

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

PRISCILLA MARIA DA SILVA LIBER LOPES

**APLICAÇÃO DE BORO E SILÍCIO AUMENTA A
PRODUTIVIDADE E A QUALIDADE DE FIBRAS DO ALGODOEIRO**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

PRISCILLA MARIA DA SILVA LIBER LOPES

**APLICAÇÃO DE BORO E SILÍCIO AUMENTA A
PRODUTIVIDADE E A QUALIDADE DE FIBRAS DO ALGODOEIRO**

Orientador: Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2022



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Priscilla Maria da Silva Liber Lopes

ORIENTADOR: Dr. Cid Naudi Silva Campos

TÍTULO: Aplicação de Boro e Silício aumenta a produtividade e a qualidade de fibras do algodoeiro

AVALIADORES:

Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Prof. Dr. Paulo Eduardo Teodoro

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto

Chapadão do Sul, 04 de fevereiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por Cid Naudi Silva Campos, Professor do Magisterio Superior, em 04/02/2022, às 10:01, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Paulo Eduardo Teodoro, Professor do Magisterio Superior, em 04/02/2022, às 10:05, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Rafael Ferreira Barreto, Professor do Magisterio Superior - Substituto, em 04/02/2022, às 10:27, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3045547 e o código CRC 366122F4.

DEDICATÓRIA

À minha avó Amélia, que não teve o privilégio da alfabetização e letramento para escrever suas histórias, mas cuja fibra moral permitiu que eu chegasse a este momento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, sabedoria divina que rege o universo, por me abençoar com saúde, inteligência e infinitas possibilidades, permitindo que eu realizasse este objetivo.

À minha mãe Neuza Teotônio da Silva e meu padrasto Celso de Gregori, pelo exemplo de honestidade que sempre foram, pelo cuidado, carinho, amor e incentivo à educação que sempre dedicaram a mim e às minhas irmãs, permitindo que eu tivesse condições de estudar e ser independente.

Às minhas irmãs Ana Cristina Silva de Gregori e Gabriella Silva de Gregori, por serem também minhas amigas e pelo apoio aos meus sonhos. Cada passo que eu dou é para inspirar vocês a irem mais longe.

Ao meu orientador Cid Naudi Silva Campos, por ser um excelente profissional com o qual aprendo coisas valiosas todos os dias, e um ser humano generoso que me apoiou nessa jornada e acreditou em mim, me fazendo persistir.

Às minhas antigas companheiras de laboratório e mestres Dágila Melo Rodrigues e Ana Carolina Sales, por terem sido inspiração para mim enquanto mulheres batalhadoras, inteligentes, esforçadas, humildes e amigas. O fardo ficou mais leve dividido com vocês.

Ao meu melhor amigo Lucas da Silva Ribeiro, por ter sido a pessoa que mais torceu por mim, me ajudou, me motivou e segue me apoiando em tudo que planejo.

À minha psicóloga Jackeline Martini Alves Pinheiro, por ter cuidado da minha saúde mental com muita dedicação, carinho e profissionalismo, me ajudando a discernir os melhores caminhos e decisões, e viver com menos ansiedade.

Aos membros do GECENP (Grupo de Estudos do Cerrado em Nutrição de Plantas) pela parceria e trabalho ofertados durante os experimentos, sem o qual não teria concluído essa pesquisa.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e a todos os professores do programa de pós-graduação em Agronomia que acrescentaram em minha formação, em especial aos professores Cassiano Garcia Roque, Rita de Cássia Félix Alvarez, Paulo Eduardo Teodoro e Rafael Ferreira Barreto pelas preciosas contribuições a este trabalho.

Ao meu amigo Maik Oliveira Silva pelo apoio moral nos estudos e ajuda com a tecnologia que foram muito importantes na fase final deste projeto.

Enfim, agradeço a todos que me incentivaram e participaram de alguma forma da execução desse trabalho, contribuindo para meu crescimento pessoal e profissional.

EPÍGRAFE

“Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você.”

Carl Sagan

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Médias de temperaturas máxima (T Max) e mínima (T Min) e precipitação pluvial em Chapadão do Sul -MS, Brasil, durante o período experimental. Fonte: Ampasul.....14

Figura 2. Teor de boro em função das doses de boro (a), teor de boro em função da ausência e da presença de Si (b), teor de silício em função das doses de boro (c), teor de silício em função da ausência e da presença de Si (d). B: boro; Si: silício; BxSi: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P<0,05$). As barras representam o erro padrão médio.18

Figura 3. Produtividade em função das doses de boro (a), produtividade em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P<0,05$). As barras representam o erro padrão médio.19

Figura 4. Mic em função das doses de boro (a), Mic em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P<0,05$). As barras representam o erro padrão médio.21

Figura 5. Str em função das doses de boro (a), Str em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P<0,05$). As mesmas letras indicam que as médias não diferem pelo teste F. As barras representam o erro padrão médio.21

Figura 6. SFI em função das doses de boro (a), SFI em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P<0,05$). As barras representam o erro padrão médio.22

Figura 7. Análise de variáveis canônicas para doses de B na presença (+Si) e ausência (-Si) da aplicação foliar de Si, para as variáveis teor de B (B), teor de Si (Si), produtividade (PROD), micronaire (MIC), comprimento da fibra (POL), resistência da fibra (STR), índice de fibras curtas (SFI) e alongamento da fibra (ELG%) no algodão.23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo da análise de variância para teor de B foliar (B), teor de Si foliar (Si), produtividade (Prod), índice micronaire (Mic), comprimento da fibra (Pol), resistência da fibra (Str), índice de fibras curtas (SFI) e alongamento da fibra (Elg) na cultura do algodão em resposta às doses de boro, na ausência e presença de silício.	17
--	----

APLICAÇÃO DE BORO E SILÍCIO AUMENTA A PRODUTIVIDADE E A QUALIDADE DE FIBRAS DO ALGODOEIRO

RESUMO

A cultura do algodoeiro é mais suscetível à deficiência de boro (B), que causa baixo rendimento e perda de produtividade. A hipótese dessa pesquisa é que esse estresse pode ser contornado com adubação adequada e auxílio de aplicação de silício (Si). O objetivo deste estudo foi verificar os possíveis incrementos na produtividade e na qualidade das fibras do algodoeiro cultivado com o fornecimento de B via solo, associado à aplicação foliar de Si. O experimento foi desenvolvido com a cultura do algodão em condições de campo, no município de Chapadão do Sul – MS. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 3x2, sendo três doses de B: 0,0 kg ha⁻¹ (deficiência); 2,0 kg ha⁻¹ (dose recomendada) e 4,0 kg ha⁻¹ (excesso); na presença e na ausência de Si, com quatro repetições, totalizando 24 parcelas. Foi realizada análise foliar do teor de B e Si, avaliada a produtividade e a qualidade da fibra do algodão, sendo mensurados: o micronaire, o comprimento, a resistência à ruptura, índice de fibras curtas e o alongamento. A adubação boratada promoveu aumento na produtividade e na qualidade das fibras, aumentando o micronaire, diminuindo o índice de fibras curtas. A aplicação foliar de silício promoveu aumento do micronaire e da resistência dos fios ao rompimento. Ambos tiveram efeito isolado na cultura, visto que a interação BxSi não foi significativa para nenhum dos parâmetros analisados.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., elemento benéfico, micronaire, nutrição de plantas

