

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

**EFEITO SINÉRGICO DO BORO, SILÍCIO E ÁCIDO SALICÍLICO
NA FISIOLOGIA DO ALGODOEIRO DEFICIENTE EM BORO**

LUCA CARVALHO PERDONATE

JABOTICABAL – SP
2º Semestre/2024

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

**EFEITO SINÉRGICO DO BORO, SILÍCIO E ÁCIDO SALICÍLICO
NA FISIOLOGIA DO ALGODOEIRO DEFICIENTE EM BORO**

LUCA CARVALHO PERDONATE

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior

Coorientador: Dr. Cid Naudi Silva Campos

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

JABOTICABAL – SP
2º Semestre/2024

P433e

Perdonate, Luca Carvalho

Efeito sinérgico do boro, silício e ácido salicílico na fisiologia do algodoeiro deficiente em boro / Luca Carvalho Perdonate. --

Jaboticabal, 2024

55 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: Jonas Pereira de Souza Júnior

1. Algodão. 2. Deficiência de boro. 3. Hormônio vegetal. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



Luca Carvalho Perdonate

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO:
EFEITO SINÉRGICO DO BORO, SILÍCIO E ÁCIDO SALICÍLICO
NA FISIOLÓGIA DO ALGODOEIRO DEFICIENTE EM BORO

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

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientador: Dr. Jonas Pereira de Souza Junior
Coorientador: Dr. Cid Naudi Silva Campos

Área de Concentração: Fisiologia Vegetal, com ênfase em Nutrição de Plantas

Data da defesa: 25/09/2024

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 17/10/2024 20:07:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
MILTON GARCIA COSTA
Data: 18/10/2024 00:36:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

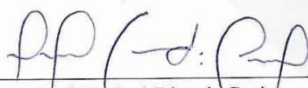
M.Sc. Milton Garcia Costa
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
PATRICIA MESSIAS FERREIRA
Data: 21/10/2024 14:25:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc. Patrícia Messias Ferreira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: ____/____/____


Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento de Ciência do Solo

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Seção Técnica de Graduação
Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n CEP 14884-900 Jaboticabal/SP - Brasil
Tel (16) 3209 7106 e-mail: graduacao.fcav@unesp.br - www.fcav.unesp.br

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e minha família. Este trabalho é a prova de que todo seu investimento e dedicação valeram a pena.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por sempre me dar saúde, força e iluminar meu caminho até aqui e durante todo esse ciclo tão importante na minha vida.

Devo agradecer e ser muito grato a toda minha família, minha mãe Eliane Aparecida de Carvalho Perdonate, meu pai Emilio Claudio Perdonate por sempre me apoiarem nos bons e maus momentos, por fazer de tudo para me ajudar a chegar até aqui. Graças a meu pai, escolhi ser um engenheiro agrônomo, seus conselhos foram de suma importância para minha formação. Gostaria também de agradecer a memória de meu avô, Laerte Antônio de Carvalho pelo apoio e por confiar em mim e no meu potencial.

À minha namorada Ana Luisa Ulian, que esteve comigo em todos os momentos da minha vida, sempre oferecendo apoio, carinho e amor, compartilhando alegrias e tristezas e por me ensinar a como ser uma pessoa melhor.

Aos meus amigos, da minha cidade natal e as amizades criadas na vida acadêmica, por sempre estarem comigo, me fazendo sorrir, até mesmo nos piores momentos. Por todos os ensinamentos e aprendizados compartilhados e por me fazerem ser a pessoa que eu sou. Especialmente ao meu amigo Conrado Henrique Martins Freire, que conduziu comigo os experimentos na universidade, por todas as dificuldades enfrentadas juntos e os aprendizados.

À república Viracopos e todos os seus moradores, que foi minha casa durante meu tempo na universidade, por todas as vivências e ensinamentos, que moldam e são essenciais para a evolução pessoal e profissional.

A todo o conhecimento e aprendizado que a Universidade Estadual Paulista – Unesp, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) me proporcionou. Estendo minha gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e aos meus coorientadores Prof. Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior, Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos e Me. Milton Garcia Costa, pelo apoio, assistência e orientação a todo momento do projeto. Além de todos os outros professores que tive durante os anos de universidade, que tive o privilégio de conhecer e aprender.

A todos que de alguma forma contribuíram, para a realização desse trabalho e da minha trajetória, me incentivando e com certeza proporcionando algum impacto na minha formação e na construção na pessoa que sou hoje.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Efeito do ácido salicílico na fisiologia vegetal	5
2.2 Boro na cultura do algodoeiro	8
2.3 Benefícios do Si no algodoeiro	13
2.4 Interação ASxBXSi	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Caracterização do local de origem dos dados	18
3.2 Delineamento experimental	20
3.2.1 Taxa fotossintética	22
3.2.2 Teor de Boro	23
3.2.3 Teor de Silício	23
3.3 Análise estatística	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Teor de boro e silício em plantas de algodão	25
4.2 Taxa fotossintética	26
5. CONCLUSÕES	30
6. LITERATURA CITADA.....	32

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Concentração de B nas folhas (a, b), e concentração de Si nas folhas (c, d) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B e diferentes tratamentos aplicados via foliar: controle (sem aplicação), boro (B), silício (Si), ácido salicílico (SA), ácido salicílico + boro (SA+B), ácido salicílico + silício (SA+Si) e ácido salicílico + boro + silício (SA+B+Si). Letras diferente indicam diferença estatística seguindo o teste de tukey (5% de probabilidade). 25

Figura 2. Fotossíntese (a), condutância estomática (b), concentração interna de CO₂ (c), transpiração (d), eficiência no uso de água (e), eficiência de carboxilação instantânea (f) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B e diferentes tratamentos aplicados via foliar: controle (sem aplicação), boro (B), silício (Si), ácido salicílico (SA), ácido salicílico + boro (SA+B), ácido salicílico + silício (SA+Si) e ácido salicílico + boro + silício (SA+B+Si). Letras diferentes indicam diferença estatística seguindo o teste de tukey (5% de probabilidade).....27

RESUMO

EFEITO SINÉRGICO DO BORO, SILÍCIO E ÁCIDO SALICÍLICO NA FISIOLOGIA DE PLANTAS DE ALGODÃO DEFICIENTE EM BORO

A produção de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é severamente prejudicada pela deficiência de boro (B). O uso de atenuadores como o silício (Si) e o ácido salicílico (SA) tem se mostrado promissor para atenuar esta desordem nutricional, no entanto, os estudos em algodoeiros são incipientes. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar de B, Si e SA, isolados e associados, na fisiologia de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B, em condições de campo. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com 7 tratamentos foliares: controle, B, Si, AS, AS+B, AS+Si e AS+B+Si, com quatro repetições. Foram avaliadas a concentração de B e Si nas folhas, a taxa de fotossíntese líquida, a condutância estomática, a transpiração, a concentração interna de CO₂, a eficiência no uso da água e a eficiência de carboxilação instantânea. A aplicação foliar de B e Si, isolados ou associados, foi eficiente em incrementar o teor foliar de B nas folhas de plantas de algodão. Com exceção do controle, que apresentou menor valor para taxa fotossintética, não houve diferença nas taxas de fotossíntese entre os tratamentos. A condutância estomática foi maior no tratamento com aplicação foliar isolada de Si, sem diferenciar dos tratamentos com SA, isolado e associado, e com B isolado. A menor condutância estomática foi observada no tratamento controle, a qual não diferiu do tratamento com AS+Si+B. A concentração interna de CO₂, não apresentou diferença entre os tratamentos, com exceção do controle que foi maior apenas

ao tratamento AS+Si+B. A transpiração não apresentou diferença entre os tratamentos. O menor valor para a WUE foi observado nas plantas do tratamento controle, as quais não diferiram dos tratamentos Si e AS. As plantas do tratamento controle apresentaram uma eficiência de carboxilação instantânea menor em comparação aos demais tratamentos, que não diferiram entre si. Em conclusão, os resultados evidenciam que a aplicação de B, AS e Si, isolados e associados, contribuem para melhorias nos aspectos nutricionais e fisiológicos das plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., Micronutriente, Elemento benéfico, Hormônio vegetal, Aplicação foliar

ABSTRACT

SYNERGISTIC EFFECT OF BORON, SILICON, AND SALICYLIC ACID ON THE PHYSIOLOGY OF BORON-DEFICIENT COTTON PLANTS

Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) production is severely affected by boron (B) deficiency. The use of mitigators such as silicon (Si) and salicylic acid (SA) has shown promise in alleviating this nutritional disorder; however, studies on cotton plants remain scarce. This study aimed to evaluate the effect of foliar application of B, Si, and SA, alone and in combination, on the physiology of cotton plants grown under B deficiency in field conditions. The experiment was conducted in a randomized block design with 7 foliar treatments: control, B, Si, SA, SA+B, SA+Si, and SA+B+Si, with four replications. The concentration of B and Si in leaves, net photosynthesis rate, stomatal conductance, transpiration, internal CO₂ concentration, water use efficiency, and instantaneous carboxylation efficiency were evaluated. The foliar application of B and Si, either alone or in combination, effectively increased the B content in cotton leaves. Except for the control, which showed the lowest photosynthetic rate, no differences were observed in photosynthesis rates among treatments. Stomatal conductance was highest in the treatment with the isolated foliar application of Si, with no significant difference from treatments with SA alone and in combination, and B alone. The lowest stomatal conductance was observed in the control treatment, which did not differ from the SA+Si+B treatment. Internal CO₂ concentration did not differ among treatments, except for the control, which was higher than the SA+Si+B treatment. Transpiration did not differ among treatments. The lowest WUE was observed in the control plants, which did not

differ from the Si and SA treatments. Control plants showed lower instantaneous carboxylation efficiency compared to the other treatments, which did not differ among themselves. In conclusion, the results indicate that the application of B, SA, and Si, alone and in combination, contributes to improvements in the nutritional and physiological aspects of cotton plants grown under B deficiency.

