

MAYARA FÁVERO COTRIM

**RELAÇÃO SOLO-PLANTA: PROTOCOLOS DE FORNECIMENTO DE B (B-
ULEXITA) EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTENSIVOS**

Relatório de Pós-doutorado realizado
na Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias
(FCAV), Unidade (Campus de
Jaboticabal-SP)

Supervisor(a): Prof Dr. Renato de Mello
Prado

Instituição sede: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias (FCAV) Câmpus de Jaboticabal

Jaboticabal, SP

2025

RESUMO

Dada a importância do fornecimento de boro (B) as plantas, tornam-se necessários estudos a nível de campo para fomentar o manejo adequado na adubação suplementar de B a partir do emprego de doses crescentes de Ulexita em sistemas de produção intensivos cultivado com culturas anuais. As diferenças entre as espécies de plantas em relação à mobilidade do B o tornam elemento único entre os nutrientes. Foram avaliados os efeitos imediatos após a aplicação do micronutriente no cultivo do milho (safra 2024) e algodão (safra 2024/2025). O delineamento foi em blocos casualizados, onde foram executados dois experimentos a campo. Os tratamentos foram constituídos por cinco doses crescentes de 0 (controle), 3, 9, 27 e 81 kg ha⁻¹ de B na forma de Ulexita (10% de B) aplicados em pré-plantio com incorporação na camada superficial de 0-20cm de profundidade. Para a relação solo-planta foram avaliados o teor de B no solo, folha diagnose, flavonoides, trocas gasosas, aminoácidos e produtividade de grãos e de algodão em caroço. Nestes estudos estabelecemos protocolos de recomendação de B em plantas para solos argilosos e de textura média em culturas de interesse econômico em sistemas intensivos de uso do solo. Também foram comparados a possibilidade de existência de variabilidade de resposta do B entre as diferentes culturas em relação ao fornecimento via solo para correção do nutriente, dentro da relação solo-planta. Os resultados demonstraram novos níveis de B na relação solo-planta quando este foi fornecido via solo através da fonte Ulexita de liberação lenta. Foram estabelecidas doses ótimas e tóxicas para cada cultura e relacionados aos níveis fisiológicos e bioquímicos, assim como produtividade de grãos e de algodão em caroço.

Palavras-chave: nutrição de plantas, toxicidade de B, fisiologia vegetal

1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo dos solos e cultivos sucessivos necessitam de atenção, pois solos com baixo teor de matéria orgânica, entre outros fatores, podem resultar em baixas produtividades. Dentre os micronutrientes mais estudados nas culturas de interesse econômico, destaca-se o boro (B). A aplicação de micronutrientes pode ser de grande relevância em solos intensivamente cultivados. As diferenças substanciais entre as espécies de plantas em relação à mobilidade do B tornam o elemento único entre os nutrientes. Em contraste com a deficiência de boro, a toxicidade do boro no solo é menos abundante e ocorre em áreas áridas e semiáridas. O excesso de boro no solo foi relatado na Austrália, EUA, Rússia, Turquia, México, Israel, Iraque, Egito, Síria, Marrocos, Jordânia, Líbia, Índia, Paquistão, Malásia, Peru, Chile, Hungria, Sérvia e Itália (NABLE et al., 1997; MILJKOVIĆ 1960; YAU et al., 1995; KOÇ, 2007; LAND et al., 2019), todavia em áreas brasileiras são escassos os estudos associados a toxicidade de B na relação solo-planta.

As plantas necessitam de B para várias etapas de seu desenvolvimento, dentre elas: crescimento, divisão celular e metabolismo do ácido nucléico, germinação do grão de pólen, crescimento do tubo polínico e além disso, síntese de proteínas e aminoácidos, e no transporte interno de açúcares amidos, como nitrogênio (N) e fósforo (P) (MASCARENHAS et al., 2014). O fornecimento de B pode ser realizada a partir da adubação via solo de manutenção ou de correção e ainda via foliar que deve ser utilizada apenas como complementar a aplicação no solo. Para garantir amplo efeito residual de B nos cultivos é importante o uso da adubação de correção especialmente de fontes de liberação lenta como a Ulexita.

No entanto, o conhecimento de doses ótimas de B na forma de Ulexita em programas de adubação de correção e a respectiva calibração para teores adequados no solo e na folha ainda não são conhecidos em Latossolo Vermelho especialmente de textura argilosa e de textura média em condições de campo. Embora houveram tentativas em estudos em campo com essa fonte em adubação de correção incorporado (até 10 kg de B ha⁻¹) em um Latossolo Amarelo do estado de Mato Grosso com a cultura da soja (Rosolem et al., 2008). Os autores concluíram que não conseguiram estabelecer os níveis críticos de

deficiência no solo e na folha do B para soja e atribuíram ao fato que amostragem realizada na camada de 0-15cm não foi adequada indicando necessidade de estudos utilizando camadas mais profundas do solo.

As indicações de doses de B via solo é de 2 kg ha⁻¹ para aplicação no sulco de semeadura junto com a fertilização NPK a exemplo na cultura do milho para o estado de São Paulo e teores foliares adequados iguais 7-17 mg kg⁻¹ (Duarte et al., 2022). É possível que as doses ótimas de B possam ser mais elevadas que 2 kg ha⁻¹ devido a alguns motivos.: especialmente para adubação de correção de B incorporado no solo pois tem-se uma alta área de contato do nutriente favorecendo reações de adsorção especialmente em solos argilosos. Os fertilizantes de B de liberação lenta como ulexita minimiza a lixiviação e isso permite uso de doses mais elevadas sem haver perdas significativas do micronutriente. Um outro aspecto é que há dúvidas que a faixa adequada de B no solo e na folha seja tão estreita (CHAPMAN et al., 1997).

Portanto, em uma revisão feita por Yamada (2000) intitulada “Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas?”. O autor conclui que as doses de boro atualmente aplicadas podem não fornecer a concentração adequada de B na solução do solo para o ótimo desenvolvimento das plantas, principalmente nos solos mais argilosos; são necessárias mais pesquisas para recomendação mais precisa da adubação boratada. No entanto, passaram mais de duas décadas e ainda permanecem dúvidas sobre a melhor dose de B especialmente com fontes mais sustentáveis de liberação lenta como a ulexita sem risco de contaminação do ambiente.

2. OBJETIVOS

Objetivo principal foi fundamentar cientificamente o manejo da adubação de correção de B a partir do emprego de doses crescentes de Ulexita (10% de B) cultivado com culturas anuais milho (safra 2023/2024) e algodão (safra 2024/2025). Para esse projeto objetivou-se avaliar os efeitos fisiológicos, bioquímicos e de produção.

Objetivos específicos

- Estabelecer as faixas adequadas e tóxicas de B no solo e na folha diagnóstica nos cultivos de milho, soja e algodão;
- Analisar os níveis considerados como ótimos de B para cultura do milho e soja em solo de textura argilosa, cultivados em sequência;
- Analisar os níveis considerados como ótimos de B para cultura do algodão em solo de textura média;
- Desvendar os danos fisiológicos, metabólicos e bioquímicos na relação solo-planta de milho e algodão na toxicidade de B;

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Experimental design milho safra 2023/2024

O experimento foi desenvolvido na área experimental da Universidade Estadual Paulista localizada no município de Jaboticabal (22° 43' 30" Sul de latitude e 47° 38' 00" Oeste de longitude, 546 m de altitude média), estado de São Paulo, Brasil, no período de 20 de dezembro de 2023 a 03 de maio de 2024. O híbrido de milho escolhido foi o AG 8701 PRO4. A semeadura realizada mecanicamente e a parcela experimental constituída por 9 linhas em espaçamento de 0,45m com 18m de comprimento. A área total estabelecida foi de 21,6m² e a área útil de estudo 3 linhas centrais de 1,35m excluindo 1m de bordaduras e 4m entre parcelas O manejo fitossanitário foi padrão em todas as parcelas, conforme recomendação técnica para o surgimento de plantas daninhas, fungos, doenças e pragas existentes.

Experimental design algodão safra 2024/2025

A pesquisa foi realizada a campo durante o período experimental de 12 de janeiro a 4 de julho de 2025 na Fazenda Campo Escola da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, campus de Chapadão do Sul-MS, com latitude de 18°48'46" Sul, longitude de 52°36'00" Oeste e altitude média de 810 metros. Foram monitoradas a temperatura máxima e mínima e pluviosidade, obtidas da estação meteorológica instalada no campus da Universidade, onde registrou-se as médias durante o período experimental (Figura 1).

Manejo fitossanitário algodão

A semeadura do algodão foi realizada no dia 12 de janeiro de 2025, com semeadora à vácuo modelo POP JM2670 com 3 linhas de 0,90 m, com 10 sementes por metro totalizando população de 111,1 mil plantas por hectare. Aos 40 Dias Após Emergência (DAE) foram realizadas aplicações de fertilizante a lanço com 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) em forma granulada contendo cerca de 60% de óxido de potássio e 100 kg ha⁻¹ de ureia (CO(NH₂)₂) com cerca de 44% a 46% de N. Aos 60 DAE foi realizada nova aplicação de ureia na mesma dose. O controle fitossanitário de pragas e doenças foi realizado conforme prevenção e surgimento ao longo do ciclo.

Balanço hídrico do milho safra 2023/2024

O clima predominante foi classificado como tropical chuvoso e seco no inverno (Aw), pelo critério de classificação climática de Köppen. Foram registrados dados pluviométricos em estação meteorológica instalada próxima a área experimental e o balanço hídrico durante o período de cultivo foi descrito na Figura 1. A chuvas acumuladas durante o período experimental foram de 570 mm e o déficit acumulado de -164 mm. Segundo Albuquerque e Resende (2007), a cultura necessita de 400 a 700 mm de água no ciclo completo, porém o consumo total da água varia em função das condições climáticas e do híbrido utilizado.

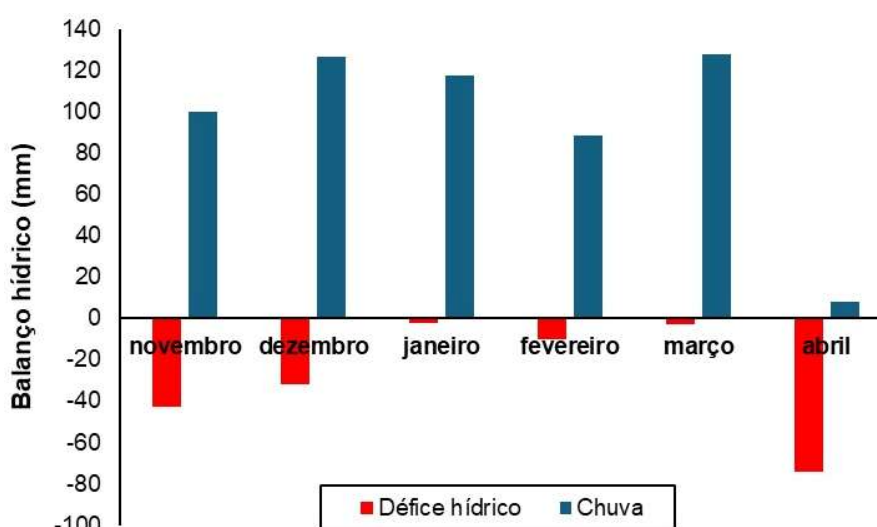


Figura 1. Balanço hídrico durante o período experimental do milho safra 2023/2024.

Regime pluviométrico do algodão safra 2024/2025

A média de chuvas acumuladas foram de 1268 mm durante o período experimental do algodão (Figura 2). O clima da região, segundo Köppen foi classificado como tropical úmido (Aw), com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação média anual de 1.850 mm, e temperatura média anual variando de 13 a 28 °C (CUNHA et al., 2013). Segundo Souza et al., (2008) as características edafoclimáticas adequadas para o cultivo do algodão na região do cerrado brasileiro deve atender a faixa de temperatura entre 25 a 30 °C na fase de germinação e no crescimento vegetativo entre 27 a 32 °C para melhor aproveitamento em produtividade. Ainda, os autores citaram que o indicado é o índice acumulado de chuvas variar entre 500 a 1.500 mm durante o ciclo.

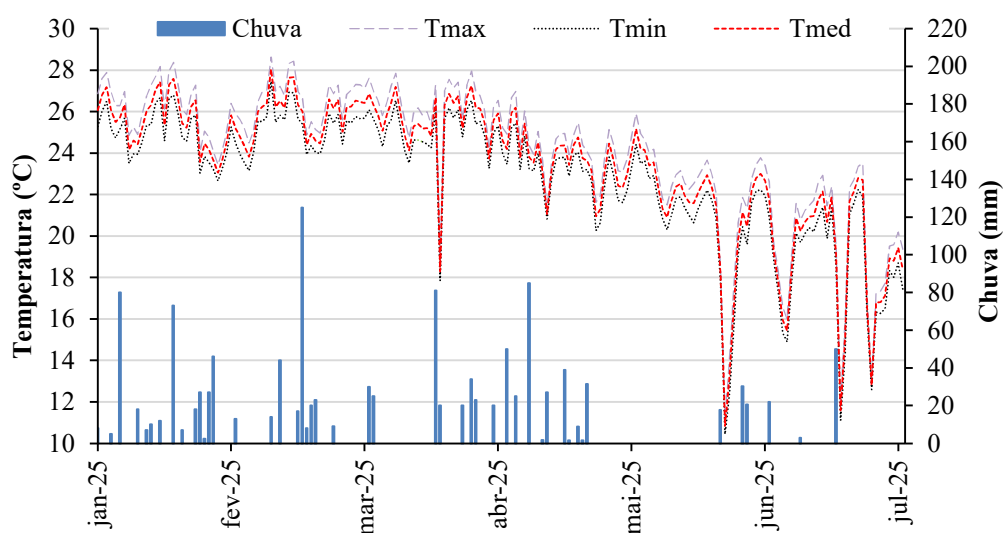


Figura 2. Médias de chuvas e temperatura máxima e mínima durante o período experimental do algodão de janeiro a julho de 2025.

Características e preparo do solo do experimento de milho

Foram realizadas coletas de 10 pontos aleatórios na área útil de cada parcela para a análise química e física para fins de fertilidade do solo (camadas de 0-20 cm), conforme Raij et al. (2001). Os teores de B encontrados foram de 0,42 mg dm⁻³, Cu: 0,60 mg dm⁻³, Fe: 13 mg dm⁻³, Mn: 28,2 mg dm⁻³ e Zn: 2,7 mg dm⁻³. Os teores de P (resina) foram de 33 mg dm⁻³, de S: 6 mg dm⁻³, Ca: 32

mmolc dm⁻³, Mg: 13 mmolc dm⁻³ e K:3,3 mmolc dm⁻³. A matéria orgânica foi de 22 g dm⁻³. A textura física encontrado foi de 54% de argila, 21% de silte e 24% de areia. Boaretto et al., (2022), estabeleceram faixas críticas de B em solos tropicais e subtropicais, na qual teores abaixo de 0,2 são considerados deficientes, 0,2 a 0,6 adequados e acima de 0,6 mg dm⁻³ tóxicos (extraído por HCl 0,05 mol L⁻¹ ou água quente). Logo, os teores encontrados inicialmente foram enquadrados como adequados (0,42 mg dm⁻³).