APPLICATION OF BORON AND SILICON INCREASES THE YIELD AND QUALITY OF COTTON FIBERS

ABSTRACT

The cotton crop is more susceptible to the deficiency of B, causing low yield and loss of productivity, stress that can be overcome with adequate fertilization and aid of application of Si. The objective of this study was to verify the possible increments in the productivity and in the fiber quality of cotton cultivated with the supply of B via soil, associated with foliar application of Si. The experiment was carried out with cotton cultivation under field conditions, in the municipality of Chapadão do Sul - MS. The experimental design was in randomized blocks, in a 3x2 factorial scheme, with three doses of B: 0.0 kg ha⁻¹ (deficiency); 2.0 kg ha⁻¹ (recommended dose) and 4.0 kg ha⁻¹ (excess); in the presence and absence of Si, with four replications, totaling 24 plots. Leaf analysis of B and Si content was performed, productivity and quality of cotton fiber were evaluated, being measured: micronaire, length, breaking strength, short fiber index and elongation. It was observed that the borate fertilization promoted an increase in productivity and fiber quality, increasing the micronaire (Mic), and decreasing the short fiber index (SFI) and the foliar application of silicon promoted an increase of the micronaire (MIC) and in the resistance of the wires to breakage (Str). Both had an isolated effect on the culture, since the BxSi interaction was not significant for any of the analyzed parameters.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., beneficial element, micronaire, plant nutrition

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1 Localização e características da área experimental.....	13
2.2 Delineamento experimental e tratamentos	15
2.3 Manejo fitossanitário.....	16
2.4 Análises realizadas	16
2.4.1 Amostragem de folhas e análise do teor de B e Si	16
2.4.2 Produtividade de algodão em caroço.....	17
2.4.3 Avaliação da qualidade de fibra	17
2.5 Análise estatística	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4. CONCLUSÃO	25
5. REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

A fibra têxtil natural do algodoeiro (*Gossypium hirsutum*) é a mais consumida no mundo, com cerca de 27 milhões de toneladas métricas anuais (CHEN et al., 2007). Entretanto, a qualidade da fibra como resistência, comprimento, finura (“micronaire”) precisam constantemente ser melhoradas, especialmente quando empregadas nas tecnologias de fiação (TAN et al., 2018). Muitos fatores influenciam no rendimento e na qualidade de fibra, como os genes e seus efeitos fenotípicos (BAYTAR et al., 2018), características do ambiente de cultivo (ZHANG et al., 2017), condições de manejo como a irrigação (MASASI et al., 2019) e a fertilização (QAYYUM et al., 2020).

A deficiência de boro (B) é um problema comum em regiões produtoras de algodão, especialmente em solos tropicais, onde a disponibilidade de B é prejudicada devido ao baixo teor de matéria orgânica e argila, causando queda dos capulhos, diminuindo a produção e a qualidade das fibras (ATIQUE-UR-REHMAN et al., 2020). Em plantas deficientes de B, a formação dos feixes vasculares é prejudicada, diminuindo a condução de fotossintatos como carboidratos, proteínas e pectinas nos pecíolos do algodão (LI et al., 2017). Estudos demonstram que a nutrição boratada adequada eleva significativamente o crescimento, a retenção de capulhos e a produção do algodão, melhorando o desempenho das cultivares (WAHID et al., 2020).

O B é componente estrutural de membranas, participando da síntese de paredes como agente cimentante e alongamento celular. Atua na síntese da base nitrogenada uracil, que interfere diretamente da síntese do RNA e, conseqüentemente, na síntese de proteínas. Facilita o transporte de carboidratos ao formar o complexo borato-açúcar ionizável. A germinação do grão de pólen e desenvolvimento do tubo polínico é muito dependente do B. Dentre todas as culturas, o algodoeiro possui uma das maiores exigências de B, extraindo cerca de 130g t⁻¹ (PRADO, 2020). Observa-se que o número e peso de capulhos por planta aumenta e as características da qualidade da fibra, como o comprimento, finura da fibra e a resistência, são melhoradas após aplicação de B no solo (ATIQUE-UR-REHMAN et al., 2020).

Por outro lado, o silício (Si) é apontado em muitos estudos como um elemento benéfico capaz de trazer efeitos positivos ao cultivo de plantas, como resistência ao estresse biótico e abiótico, por meio de um efeito físico (deposição na parede celular) ou bioquímico (alterações metabólicas) (LUYCKX et al., 2017). No algodoeiro, a interação do Si com a planta melhora a resposta nutricional e os aspectos fisiológicos como fotossíntese, condutância estomática e

eficiência hídrica, influenciando na produtividade final das fibras (BARROS et al., 2019). Outros trabalhos demonstram que a interação entre Si e B no algodoeiro tem efeito mitigador em sintomas de deficiência e toxicidade de B (SOUZA JUNIOR et al., 2019), apresentando um potencial aumento de produtividade na cultura quando associados em doses adequadas.

Esses estudos são, portanto, essenciais, porque o cultivo do algodão em muitas regiões do mundo é realizado em ambientes com baixa disponibilidade de boro. O conhecimento sobre efeito da nutrição boratada aliada à aplicação de Si e seus efeitos sobre a qualidade das fibras será útil para o manejo nutricional do algodoeiro visando altas produtividades e melhoria das fibras.

Nesse cenário, surgem as hipóteses de que o B aplicado via solo promove melhoria na produtividade e na qualidade das fibras do algodoeiro; e, associado a esse efeito do B nas plantas de algodão, espera-se que a aplicação de Si via foliar na fase reprodutiva do algodoeiro possa ter efeito somatório, culminando no aumento da produtividade e, principalmente, incrementando a qualidade da fibra. O objetivo deste estudo foi verificar os possíveis incrementos na produtividade e na qualidade das fibras do algodoeiro cultivado com o fornecimento de B via solo, associado à aplicação foliar de Si.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e características da área experimental

O experimento foi desenvolvido com algodão cultivar FM 985 GLTP em condições de campo, a 820 metros de altitude, no município de Chapadão do Sul, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil.