Key words: *Gossypium hirsutum* L., Micronutrient, Beneficial element, Plant hormone, Foliar application

1. INTRODUÇÃO

A produção de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é fundamental para a economia do Brasil, que oferece condições climáticas ideais para o cultivo dessa planta (EMBRAPA, 2023). Anualmente cerca de 1,6 milhões de hectares de terras são destinados ao cultivo do algodoeiro, produzindo aproximadamente 2,5 milhões de toneladas da fibra (CONAB, 2023). O Brasil ocupa a posição de terceiro maior produtor e segundo maior exportador de algodão no mundo (USDA, 2023).

Entre os micronutrientes essenciais ao desenvolvimento do algodoeiro, o boro (B) se destaca como o mais limitante, com deficiências frequentes devido à alta demanda da planta e à baixa disponibilidade desse elemento, especialmente em solos de baixa fertilidade ou arenosos, típicos de regiões tropicais e subtropicais (ROSOLEM et al., 2001).

O algodão necessita de B desde a fase vegetativa até o enchimento das maçãs (CORDEIRO et al., 2024). Na fase vegetativa, o B afeta principalmente o crescimento das raízes (KOHLI et al., 2023) e melhora a fertilidade das estruturas reprodutivas (formação do tubo polínico) na fase reprodutiva inicial (FANG et al., 2019).

No estágio final, na abertura dos capulhos o B é necessário para o transporte de carboidratos das folhas para as maçãs (ZHAO; OOSTERHUIS, 2002). Assim, o fornecimento adequado de B é essencial ao longo de todo o ciclo do algodoeiro, desempenhando funções em todas as fases de desenvolvimento da planta (BOGIANI et al., 2014).

O fornecimento adequado de B para o algodão melhora a síntese hormonal, a taxa fotossintética, o crescimento vegetativo, a eficiência no uso da água, os componentes de rendimento, a qualidade da fibra do algodão e a produtividade (BOGIANI et al., 2013; CORDEIRO et al., 2022; LI et al., 2017; PEREIRA et al., 2021; SOUZA JUNIOR et al., 2022).

Quando a concentração desse micronutriente no solo estão abaixo do ideal, há uma redução significativa no desenvolvimento fisiológico e morfológico do algodoeiro, impactando características de crescimento, rendimento e produtividade do algodão (MEHRAN et al., 2023; ROSOLEM et al., 2001).

Na deficiência de B, o uso do silício (Si) pode atenuar os efeitos deletérios e garantir a produtividade do algodão (SOUZA JUNIOR, 2019). Este elemento benéfico contribui para a melhoria da fotossíntese e o aumento da produtividade, especialmente em plantas de algodão submetidas a condições ambientais adversas (SAFDAR et al., 2023; VASANTHI et al., 2012).

O Si auxilia no arranjo adequado das folhas, tornando-as mais densas e aumentando a da luz solar (WARAICH et al., 2011). Além disso, estimula a produção de citocinina, um regulador de crescimento vegetal que melhora a elasticidade e firmeza da parede celular, favorecendo o crescimento e desenvolvimento das plantas em ambientes estressantes (AHMED et al., 2008; VASANTHI et al., 2012).

No algodoeiro, a aplicação foliar de Si tem aumentado a produtividade e acúmulo do elemento, melhorando a formação de pigmentos e a eficiência quântica fotossintética e impactando positivamente os processos fisiológicos e

o rendimento do algodão (SOUZA JUNIOR et al., 2021). Além disso, a aplicação de Si, tanto via foliar como via radicular, pode melhorar a eficiência do fotossistema II (SOUZA FERRAZ et al., 2014) e a produção de clorofila (FAROOQ et al., 2013), contribuindo para o desenvolvimento da planta e para aliviar o estresse causado pela deficiência de B (SOUZA JUNIOR, 2019).

Assim como o Si, o ácido salicílico (AS) também tem sido reportado como atenuador de estresse em plantas do algodão (RAKHMATOVA et al., 2023). O AS é uma molécula sinalizadora endógena essencial nas plantas, regulando processos de crescimento, desenvolvimento e resistência ao estresse biótico e abiótico (HU et al., 2022; ZHANG; LI, 2019). Além disso, o AS é fundamental para a fotossíntese e o funcionamento das células de proteção responsáveis pelo fechamento dos estômatos (MELOTTO et al., 2006; VLOT et al., 2009).

Existem poucos relatos sobre o uso de AS no algodoeiro, mas alguns estudos indicam que sua aplicação pode aumentar a altura das plantas, o número de ramos monopodiais e o número de capulhos (HEIDARI et al., 2022; BORZOUWI et al., 2021; BARROS et al., 2019), apresentando efeito positivo nos componentes de produção e na qualidade da fibra (KILIÇ et al., 2024).

A aplicação combinada de Si e AS no algodão resulta em uma relação sinérgica, proporcionando um suporte mais eficaz para o crescimento da planta (BARROS et al., 2019). Partindo desta perspectiva, torna-se relevante investigar as hipóteses de que i) a aplicação de AS, isolado, podem potencializar o desenvolvimento de plantas de algodão cultivadas em condições de deficiência de B, e, caso afirmativo ii) a aplicação associada de

AS e, Si, sem induzir polimerização, pode gerar um efeito sinérgico resultando em benefícios na fisiologia das plantas, e iii) a aplicação associada de AS, Si e B pode resultar em efeitos benéficos ainda maiores dos elementos aplicados, melhorando o aparato fotossintético e aumentando a produtividade da cultura algodão. O objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da aplicação de AS, isolado e associado com B e Si, no aparato fotossintético, no desenvolvimento e na produtividade da cultura de algodão cultivadas sob deficiência de B.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Efeito do ácido salicílico na fisiologia vegetal

O AS é um hormônio vegetal natural que atua como uma molécula sinalizadora, regulando diversos processos nas plantas como crescimento, germinação de plântulas, glicólise, floração, rendimento de frutos, absorção e transporte de íons, condutância estomática, taxa de transpiração e fotossíntese, além da síntese de enzimas antioxidantes durante o estresse biótico e abiótico (MOUSTAFA-FARAG et al., 2020). Além de ser amplamente reconhecido como uma molécula sinalizadora que induz o sistema defensivo das plantas contra estressores bióticos como patógenos e desempenhar um papel ativo na resposta a diversos estressores abióticos como frio, seca, salinidade, metais pesados e deficiências nutricionais (DONG et al., 2014; BAGAUTDINOVA et al., 2022).

Este hormônio é essencial na defesa das plantas, influenciando vários aspectos da imunidade vegetal (ZHANG; LI, 2019), e desempenha um papel fundamental na fotossíntese e no funcionamento das células protetoras que controlam o fechamento dos estômatos (MELOTTO et al., 2006; VLOT et al., 2009; SHARMA et al., 2023).

Este hormônio sinaliza a resistência das plantas ao modular o metabolismo das espécies reativas de oxigênio (EROs), especialmente o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), por meio de sua ligação direta com as enzimas catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), que são essenciais para neutralizar as EROs (DURNER; KLESSIG, 1996; HERNÁNDEZ et al., 2017). Isso é importante, pois o estresse oxidativo pode causar danos significativos a

lipídios, proteínas e ácidos nucleicos, e consequentemente, pode ocasionar a morte celular e reduzir o crescimento das plantas (DANGOL et al., 2019).

O AS pode afetar positivamente a germinação das sementes, o crescimento celular, a formação de plântulas, a expressão de genes relacionados à senescência e a produção de frutos em leguminosas (VLOT et al., 2009). A aplicação de AS em concentrações apropriadas melhora a condutância estomática, o transporte de elétrons e as atividades antioxidantes, aumentando a eficiência fotossintética (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2010; JANDA et al., 2014; AAMER et al., 2022).