Os valores de pH (CaCl₂) foram de 6,1, considerado como acidez média (RAIJ et al., 1997). Vale ressaltar que valores de pH abaixo de 7 podem levar a aplicação de B na forma de H₃BO₃ altamente suscetível a perdas por lixiviação e influencia diretamente nos processos de adsorção (FOLONI et al., 2016; SÁ et al., 2016). O solo da área experimental foi classificado como Argiloso Vermelho Eutroférico relatado por Santos et al. (2013).

Características e preparo do solo do experimento de algodão

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf) de textura caracterizada como argilosa segundo dos Santos et al. (2018). Anterior a instalação do experimento, foi realizada amostragem da camada de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m de profundidade do solo. Retirou-se amostras simples com auxílio de um trado holandês e homogeneizadas para obtenção da amostra composta, com a finalidade de caracterizar a textura física do solo da área. As amostras de trabalho foram enviadas para análise físico-químicas para fins de fertilidade do solo (Raij et al., 2001), sendo estas realizadas no Laboratório de Solos Exata, em Chapadão do Sul, estado de Mato Grosso do Sul.

Os resultados da análise química do solo na camada de 0 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m de profundidade, respectivamente, foram: pH (CaCl₂)= 5,32 e 4,66; P (meh)= 14,57 e 7,32 mg/dm³; Ca (NH₄Cl)= 3,85 e 2,21 cmolc/dm³; Mg (NH₄Cl)= 0,98 e 0,70 cmolc/dm³; K(NH₄Cl)= 0,31 e 0,18 cmolc/dm³; H + Al= 3,14 e 5,60 cmolc/dm³.

A soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺)= 5,03 e 3,09 cmolc/dm³, capacidade de troca catiônica (CTC= SB + H+Al)= 9,04 e 8,69 cmolc/dm³ e V%= 69 e 35%. Os teores de micronutrientes do solo foram determinados na camada de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade: B(meh)= 0,25 e 0,20 mg dm⁻³;

Cu(meh)= 1,55 e 1,22 mg dm⁻³; Fe(meh)= 64,35 e 44,06 mg dm⁻³; Mn (meh)= 13,94 e 3,67 mg dm⁻³; Zn= 6,7 e 2,01 mg dm⁻³. A análise física demonstrou granulometria de 408, 19,5 e 572 g dm⁻³ para argila, silte e areia, respectivamente. As correções e adubações do solo como calagem e gessagem na área experimental foram previamente realizadas após a verificação dos níveis da análise de solo de acordo com a necessidade da cultura (Cantarella et al. (2022). A adubação de base no plantio foi de 140 kg ha⁻¹ de Fosfato Monoamônico (11N-52P-00K) contendo entre 10% a 12% de nitrogênio (N) na forma amoniacal e 50% a 54% de fósforo (P₂O₅).

O solo da área experimental foi previamente preparado em sistema convencional de cultivo a partir de subsolagem e gradagem. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, e os tratamentos constituídos por cinco doses 0 (controle), 3, 9, 27 e 81 kg ha⁻¹ de B fonte Ulexita (10% de B) dispostos em quatro blocos. As doses crescentes de B (fonte Ulexita 10% B) foram distribuídas a lanço e em seguida incorporadas com grade aradora e posteriormente com gradagem niveladora. Para evitar contaminação entre as parcelas foram adotadas distâncias entre parcelas de 4m. A fonte de B (Ulexita) utilizada no experimento é caracterizada com um borato de sódio e cálcio (NaCaB₅O₂.8H₂O) e dentre os boratos é considerada como alta solubilidade com a liberação de B mais lenta (BYERS et al., 2001). O teor de B disponibilizado pela fonte está em torno de 8-10% e a granulometria obtida por meio do processo de granulação com a utilização de ácido sulfúrico, na qual proporciona aumento na solubilidade, em cerca de 90% na presença de água.

Durante o ciclo e colheita das culturas, as avaliações foram de atributos fisiológicos, bioquímicos e de produtividade oriundas do sistema solo-planta conforme metodologias descritas abaixo:

a. Teor de B no solo

Foi realizada a amostragem de solo na camada de 0-20cm de profundidade na colheita das culturas a partir da coleta de 15 subamostras por parcela para compor amostra composta. Foi realizada análise química do solo para determinação do B disponível (Raij et al., 2001).

b. Estado nutricional

Foi realizada a amostragem foliar na época do florescimento da cultura do milho (terço médio da folha da base da principal espiga) e algodão (5ª folha/limbo a partir da haste principal) a partir de 25 folhas por parcela. O teor foliar de B foi determinado conforme método descrito por Bataglia et al. (1983).

c. Eficiência nutricional

A eficiência de translocação de B foi calculada multiplicando a razão do acúmulo do nutriente na parte aérea pelo acúmulo total de nutriente na planta por 100 (Li et al., 1991). A eficiência de uso de B determinada pela razão da massa seca ao quadrado e o acúmulo do nutriente (Siddiqi and Glass 1981).

d. Flavonoides

Foi avaliado o índice de flavonoides e antocianina medidos nas folhas diagnose das culturas com auxílio do medidor Multi-Pigmentos (MPM-100, OPTI-SCIENCES, EUA).

e. Trocas gasosas foliares

Nas folhas diagnósticas das culturas, foi avaliado a taxa fotossintética líquida (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (Gs) e concentração interna de C (Ci) serão medidas usando um analisador de gás infravermelho aberto (LcPro-SD, ADC BioScientific Ltd., RB). A câmara IRGA foi irradiada com uma densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A leitura será realizada no período entre 9 e 11 horas da manhã. A partir da relação entre A e E será determinada a eficiência intrínseca de uso da água ($\text{EUA} = A/E$). A eficiência instantânea de carboxilação será determinada com a relação A e Ci ($\text{EIC} = A/\text{Ci}$).

f. Fluorescência e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)

Foi realizada a leitura da eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) na folha diagnóstica de cada cultura entre 7 e 8 horas da manhã utilizando um fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., EUA) e também os pigmentos fotossintetizantes clorofila, flavonoides e antocianinas a partir de um medidor multi-pigmentos (MPM-100 multipigment chlorophyllmeter /ADC BioScientific).

g. Aminoácidos

As análises de aminoácidos foram realizadas com derivatização por meio de Acc Q. Fluor reagente (6-aminoquinolil-N-hidroxisuccinimidil carbamato - AQC), adquirido na forma de Kit (Waters®), que é composto pelo derivatizante e seu diluente, solução tampão para dissolução das amostras hidrolisadas, coluna cromatográfica (C18 150 x 4,6mm), solução concentrada de tampão acetato para fase móvel e a mistura dos padrões dos 17 aminoácidos (alanina, arginina, ácido aspártico, cistina, ácido glutâmico, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, tirosina e valina). O preparo do reagente para derivatização (6-aminoquinolil-N-hidroxisuccinimidil carbamato - AQC) foi recomendado de acordo com as instruções do fabricante.

Para as análises primeiramente foi realizada a hidrólise ácida das amostras. Será pesada 0,05 g da amostra e em seguida adicionado 7 mL ácido clorídrico (HCl) a 6 N, sendo posteriormente, as amostras levadas bloco digestor a 110°C por 24 horas. Após o resfriamento até temperatura ambiente, foram adicionados aos tubos de ensaios 10 mL de água Milli-Q®. Uma alíquota de 50 µL será transferida para o fundo de um vial. O vial será mantido em dessecador com sílica gel e sob vácuo por aproximadamente 16 horas, ou até completa secura do solvente. Ao sólido hidrolisado será adicionado 20 µL do diluente (HCl 20 mM) e agitado em vórtex por 15 segundos.

Posteriormente as amostras foram submetidas a derivatização. Foram adicionados 60 µL de tampão borato (Kit AQC) e o vial será novamente agitado em vórtex durante 5 segundos. Por fim, adicionados 20 µL do derivatizante (Kit AQC) e a mistura agitada imediatamente em vórtex durante 10 segundos. O vial foi deixado em repouso durante 1,0 minuto para o término da reação. Posteriormente foi levado para banho-maria a $55 \pm 1^\circ\text{C}$ por 10 minutos. A solução assim obtida foi levada para análise cromatográfica.

A separação e quantificação dos 17 aminoácidos foram realizadas em cromatógrafo líquido no sistema UPLC Waters Acquity série 1100, com injetor automático de amostras. Utilizou-se uma coluna de fase reversa do tipo C18, 1,8 µm (diâmetro interno de 2,1 mm (i.d.) £ 100 mm. Para a separação foi adotado o sistema de gradiente linear com quatro fases móveis, tendo como fases móvel: A (100% AccQTag Ultra eluente A concentrado, acetonitrila e ácido fórmico), B (90:10 Água: AccQTag Ultra eluente B, acetonitrila e ácido fórmico), C (100%

água MilliQ), D (100% AccQ•Tag Ultra eluent B). A vazão da fase móvel foi de 0,7 mL min⁻¹ e a temperatura da coluna durante a corrida será de 49° C. A detecção dos aminoácidos foi realizada utilizando detector de fluorescência, ajustado para o comprimento de onda de 266 a 473 nm. A identidade qualitativa e quantitativa do pico foi confirmada comparando os tempos de retenção e os espectros de UV de compostos individuais e pelo método de adição padrão.

Todos os solventes utilizados nas análises cromatográficas foram grau HPLC, e antes da utilização foram filtrados à vácuo em membrana de 0,2 µm de porosidade e posteriormente desgaseificados em sistema a vácuo utilizando ultrassom. A água utilizada foi destilada e em seguida ultrapurificada em sistema Milli-Q sendo posteriormente desgaseificada.

h. Produtividade

A colheita foi realizada nas parcelas de área útil. Foi realizada análise do teor de água dos grãos e corrigido para umidade de 13% para obter a produção de grãos e para algodão foi obtida a produtividade em algodão em caroço.

Análise de dados

Os dados foram analisados para verificação da presença de outliers utilizando o método de quartis (VINUTHA et al., 2018) e submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) e homogeneidade de Levene ($p > 0.05$). Em seguida, analisados pela análise de variância e, quando significativo ($p < 0.05$) realizou-se estudos de regressão polinomial. A metodologia utilizada para a definição das dosagens foi proposta por Fageria et al., (2000), estabelecida como toxicidade de B os 10% em redução da produtividade e a dose ótima os 100% em produtividade máxima. A correlação de Pearson foi estimada para verificar a interdependência entre as variáveis analisadas, obtendo a relação para cada dose de B aplicada via solo.

4. RESULTADOS

4.1. Cultura do milho (safra 2023/2024)

A aplicação de doses crescentes da fonte Ulexita (10% de B) foram significativas para a produtividade de milho, conforme Figura 3. Os dados

ajustaram-se a uma regressão quadrática, cujo r^2 apresentou confiabilidade acima de 95%. O ponto de máxima produtividade foi de 6391 kg ha⁻¹ de B, atingido com a aplicação de 31 kg ha⁻¹ de B. A partir desse valor, o incremento adicional de boro resultou em declínio na produtividade em decorrência do efeito da toxicidade de B no solo e tecidos vegetais. A toxicidade foi estimada com base na redução em 10% da produtividade máxima, obtida na dose de 69 kg ha⁻¹ de B com valores de 5752 kg ha⁻¹ de grãos.

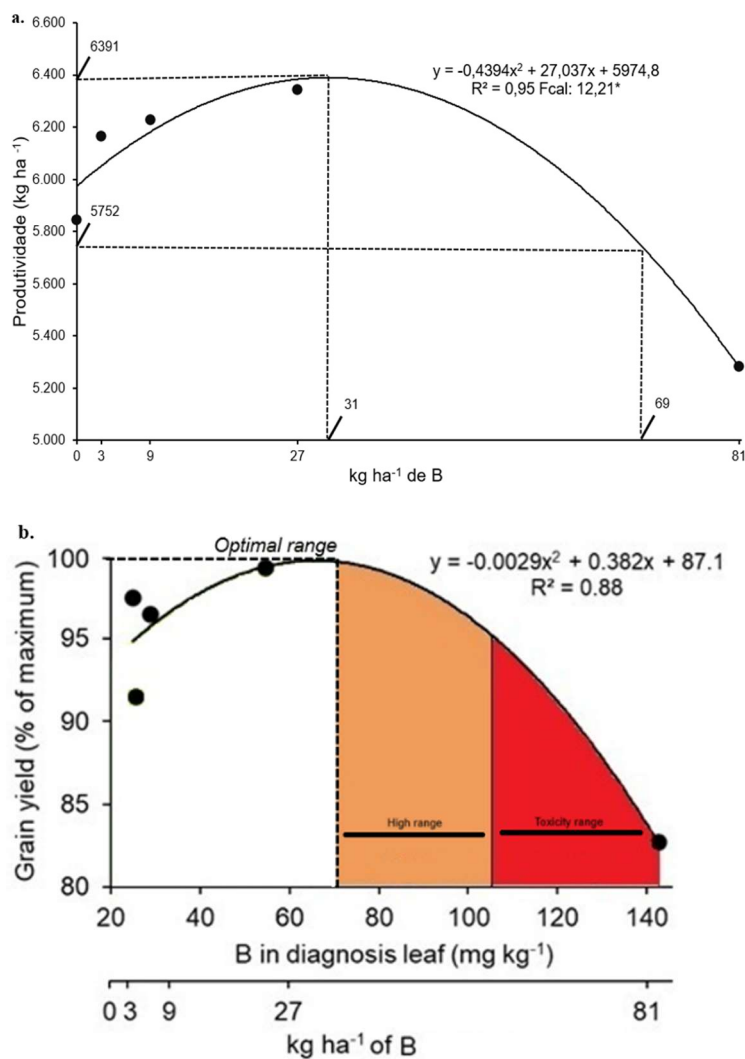


Figura 3. Produtividade de grãos e a relação entre teor de B foliar e produtividade de grãos de plantas de milho cultivadas sob diferentes doses de Ulexita (10% B) (0, 3, 9, 27 e 81 kg ha⁻¹ de B), para determinação dos níveis críticos. *Valores significativos pelo teste F á 5% de probabilidade de erro.

Todos os gráficos de teores de B no solo, folha diagnose e acúmulo na planta inteira foram significativos (Figura 4). Exceto o acúmulo de B na planta

inteira que demonstrou ajuste linear, o B no solo e folha diagnose apresentaram ajustes quadráticos com r^2 acima de 99%. Com o aumento da aplicação de doses de Ulexita (10% de B) via solo foi obtido o teor máximo de $4,9 \text{ mg dm}^{-3}$ de B proveniente da dose de 31 kg ha^{-1} de B em solo argiloso cultivado com milho, obtidos a partir dos parâmetros e ajustes da produtividade (dose ótima e tóxica). A faixa entre 31 e 69 kg ha^{-1} de B resultou em teores de $4,9$ a $7,7 \text{ mg dm}^{-3}$ no solo, respectivamente, sendo considerada a zona crítica de transição entre suficiência e potencial toxicidade.