O clima da região é do tipo tropical úmido (Aw), com estação chuvosa no verão e seca no inverno e precipitação média anual de 1850 mm. A temperatura anual oscila entre 13 e 28 °C (medidas diárias). Os dados de precipitação pluvial e médias de temperaturas (máxima e mínima) durante a realização do experimento encontram-se na Figura 1.

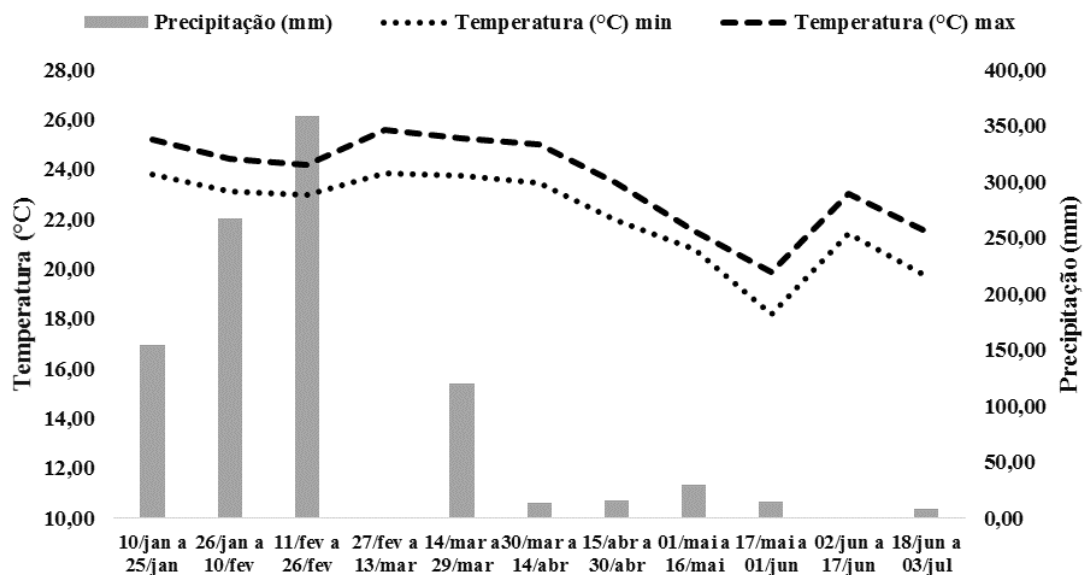


Figura 1. Médias de temperaturas máxima (T Max) e mínima (T Min) e precipitação pluvial em Chapadão do Sul -MS, Brasil, durante o período experimental. Fonte: ampasul.org.br

A precipitação total obtida durante o experimento foi de 983,2 mm, atendendo a faixa de necessidade hídrica da cultura que é de 500 a 1500 mm de precipitação pluvial anual e umidade relativa em torno de 60%. Em relação às exigências térmicas, temperatura mínima e máxima, as mesmas se encontraram dentro da faixa considerada ideal para cultura, em torno de 20 e 30°C (FREIRE, 2007).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS et al., 2018). Antes da instalação do experimento foi realizada amostragem do solo na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade e posteriormente realizou-se análise química do solo para fins de fertilidade, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2001), apresentando os seguintes resultados: pH (CaCl₂): 4,9; P(Res): 74,60 mg dm⁻³; matéria orgânica: 31,80 g dm⁻³; K: 133,00 mg dm⁻³; Ca: 3,20 cmol_c dm⁻³; Mg: 0,80 cmol_c dm⁻³; S: 25,50 mg dm⁻³; H + Al: 5,30 cmol_c dm⁻³; Al: 0,10 cmol_c; B: 0,30 mg dm⁻³; Cu: 1,20 mg dm⁻³; Fe: 47 mg dm⁻³; Mn: 17,30 mg dm⁻³ e Zn: 5,60 mg dm⁻³; CTC: 9,64 cmol_c dm⁻³; V (%): 45; e a seguinte composição granulométrica, segundo metodologia descrita por Donagema et al. (2011): 63,0% de argila, 29,5% de areia e 7,5% de silte. Destaca-se o teor de B no solo, classificado com baixo para o cultivo de algodão (SOUSA; LOBATO, 2004).

Em setembro de 2019, foi realizado o preparo da área com a correção do solo, sendo aplicados 1.500 kg ha⁻¹ de calcário e 700 kg ha⁻¹ de gesso agrícola, a lanço sem incorporação. Em janeiro foi realizada adubação pré-semeadura com 200 kg ha⁻¹ de KCl (00-00-60) a lanço.

O experimento foi semeado no dia 10 de janeiro de 2020 e realizada a adubação na linha com 270 kg ha⁻¹ de 11-44-00 + 3% de S; e de cobertura, realizada aos 25 dias após a emergência (DAE) com 200 kg ha⁻¹ de uréia (45-00-00) a lanço e aos 50 DAE com 350 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (20-00-00 + 24% de S) a lanço.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 3x2, sendo três doses de B: 0,0 kg ha⁻¹ (deficiência); 2,0 kg ha⁻¹ (dose recomendada) (SOUSA; LOBATO, 2004) e 4,0 kg ha⁻¹ (excesso); na presença (920 g de Si ha⁻¹, divididos em quatro aplicações) e ausência de Si, com quatro repetições, totalizando 24 parcelas. A fonte de B utilizada foi a ulexita (100 g kg⁻¹ de B e solubilidade de 950 g L⁻¹ de água) a fonte de Si foi o silicato de potássio estabilizado com sorbitol (SiKE - 115 g L⁻¹ de Si, 113,85 g L⁻¹ de K₂O, 100 mL L⁻¹ de sorbitol e pH 12,0). O K foi equilibrado entre os tratamentos, para tanto utilizou-se do KCl (60% K₂O), como fonte de K.

As parcelas foram constituídas de 4 linhas com 11 m espaçadas à 90 cm, totalizando 39,6 m² como área da parcela, a área útil utilizada para avaliações foi composta por duas linhas centrais com seis metros de comprimento, totalizando 10,8 m².

A aplicação do B via solo foi realizada em função dos tratamentos e em área total de cada parcela, de forma manual e uma única vez, em pré-emergência, utilizando gesso agrícola (CaSO₄. 2H₂O) apenas como enchimento na proporção de 500 kg ha⁻¹.