Estudos relatam que o AS tem a capacidade de ativar peroxidases, desempenhando um papel importante na biossíntese de suberina e lignina, que reforçam as paredes celulares e são importantes para a proteção das plantas (SAKHABUTDINOVA, 2004). Além disso, o AS pode atuar como regulador da fotossíntese ao influenciar a atividade da rubisco, contribuir para a aclimação à luz e homeostase redox, e controlar a abertura estomática (VICENTE; PLASENCIA, 2011), além de prevenir a degradação da clorofila em culturas (NORIEGA et al., 2012).

Conforme Raskin (1992), o AS é fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, regulando processos fisiológicos essenciais como transpiração, respiração e divisão celular. Desempenhando um papel importante na fotossíntese, aumentando sua eficiência ao otimizar a produção de clorofila e a absorção de luz.

Segundo Aamer et al. (2022), o AS pode efetivamente aumentar a eficiência da fotossíntese impulsionando o crescimento e o desenvolvimento

das plantas. Este composto atua melhorando a eficiência dos cloroplastos, a "máquina fotossintética" situada nas células das plantas. Com essa ajuda adicional, os cloroplastos podem absorver mais luz solar e transformá-la em energia de maneira mais eficaz.

Como um fitohormônio multifacetado, o AS desencadeia processos fisiológicos e bioquímicos em todas as fases de desenvolvimento da planta, incluindo germinação de sementes, crescimento vegetativo, produção de sementes e senescência (VICENTE; PLASENCIA, 2011).

A aplicação de AS tem demonstrado efeitos fisiológicos benéficos em plantas de algodão aumentando a taxa de crescimento, a taxa fotossintética e a eficiência do uso da água sob estresse hídrico (SMITH et al., 2018). Além de estimular o desenvolvimento de fibras mais finas e longas (NOREEN et al., 2015; RAZA et al., 2018).

Conforme Kiliç e Karamedir (2024), as plantas de algodão podem ser expostas a muitos estressores durante a estação de crescimento. Segundo os autores, as altas temperaturas do verão e a disponibilidade limitada de água podem causar estresse térmico e hídrico ou alguma deficiência nutricional nas plantas. Durante esses períodos de estresse, as plantas ativam seus mecanismos de defesa, sendo AS um dos hormônios secretados. A aplicação de AS pode ser importante para reduzir os efeitos negativos desses estressores na produtividade do algodão. No entanto, o efeito da aplicação de AS depende de vários fatores, como o tipo e o estágio de desenvolvimento da planta, bem como a concentração dos níveis de AS aplicado e endógeno (HARA et al., 2012).

Em adição, estudos demonstram que o AS, ao favorecer a fotossíntese e reduzir o estresse oxidativo, pode reduzir os efeitos deletérios em algodão (VENKATESHWARLU; VARDHINI, 2021; DAS et al., 2024).

2.2 Boro na cultura do algodoeiro

O boro (B) é um elemento essencial para o funcionamento normal das plantas (HUSSAIN et al., 2017). Entre os micronutrientes exigidos pelo algodoeiro, o B é o mais limitante, e seus sintomas de deficiência aparecem com maior frequência em virtude da necessidade da planta e da disponibilidade do elemento no solo, que muitas vezes é baixa (ROSOLEM et al., 2001).

Esse micronutriente desempenha um papel funcional na formação e na função das paredes celulares (GARCIA et al., 2001), e sua relação indireta com a fotossíntese tem sido observada em diversas culturas, como a soja (LIU et al., 2005) e no algodão (MINGFENG et al., 2017).

A importância do micronutriente na produção das plantas deve-se ao seu papel biológico no metabolismo de ácidos nucleicos, atuando na síntese de uracil, no metabolismo de carboidratos, proteínas, ácido indolacético e compostos fenólicos, bem como na síntese, estrutura e integridade da parede celular, na funcionalidade da membrana plasmática, além de desempenhar um papel importante no transporte de açúcares (MENGEL; KIRKBY, 1978; LOOMIS; DURST, 1992; MARSCHNER; MARSCHNER, 1995; GOLDBACH, 1997; BROWN et al., 1999; GOLDBACH et al., 2001).

A nível molecular, estudos demonstram a importância do B na ligação da pectina presente na parede celular, essencial para o desenvolvimento foliar

(TANAKA; FUJIWARA, 2008). As pectinas, componentes celulares importantes das plantas são formadas por polissacarídeos como as homogalacturonas e as rhamnogalacturonas I e II (RG-I e RG-II) (KOBAYASHI; MATOH; AZUMA, 1996; MIWA et al., 2013). A síntese de RG-II é reticulada por um diéster de boratodiol 1:2, formando RG-II dimérico e, posteriormente, uma ligação cruzada com o borato, resultando em uma rede tridimensional pecticística estável (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

O B participa da ativação ou inibição de enzimas, do metabolismo de compostos fenólicos, das auxinas (AIA) e precursores da lignina, e está presente nas reações de armazenagem de energia (ATP), no metabolismo de ácidos nucleicos, e na síntese de proteínas (KOUCHI; KUMAZAWA, 1976, TAIZ; ZEIGER, 2004; MALAVOLTA, 2006). Além disso, tem funções na formação da parede celular, divisão celular, organização e funcionamento de membranas, alongação celular, síntese e transporte de carboidratos e açúcares (DECHEN et al., 1991), na fotossíntese e no metabolismo e transporte de carboidratos (MALAVOLTA, 2006).

O B é absorvido pelas plantas via sistema radicular, na forma de ácido bórico, por diferentes mecanismos moleculares, dependendo da disponibilidade do elemento na solução do solo. Em alta disponibilidade de B, a absorção pode ocorrer por difusão passiva através das camadas duplas de lipídeos (BROWN et al., 2002). Enquanto em baixa disponibilidade, a absorção é ativa e depende de transportadores específicos (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

O teor de B nos solos tropicais, devido ao baixo teor de matéria orgânica, é geralmente baixo limitando a produção agrícola (TANAKA;

FUJIWARA, 2008). Além disso, o micronutriente possui alta mobilidade no solo, estando frequentemente na forma de ácido bórico, o que facilita sua perda por lixiviação (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

A aplicação foliar de B aumenta o rendimento e a qualidade do algodão, especialmente em solos calcários, onde a deficiência desse micronutriente é comum (DORDAS et al., 2006). Ainda segundo Dordas et al. (2006) embora a nutrição da planta dependa principalmente da aplicação radicular, a aplicação foliar é uma prática complementar, geralmente utilizada quando ocorrem falhas na aplicação via solo ou quando é necessária uma resposta rápida da planta. Durante estágios críticos de crescimento, a aplicação foliar de B pode melhorar vários componentes do rendimento, garantindo uma correção mais imediata da deficiência (AHMED et al., 2010).

A deficiência de B causa prejuízo significativo na produção do algodoeiro (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; AHMED et al., 2013; BOGIANI et al., 2014), indicando uma alta resposta da cultura à fertilização boratada (BELLALOU; TURLEY; STETINA, 2015).

Os sintomas de deficiência de boro ocorrem inicialmente nas regiões de crescimento, como nas partes jovens, nos tecidos de condução e nos órgãos de propagação devido à baixa redistribuição, indicando a importância de garantir um suprimento contínuo de B para as plantas (DELL; HUANG, 1997; SHORROCKS, 1997). Quando há deficiência de B, o desenvolvimento das plantas é prejudicado, podendo não ocorrer o desenvolvimento completo do ciclo vegetativo em condições severas de deficiência (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995).

A campo, alguns sinais comuns observados no algodoeiro são: amarelecimento das folhas do ponteiro; no período de florescimento/frutificação, aparecem anéis concêntricos verde-escuros nos pecíolos e nas hastes, com necrose interna da medula (ROSOLEM; BASTOS, 1997). À medida que a carência aumenta, esses anéis surgem nos ramos e na haste principal (ROSOLEM; BASTOS, 1997; CARVALHO et al., 2011). Também ocorre queda excessiva de botões florais, flores e frutos novos (ROSOLEM et al., 2001), possivelmente pela inviabilização do grão de pólen, que culmina na não fecundação do óvulo, ou pelos distúrbios causados no sistema vascular da região do pedúnculo, impossibilitando o transporte ideal de carboidratos para esses órgãos (ZHAO; OOSTERHUIS, 2002).

Nas raízes de algodoeiro, observa-se coloração escura, menor comprimento, engrossamento e alta taxa de emissão de raízes laterais (OLIVEIRA et al., 2006; BOGIANI; ROSOLEM, 2012). Estes efeitos são atribuídos ao impedimento da atividade meristemática, resultando em declínio na divisão e alongação celular, e ao acúmulo de compostos fenólicos prejudiciais à integridade celular (LEE; ARONOFF, 1967; KOUCHI; KUMAZAWA, 1976).

A altura das plantas de algodão cultivadas em deficiência também de B é prejudicada pela desordem nutricional na síntese de RNA e de proteínas, processos fundamentais nos tecidos meristemáticos que afetam a divisão e diferenciação celular, e, conseqüentemente, o crescimento das partes jovens das plantas (MENGEL; KIRKBY, 1978). O menor desenvolvimento vegetal

também é explicado pelo papel do B na estrutura da parede celular (DEMİRAY; DEREBOYLU, 2014).