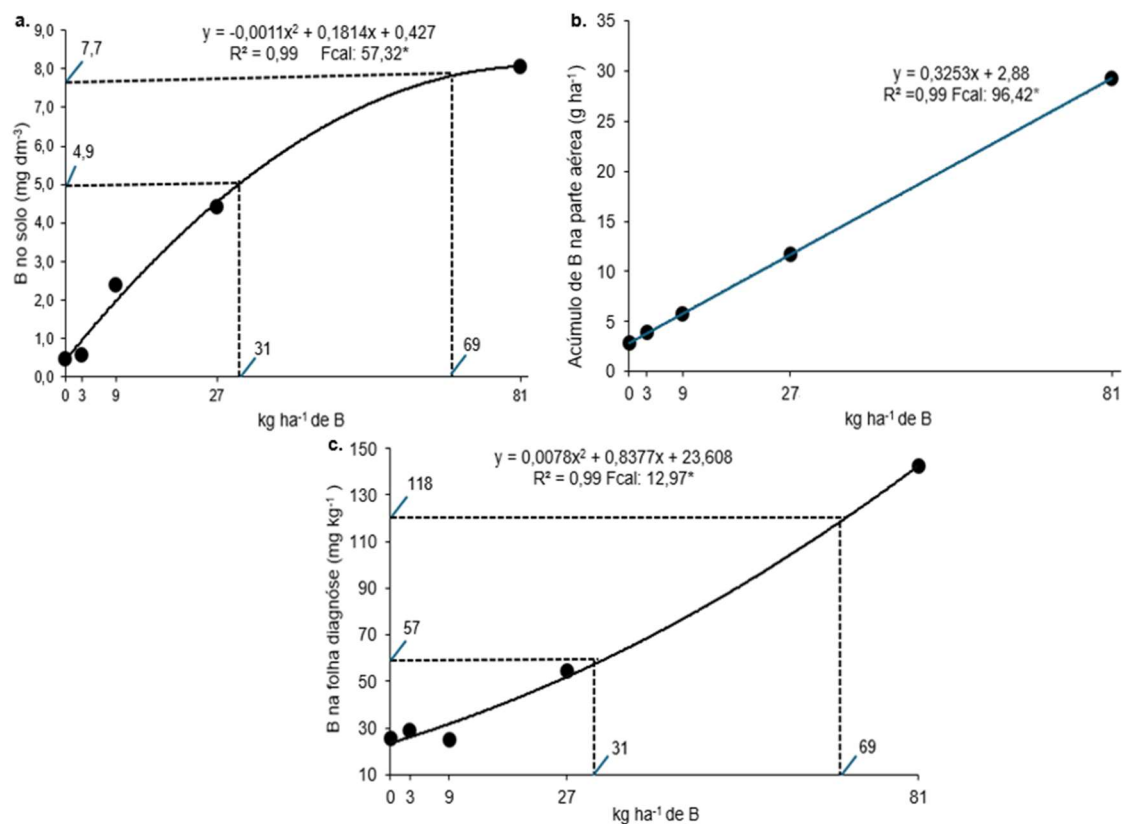


Figura 4. Teor de B no solo, acúmulo na planta inteira e folha diagnose em doses crescentes da fonte Ulexita ($0,3,9,27$ e 81 kg ha^{-1} de B) incorporados via solo.

*Valores significativos pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

O acúmulo de B na planta inteira de milho aumentou demonstrado pelo ajuste linear em função da aplicação de doses crescentes de Ulexita (10% de B). O B foliar iniciou com 10 mg kg^{-1} de B (dose 0) até 118 mg kg^{-1} de B na dose de 69 kg ha^{-1} de B. O intervalo entre as doses 31 a 69 kg ha^{-1} de B resultaram em

teores foliares de 57 a 118 mg kg⁻¹ de B. Foi indicado toxicidade a partir da dose de 69 kg ha⁻¹ com teores foliares a partir de 118 mg kg⁻¹ de B.

Danos no aparato fisiológico e nutricional

Os índices de antocianina se mantiveram estáveis ao longo do aumento das dosagens de Ulexita (10% de B), figura 5. Os decréscimos nos índices de pigmentos fotossintetizantes, como a clorofila e fotossíntese líquida (Figura 5) demonstraram-se evidentes à medida que aumentassem as doses de Ulexita (10% de B).

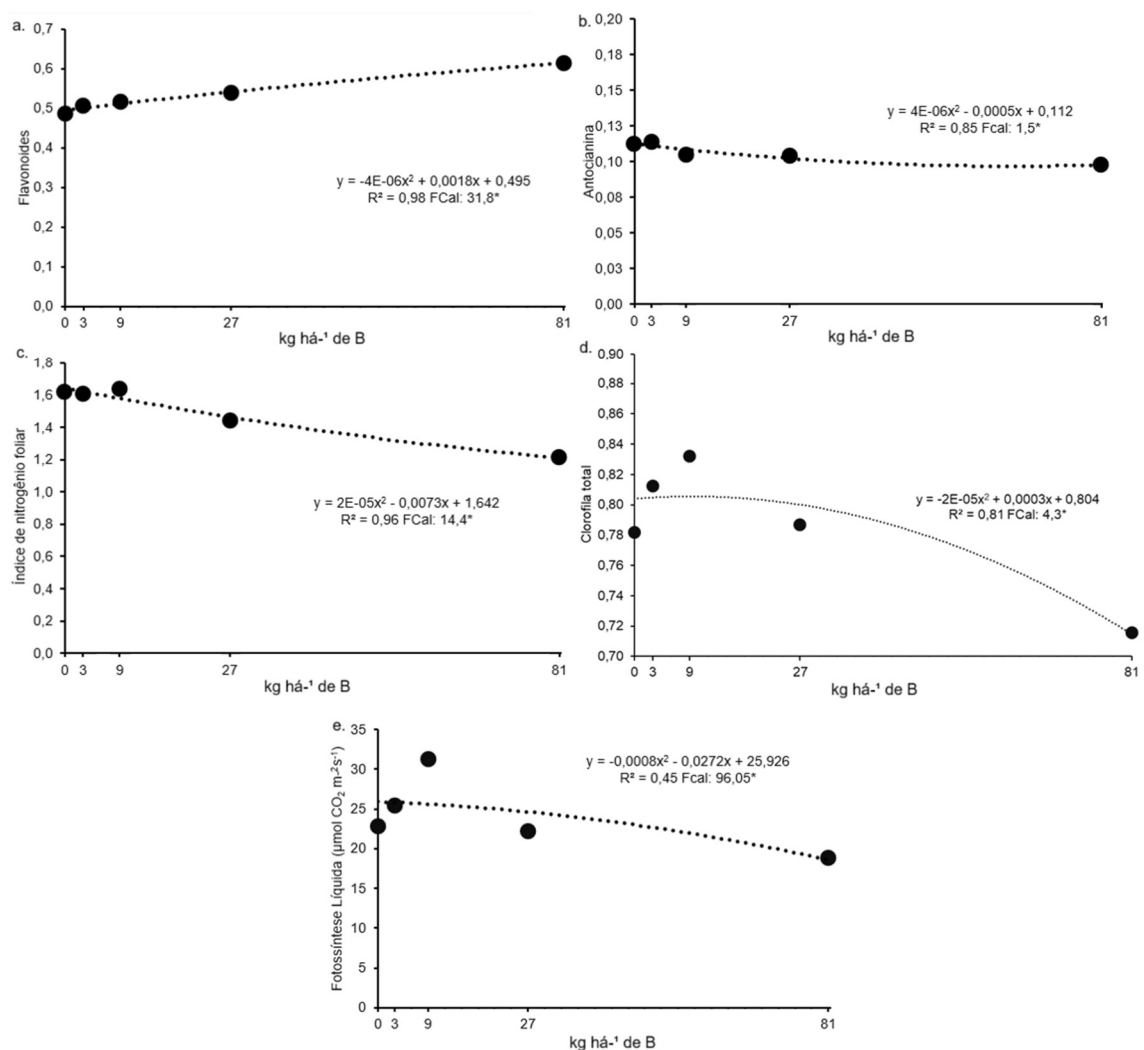


Figura 5. Índices de flavonoides, antocianina, nitrogênio foliar, clorofila total e fotossíntese líquida em doses crescentes da fonte Ulexita (0,3,9,27 e 81 kg ha⁻¹ de B) incorporados via solo. *Valores significativos pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

A análise da correlação de Pearson demonstrou comportamentos fisiológicos distintos em função da dose testada de B (Figura 6). As correlações expressivas foram observadas entre o boro no solo (Bsol) com o boro na folha diagnose (BFD) com $r=0,93$. Outras associações foram significativas como a relação entre Bsol e boro na planta inteira (BPI), como também o BFD com BPI, $r=0,90$ e $0,91$, respectivamente. Tais correlações positivas e significativas indicaram que o aumento da disponibilidade de B no solo promoveu maior acúmulo do nutriente as plantas, o que refletiu no teor foliar. Outro fato notório foi a produtividade (PROD) com Bsol ($r=-0,63$), que indicou correlação negativa, sugerindo que o excesso de fornecimento de B via solo resultou em acúmulo nos tecidos vegetais afetando negativamente a produtividade de grãos. Esses resultados destacaram que a forma de adubação via solo influenciou diretamente as interações entre análises estudadas com implicações importantes para o manejo nutricional.

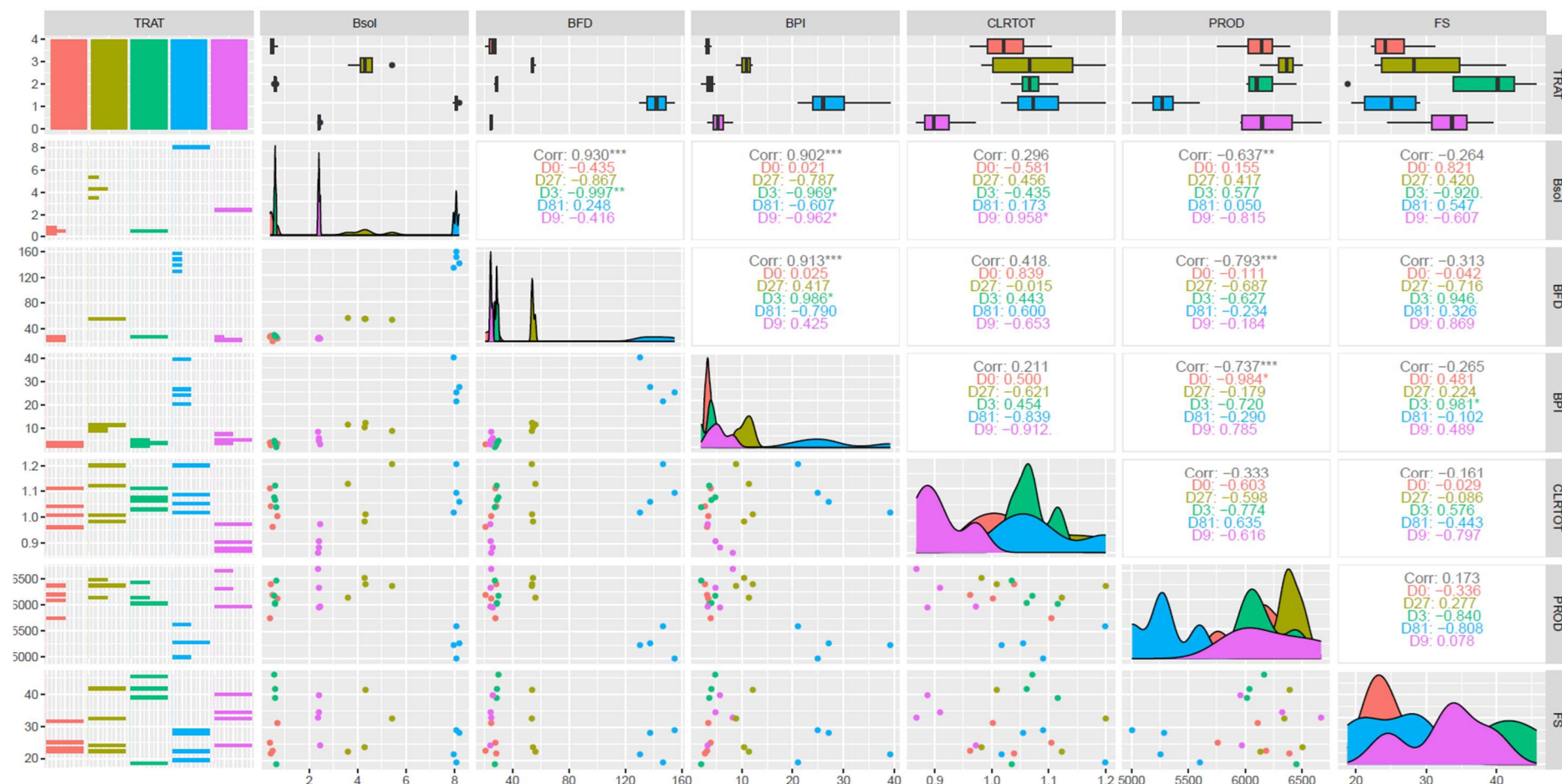


Figura 6. Correlação de Pearson entre boro no solo (Bsol), boro na folha diagnose (BFD), boro na planta inteira (BPI), clorofila total (CLRTOT), produtividade (PROD) e fotossíntese líquida (FS) em doses crescentes da fonte Ulexita (0 (D0),3 (D3),9 (D9),27 (D27) e 81 (D81) kg ha⁻¹ de B) incorporados via solo. ***Correlações significativas entre variáveis.

A toxicidade visual de B em plantas de milho, foi observada no estágio inicial fenológico v6 (sexto nó, com a sexta folha desenvolvida) e descritas ao comparar folhas de milho saudáveis com as demais com sintomas de toxicidade de B (Figura 7). Os sintomas foram caracterizados por manchas marrons necróticas nas margens das folhas mais velhas. As folhas possuíam aspecto onduladas, enrijecidas e enrugadas.