Foram realizadas quatro aplicações foliares de Si (230 g de Si ha⁻¹ por aplicação), de acordo com os tratamentos, iniciando no estágio reprodutivo B1 (um botão floral no primeiro ramo reprodutivo) com intervalos de 7 a 11 dias, variando devido às condições climáticas. A aplicação foi realizada com pulverizador de pressão de CO₂ Herbicat®, regulado para uma taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹ de calda, com pressão de serviço de 2 bares, sob uma barra de 4 bicos, espaçados 90 cm entre si. As condições meteorológicas no momento das aplicações foram verificadas e sempre estiveram <26°C; >60% e < 8 Km h⁻¹ a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, respectivamente, sendo favoráveis para aplicação foliar.

2.3 Manejo fitossanitário

O manejo fitossanitário da cultura foi realizado de acordo com recomendações técnicas. Para o controle das plantas daninhas, utilizou-se 3 L ha⁻¹ de Glifosato (588 g L⁻¹); e 500 mL ha⁻¹ de Tidiazuron (120 g L⁻¹). Os inseticidas utilizados foram 1,8 L ha⁻¹ de abamectina (18 g L⁻¹); 200 g ha⁻¹ de acetamiprido (200 g kg⁻¹); 1,8 L ha⁻¹ de carbosulfano (700 g L⁻¹); 1,5 L ha⁻¹ de espiromesifeno (240 g L⁻¹); 2,25 L ha⁻¹ de etiprole (200 g L⁻¹); 1 L ha⁻¹ de fipronil (250 g L⁻¹); 100 g ha⁻¹ de imidacloprido (700 g L⁻¹); 4,5 L ha⁻¹ de malationa (1000 g L⁻¹); 1,6 L ha⁻¹ de metomil (215 g L⁻¹); 150 mL ha⁻¹ de novaluron (100 g L⁻¹); 300 mL ha⁻¹ de piriproxifem (100 g L⁻¹); 500 g ha⁻¹ de tiodicarbe (800 g kg⁻¹); e 3 L ha⁻¹ da mistura beta-ciflurtrina (12,5 g L⁻¹) + imidacloprido (100 g L⁻¹). Além disso, foram aplicados reguladores de crescimento, de acordo com as recomendações técnicas de cada produto.

2.4 Análises realizadas

2.4.1 Amostragem de folhas e análise do teor de B e Si

Uma semana após a quarta aplicação foliar de Si, foi realizada amostragem de 10 folhas por parcela, considerando a quinta folha completamente expandida, a partir do ápice. As amostras foliares foram descontaminadas com uso de água, solução detergente neutra (0,1%), solução HCl (0,3%) e água deionizada e secas em estufa a 65 ± 5°C até obtenção de massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley. Em seguida, realizou-se a análise química das folhas para determinar o teor de B, a partir de digestão via seca em mufla a 400°C por três horas e reação colorimétrica com H-Azometina, seguida por leitura colorimétrica em espectrofotômetro, de acordo com metodologia descrita por Bataglia et al. (1983). O teor de Si, foi determinado a partir da digestão alcalina com H₂O₂ e NaOH, e reação colorimétrica com molibdato de amônio, sendo determinada por leitura colorimétrica em espectrofotômetro, de acordo com metodologia descrita por Kondörfer et al. (2004).

2.4.2 Produtividade de algodão em caroço

Com a abertura dos capulhos, aproximadamente aos 180 dias após a semeadura, foi realizada a colheita da área útil, sendo estimada a produtividade e mensurada a qualidade de fibra das plumas do algodão. Para a produtividade, foram colhidas todas as maçãs de algodão dentro da área útil (10.8m²), em seguida, foram pesadas em balança com duas casas decimais. O peso foi extrapolado para produção em 1 ha (10.000 m²).

2.4.3 Avaliação da qualidade de fibra

Após a pesagem das amostras, as mesmas foram armazenadas em sacos de papel e enviadas ao laboratório de análises de qualidade de fibras na Associação Sul-Matogrossense dos Produtores de Algodão (AMPASUL) de Chapadão do Sul, com uso do equipamento HVI (High Volume Instrument) em ambiente com temperatura e umidade controlada, sendo mensurados na fibra: o micronaire, o comprimento, a resistência à ruptura e o índice de fibras curtas e o alongamento, segundo método descrito por Fonseca e Santana (2002).

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$), verificação de normalidade (Teste W de Shapiro-Wilk). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o software AgroEstat®

Foi realizada análise multivariada de variáveis canônicas para verificar a inter-relação entre tratamentos e variáveis. As análises estatísticas foram realizadas com software livre R utilizando os pacotes “factoextra”, “gplots” e “pheatmap”.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resposta do algodão ao B foi significativa para as variáveis teor de B foliar (B), Produtividade (Prod), micronaire (Mic) e índice de fibras curtas (SFI). Já na presença de Si, podemos observar acréscimo no teor de Si foliar (Si), no micronaire (Mic) e na resistência da fibra à ruptura (Str) (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para teor de B foliar (B), teor de Si foliar (Si), produtividade (Prod), índice micronaire (Mic), comprimento da fibra (Pol), resistência da fibra (Str), índice de fibras curtas (SFI) e alongamento da fibra (Elg) na cultura do algodão em resposta às doses de boro, na ausência e presença de silício.

	B	Si	Prod	Mic	Pol	Str	SFI	Elg
	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	-	pol./mm	g/tex	%	%
Doses B								
0	17,54 c	9,61	4384,06 b	3,55 b	1,17	27,84	9,70 a	5,99
2	31,55 b	9,42	4920,88 a	3,83 a	1,18	27,71	8,93 b	6,04
4	36,94 a	9,28	4654,62 ab	3,85 a	1,16	27,50	9,23 b	5,89
DMS(5%)	3,14	0,45	430,24	0,27	0,03	1,20	0,35	0,20
Si								
Ausência	28,82	0,62 b	4542,05	3,64 b	1,18	27,24 b	9,36	5,97
Presença	27,65	18,26 a	4764,32	3,85 a	1,16	28,13 a	9,21	5,98
DMS(5%)	2,10	0,30	288,26	0,18	0,02	0,81	0,24	0,10
-----Valor F-----								
Doses B	137,32**	1,86 ^{ns}	5,25*	5,04*	1,06 ^{ns}	0,28 ^{ns}	16,63**	1,96 ^{ns}
Si	0,08 ^{ns}	15816,16**	2,70 ^{ns}	6,30*	2,89 ^{ns}	5,55*	1,84 ^{ns}	0,02 ^{ns}
B x Si	0,02 ^{ns}	2,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,46 ^{ns}	1,40 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,91 ^{ns}
CV (%)	8,43	3,64	7,12	5,56	1,96	3,35	2,92	2,59

** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo pelo teste F. Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem, pelo teste de Tukey (P<0,05).