A dominância apical e o desenvolvimento de flores, frutos e sementes também são inibidos no algodão quando este micronutriente está em deficiência, reduzindo a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995; ANDERSON; BOSWELL 1968; SILVA et al. 1979).

A deficiência severa de B pode provocar a morte da gema apical e o surgimento anormal de brotos novos (superbrotamento da planta). Baixos teores no tecido durante o florescimento podem inviabilizar a germinação do grão de pólen, impedindo a fecundação dos óvulos e a formação das sementes e, por consequência, das fibras advindas delas. Estruturas formadas podem exibir anormalidades relacionadas à desintegração de tecidos internos (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Apesar de incipiente na literatura, e não haver relatos para a cultura do algodoeiro, recentemente foi reportado que a deficiência de B diminui os níveis de AS nas raízes de tomateiros, comprometendo a resposta defensiva da planta (LI et al., 2023). Essa alteração nas vias dos fitohormônios faz parte do mecanismo adaptativo da planta para sobreviver à deficiência de B. Neste contexto, e a importância do B para o desenvolvimento do algodoeiro, levanta-se o questionamento se a aplicação do AS pode auxiliar as plantas contra a deficiência de boro.

Sendo assim, para explorar possíveis soluções para reduzir os efeitos da deficiência de B, um elemento que vem ganhando destaque é o silício (Si).

Estudos indicam que o silício pode desempenhar um papel importante na proteção do algodoeiro contra estresses abióticos, incluindo a deficiência de boro (SOUZA JÚNIOR et al., 2019). A aplicação de Si tem mostrado potencial para melhorar a resistência das plantas, otimizar processos fisiológicos e aumentar a eficiência fotossintética (SANTOS et al., 2021), sugerindo que sua utilização pode ser uma estratégia promissora para o algodoeiro sob condições de deficiência de B.

2.3 Benefícios do Si no algodoeiro

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, mas seu papel na fisiologia das plantas ainda é pouco compreendido, e as tentativas de associá-lo a atividades metabólicas ou fisiológicas têm sido inconclusivas (ZHU; GONG, 2014). Embora o Si não seja classificado como um elemento essencial para as plantas, ele tem demonstrado ser benéfico para o crescimento vegetal e eficiente na melhora de efeitos adversos causados por metais pesados (MA et al., 2001).

O Si é o único elemento químico que não é prejudicial quando acumulado em excesso nas plantas (ZHU; GONG, 2014), e seus efeitos positivos foram demonstrados contra estresses bióticos na cultura do arroz (FALLAH, 2012) e abióticos no tomateiro (SHI et al., 2016). O Si também protege as plantas por meio de processos que aumentam os mecanismos de defesa, incluindo a acumulação de lignina, compostos fenólicos e fitoalexinas (EPSTEIN, 1999; FAWA et al., 2001; MA; YAMAJI, 2006).

O Si tem a capacidade de aliviar estresses abióticos como temperaturas elevadas e desordens nutricionais por B (ETESAMI; JEONG, 2023). Em

plantas de algodão, a aplicação de Si via radicular aumenta o teor de clorofila (FAROOQ et al., 2013), enquanto a aplicação foliar aumenta a eficiência quântica do fotossistema II, diminuindo a fluorescência inicial, melhorando a estabilidade do fotossistema (SOUZA FERRAZ et al., 2014). Isso resulta em maior produção de massa seca e alívio dos danos causados pela alta temperatura.

O algodoeiro é classificado como planta intermediária quanto à absorção de Si (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005), apresentando absorção radicular mais lenta quando comparada à velocidade de absorção de água (ADATIA; BESFORD, 1986; MA; YAMAJI, 2006).

Em situações de estresse por desordem nutricional de B, a aplicação de Si pode ser uma estratégia promissora para mitigar os efeitos negativos (SOUZA JUNIOR, 2019). O Si é um elemento benéfico que melhora o crescimento das plantas, especialmente sob estresse biótico ou abiótico (ETESAMI; JEONG, 2023).

A aplicação foliar Si no algodão deficiente em B melhora a eficiência fotossintética em condições controladas (SOUZA JUNIOR et al., 2019; SOUZA JUNIOR et al., 2020) e o rendimento em condições de campo (BARROS et al., 2019). O benefício do Si na produção de clorofila está associado à formação de uma camada dupla de sílica abaixo da cutícula epidérmica, melhorando a interceptação da luz solar e aumentando a fotossíntese (RAVEN, 1983).

A pulverização foliar de Si durante o estágio reprodutivo do algodão pode aumentar a concentração de Si nas fibras, afetando sua formação e favorecendo características de qualidade; no entanto, esses efeitos ainda são

desconhecidos. Isso é relevante porque as características tecnológicas da fibra de algodão, como teor de fibras curtas, comprimento, resistência à tração e micronaire, determinam sua qualidade e valor econômico no mercado (SOUZA JUNIOR, 2022). O Si tem ainda uma relação importante com a formação das fibras de algodão, desempenhando um papel importante devido à sua alta concentração durante a expansão das fibras, aproximadamente nos dias 1 a 21 após a antese (BOYLSTON, 1988).

No algodão estudos indicam efeitos benéficos do Si aplicado via radicular, como o aumento do teor de clorofila (FAROOQ et al., 2013). A aplicação foliar de Si também mostrou benefícios, aumentando a eficiência quântica do fotossistema II e diminuindo a fluorescência inicial e máxima (SOUZA FERRAZ et al., 2017). O Si tem um papel benéfico na mitigação de problemas nutricionais causados pela deficiência de B em plantas de algodão, especificamente, a aplicação foliar de Si ajuda a aliviar os efeitos negativos dessa deficiência, favorecendo o acúmulo de Si na parte aérea e a produção de massa seca da parte aérea, além de favorecer a produção de clorofila *a* e clorofila *b* (SOUZA JÚNIOR et al., 2019).

A aplicação foliar de Si associada ao AS no algodão favorece as variáveis fisiológicas, aumentando a fotossíntese, a condutância estomática e a eficiência do uso da água, refletindo no aumento da produtividade (BARROS; PRADO, 2019). Tendo em vista os benefícios da aplicação foliar do Si associada ao AS no algodão, torna-se relevante investigar a interação entre B, Si e AS. Entender como esses elementos podem atuar sinergicamente pode

proporcionar novas estratégias para otimizar a nutrição e a resistência das plantas, especialmente em condições de deficiência de boro.

2.4 Interação ASxBXSi

O B, o Si e o AS têm atraído a atenção da comunidade científica devido aos seus efeitos fisiológicos no algodão. Estudos com esses elementos são importantes para determinar seu impacto nas diversas fases do ciclo de vida da planta, desde o estabelecimento inicial até a produção de fibra de alta qualidade (AHMAD et al., 2019).

Os efeitos fisiológicos da aplicação individual e combinada de B, Si e AS no algodoeiro vem sendo estudados com foco particular em seu impacto nos pigmentos de clorofila e carotenóides (RAITER, 2023). Esses pigmentos são importantes para o processo de fotossíntese e desenvolvimento geral da planta, afetando fatores como produção de energia e capacidade de resposta às condições ambientais (SMITH et al., 2019).

A utilização e estudo do AS tem sido amplamente realizada devido à sua função de proteger as plantas de estresses bióticos e abióticos. Embora ainda sejam poucos os estudos na literatura sobre os efeitos do AS no algodoeiro e sua correlação com os pigmentos foliares, pesquisas em outras culturas[W81], revelaram que ele tem o potencial de promover o aumento na síntese de clorofilas e na atividade fotossintética (SANTOS; OLIVEIRA; LUMBRERAS, 2020).

Existem poucos relatos na literatura sobre a utilização da combinação de B, Si e AS no algodão. Barros et al. (2019) utilizando aplicação combinada de Si e AS no algodão observaram uma relação sinérgica entre esses elementos,

fornecendo um suporte maior para o crescimento, desenvolvimento e funções metabólicas.

Sabe-se que o Si e o B são benéficos quando aplicados juntos, aumentando a eficiência do uso de B, além de melhorar a produção e a qualidade da fibra do algodão (SOUZA JUNIOR, 2019). No entanto, os efeitos da adição do AS nesta combinação ainda não são totalmente conhecidos no algodoeiro. Supõe-se que o AS pode desempenhar um papel importante na regulação dos processos fisiológicos no algodoeiro, potencializando os benefícios do Si e B. Portanto, a investigação dos efeitos combinados de Si, B e AS se mostra relevante, a fim de se entender melhor como essa interação sinérgica pode influenciar a produtividade e a qualidade do algodão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de origem dos dados

O estudo foi conduzido na Fundação Chapadão, situada em Chapadão do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul, B, nas coordenadas 18°41'33" S e 52°40'45" W, durante a safra 2022/2023, utilizando a cultivar de algodão de ciclo precoce FM 906 GLT. A semeadura foi efetuada em dezembro de 2022. O clima da região é classificado como tropical úmido, com verões chuvosos e invernos secos.