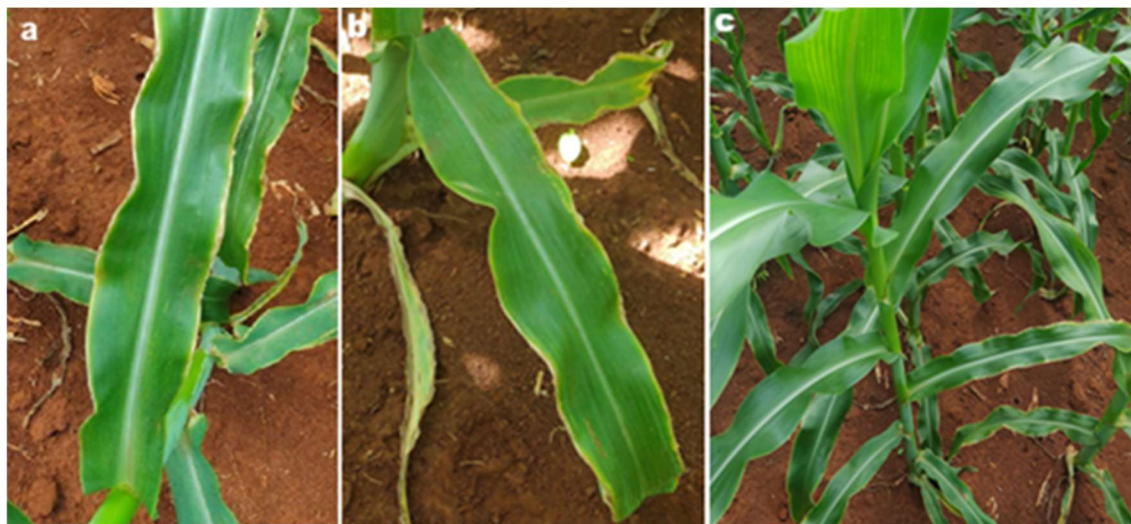
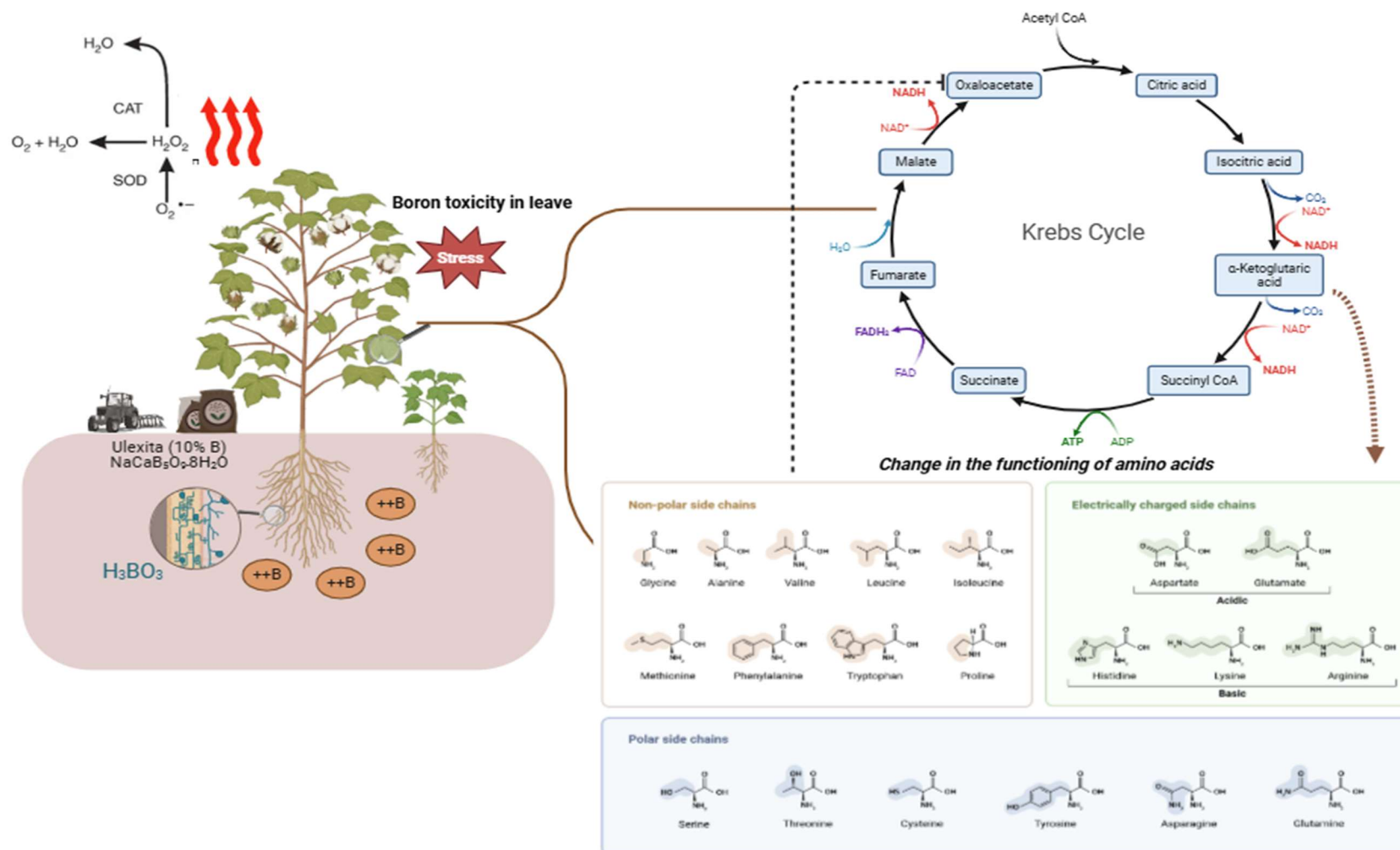


Figura 7. Plantas de milho em estágio v6 com sintomas de toxicidade de B com manchas de necrose nas bordas das folhas velhas.

4.2. Cultura do algodão (safra 2024/2025)

Graphical abstract:



A aplicação de Ulexita (10% de B) via solo demonstrou diferença na produtividade de algodão em caroço (Figura 8). A regressão foi polinomial e o modelo quadrático para ambas cultivares testadas, com confiabilidade dos resultados acima de 70% (r^2). O ponto de máxima produtividade foi de 245 e 206 @ ha⁻¹ de algodão em caroço, respectivamente, para a cultivar 1 (DP 2297 B3XF) e 2 (FM 974 GLT), obtidas com a aplicação de 11 e 9 kg de B ha⁻¹, respectivamente. A partir desse valor, o incremento adicional de B resultou em declínio na produtividade em decorrência do efeito da toxicidade de B na folha e tecidos vegetais.

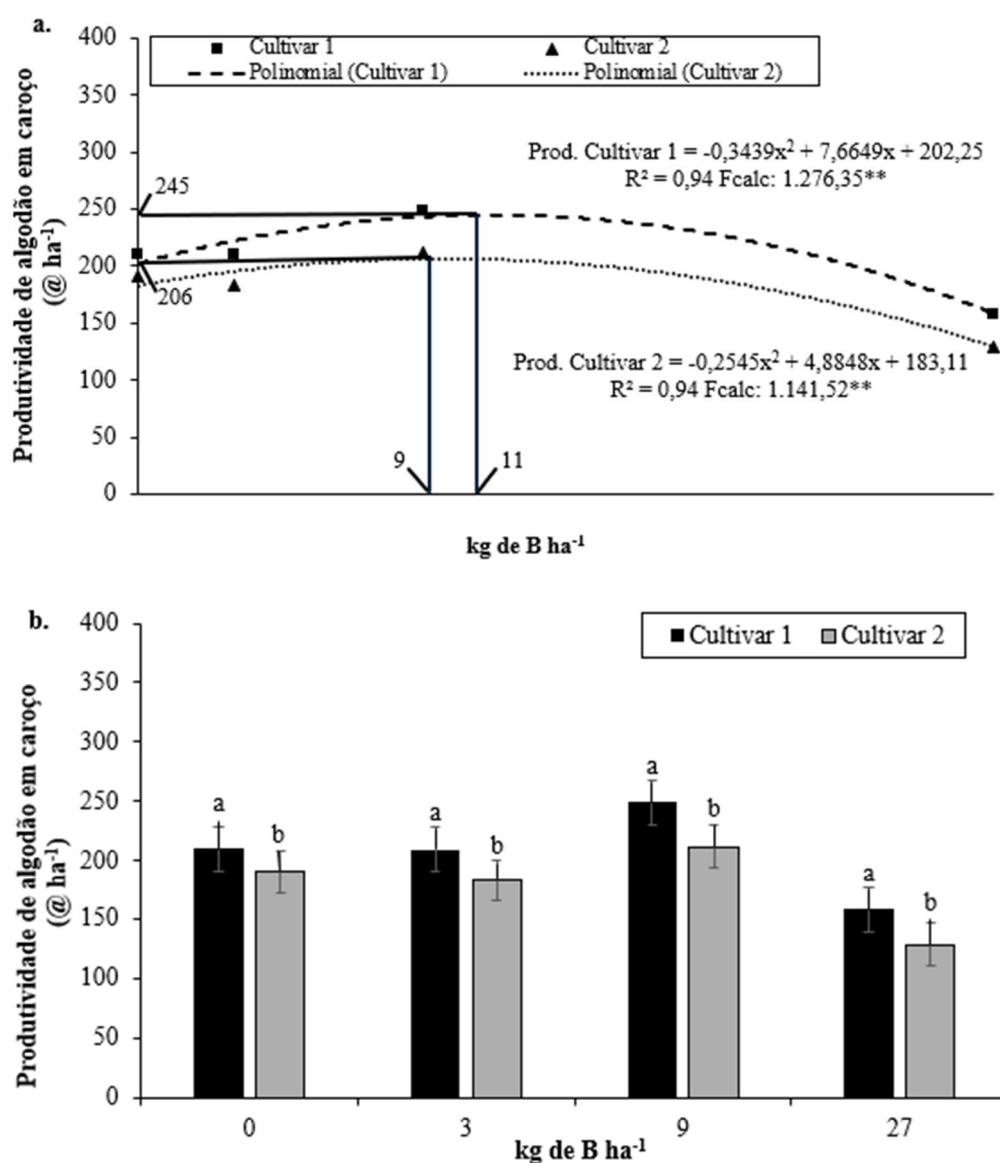


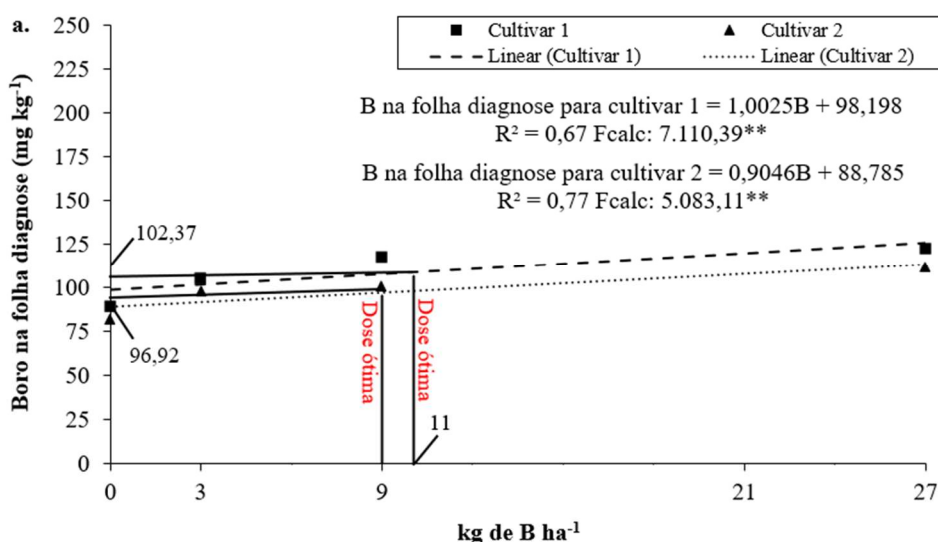
Figura 8. Produtividade de algodão em caroço e a interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares

(b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

A toxicidade foi estimada a partir da redução em 10% da produtividade máxima, para a cultivar 2 foi obtido a dose de 18,6 kg de B ha^{-1} com valores de 185,4 kg ha^{-1} de algodão em caroço, identificada como tóxica. Para a cultivar 1, a dose de 19,6 kg de B ha^{-1} com valores de 220,4 kg ha^{-1} de algodão em caroço foi identificada como tóxica. A cultivar 1 respondeu mais em produtividade em relação a cultivar 2 (Figura 8b).

Teores ótimos e tóxicos de B na folha diagnose

O teor de B na folha diagnose aumentou com aplicação crescente de Ulexita via solo, conforme ajuste linear (Figura 9a). Foram estimados a dose ótima em comparação a máxima produtividade e obtidos os valores de B adequados na folha diagnose de 102,37 e 96,92 mg B kg^{-1} para cultivar 1 e 2, respectivamente (Figura 9a). Conforme a estimativa da dose tóxica (19,6 e 18,6 kg de B ha^{-1}) para a cultivar 1 e 2, respectivamente, os valores encontrados foram de 110,84 e 105,61 mg de B kg^{-1} , considerados neste estudo como tóxicos para as duas cultivares testadas (Figura 9b). Assim como na produtividade de algodão em caroço, para a análise de B na folha diagnose também houve maior teor do nutriente na cultivar 1 (Figura 9c).



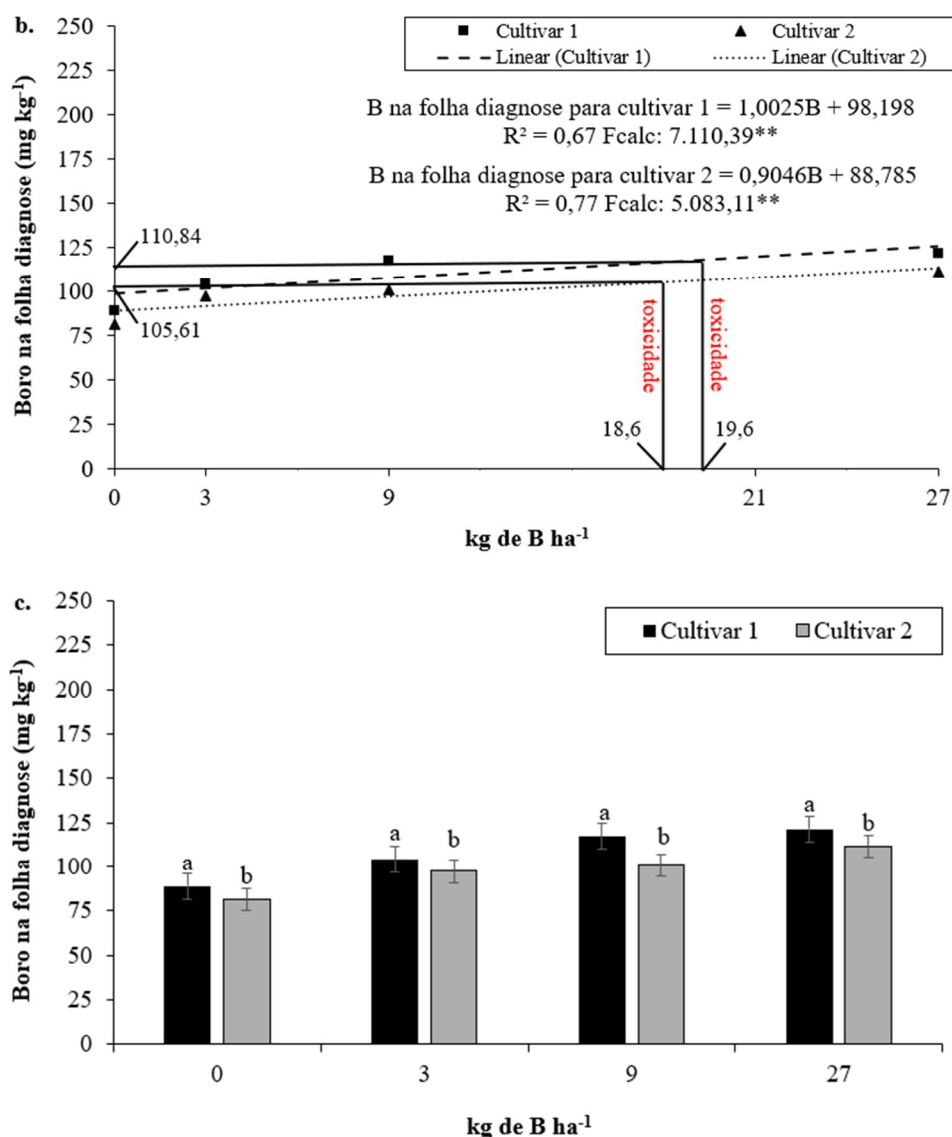


Figura 9. Boro na folha diagnose de algodão e a interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a e b) e comparativo entre cultivares (c). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias das cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Danos na atividade do sistema antioxidante: enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT)

A atividade da SOD demonstrou diferença apenas para as doses de B, com ajuste linear (Figura 10a). Notamos aumento da enzima a medida que fosse aumentando as doses de B via solo. A atividade da enzima antioxidante catalase

para a cultivar 1 demonstrou diferença com o aumento das doses, com ajuste linear (Figura 10b). Em contraste, para a cultivar 2 não foram obtidas variações entre as doses de B via solo.