Esses efeitos ocorreram de forma individual em relação a cada elemento, visto que a interação entre eles não foi significativa. As variáveis comprimento da fibra (Pol) e alongamento da fibra (Elg) não apresentaram significância estatística para nenhum tratamento, isolado ou interação.

As plantas cultivadas sob excesso de boro (4 kg ha⁻¹) apresentaram maior teor de B foliar (36,94 mg kg⁻¹) em relação aos tratamentos sob ausência da aplicação (17,54 mg kg⁻¹) e dose recomendada de B (31,55 mg kg⁻¹) (Figura 2a). O algodoeiro é responsivo à aplicação de B (Prado, 2020), no tratamento sem aplicação de B, os teores deste elemento nas folhas encontravam-se abaixo da faixa considerada adequada para a cultura do algodão (30 a 50 mg kg⁻¹), de acordo com (SOUSA; LOBATO, 2004).

A aplicação de Si não promoveu diferença significativa no teor de boro foliar (Figura 2b). Apesar do Si ser um dos elementos mais abundantes no planeta, nem todo o Si do solo está disponível para as plantas, por estar retido em minerais de silicato recalcitrantes (GREGER et al., 2018), sendo necessário a aplicação de fontes solúveis e absorvíveis, como o silicato de potássio, para incrementar seus efeitos benéficos nas plantas.

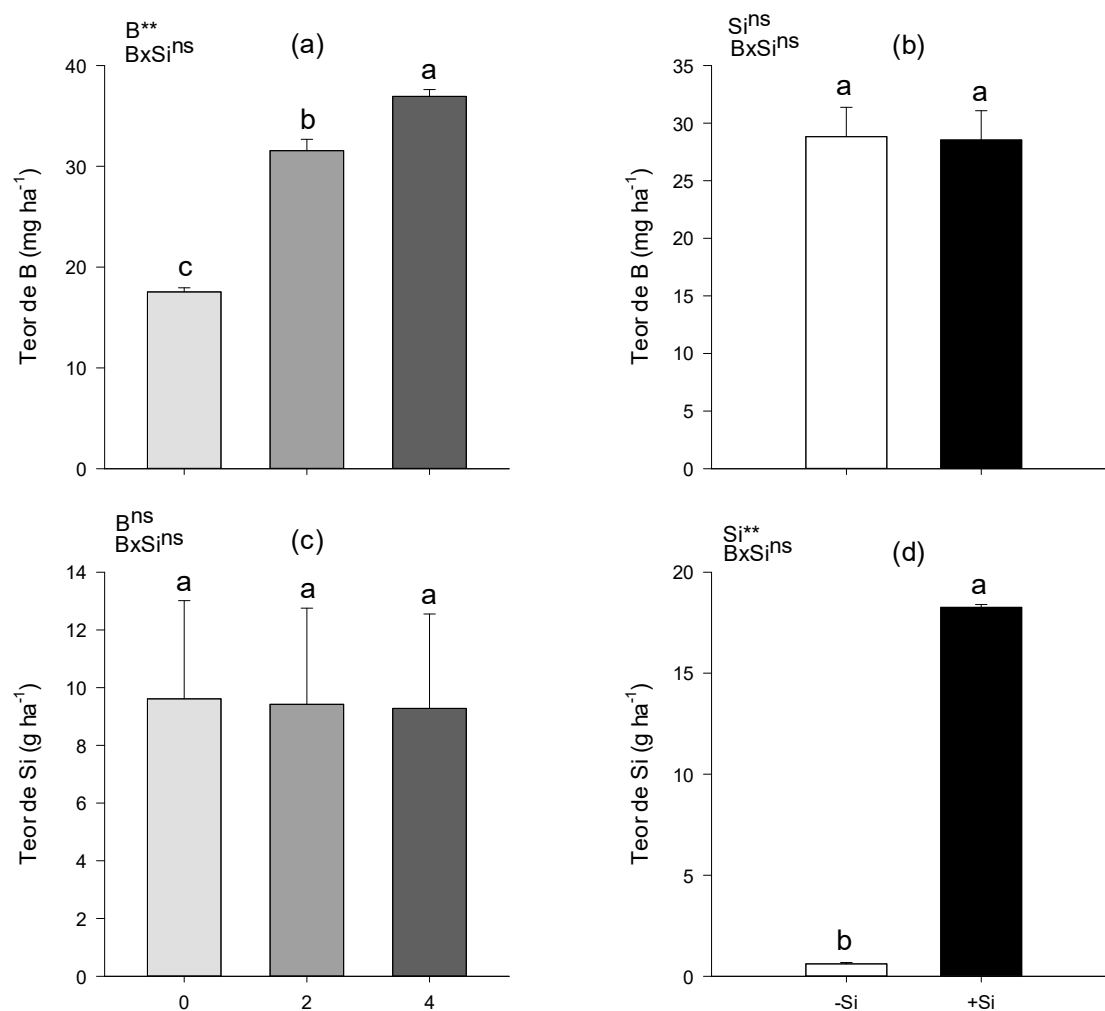


Figura 2. Teor de boro em função das doses de boro (a), teor de boro em função da ausência e da presença de Si (b), teor de silício em função das doses de boro (c), teor de silício em função da ausência e da presença de Si (d). B: boro; Si: silício; BxSi: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey (P<0,05). As barras representam o erro padrão médio.

A adubação boratada aumentou a produtividade, quando comparado ao tratamento controle que apresentava deficiência desse nutriente. A dose de 2,0 kg ha⁻¹ elevou a produtividade em 536,82 kg ha⁻¹, apresentando a melhor média para essa variável (Figura 3a).

