A.; COSTA, E. W. A.; SILVA, J. F.; PRADO, R. M.; SILVA JÚNIOR, G. B. Ammonium and nitrate distinctly regulate photosynthetic and growth performance, eliciting antagonistic responses in yellow passion fruit plants. **Scientia Horticulturae**, v. 330, p. 113022, 2024.

DANTAS, A.M.T.; COSTA, A.P.; PEIXOTO, J.R.; FALEIRO, F.G.; VIELLA, M.S., PIRES, M.C. Influence of harvest times on yellow passion fruit physicochemical characteristics. **Bioscience Journal**, v. 34, n. 6, p. 1640-1648, 2018.

DANTAS, E. F.; FREITAS, A. D. S.; LYRA, M. C. C. P.; SANTOS, C. E. R.S.; NETA, S. J. C.; SANTANA, A. C. A.; BEZERRA, R. V.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biological fixation, transfer and balance of nitrogen in passion fruit (*Passiflora edulis Sims*) orchard intercropped with different green manure crops. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n. 032019, p. 465-471, 2019.

DAS, P.; MANNA, I.; BISWAS, A. K.; BANDYOPADHYAY, M. Exogenous silicon alters ascorbate-glutathione cycle in two salt-stressed indica rice cultivars (MTU 1010 and Nonabokra). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 26, p. 26625-26642, 2018.

DINIZ, A. A.; CAVALCANTE, L. F.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; DIAS, N. S.; DANTAS, T. A. G.; CAMPOS, V. B.; NASCIMENTO, J. A. M.; DANTAS, S. A. G. Postharvest quality of yellow passion fruit produced in soil with bovine biofertilizer and nitrogen. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 18, p. 27328-27338, 2022.

DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; CRUZ, C.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Nitrogen nutrition and antioxidant metabolism in ammonium-tolerant and -sensitive plants. **Physiologia Plantarum**, v. 132, n. 3, p. 359-369, 2007.

- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Editora Planta. 2006. 403 p.
- FRAZÃO, J. J.; PRADO, R. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P.; ROSSATTO, D. R. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020.
- GOU, T.; YANG, L.; HU, W.; CHEN, X.; ZHU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 152, p. 53-61, 2020.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 347 p.
- HORCHANI, F.; HAJRI, R.; ASCHI-SMITI, S. Is the sensitivity to ammonium nutrition related to nitrogen accumulation? **Current Botany**, v. 2, n. 1, p. 18-22, 2011.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2022**: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maracuja/br>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- JIN, Z.; ZHU, Y.; LI, X.; DONG, Y.; AN, Z. Soil N retention and nitrate leaching in three types of dunes in the Mu Us desert of China. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2015.
- JUNGHANS, T. G. (ed.). **Espécies de maracujazeiro: uma riqueza do Brasil**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2022. 203 p.
- KAUSHIK, P.; SAINI, D. K. Silicon as a vegetable crops modulator-a review. **Plants**, v. 8, n. 148, p. 1-18, 2019.
- KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I. J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 510, 2017.
- LI, Z.; SONG, Z.; YAN, Z.; HAO, Q.; SONG, A.; LIU, L.; YANG, X.; XIA, S.; LIANG, Y. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 3, p.1-19, 2018.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.
- MASOOD, S.; SULEMAN, M.; HUSSAIN, S.; JAMIL, M.; ASHRAF, M.; SIDDIQUI, M. H.; NAZAR, R.; KHAN, N.; JEHAN, S.; KHAN, K. S. Fertilizers containing balanced proportions of NH_4^+ -N and NO_3^- -N enhance maize (*Zea mays* L.) yield due to improved nitrogen recovery efficiency. **Sustainability**, v. 15, n. 16, p. 12547, 2023.
- MODA, L. R.; PRADO, R. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P.; SILVA JÚNIOR, G. B.; SANTOS, L. C. N.; SOARES, M. V. G.; KADYAMPAKENI, D. M. Response of orange seedlings to the proportion of nitrate-ammonium in the nutrient solution and the benefits of phosphorus in ammonia toxicity. **Scientia Horticulturae**, v. 285, p. 110166, 2021.