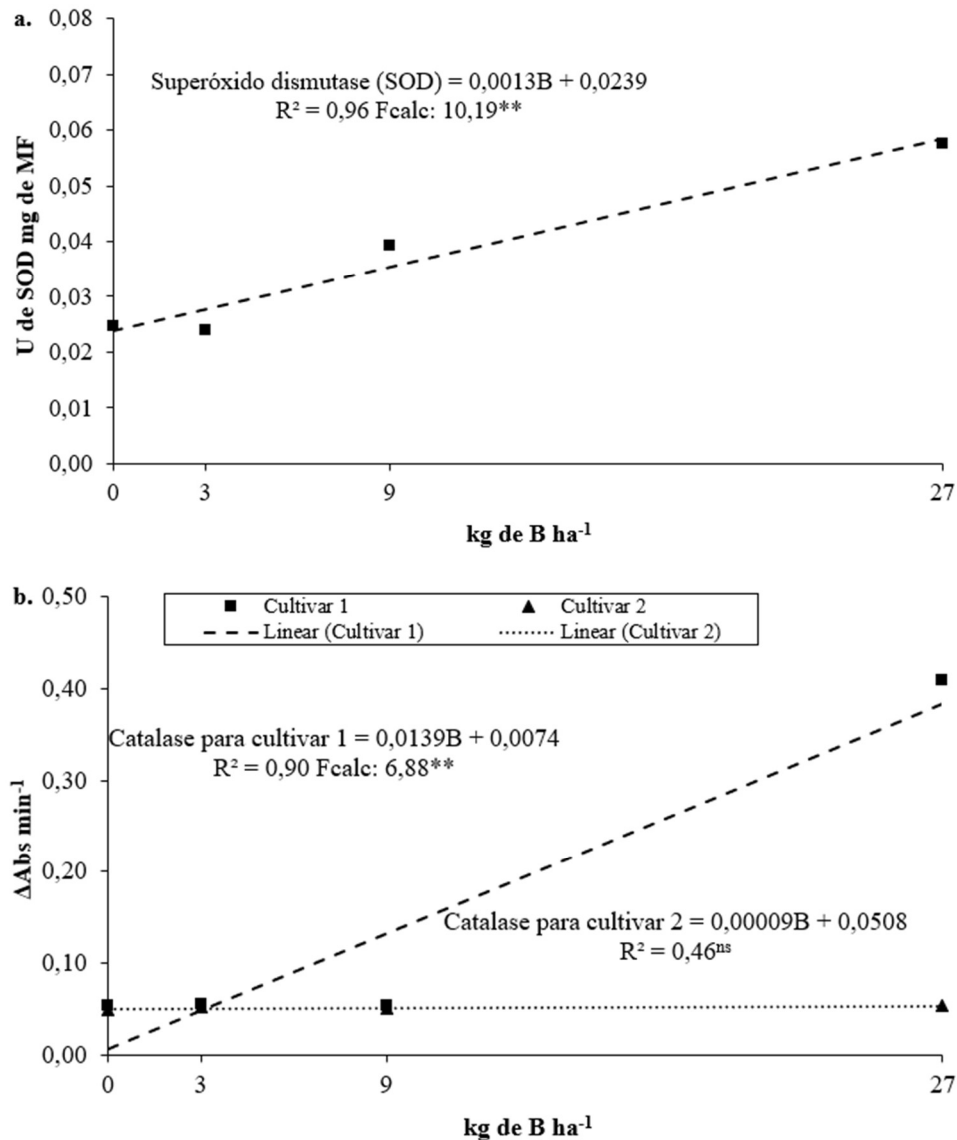


Figura 10. Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (a) em doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita). Atividade da enzima catalase (b) em doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974). ns,** Não significativo e valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro, respectivamente.

Desregulação nas trocas gasosas

A aplicação de B via solo apresentou pico de condutância estomática (Gs) na dose de 3, 9 e 27 kg de B ha⁻¹ para a cultivar 1 significativamente maior em relação à cultivar 2 (Figura 11). No tratamento controle sem aplicação de B não foram observadas diferenças entre as cultivares, pois ambas mantiveram valores semelhantes de condutância estomática.

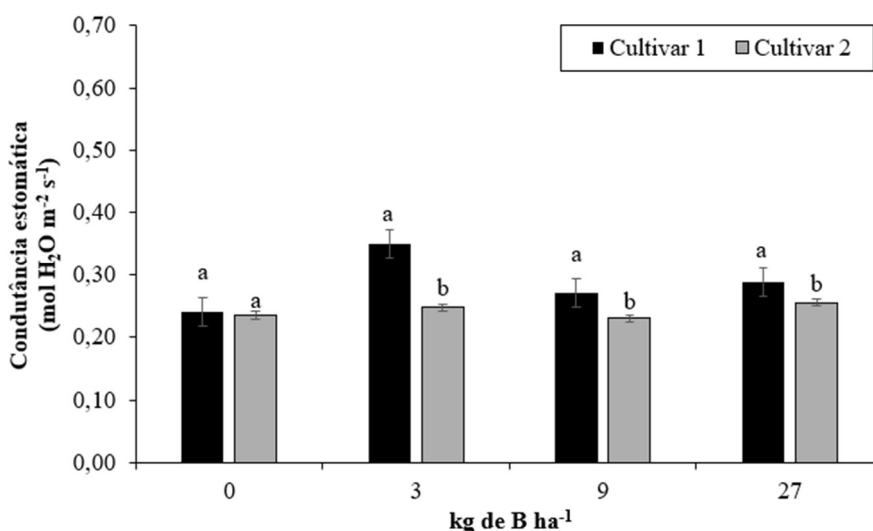


Figura 11. Condutância estomática (gs) na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Os dados se ajustaram em regressões lineares para ambas as cultivares (Figura 12a) com r^2 acima de 80% de confiabilidade. A cultivar 2 demonstrou maiores valores de fotossíntese líquida para todas as doses, exceto na dosagem de 27 kg de B há⁻¹ que se assemelhou a cultivar 1 (Figura 12b). A taxa fotossintética foi menor na cultivar 1, exceto na dose maior de 27 kg de B há⁻¹. Logo, a cultivar 2 apresentou maior demanda metabólica e resistência a altas dosagens de B em processos fotossintéticos.

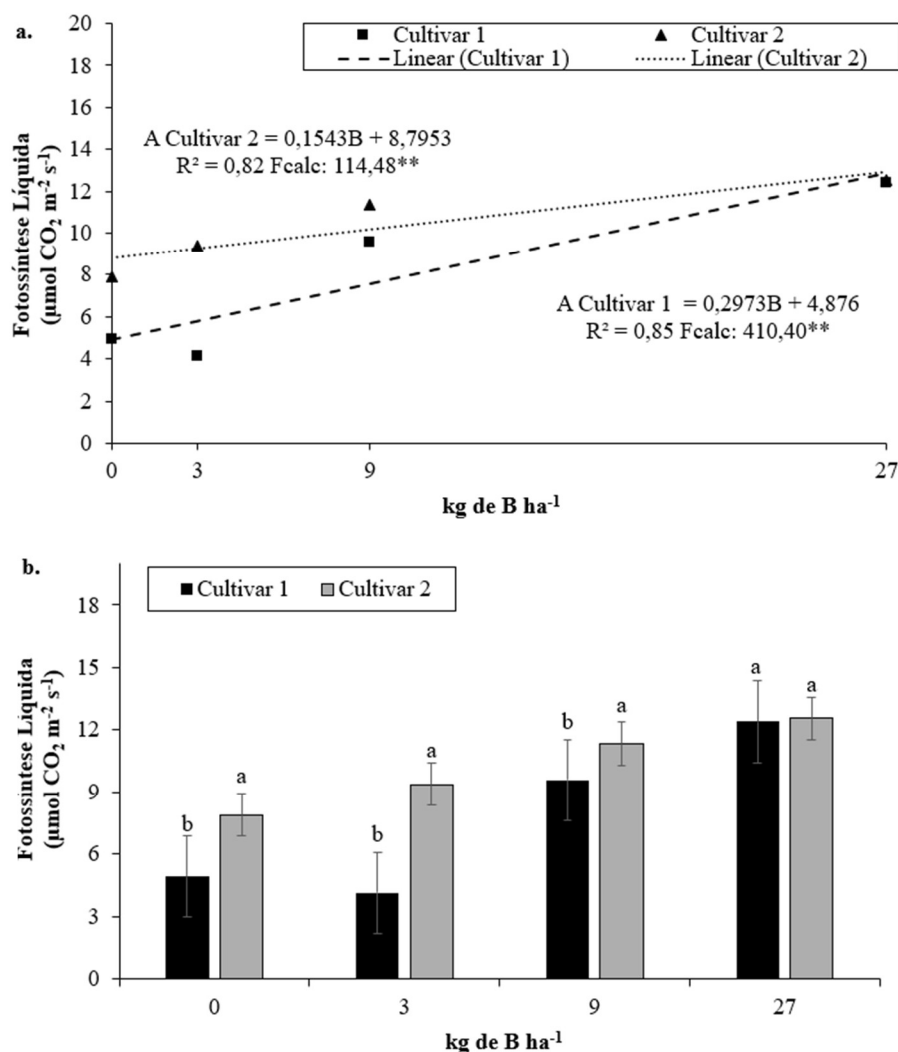


Figura 12. Fotossíntese líquida na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha^{-1} de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

A concentração interna de CO_2 foi menor no tratamento controle (0 kg de B ha^{-1} via solo) e a medida que acrescia o B via solo a concentração interna de CO_2 aumentava (Figura 13a). Sem a aplicação de B a cultivar 1 demonstrou maior concentração interna de CO_2 em relação a cultivar 2 (Figura 13b). O mesmo comportamento de ranqueamento das cultivares foi obtido na dose de 9 kg de B ha^{-1} , porém com valores superiores ao obtido no tratamento controle. Na

dose de 3 kg de B há⁻¹ a cultivar 2 apresentou as maiores concentrações internas de CO₂.

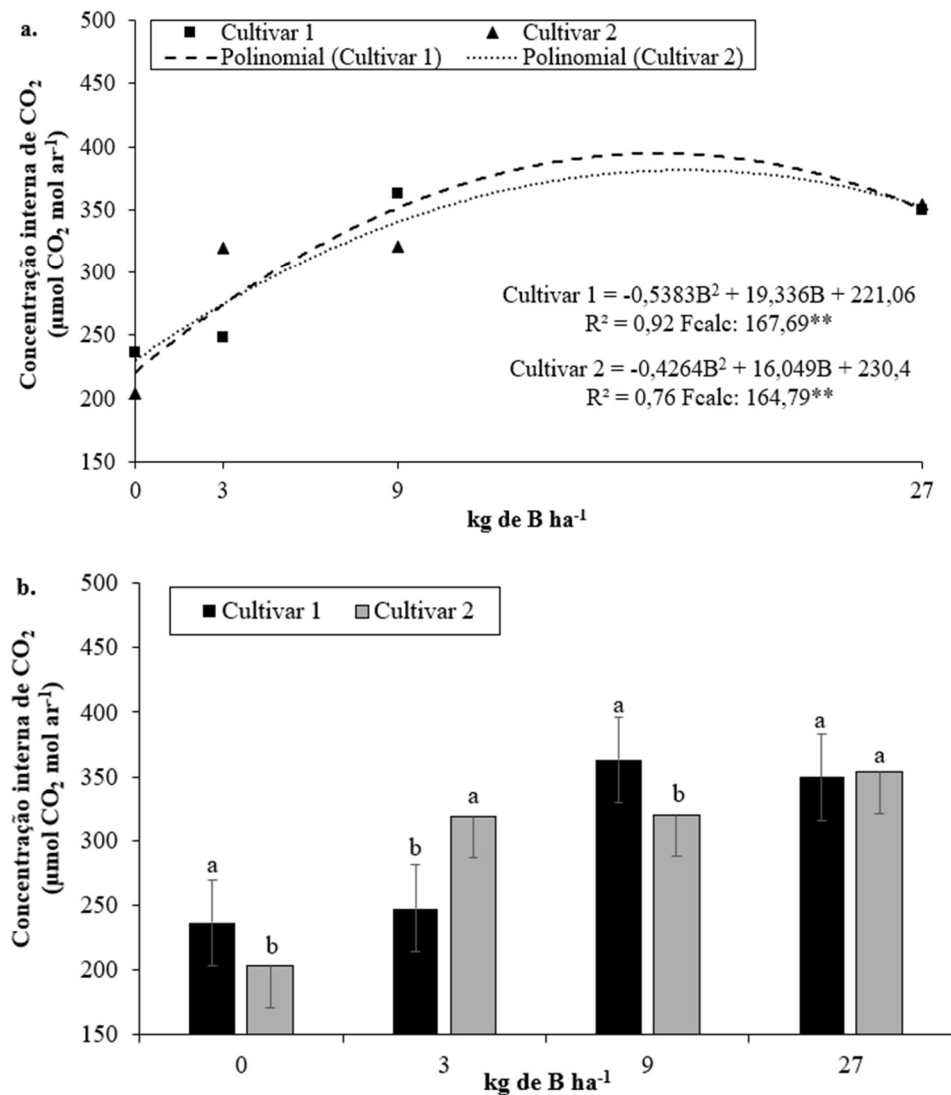


Figura 13. Concentração interna de CO₂ na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Concentração de aminoácidos de cadeia lateral ácida (–COOH), como ácido aspártico e ácido glutâmico

A aplicação de B via solo, isolada, diminuiu a concentração de ácido aspártico nas doses de 3 e 9 kg de B ha⁻¹, mas aumentou com a dose máxima de 27 kg de B ha⁻¹ (Figura 14) na cultivar 2. O estresse por altas dosagens (>11 kg de B ha⁻¹), consideradas neste estudo como tóxicas, aumentaram a concentração de ácido aspártico. Todavia, o ácido glutâmico não demonstrou diferenças significativas para nenhum dos tratamentos isolados e interação avaliados.

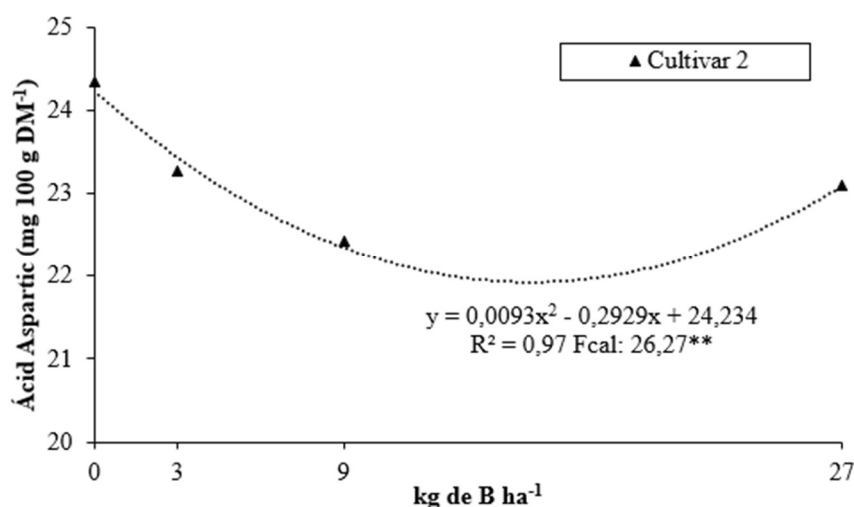


Figura 14. Concentração de ácido aspártico entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) na cultivar 2 (FM 974 GLT) conforme ajuste da equação.

**Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro.

Concentração de aminoácidos de cadeia lateral básica (–NH₂ e imidazol): arginina, histidina e lisina

As aplicações de B via solo se ajustaram em modelos quadráticos, com aumento expressivo da concentração de arginina a medida que aumentassem as doses de B via solo (Figura 15a). A cultivar 1 acumulou mais arginina em todas as doses de B via solo em comparativo com a cultivar 2 (Figura 15b).

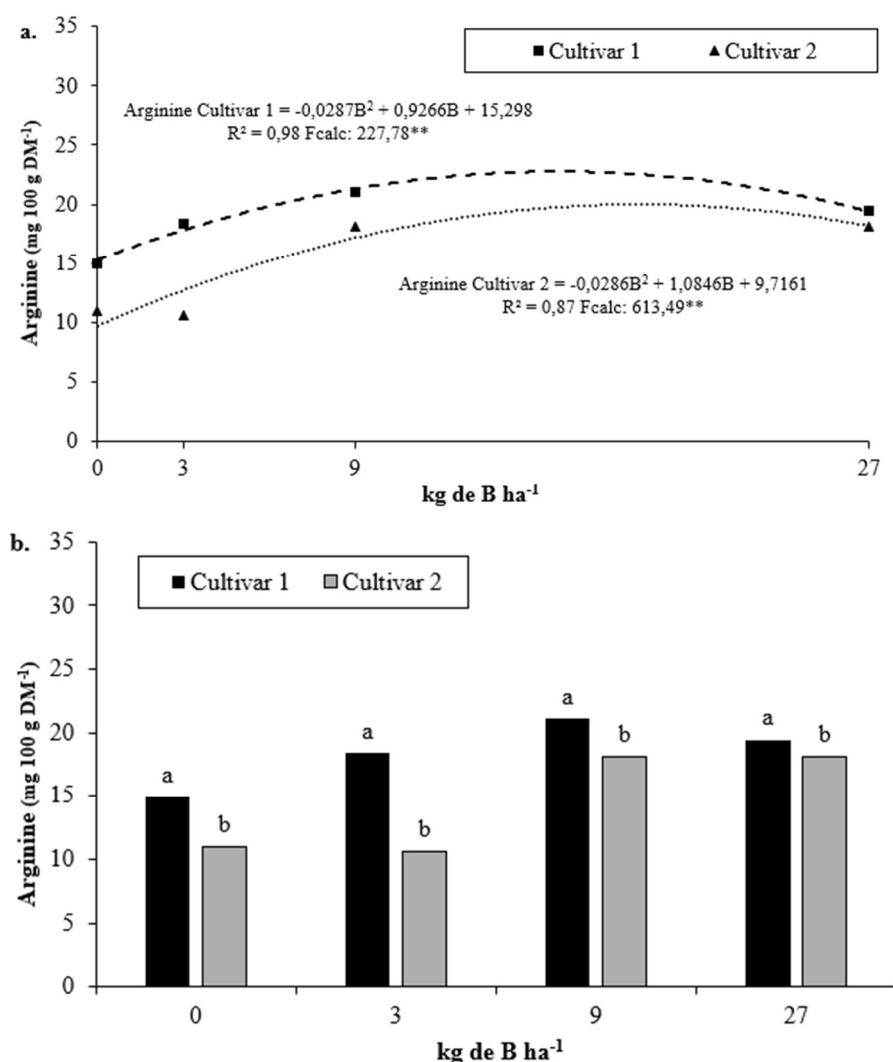


Figura 15. Concentração de arginina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

As concentrações de histidina acumuladas nas folhas via relação solo-planta em decorrência da aplicação de B via solo se ajustaram em regressão polinomial pelo modelo quadrático nos dois cultivares testados (Figura 16a). O r^2 calculado no cultivar 2 foi considerado baixo, porém houve significância. Notamos diferença entre os cultivares, na qual o cultivar 1 demonstrou maior concentração de histidina, exceto na dose de 3 kg de B ha⁻¹ que obteve comportamento contrário (Figura 16b).

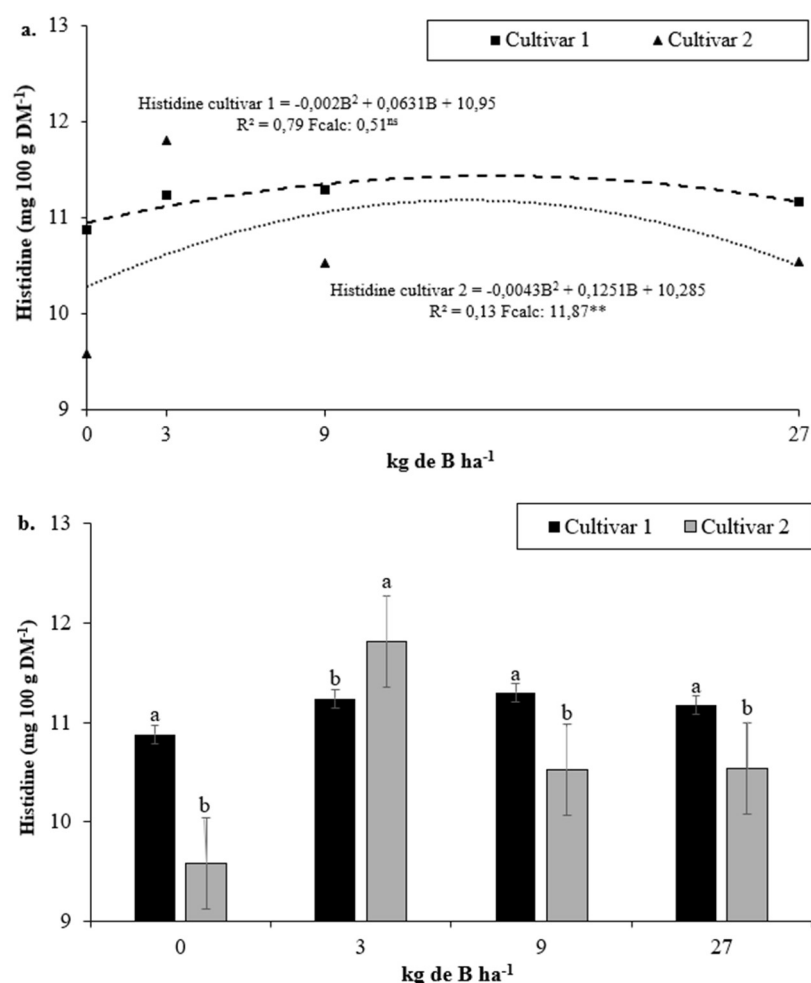


Figura 16. Concentração de histidina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

A incorporação de B via solo incrementou linearmente a concentração de lisina para a cultivar 2 (Figura 17a), porém para o cultivar 1 demonstrou estabilidade nas concentrações deste aminoácido. O cultivar 2 acumulou mais lisina em relação a cultivar 1 em doses altas de B via solo (>18 kg de B ha⁻¹), consideradas neste estudo como tóxicas (Figura 17a e b).

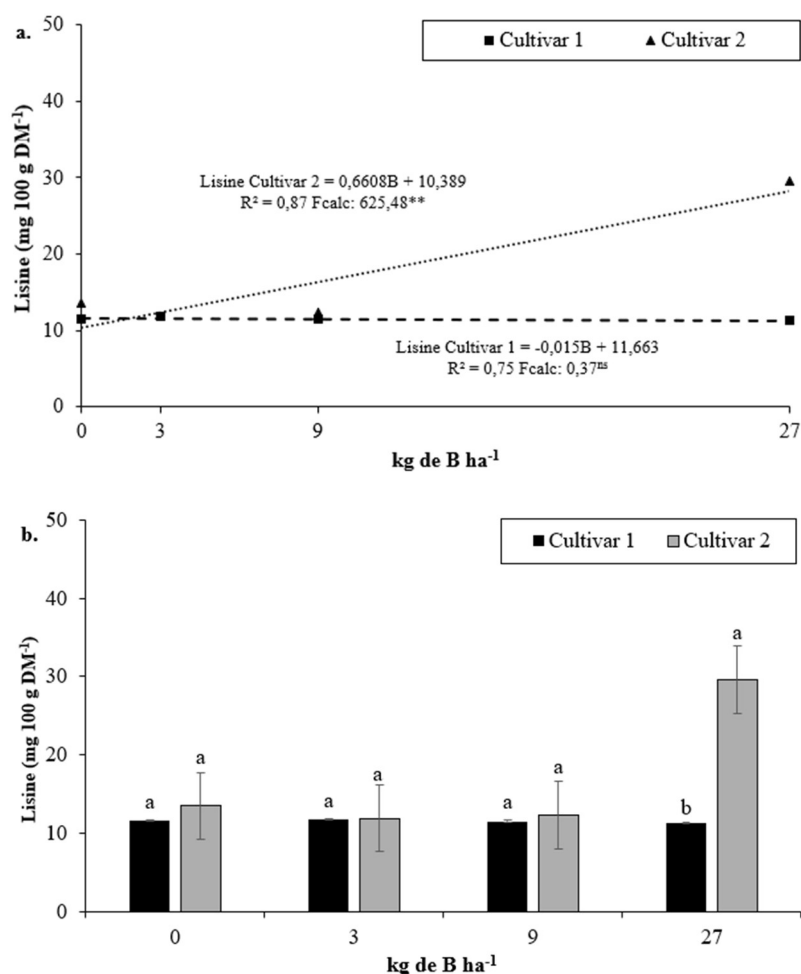


Figura 17. Concentração de lisina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott (p < 0,05).

Concentração de aminoácidos com cadeia lateral não polar (hidrofóbicos): Alanina, glicina, isoleucina, leucina, metionina, valina, prolina

As aplicações de B via solo para a concentração de alanina se ajustaram em regressão polinomial no modelo quadrático. Doses de 3 kg de B ha⁻¹ diminuíram a concentração de alanina, independente do cultivar testado (Figura 18). Com o aumento do B via solo as concentrações do aminoácido aumentaram até a dose de 9 kg de B ha⁻¹, a partir desta dosagem os valores voltaram a reduzir drasticamente.

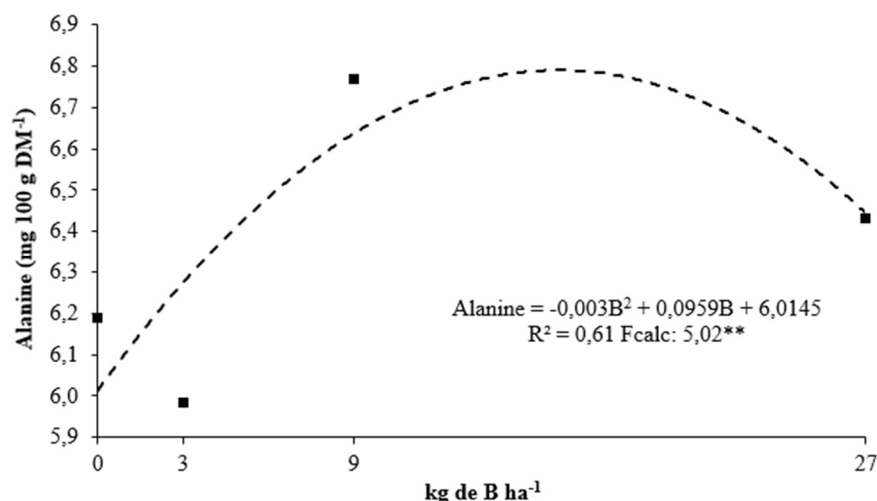
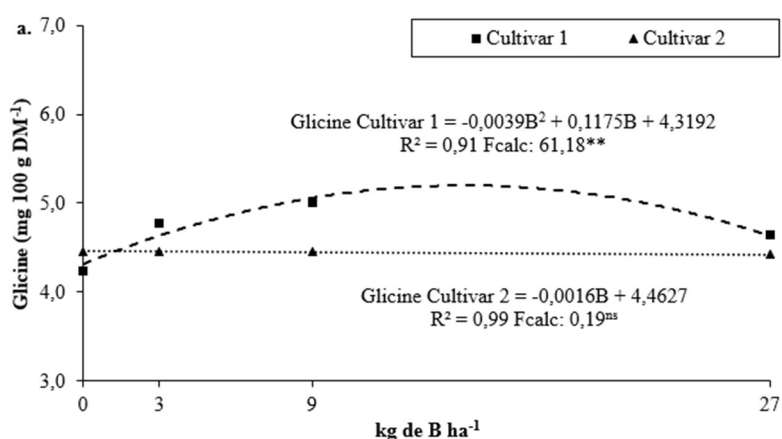


Figura 18. Concentração de alanina entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro.

A incorporação de B via solo para a concentração de glicina na cultivar 1 (Figura 19a) se ajustou a uma regressão polinomial de modelo quadrático, com valores expressivos do aminoácido nas doses de 3 e 9 kg de B ha⁻¹, porém para o cultivar 1 demonstrou estabilidade nas concentrações deste aminoácido. O cultivar 1 acumulou mais glicina em relação a cultivar em todas as doses de B e o mesmo não foi observado no tratamento controle. A cultivar 2 demonstrou maior concentração de glicina no tratamento controle (Figura 19b).



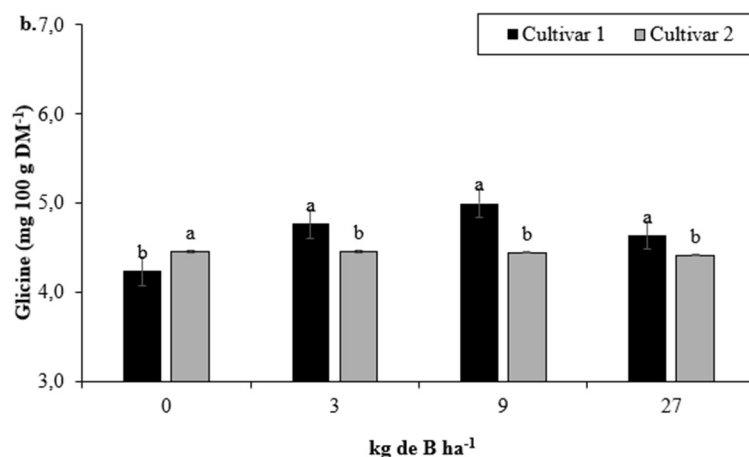
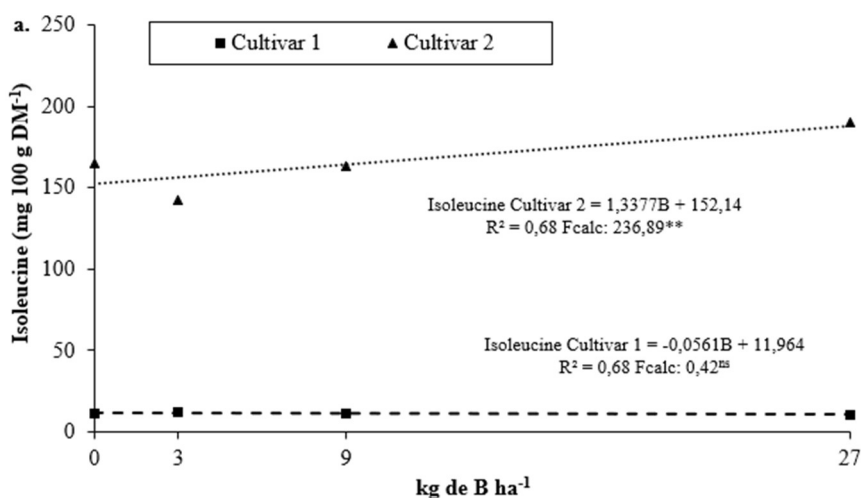


Figura 19. Concentração de glicina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).