As temperaturas máximas, mínimas, médias e pluviosidade foram coletadas todos os dias durante as duas safras. A temperatura média do ano de 2022 foi de 18,9 °C, com médias máximas de 19,6 °C e mínimas de 18,3 °C. No ano de 2023, a temperatura média foi de 22,5 °C, com médias máximas de 23,2 °C e mínimas de 21,8 °C. A precipitação média do ano de 2022 foi de 11,22 mm e no ano de 2023 foi de 22,86 mm.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS et al., 2018). Amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm antes do início do experimento, e a fertilidade foi avaliada por meio de análise química (Raij et al. 2001). Os resultados da análise química do solo foram: pH (CaCl₂): 5,3; P (resina): 52,0 mg dm⁻³; matéria orgânica: 23 g dm⁻³; K: 113 mg dm⁻³; Ca: 2,7 cmol_c dm⁻³; Mg: 0,97 cmol_c dm⁻³; S: 7,8 mg dm⁻³; H+Al: 4,48 cmol_c dm⁻³; Al: 0,01 cmol_c dm⁻³; Cu: 1,50 mg dm⁻³; Fe: 32,2 mg dm⁻³; Mn: 22,2 mg dm⁻³; Zn: 9,75 mg dm⁻³; B: 0,03

mg dm⁻³. É importante notar que o teor de B no solo (0,03 mg dm⁻³) é baixo para o algodão (AHMED et al., 2013; ZHAO et al., 2003; ATIQUE-UR-REHMA et al., 2020); (MU Extension, 2023). Para o preparo do solo, foram realizadas gradagem e aração. A fertilização foi realizada antes do plantio utilizando 250 kg/ha de fosfato monoamônico, correspondendo a 22,5 kg de nitrogênio e 120,0 kg de pentóxido de fósforo.

Após a emergência das plantas, inicialmente, foram aplicados 175 kg ha⁻¹ de potássio (K) e nitrogênio (N). Subsequentemente, foram aplicados Transorb (2,5L), Belt (80ml) e Mostiplan (0,2L) para controle de pragas e doenças. No estágio fenológico V4, foi feita uma aplicação de Liberty, óleo mineral e Transorb para controle de plantas daninhas. Posteriormente, foi realizada outra aplicação de ureia na dose de 90 kg ha⁻¹. Foram realizadas aplicações de Malation + Engeo, seguidas de aplicação de Malation isolado com intervalo de 6 dias, visando controle de pragas. Foi utilizado regulador de crescimento (50ml ha⁻¹), seguido de nova aplicação de ureia (90 kg ha⁻¹) após 2 dias.

Para o controle de plantas daninhas foi aplicado 1,5L de Liberty, 2L de Transorb e Áureo; fungicidas, seis aplicações incluindo Orkestra, Ochima, Previnil, Mees, Audaz e Fox xpro. Para controle de ácaro foi utilizado Priori top e Acetamiprido; inseticidas, treze aplicações incluindo Sperto, Malation, Marshal, Curbix, Taura e Polo. Além das aplicações, foram realizadas duas aplicações adicionais de reguladores de crescimento e atividades de capina e roçada para o controle de plantas invasoras e manutenção da área cultivada

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com 7 tratamentos: água (controle); B; Si; AS; AS + B; AS + Si; AS + B + Si, todos os tratamentos foram aplicados via foliar, com 4 repetições, totalizando 32 parcelas. Cada parcela foi constituída por 4 linhas de 5 metros de comprimento espaçadas por 0,90 metros, sendo a área útil composta pelas 3 linhas centrais com 3 metros de comprimento, totalizando 8,1 m².

Foi utilizado ácido bórico, silicato de potássio (10% de Si) e ácido salicílico P.A. como fonte de B, Si e AS, respectivamente. As concentrações dos elementos foram definidas a partir do teste de polimerização, sendo aplicados um total de 1,5 g L⁻¹ de B, 1,15 g L⁻¹ de Si e 210 mg L⁻¹ de AS, distribuídos ao longo de quatro aplicações foliares. O teste de polimerização foi empregado para avaliar a solubilidade e estabilidade desses elementos em solução, garantindo que permanecessem disponíveis e eficazes para absorção pelas plantas. Esse teste é fundamental para evitar a formação de compostos insolúveis que possam reduzir a eficiência dos nutrientes aplicados. Além disso, foi realizada a aplicação de potássio para equilibrar o nutriente entre os tratamentos que não receberam o silicato de potássio.

O tratamento controle consistiu apenas na aplicação de água. No tratamento com boro, foi preparada uma solução contendo 1,5 g/L de B na forma de ácido bórico, e o pH da solução foi ajustado entre 7,5 e 8,5 para garantir a dissolução completa. Foram adicionados 0,95 g/L de potássio para equilibrar os nutrientes. A mistura final de aplicação foi composta por 36 mL dessa solução de B mais 0,95 g de K por litro de calda. Para o tratamento com

silício, foi utilizada uma solução contendo 1,15 g/L de Si, proveniente de silicato de potássio estabilizado com sorbitol, juntamente com 113,85 g/L de K₂O. Nesse caso, 10 mL dessa solução foram usados por litro de calda.

No tratamento com ácido salicílico, a concentração aplicada foi de 210 mg/L de AS, e o pH da solução foi ajustado acima de 11 com NaOH (1 M) para facilitar a dissolução. No tratamento AS + B, após dissolver o AS, o pH foi reduzido para 9, e a solução com B (36 mL) e 0,95 g de K foram adicionados por litro de calda. No tratamento AS + Si (T6), após a dissolução do AS, 10 mL da solução silicatada foram adicionados por litro de calda.

O tratamento AS + B + Si foi composto por uma solução com 250 mg/L de AS, 1,5 g/L de B (ácido bórico) e 1,15 g/L de Si (silicato de potássio estabilizado com sorbitol). Após a dissolução do AS, o pH foi ajustado para 9, e a mistura de aplicação incluiu 36 mL da solução de B e 10 mL da solução de Si por litro de calda. A ordem de adição das soluções foi cuidadosamente seguida em todos os tratamentos para evitar a formação de precipitados.

O pH das soluções foi medido antes da pulverização foliar, com valores de 7,1; 8,5; 10,9 e 11 para água, B, Si e AS, respectivamente. Quatro aplicações foliares foram realizadas, começando no estágio reprodutivo B1 (um botão floral no primeiro ramo reprodutivo), com intervalos de 7 a 11 dias, dependendo das condições climáticas. A aplicação foi feita com pulverizador costal pressurizado Herbicat CO₂, equipado com barra de pulverização e 6 pontas espaçadas de 50 cm, reguladas para vazão de 200 L ha⁻¹. As condições climáticas foram verificadas durante a aplicação e apresentaram:

temperatura < 26 °C, umidade relativa > 60% e velocidade do vento < 8 km/h, sendo estas condições favoráveis para aplicação foliar

3.2.1 Taxa fotossintética

Aos 11 dias após a quarta aplicação foliar dos tratamentos, os teores de pigmentos foram realizados na quinta folha completamente expandida as medições de fotossíntese, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂, eficiência do uso da água e eficiência de carboxilação instantânea foram realizadas utilizando um analisador de gás infravermelho portátil, modelo LI-6400XT (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas em folhas completamente expandidas e saudáveis, em condições de saturação de luz (aproximadamente igual a, 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de PAR) e concentração de CO₂ atmosférico (aproximadamente 400 ppm). A temperatura da câmara foi mantida em 25°C, e a umidade relativa foi ajustada para permanecer em torno de 60%.

As taxas de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs) e transpiração (E) foram obtidas diretamente do analisador de gás infravermelho. As leituras foram realizadas após o equilíbrio do sistema, quando a taxa de fotossíntese estabilizou. Para cada planta, três medições foram realizadas em diferentes folhas para garantir a reprodutibilidade dos dados.

A concentração interna de CO₂ (Ci) foi calculada automaticamente pelo equipamento, baseada na diferença entre a concentração de CO₂ no ar fornecido à câmara e o ar que saiu da câmara após a interação com a folha.

A eficiência do uso da água (WUE) foi calculada pela razão entre a taxa de fotossíntese líquida (A) e a taxa de transpiração (E), ou seja, $WUE=A/E$.

A eficiência de carboxilação instantânea (E_i) foi calculada pela razão entre a taxa de fotossíntese líquida (A) e a concentração interna de CO_2 (C_i), ou seja, $E_i=A/C_i$.

3.2.2 Teor de Boro

O teor de B foi determinado através de digestão via seca das amostras em um forno mufla a 400 °C, seguida por reação colorimétrica com azometina-H e leitura espectrofotométrica, conforme descrito por Bataglia et al. (1978).

3.2.3 Teor de Silício

O teor de silício foi determinado utilizando-se a extração do elemento com uma solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio, conforme a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010). A leitura foi realizada em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm, de acordo com as recomendações de Korndörfer et al. (2004). O acúmulo de B e Si foi calculado multiplicando as respectivas concentrações dos elementos na parte aérea pela matéria seca da parte aérea.