- MURATORE, C.; ESPEN, L.; PRINSI, B. Nitrogen uptake in plants: the plasma membrane root transport systems from a physiological and proteomic perspective. **Plants**, v. 10, n. 4, p. 681, 2021.
- NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, p. 1-8, 2017.
- PAN, W. L.; MADSEN, I. J.; BOLTON, R. P.; GRAVES, L.; SISTRUNK, T. Ammonia/ammonium toxicity root symptoms induced by inorganic and organic fertilizers and placement. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 6, p. 2485-2492, 2016.
- PODGÓRSKA, A.; MAZUR, R.; OSTASZEWSKA-BUGAJSKA, M.; KRYZHEUSKAYA, K.; DZIEWIT, K.; BORYSIUK, K.; WDOWIAK, A.; BURIAN, M.; RASMUSSEN, A. G.; SZAL, B. Efficient photosynthetic functioning of *Arabidopsis thaliana* through electron dissipation in chloroplasts and electron export to mitochondria under ammonium nutrition. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p.1-18, 2020.
- PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. 2. ed. Jaboticabal: Editora Unesp, 2020. 416 p.
- R CORE TEAM: **A language and environment for statistical computing**., Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.
- RASTOGI, A.; YADAV, S.; HUSSAIN, S.; KATARIA, S.; HAJIHASHEMI, S.; KUMARI, P.; YANG, X.; BRESTIC, M. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 169, p. 40-48, 2021.
- SEETHEPALLI, A, DHAKAL, K., GRIFFITHS, M., GUO, H; FRESCHET, G. T., VORK., L. M. RhizoVision Explorer: open-source software for root image analysis and measurement standardization. **AoB Plants**, v. 13, n. 6, p. 1-15, 2021.
- SILVA JÚNIOR, G. B.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; AGOSTINHO, F. B.; SILVA, S. L. O.; SANTOS, L. C. N.; GONZÁLEZ, L. C. Silicon mitigates ammonium toxicity in yellow passionfruit seedlings. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 79, n. 3, p. 425-434, 2019.
- SILVA JÚNIOR, G. B.; PRADO, R. M.; SILVA, S. L. O.; CAMPOS, C. N. S.; CASTELLANOS, L. G.; SANTOS, L. C. N.; BARRETO, R. F.; TEODORO, P. E. Nitrogen concentrations and proportions of ammonium and nitrate in the nutrition and growth of yellow passion fruit seedlings. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 16, p. 2533-2547, 2020.
- SILVEIRA, J. A. G.; MATOS, J. C. S.; CECCATO, V. M.; SAMPAIO, A. H.; COSTA, R. C. L.; VIÉGAS, R. A. Induction of nitrate reductase activity and nitrogen fixation in two *Phaseolus* species in relation to exogenous nitrate level. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 4, p. 181-188, 1998.
- SINGH, P.; KUMAR, V.; SHARMA, J.; SAINI, S.; SHARMA, P.; KUMAR, S.; SINHMAR, Y.; KUMAR, D.; SHARMA, A. Silicon supplementation alleviates the salinity stress in wheat plants by enhancing the plant water status, photosynthetic pigments, proline content and antioxidant enzyme activities. **Plants**, v. 11, n. 19, p. 2525, 2022.
- SNELL, F. D.; SNELL, C. T. **Colorimetric methods of analysis**. London: Van Nostrand, 1949.

SONG, J.; YANG, J.; JEONG, B. R. Alleviation of ammonium toxicity in *Salvia splendens* 'Vista Red' with silicon supplementation. **Toxics**, v. 10, n. 8, p. 446, 2022a.

SONG, J.; YANG, J.; JEONG, B. R. Silicon mitigates ammonium toxicity in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*) 'Ssamchu'. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 1-15, 2022b.

SOURI, Z.; KHANNA, K.; KARIMI, N.; AHMAD, P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 3, p. 906-925, 2020.

TOMBEUR, F.; RAVEN, J. A.; TOUSSAINT, A.; LAMBERS, H.; COOKE, J.; HARTLEY, S. E.; JOHNSON, S. N.; COQ, S.; KATZ, O.; SCHALLER, J. Why do plants silicify? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 38, n. 3, p. 275-288, 2023.

VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; TOLEDO, R. L.; SANTOS, L. C. N.; HURTADO, A. C.; NEDD, L. L. T.; GONZALEZ, L. C. Silicon supplementation alleviates ammonium toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 2, p. 413-419, 2019.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

WENCESLAU, D. S. L.; OLIVEIRA, D. F.; RABELO, H. O.; FERBONINK, G. F.; GOMES, L. A. A.; LEONEL, E. C. A.; CAIONE, G. Nitrate concentration and nitrate/ammonium ratio on lettuce grown in hydroponics in Southern Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 6, p. 862-868, 2021.

XU, G.; FAN, X.; MILLER, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 153-182, 2012.

YIN, H.; LI, B.; WANG, X.; XI, Z. Effect of ammonium and nitrate supplies on nitrogen and sucrose metabolism of Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* cv.). **Journal of The Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 14, p. 5239-5250, 2020.

ZHANG, B.; CHEN, L.; JIN, S.; GUO, Q.; HOU, J. The Influence of plants on the migration and transformation of nitrogen in plant-soil systems: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 4084-4102, 2022.

ZHANG, J.; LV, J.; DAWUDA, M. M.; XIE, J.; YU, J.; LI, J.; ZHANG, X.; TANG, C.; WANG, C.; GAN, Y. Appropriate ammonium-nitrate ratio improves nutrient accumulation and fruit quality in pepper (*Capsicum annuum* L.). **Agronomy**, v. 9, n. 11, p. 683, 2019.