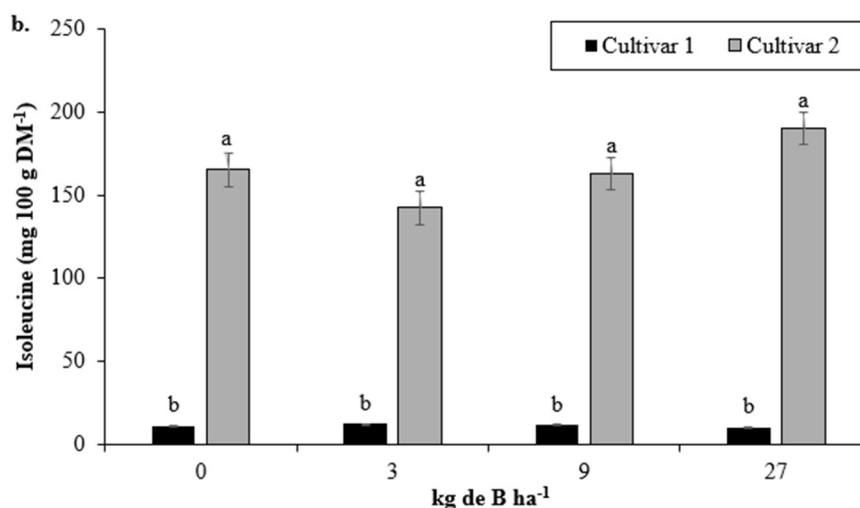
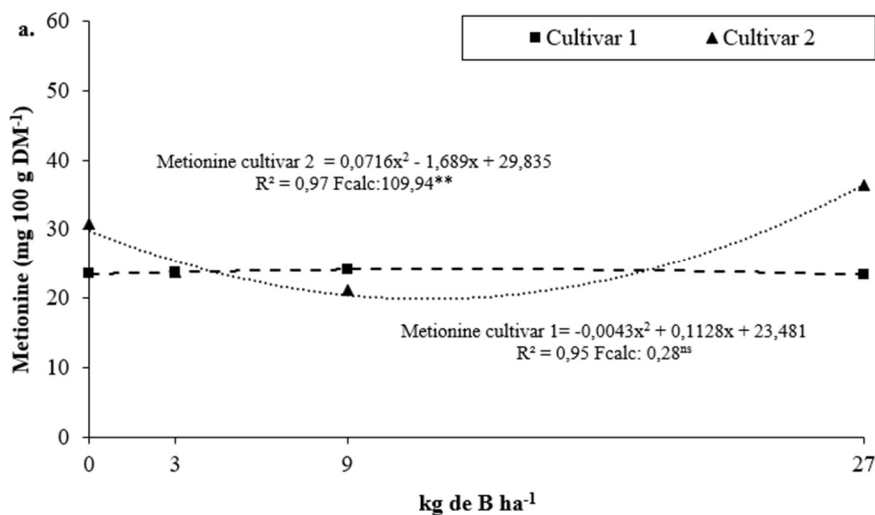


Figura 20. Concentração de isoleucina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Valores significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

O incremento do B via solo ajustou os dados em regressão polinomial em equação quadrática para ambas as cultivares testadas, mas apenas a cultivar 1 não demonstrou diferença entre as doses para a metionina. A cultivar 2 apresentou menores concentrações de metionina nas doses de 3 e 9 kg de B ha⁻¹, a partir destas doses houve aumento do aminoácido. Na doses de 27 kg de B ha⁻¹ a cultivar 2 concentrou mais metionina do que a cultivar 1 (Figura 21b). A cultivar 1 foi superior na concentração do aminoácido para a dose de 0 e 9 kg de B ha⁻¹.



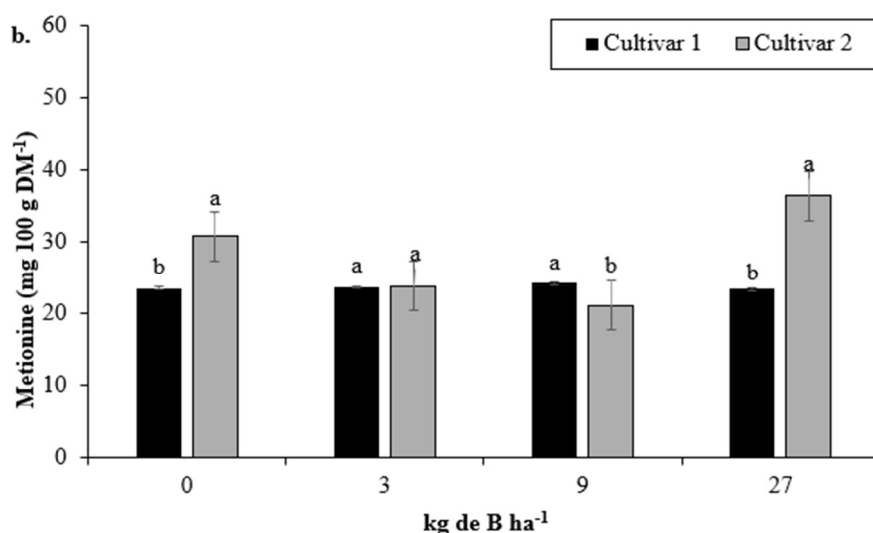
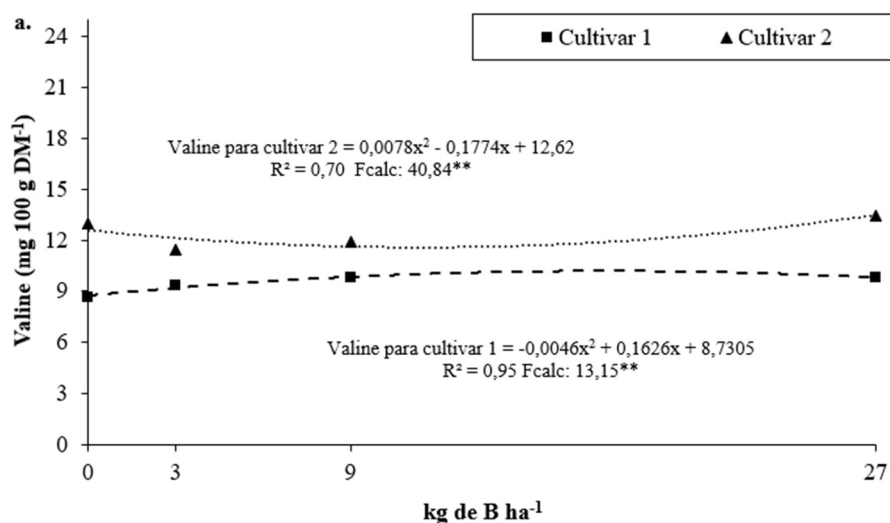


Figura 21. Concentração de metionina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). ns, **Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

As aplicações de B via solo foram significativas e se ajustaram em regressão polinomial em modelo de equação quadrática para as duas cultivares na avaliação da concentração de valina (Figura 22a). O aminoácido valina se concentrou em maior quantidade na cultivar 2 em todas as doses testadas (Figura 22b).



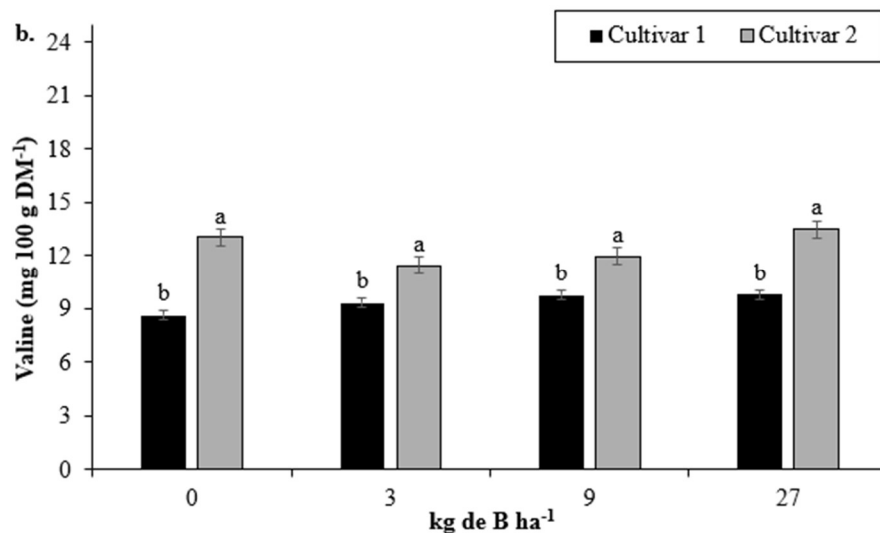
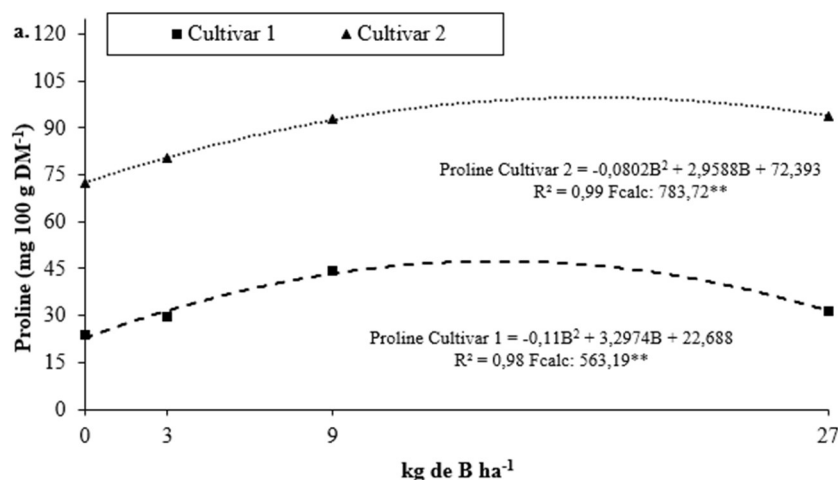


Figura 22. Concentração de valina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). ns, **Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Assim como a valina, as concentrações de prolina foram significativas e se ajustaram em regressão polinomial em equação quadrática, com crescente aumento das concentrações do aminoácido a medida que aumentasse as doses de B via solo (Figura 23a). A cultivar 2 também apresentou maiores concentrações de prolina do que a cultivar 1, independente da dose testada.



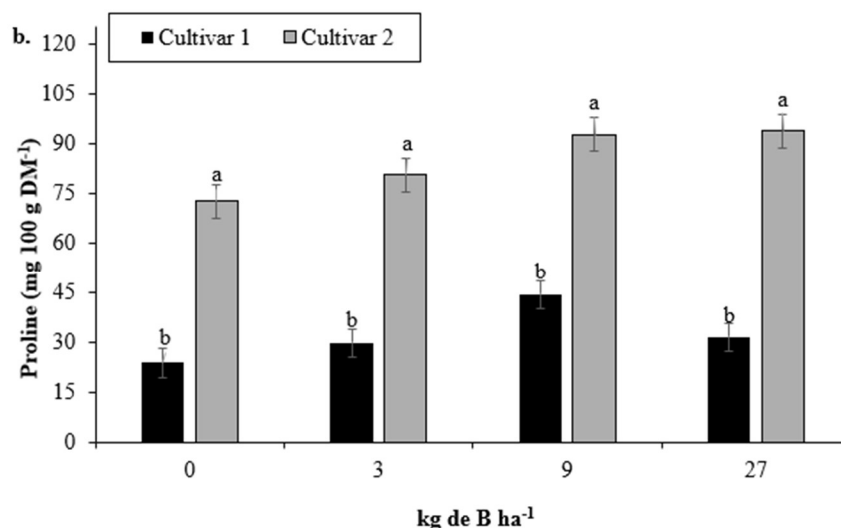


Figura 23. Concentração de prolina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Concentração de aminoácidos com cadeia lateral polar (–OH, –OH aromático e –SH): Serina, treonina, tirosina, cistina e fenilamina

Os dados da aplicação de B via solo para serina se ajustaram em regressão quadrática para as cultivares (Figura 24a). A partir da dose estimada como ótima de 9 e 11 kg de B ha⁻¹ a concentração de serina se manteve estável e posteriormente demonstrou queda, conforme ajuste da curva. A cultivar 2 demonstrou maiores concentrações de serina apenas nas doses de 0 e 3 kg de B ha⁻¹.

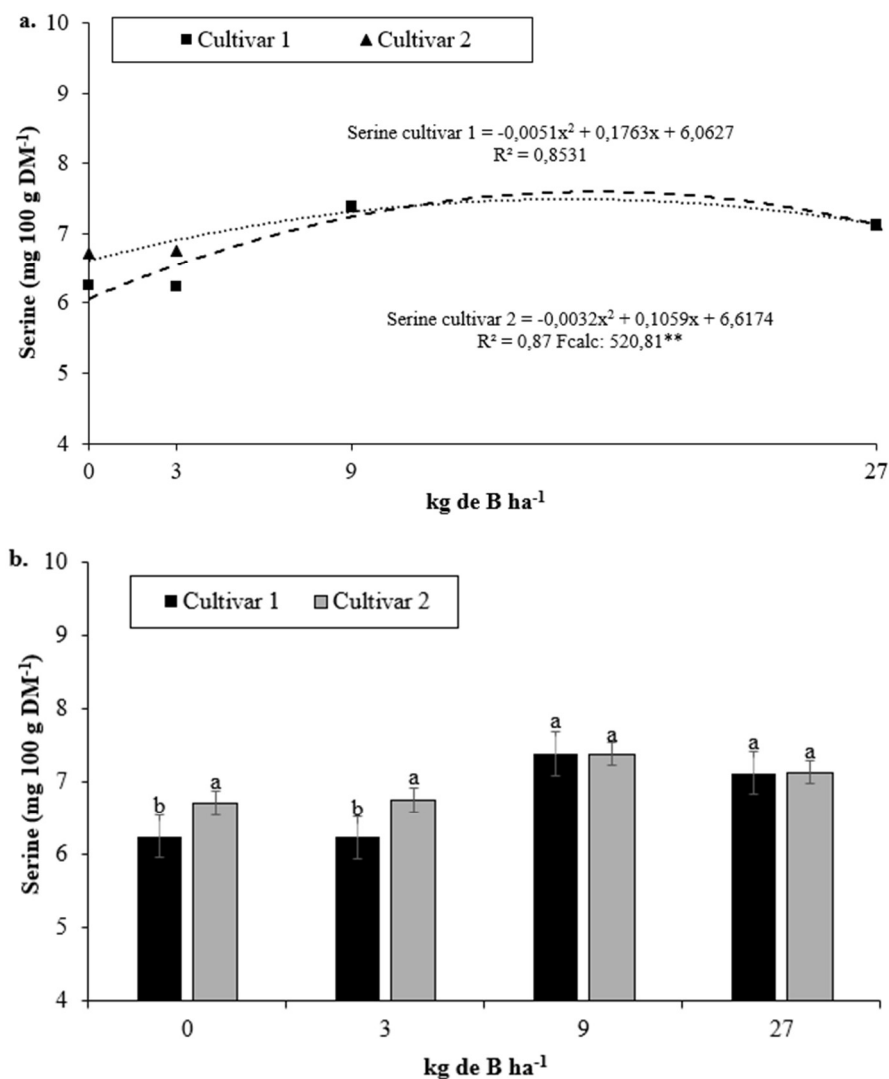


Figura 24. Concentração de serina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

A aplicação de B via solo para treonina se ajustaram em regressão quadrática para a cultivar 1 e linear para a cultivar 2 (Figura 25a). Aumentos significativos foram obtidos com o aumento das doses de B, conforme ajuste da curva. O cultivar 1 demonstrou maiores concentrações de treonina apenas nas doses de 0 e 3 kg de B ha⁻¹ (Figura 25b).