3.3 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (teste F) e, quando significativos, os dados qualitativos foram comparados pelo teste de

Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no software Sisvar (FERREIRA, 2014), e os gráficos foram elaborados no Python.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teor de boro e silício em plantas de algodão

O baixo teor de B no solo ($0,03 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme identificado pela análise química, resultou em deficiência deste micronutriente nas plantas, com menores concentrações de B observadas nos tratamentos sem aplicação do micronutriente em ambas as safras (Figura 1a, b).

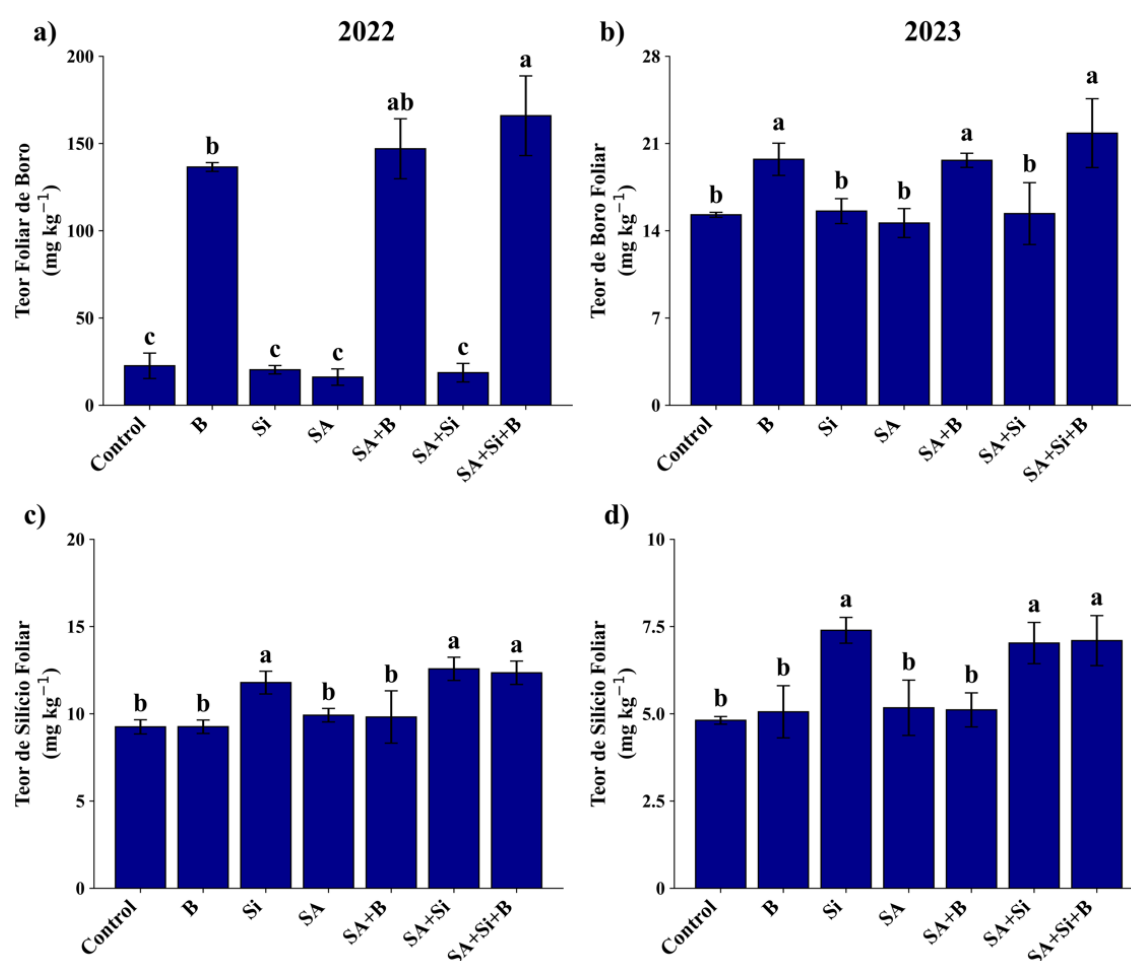


Figura 1. Concentração de B nas folhas (a, b), e concentração de Si nas folhas (c, d) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B e diferentes tratamentos aplicados via foliar: controle (sem aplicação), boro (B), silício (Si), ácido salicílico (SA), ácido salicílico + boro (SA+B), ácido salicílico + silício (SA+Si) e ácido salicílico + boro + silício (SA+B+Si). Letras diferente indicam diferença estatística seguindo o teste de tukey (5% de probabilidade).

Na safra 2022 e 2023, a aplicação foliar de B foi eficiente em incrementar o teor foliar de B nas folhas de plantas de algodão (Figura 1a, b). Na safra 2022, a aplicação associada de AS+Si+B resultou em um efeito sinérgico, com maior incremento do teor foliar de B, comparado à aplicação isolada de B, sem apresentar diferença da aplicação associada AS+B (Figura 1a). Na safra 2023 a aplicação isolada de B ou associada de AS+B e AS+Si+B não apresentaram diferença entre si, sendo estes tratamentos maiores em comparação aos tratamentos sem B. Esse aumento na concentração foliar de B pode ser atribuído à capacidade do AS de modular a absorção de nutrientes e melhorar a eficiência fisiológica das plantas, conforme reportado por Ribeiro et al. (2012).

A aplicação foliar de Si, isolado ou associado (AS+Si, AS+Si+B) foi eficiente em incrementar o teor do elemento benéfico nas folhas do algodoeiro nas duas safras estudadas (2022 e 2023), sem apresentarem diferença entre si (Figura 2c, d).

4.2 Taxa fotossintética

A fotossíntese é um dos processos mais críticos para o crescimento e produtividade das plantas, diretamente influenciada pela disponibilidade de micronutrientes como o B. Com exceção do controle, que apresentou menor valor para taxa fotossintética, não houve diferença nas taxas de fotossíntese entre os tratamentos com B, Si, AS aplicados isolados ou associados (Figura 2a).