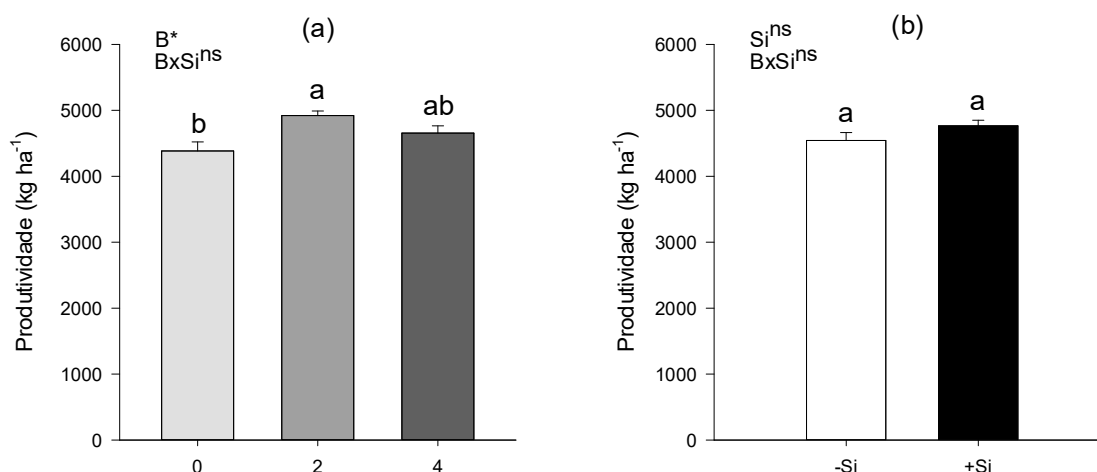


Figura 3. Produtividade em função das doses de boro (a), produtividade em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey (P<0,05). As barras representam o erro padrão médio.

Esse resultado pode ser explicado pelo papel que este micronutriente exerce no desenvolvimento reprodutivo das plantas, como na germinação do grão de pólen, e crescimento do tubo polínico (LEONARD et al., 2014), que influencia a formação e a permanência dos capulhos. Além disso, o B é componente estrutural das membranas celulares, e sua deficiência prejudica a formação dos vasos condutores, como o xilema, formando anéis marrons nos pecíolos, dificultando o fluxo normal de água e podendo causar até a queda de folhas e capulhos por conta da fragilidade estrutural (LI et al., 2017; WAHID et al., 2020).

O fornecimento de B na dose de 4,0 kg ha⁻¹, embora tenha tido efeito positivo, 270 kg ha⁻¹ a mais que o controle, ambos não diferiram estatisticamente. A queda na produtividade com a dose de B de 4,0 kg ha⁻¹, em relação à dose de 2,0 kg ha⁻¹ demonstra possível efeito da toxicidade desse micronutriente. De acordo com Souza Junior et al. (2019), a produção de massa seca diminuiu em doses mais altas, mesmo sem sintomas visíveis de toxicidade, evidenciando a linha tênue que há entre a dose adequada e o excesso de B. Não houve diferença estatística significativa para a aplicação de Si na produtividade da cultura (Figura 3b).

O índice Micronaire (Mic) obteve acréscimo na presença de B e Si (Figura 4), efeito este, observado isoladamente para cada tratamento. Essa característica qualitativa é importante, pois fibras muito finas (< 3,0) e imaturas podem sofrer danos indesejados (neps)

em seu processamento (FREIRE, 2007). Como citado anteriormente, o B é componente estrutural de membranas celulares, atua nas células germinativas e também na condução de açúcares e é precursor de base nitrogenada do RNA, que codifica proteínas (PRADO, 2020). Tais funções estão diretamente relacionadas com o aumento de espessura observado na fibra vegetal.

O Si age fazendo associações com paredes celulares, depositado na forma de SiO_2 , conferindo proteção mecânica e também pode agir no metabolismo das plantas, influenciando processos fisiológicos nos vegetais. Os efeitos benéficos diretos e indiretos são conhecidos da indústria têxtil, e já é usual o emprego *in vitro* deste elemento para melhorar algumas características da fibra (LUYCKX et al., 2017). Neste trabalho foi observado o incremento do Si tanto no micronaire (Mic) (Figura 4) quanto na resistência da fibra (Str) (Figura 5).

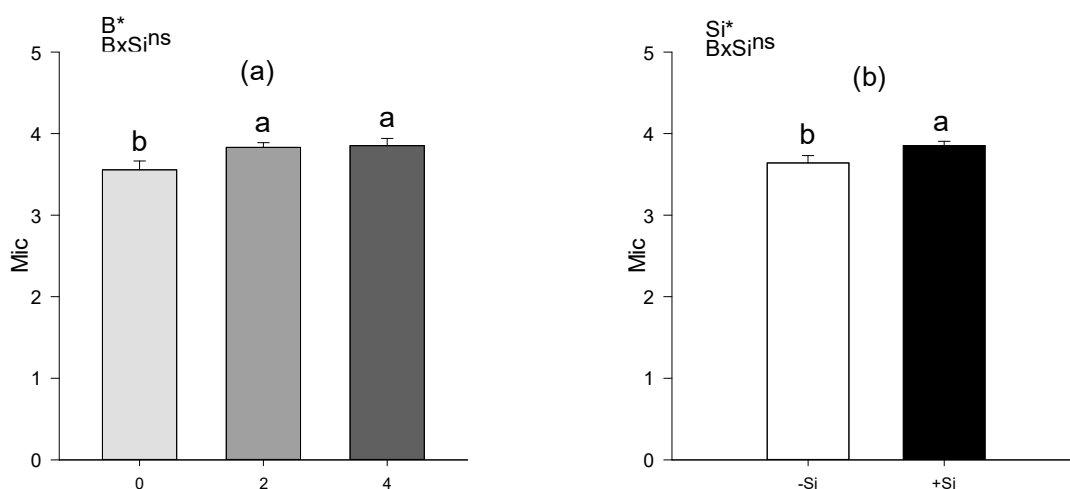


Figura 4. Mic em função das doses de boro (a), Mic em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio.

A resistência da fibra (Str) foi incrementada significativamente pela presença de Si, mostrando que o acréscimo deste elemento ao manejo da cultura produz fios com características mais desejáveis, com feixes mais resistentes ao rompimento. Trabalhos como o de Guerriero et al. (2016) e Guerriero et al (2019), demonstram que a biossilificação da parede celular pode ser induzida por proteínas e, em células epidérmicas, o silício fornece o suporte necessário para o eixo dos tricomas, aumentando também a durabilidade do biomaterial através de sua deposição nos tecidos. Segundo Ferraz et al. (2021) o Si atua

ativando o sistema antioxidante da planta, diminuindo o vazamento de eletrólitos, aumentando a eficiência fotossintética do sistema, além dos outros mecanismos já citados. Em seu trabalho com outras cultivares, observou o incremento nas características qualitativas, como micronaire, resistência e comprimento de fibra na presença de Si.