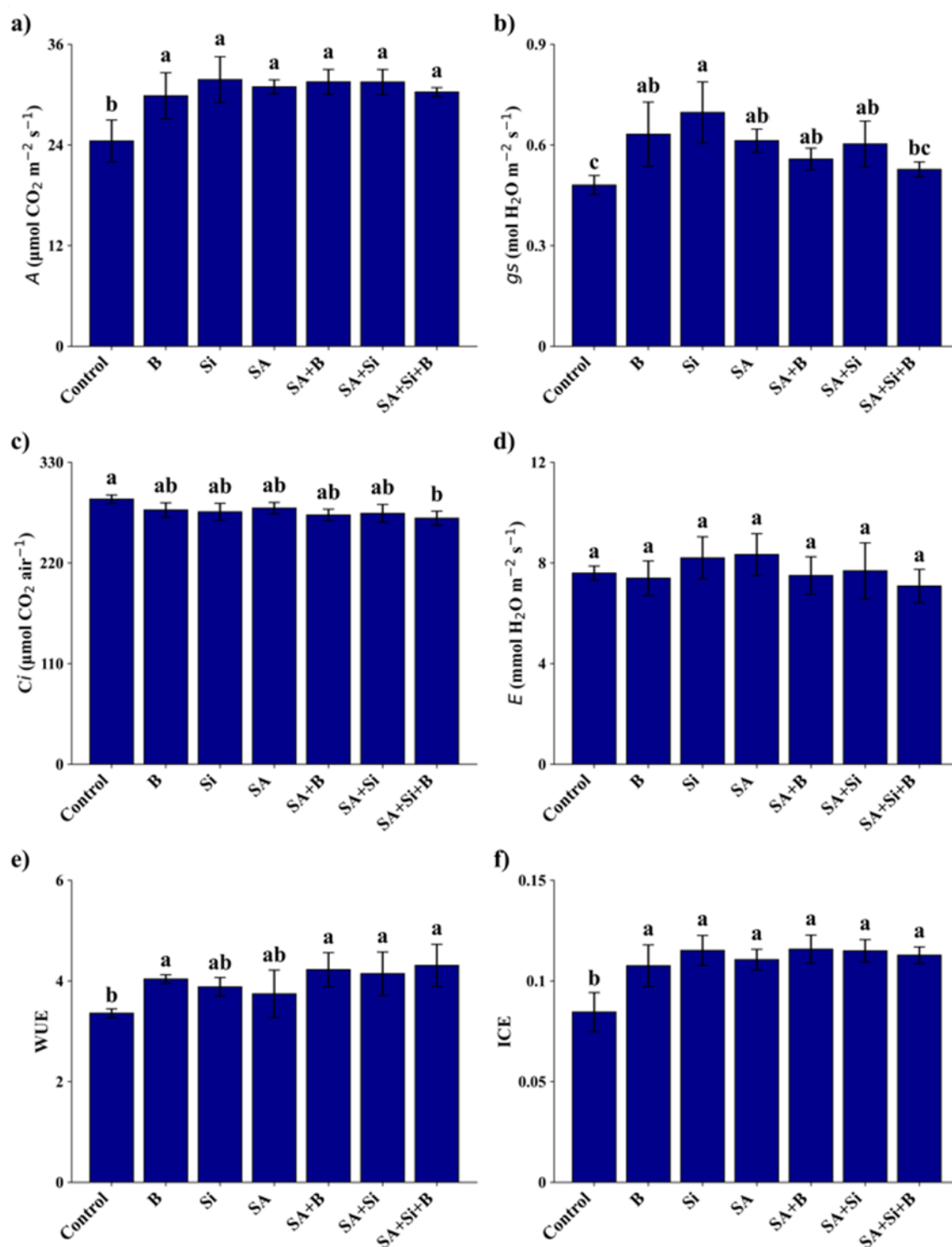


Figura 2. Fotossíntese (a), condutância estomática (b), concentração interna de CO_2 (c), transpiração (d), eficiência no uso de água (e), eficiência de carboxilação instantânea (f) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B e diferentes tratamentos aplicados via foliar: controle (sem aplicação), boro (B), silício (Si), ácido salicílico (SA), ácido salicílico + boro (SA+B), ácido salicílico + silício (SA+Si) e ácido salicílico + boro + silício (SA+B+Si). Letras diferente indicam diferença estatística seguindo o teste de tukey (5% de probabilidade).

A condutância estomática (Figura 2b) foi maior no tratamento com aplicação foliar isolada de Si, sem diferenciar dos tratamentos com SA (AS, AS+B e AS+Si) e do tratamento com B isolado. A menor condutância estomática foi observada no tratamento controle, a qual não diferiu do tratamento com AS+Si+B.

O aumento da condutância estomática pode ser atribuído à capacidade do B e do Si de manter o turgor celular e estabilizar as membranas celulares, o que favorece a abertura estomática e a absorção de CO₂ para a fotossíntese (EPSTEIN, 1999; MARSCHNER, 2012). O B é essencial para a integridade da parede celular e pode melhorar a eficiência na transferência de elétrons durante a fotossíntese (MARSCHNER, 2012). O Si, ao aumentar a resistência ao estresse hídrico e térmico, pode ter contribuído para uma fotossíntese mais eficiente (LIANG et al., 2007).

A concentração interna de CO₂ (Figura 2c), não apresentou diferença entre os tratamentos, com exceção do controle que foi maior apenas que o tratamento AS+Si+B.

A transpiração (Figura 2d) não apresentou diferença entre os tratamentos.

A eficiência no uso de água (WUE) (Figura 2e) foi maior no tratamento isolado B e nos tratamentos associados AS+B, AS+Si e AS+Si+B, sem diferir dos tratamentos isolados Si e AS. O menor valor para a WUE foi observado

nas plantas do tratamento controle, as quais não diferiram dos tratamentos Si e AS.

O Si, por reforçar as paredes celulares e melhorar a retenção de água (EPSTEIN, 1999), quando combinado com o AS pode ter ajudado as plantas a manterem um equilíbrio hídrico mais eficiente sob condições de estresse (RIBEIRO et al., 2012).

As plantas do tratamento controle apresentaram uma eficiência de carboxilação instantânea (ICE) menor em comparação aos demais tratamentos, que não diferiram entre si. Esse aumento na eficiência de carboxilação pode ser atribuído ao papel do B e do Si na otimização dos processos fisiológicos das plantas, melhorando a conversão de CO₂ em biomassa (GUPTA et al., 2017; MARSCHNER, 2012). O Si, ao mitigar o estresse oxidativo e melhorar a regulação estomática, também desempenha um papel importante nesse aumento de eficiência (LIANG et al., 2007; EPSTEIN, 1999).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam que a aplicação de B, AS e Si, tanto isoladamente quanto em combinação, contribuiu para melhorias nos aspectos nutricionais e fisiológicos das plantas de algodão, especialmente no aumento das concentrações de B e Si nas folhas, refletindo o papel crucial desses elementos na estabilidade das paredes celulares e na resistência a estresses. Embora a fotossíntese e a eficiência no uso da água (WUE) tenham se mantido estáveis entre a maioria dos tratamentos, o controle se destacou com resultados inferiores, reforçando a importância dos tratamentos aplicados para o desempenho fisiológico das plantas. Além disso, a eficiência de carboxilação instantânea foi maior nos tratamentos com B, Si e AS, indicando uma maior conversão de CO_2 em biomassa, fundamental para o crescimento da cultura. Esses achados confirmam a relevância da aplicação integrada na otimização da qualidade e produtividade do algodão, promovendo um manejo mais eficiente e sustentável da cultura.

6. LITERATURA CITADA

AAMER, M.; CHATTHA, M.U.; HASSAN, M.U.; AHMED, H.A.I.; HAIYING, T.; RASHEED, A.; GUOQIN, H.; SHAHZAD, B. Regulation of photosynthesis by salicylic acid under optimal and suboptimal conditions. *In Managing Plant Stress Using Salicylic Acid: Physiological and Molecular Aspects*. 1 ed., John Wiley & Sons: New Jersey, 2022, 258-269 pp.

ADATIA, M. H.; BESFORD, R. T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, v. 58, p. 343-51, 1986.

AHMAD, S.; HUSSAINT, N.; AHMED, N.; ZAKA, M. S. Influence of boron nutrition on physiological parameters and productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Crop. **Pakistan Journal Botanic**, v. 51, n. 2, p. 401-408, 2019.

AHMED, A. H. H.; HARB, E. M.; HIGAZY, M. A.; MORGAN, S. H. Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions. **International Journal of Agricultural Research**, v. 3, p. 1-26, 2008.

AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ALI, M. A. Boron requirement of irrigated cotton in a typic haplocambid for optimum productivity and seed composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, n. 8, p.1293–309, 2013.

ANDERSON, O. E.; BOSWELL, F. C. Boron and manganese effects on cotton yield, lint quality, and earliness of harvest. **Agronomy Journal**, v. 60, n. 5, p. 488-493, 1968.

ASADA, K. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 601-639, 1999.

BAGAUTDINOVA, Z. Z.; OMELYANCHUK, N.; TYAPKIN, A. V.; KOVRIZHNYKH, V. V.; LAVREKHA, V. V.; ZEMLYANSKAYA, E. V. Salicylic acid in root growth and development. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, p. 2223-2228, 2022

BARROS, T.C.; PRADO, R.M.; ROQUE, C.G.; ARF, M.V.; VILELA, R.G. Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, p. 458-465, 2019.

BELLALLOUI, N.; TURLEY, R. B.; STETINA, S. R. Water stress and foliar boron application altered cell wall boron and seed nutrition in near-isogenic cotton lines expressing fuzzy and fuzzless seed phenotypes. **PLoS One**, v. 10, 2015.

BOGIANI, J. C.; ROSOLEM, C. A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1499-1506, 2012.

BOGIANI, J. C.; SAMPAIO, T. F.; ABREU JUNIOR, C. H.; ROSOLEM, C. A. Boron uptake and translocation in some cotton cultivars. **Plant Soil**, v. 375, p. 241–253, 2014.

BORZOUYI, Z.; ARMIN, M.; MARVI, H. The effect of time and type of stress moderators on yield and yield components of cotton on conventional and double-cropping systems under saline conditions. **Journal of Cotton Research**, v. 4, p. 1-15, 2021.

BROWN, P.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M.; BASSIL, E.S.. Boron in plant biology. **Plant Biology**, v.4, p.205-223, 2002.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; et al. Boron deficiency increases putrescine levels in tobacco and cucumber plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 8, p. 877-883, 2004.

CARVALHO, M. da C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no cerrado do**

Brasil. 2. ed. rev. ampl. Aparecida de Goiânia: Mundial Gráfica, 2011. p. 677-752.

CASTRO, J. L. S. **A toxicidade do ácido ascórbico em plantas de arroz silenciadas nas APXs cloroplásticas induz estresse oxidativo não dependente da fotossíntese.** 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos Safra 2022/23.** 7º Levantamento. v. 9, abr. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 10 ago. de 2024.

CORDEIRO, L. F. S.; MALENOWTCH, J. V. C.; CORDEIRO, C. F. S.; DETONI FILHO, J. A. C.; FURLANI JÚNIOR, E. F.; FERRARI, S. Improving cotton yield and fiber quality in different tropical soils with boron fertilization. **Agronomy Journal**, v. 116, p. 1540–1550, 2024.

CRUZ-ORTEGA, R; AYALA-CORDERO, G; ANAYA, A L. Allelochemical stress produced by the aqueous leachate of *Callicarpa acuminata*: effects on roots of bean, maize, and tomato. **Physiologia Plantarum**, v. 116, n. 1, p. 20-27, 2002.

DAS, K; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science**, v. 2, p. 53, 2014.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. **Trends in Plant Science**, v. 1, n. 1, p. 21-26, 1996.

DE SOUZA JUNIOR, J. P.; PRADO, R. M.; SARAH, M. M. S.; FELISBERTO, G. Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 182, n. 5, p. 805-814, 2019.

DE SOUZA JÚNIOR, J. P. **Relação boro e silício em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de boro**. 2021. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2021.

DE SOUZA JÚNIOR, J. P. PRADO, R. M.; DINIZ, J. F.; GUEDES, V. H. F. Foliar application of innovative sources of silicon in soybean, cotton, and maize. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3200-3211, 2022.

DE SOUZA JÚNIOR, J. P., PRADO, R. M., CAMPOS, C. N. S., OLIVEIRA, D. F., CAZETTA, J. O.; DETONI, J. A. Silicon foliar spraying in the reproductive stage of cotton plays an equivalent role to boron in increasing yield, and combined boron-silicon application, without polymerization, increases fiber quality. **Crops and Products**, v. 182, 2022.

DE SOUZA JUNIOR, J. P. PRADO, R. M., CAMPOS, C. N. S. Silicon modulate the non-enzymatic antioxidant defence system and oxidative stress in a similar way as boron in boron-deficient cotton flowers. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 197, p. 107594, 2023.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EMBRAPA. **Cultura do Algodão no Cerrado - Sistemas de Produção**. Brasília: Embrapa, 2023. 71p.

EPSTEIN, E. Silicon. **Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.

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

FANG, K. F.; DU, B. S.; ZHANG, Q.; XING, Y.; CAO, Q. Q.; QIN, L. Boron deficiency alters cytosolic Ca^{2+} concentration and affects the cell wall components of pollen tubes in *Malus domestica*. **Plant Biology**, v. 21, n. 2, p. 343–351, 2019.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Micronutrient application through seed treatments - A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 12, n. 1, p. 125-142, 2013.

FREEMAN, H. A.; MOORE, J. L. The technology of cotton: Processing, quality and applications. **Textile Research Journal**, v. 23, n. 1, p. 345-350, 1953.

FRYZOVA, Radka et al. Oxidative stress and heavy metals in plants. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 245, p. 129-156, 2018.

FURLANI, P. R.; et al. Effects of boron and silicon on cotton growth under low boron conditions. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 447-451, 2003.

GILL, Sarvajeet Singh; TUTEJA, Narendra. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GNIAZDOWSKA, A et al. Allelopathic compounds as oxidative stress agents: YES or NO. *Reactive Oxygen and Nitrogen Species Signaling and Communication in Plants*, p. 155-176, 2015.

GONG, H. J.; et al. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, n. 2, p. 313-321, 2005.

GUPTA, N.; et al. Role of boron in plant growth: A review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 1, p. 1959-1973, 2017.

HEIDARI, M.; MORADI, M.; ARMIN, M.; AMERIAN, M.R. Effects of foliar application of salicylic acid and calcium chloride on yield, yield components and

some physiological parameters in cotton. **Sustainability in Food and Agriculture**, v. 3, p. 28-32, 2022.

HU, Y.; ZHI, L.; LI, P.; HANCOCK, J.T.; HU, X. The role of Salicylic acid signal in plant growth, development and abiotic stress. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 91, n. 12, p. 2591-2605, 2022.

JAYAKANNAN, Maheswari et al. Salicylic acid in plant salinity stress signalling and tolerance. **Plant Growth Regulation**, v. 76, p. 25-40, 2015.

KHAN, M. A. et al. World cotton production and consumption: an overview. In: AHMAD, S.; HASANUZZAMAN, M. (Ed.). **Cotton Production and Uses**. Singapore: Springer, 2020. p. 1–7.

KIM, Y.-H. et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Front Plant Sci.**, v. 8, p. 510, 2017.

KOHLI, S. K.; KAUR, H.; KHANNA, K.; HANDA, N.; BHARDWAJ, R.; RINKLEBE, J.; AHMAD, P. Boron in plants: Uptake, deficiency and biological potential. **Plant Growth Regulation**, v. 100, p. 267–282, 2023.

KORNDÖRFER, G.H., PEREIRA, H.S., NOLLA, A., 2004. **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. 2nd ed. UFU, Uberlândia.

KRASKA, J.E., BREITENBECK, G. A.. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. Commun. **Soil Sci. Plant Anal.** v. 41, p. 2075–2085, 2010.

LI, M.; ZHAO, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, W.; ZHOU, J.; XU, F.; LIU, X. Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 20-44, 2017.

MA, J. F.; et al. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 9, n. 5, p. 231-233, 2004.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 65, n. 2, p. 3049-3057, 2008.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MEHRAN, M.; ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; SHAKIR, M. S. Growth, yield and fiber quality characteristics of Bt and non-Bt cotton cultivars in response to boron nutrition. **Journal of Cotton Research**, v. 6, n. 1, p. 2-12, 2023.

MELOTTO, M.; UNDERWOOD, W.; KOCZAN, J.; NOMURA, K.; HE, S.Y. Plant stomata function in innate immunity against bacterial invasion. **Cell**, v. 126, p. 969-980, 2006.

MILLER, Gad et al. Double mutants deficient in cytosolic and thylakoid ascorbate peroxidase reveal a complex mode of interaction between reactive oxygen species, plant development, and response to abiotic stresses. **Plant Physiology**, v. 144, n. 4, p. 1777-1785, 2007.

MILLER, Gad; SHULAEV, Vladimir; MITTLER, Ron. Reactive oxygen signaling and abiotic stress. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 3, p. 481-489, 2008.

MOORE, S.; STEIN, W. H. Photometric ninhydrin method for use in the chromatography of amino acids. **Journal of Biological Chemistry**, v. 176, n. 1, p. 367-388, 1948.

MU EXTENSION. **Sulfur and Boron Fertilization on Cotton**. 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>. Acesso em: 10 ago. de 2023.

PEREIRA, G. L.; SIQUEIRA, J. Á.; SILVA, W. B.; CARDOSO, F. B.; NESI, A. N.; ARAÚJO, W. L. Boron: More than an essential element for land plants? **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-10, 2021.

PORRA, R. J.; THOMPSON, W. A.; KRIEDEMANN, P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, v. 975, n. 3, p. 384-394, 1989.

RAKHMATOVA, N.; IMAMKHODJAYEVA, A.; UZBEKOV, V.; UBAYDULLAEVA, K.; ZUPAROVA, D. Comparative analysis of the content of salicylic acid in biotechnological cotton genotypes under some kinds of abiotic stress. *Scientif Horizons*, v. 26, n. 1, 2023.

RIBEIRO, S. M. R.; et al. Efeito do ácido salicílico no crescimento e na produção de substâncias de defesa em plantas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 7, n. 1, p. 40-52, 2012.

RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 6, n. 3, p. 268-272, 2003.

ROSOLEM, C.A. Problemas em nutrição mineral, calagem e adubação do algodoeiro. *Informações Agrônomicas*, n. 95, 2001. 17p.

SAFDAR, M. E.; QAMAR, R.; JAVED, A.; NADEEM, M. A. Combined Application of Boron and Zinc Improves Seed and Oil Yields and Oil Quality of Oilseed Rape (*Brassica napus L.*). *Agronomy*, v. 13, n. 8, p. 2020, 2023.

SHABANI, A.; et al. Boron alleviates the oxidative damage by enhancing the antioxidant system and the expression of pathogenesis-related genes in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 127, p. 203-210, 2018.

SOUZA FERRAZ, Renner Luciano de et al. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. *Semina: Ciências Agrárias*, p. 735-748, 2014.

SOUZA, G.M.; RIBEIRO, R.V.; SANTOS, M.G. Photosynthetic response and water use efficiency in sugarcane under different water availabilities. **Journal of Plant Physiology**, v. 226, p. 76-82, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 6th ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015.

TREVISOLI, E. D. V. G. **Purificação de eliciadores de defesa vegetal em soja e feijoeiro a partir de nematoides fitopatogênicos**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2016.

VASANTHI, N.; SALEENA, L. M.; RAJ, S.A. Silicon in day today life. **World Applied Sciences Journal**, v. 17, n. 11, p. 1425-1440, 2012.

VIEIRA, J. G. **Aplicação exógena de ácido salicílico em feijoeiro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2011.

VLOT, A.C.; DEMPSEY, D.M.A.; KLESSIG, D.F. Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. **Annual Review of Phytopathology**, v. 47, p. 177-206, 2009.

WARAICH, R. A.; AHMAD, R.; SAIFULLAH; ASHRAF, M. Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 764-777, 2011.

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, n. 3, p. 508-514, 1954.

ZHANG, Y.; LI, X. Salicylic acid: biosynthesis, perception, and contributions to plant immunity. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 50, p. 29-36, 2019.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M. Cotton carbon exchange, nonstructural carbohydrates, and boron distribution in tissues during development of boron deficiency. **Field Crops Research**, v. 78, n. 1, p. 75–87, 2002.