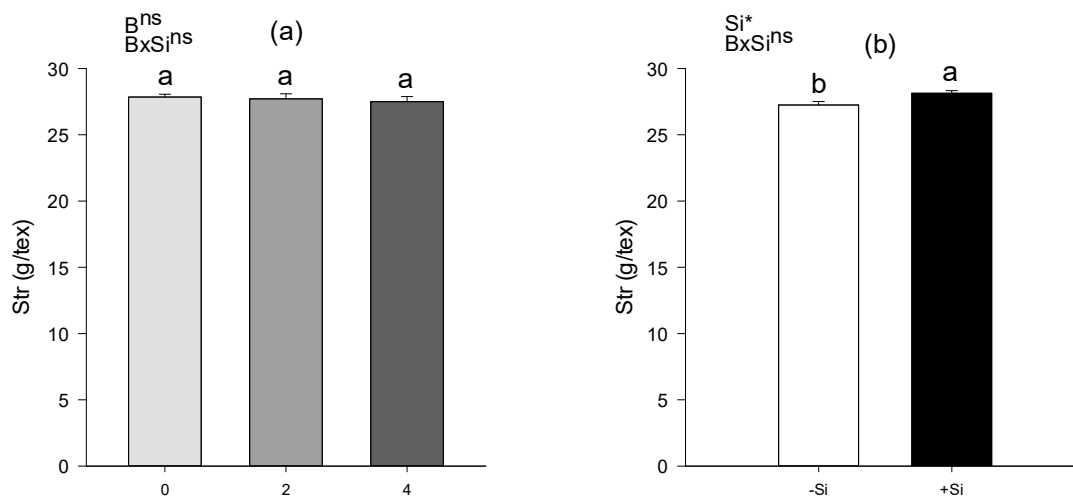


Figura 5. Str em função das doses de boro (a), Str em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ^{ns}: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey (P<0,05). As mesmas letras indicam que as médias não diferem pelo teste F. As barras representam o erro padrão médio.

Em relação ao índice de fibras curtas (SFI), houve diferença significativa para o B, mas não para o Si (Figura 6). A presença do micronutriente diminuiu a porcentagem de fibras curtas, ou seja, menores que 12,7mm. Um alto índice de fibras curtas (> 10,1%) é indesejável para a indústria têxtil, pois tendem a causar pilling ou “bolinhas” em tecidos de fibra natural, diminuindo o valor agregado do produto.

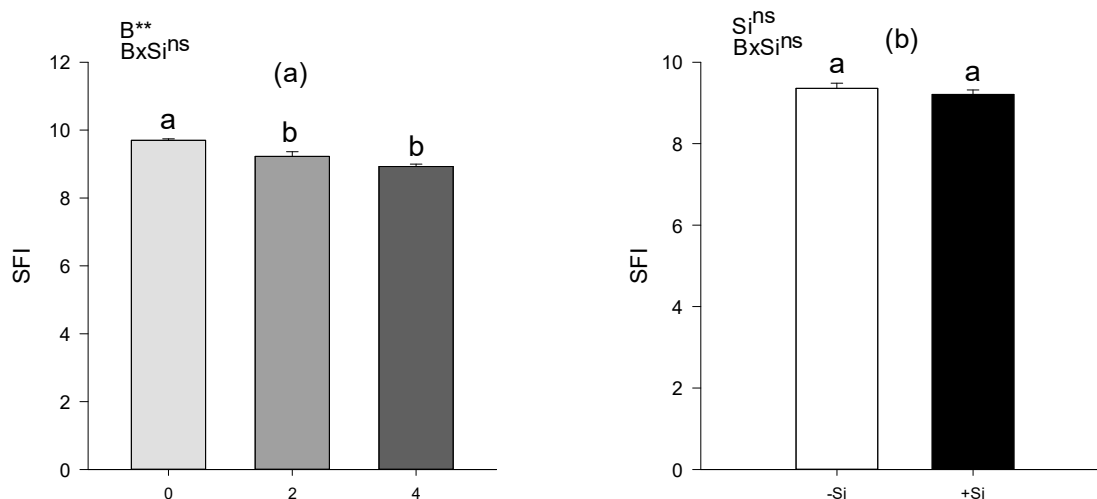


Figura 6. SFI em função das doses de boro (a), SFI em função da ausência e da presença de Si (b). B: boro; Si: silício; B x Si: interação entre B e Si; ** e *: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. ns: não significativo, pelo teste F. As mesmas letras indicam que as médias não diferem, pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). As barras representam o erro padrão médio.

A exigência do B para a cultura do algodoeiro é maior na fase reprodutiva, e sua deficiência promove alterações na síntese de elementos componentes das paredes celulares (celulose, hemicelulose, pectinas) e na fertilidade do grão de pólen, consequentemente influenciando no estabelecimento e qualidade dos frutos. Trabalhos como o de Li et al. (2017), Atique-ur-Rehman et al. (2020), Wahid et al. (2020) tem demonstrado a importância da adubação boratada para aumento da produtividade e qualidade das fibras do algodão.

O biplot formado na análise de variáveis canônicas (Figura 7) apresentou 99,9% da variância total. Os tratamentos com aplicação de B ficaram próximos das variáveis teor de B (B), produtividade (PROD), micronaire (MIC), comprimento da fibra (POL).

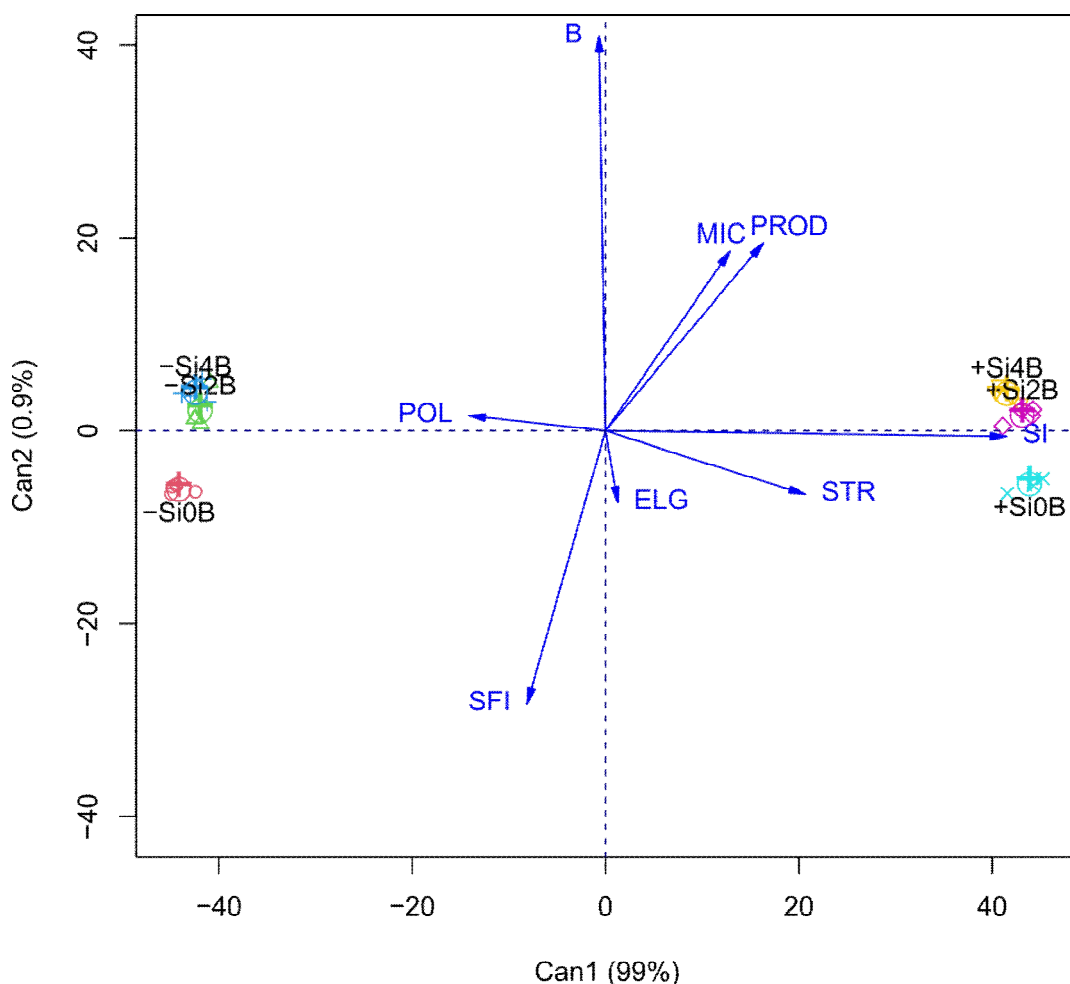


Figura 7. Análise de variáveis canônicas para doses de B na presença (+Si) e ausência (-Si) da aplicação foliar de Si, para as variáveis teor de B (B), teor de Si (Si), produtividade (PROD), micronaire (MIC), comprimento da fibra (POL), resistência da fibra (STR), índice de fibras curtas (SFI) e alongamento da fibra (ELG%) no algodão.

Ao analisar os tratamentos com a presença do Si as variáveis que mais se aproximaram foram resistência da fibra (STR) e teor de Si foliar (Si) independentemente da adubação boratada. Já os tratamentos que receberam adubação boratada na ausência da aplicação foliar de Si, distanciam-se destas mesmas variáveis, e ficam próximos a variável comprimento da fibra (POL). No tratamento sem adubação boratada e ausência de Si aproxima-se do índice de fibras curtas (SFI), verifica-se assim que a adubação boratada via solo e a aplicação de Si via foliar diminuem o índice de fibras curtas do algodão.

4. CONCLUSÃO

A adubação boratada promove aumento na produtividade e na qualidade das fibras, aumentando o micronaire (Mic), e diminuindo o índice de fibras curtas (SFI).

A aplicação foliar de silício promove aumento do micronaire (MIC) e da resistência dos fios ao rompimento (Str).

5. REFERÊNCIAS

ATIQUE-UR-REHMAN et al. Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil. **PLoS ONE**, v. 15, n. 8, p. e0231805, 2020.

BARROS, T.C. et al. Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v.42, n.5, p. 458-465, 2019.

BATAGLIA, O.C. et al. Métodos de análise química de plantas-Boletim Técnico 78. **Campinas: Instituto Agrônômico**, p. 48, 1983.

BAYTAR, A.A. et al. Identification of stable QTLs for fiber quality and plant structure in Upland cotton (*G. hirsutum* L.) under drought stress. **Industrial Crops and Products**, v.124,p. 776-786, 2018.

CHEN, Z.J. et al. Toward sequencing cotton (*Gossypium*) genomes. **In Plant Physiology**, v. 145, n. 4, p. 1303-1310, 2007.

DONAGEM A.G.K. et al. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FERRAZ, R.L.D.S. et al. Physiological adjustments, fiber yield and quality of colored cotton BRS Topázio cultivar under leaf silicon spraying. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, 2021.

FONSECA R.G., SANTANA J.C.F. **Resultados de ensaio HVI e suas interpretações (ASTM D-4605)**. Campina Grande: Embrapa Algodão; 2002.

FREIRE, E.C. **Algodão no Cerrado do Brasil**. 1.ed. Brasília: ABRAPA; 2007, 918 p.

GREGGER M. et al. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. **Plants**, v.7, v.2, p. 41, 2018.

GUERRIERO, G. et al. Silicon and the plant extracellular matrix. **Frontiers in Plant Science**. v.7, p. 463, 2016.

GUERRIERO, G. et al. Identification of the aquaporin gene family in *Cannabis sativa* and evidence for the accumulation of silicon in its tissues. **Plant Science**. v. 287, p. 110167, 2019.

KONDÖRFER GH, PEREIRA HS, NOLA, A. **Análise de sílcio: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

LEONARD A. et al. tassel-less1 encodes a boron channel protein required for inflorescence development in maize. **Plant Cell Physiol**. v. 55, n.6, p. 1044-54, 2014.

LI, M. et al. 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. 1-9, 2017.

LUYCKX, M. et al. Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p. 411, 2017.

MASASI, B. et al. Impacts of irrigation termination date on cotton yield and irrigation requirement. **Agriculture**, v. 9, n. 2, p. 39, 2019.

PRADO R.M. **Nutrição de Plantas**. 2.ed. São Paulo: Unesp; 2020. 416p.

QAYYUM, M.F. et al. Straw-based biochar mediated potassium availability and increased growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 24, n.12, p. 963-973, 2020.

RAIJ B.V. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

SANTOS H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa Solos; 2018.

SOUSA D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; 2004.

SOUZA JUNIOR, J.P. et al. 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.

TAN, Z. et al. Genetic map construction and fiber quality QTL mapping using the cottonSNP80K array in upland cotton. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p. 225, 2018.

WAHID, M.A. et al. Foliar feeding of boron improves the productivity of cotton cultivars with enhanced boll retention percentage. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 16, p. 2411-2424, 2020.

ZHANG, H. et al. Soil water and salt affect cotton (*Gossypium hirsutum* L.) photosynthesis, yield and fiber quality in coastal saline soil. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 112-121, 2017.