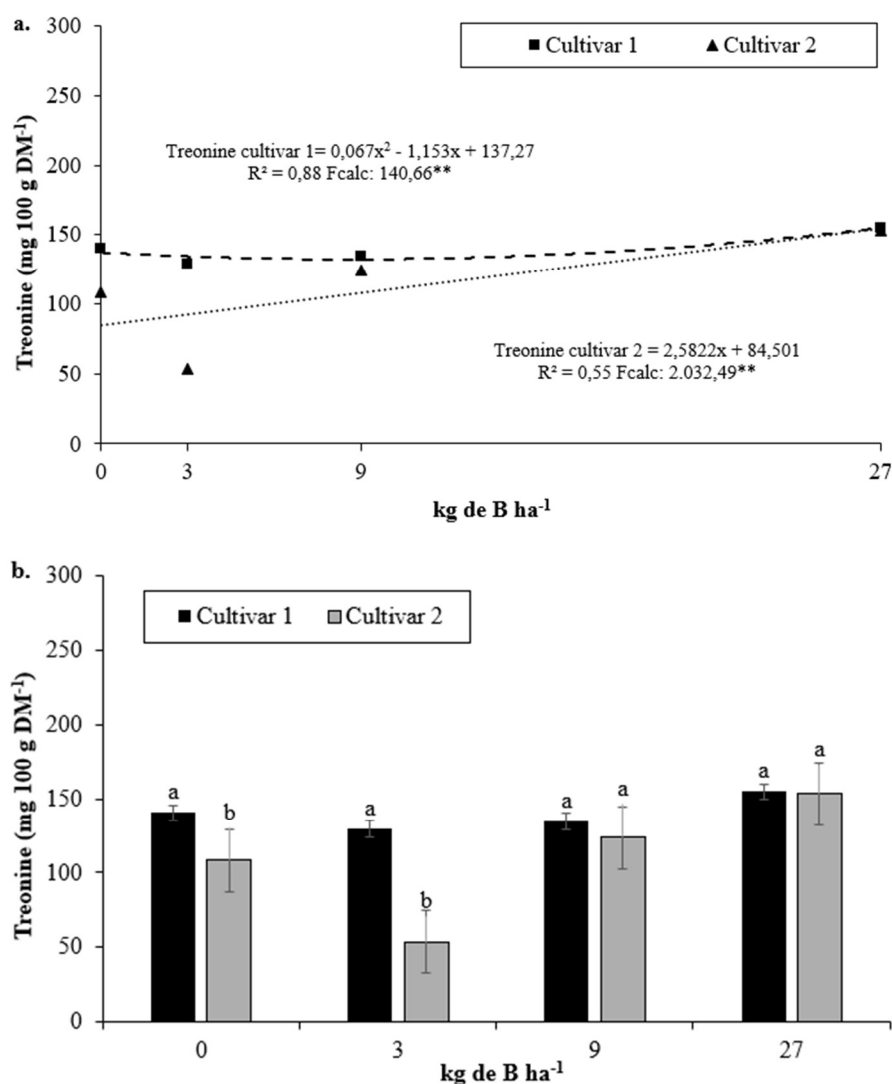


Figura 25. Concentração de treonina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b). **Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Aumentos significativos na tirosina para a cultivar 1 foram obtidos com o aumento das doses de B, conforme ajuste linear. Os dados da aplicação de B via solo para o aminoácido se ajustaram em regressão linear para a cultivar 1 e quadrática para a cultivar 2 (Figura 26a). Para a cultivar 2, a dose de 3 e 9 kg de B ha⁻¹ demonstrou comportamento diferente na concentração do aminoácido, com menores valores em relação a dose controle e máxima. O cultivar 1

demonstrou maiores concentrações de tirosina apenas nas doses de 9 e 27 kg de B ha⁻¹ e a cultivar 2 apenas nas doses de 0 e 3 kg de B ha⁻¹ (Figura 26b).

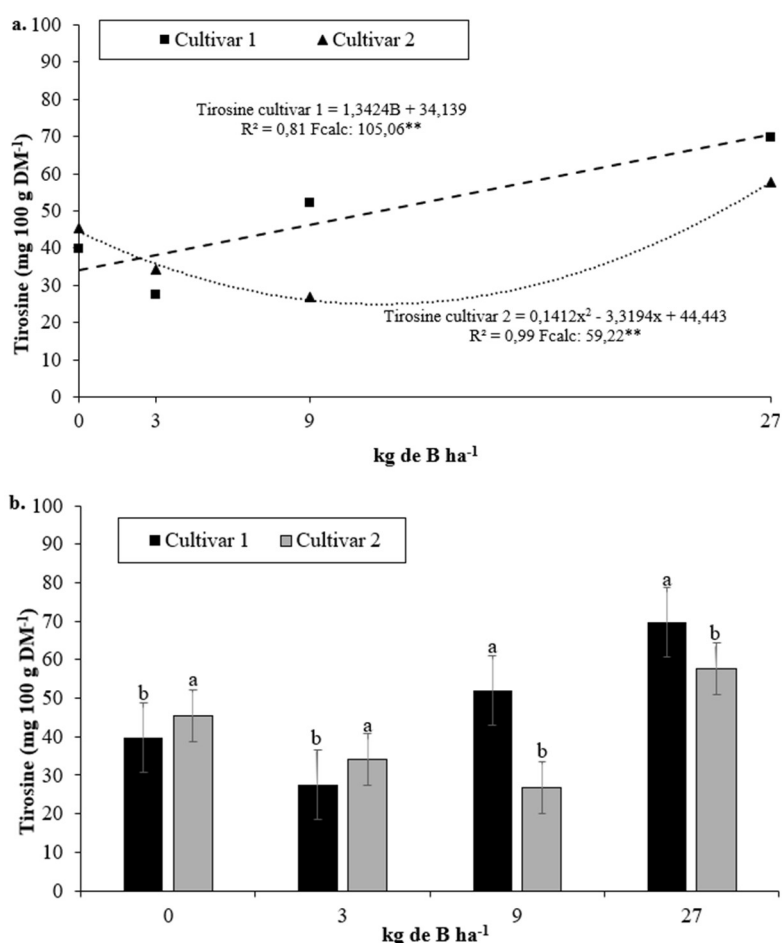


Figura 26. Concentração de tirosina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b).**Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

A relação entre a dose de B via solo e a concentração de cistina foi modelada por regressões lineares, com elevado grau de ajuste em ambas as cultivares (Figura 27a). Para a cultivar 1 foi observado aumento exponencial no teor de cistina com o incremento das doses de B, atingindo valores superiores a 200 mg 100 g⁻¹ de matéria seca na dose mais elevada (27 kg de B ha⁻¹). Para a Cultivar 2, a resposta também foi significativa, embora mais moderada e estável.

Os resultados obtidos do comparativo das cultivares em relação as doses de B via solo demonstraram que até as doses de 3 kg ha⁻¹, não houveram diferença significativa entre as cultivares, mantendo-se baixos os níveis de cistina (≤ 20 mg 100 g⁻¹). No entanto, a partir da dose de 9 kg de B ha⁻¹, a cultivar 1 passou a apresentar concentração superior ao da cultivar 2, com uma diferença crescente até a dose de 27 kg ha⁻¹, em que a cultivar 1 atingiu valores superiores a 200 mg 100 g⁻¹, enquanto a Cultivar 2 manteve-se próxima de 30 mg 100 g⁻¹ (Figura 27b).

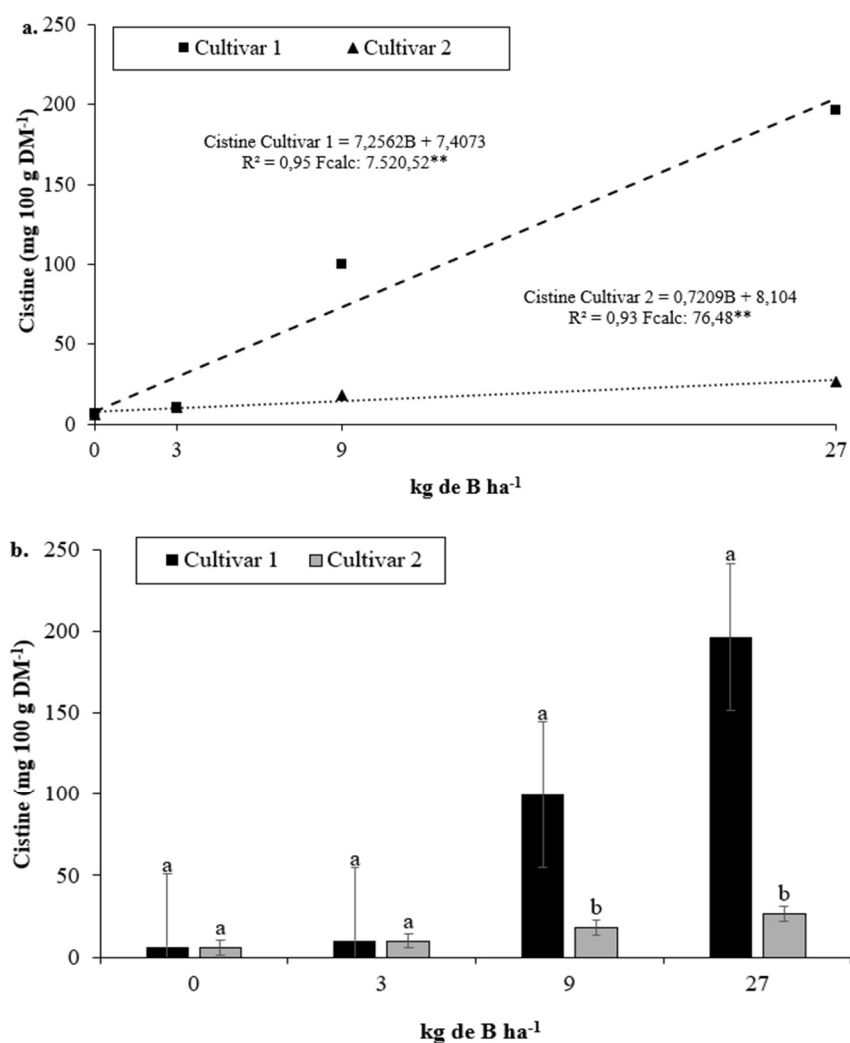


Figura 27. Concentração de cistina na interação entre doses de B (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹ de Ulexita) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT) pelo ajuste da equação (a) e comparativo entre cultivares (b).**Não significativo e significativos pelo teste F a 1% de probabilidade de erro. As letras

minúsculas comparam as médias cultivares em relação a aplicação de B no solo pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Efeitos visuais da toxicidade de B nas plantas de algodão

A toxicidade visual de B em plântulas de algodão, foi observada no estágio inicial aos 25 dias após a emergência (DAE) e descritas ao comparar folhas de algodão saudáveis (tratamento controle) com as demais com sintomas de toxicidade de B (Figura 28). Os sintomas foram caracterizados por aspecto onduladas, enrijecidas e enrugadas, com as bordas voltadas para cima.

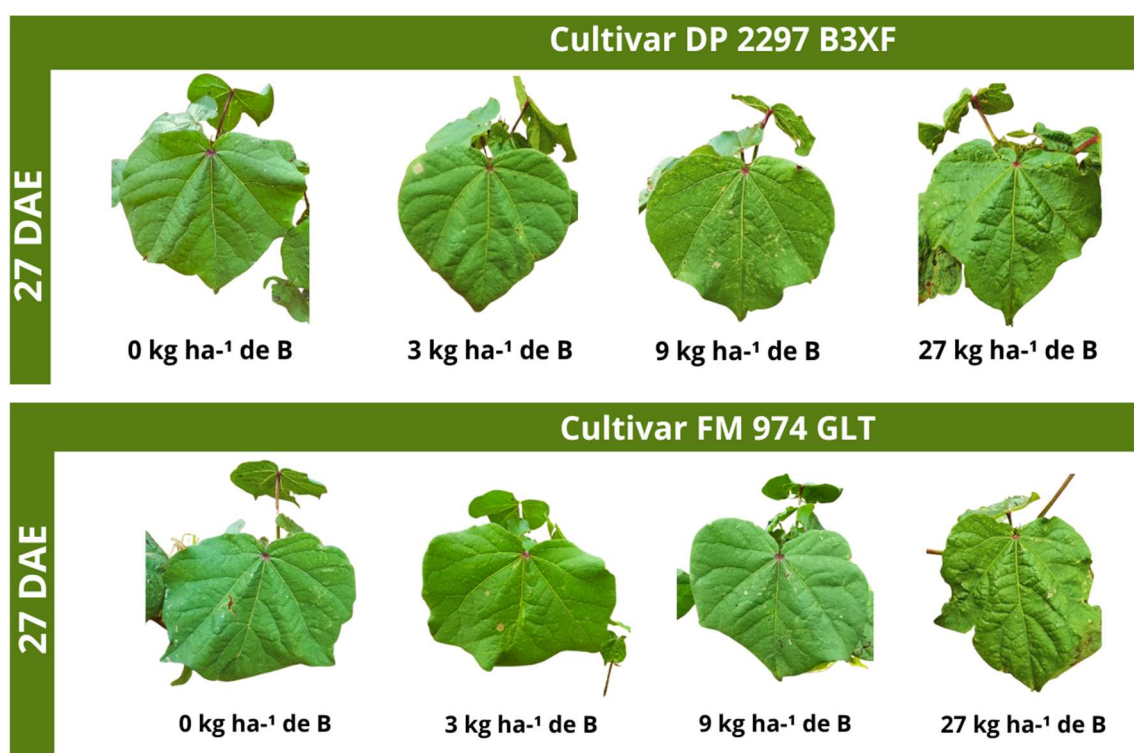


Figura 28. Sintomas visuais de toxicidade de boro em plantas de algodão com o aumento das doses de B disponibilizados via solo nas doses de Ulexita (0,3,9 e 27 kg B ha⁻¹) e dois cultivares (cultivar 1: DP 2297 B3XF e cultivar 2: FM 974 GLT).

5. DISCUSSÃO

5.1. Cultura do milho

O modo de adubação boratada predominante nos cultivos de milho é o via solo no sulco de semeadura de forma localizada, tendo a necessidade de

aplicações anuais com uso de doses moderadas dado risco de toxicidade nas plântulas e de lixiviação. Um outro método que tem avançado nos cultivos é o uso da aplicação foliar do B, porém exige várias aplicações anuais dada baixa mobilidade floemática do B (PRADO, 2021). Essas aplicações de B não tem efeito residual ao longo dos cultivos para ampliar o efeito residual deste nutriente, deste modo tem-se a possibilidade do uso da adubação corretiva no solo.

Os estudos desta modalidade de adubação boratada é limitado pelo fato do risco de lixiviação especialmente em regiões tropicais de elevada taxa de precipitação pluvial. Para melhorar a eficiência da adubação corretiva de boro seria com uso de fonte de solubilidade lenta como a Ulexita favorecendo efeito residual da adubação. Esse efeito residual pode ser ainda incrementado pelo fato do uso da Ulexita em solos de textura argilosa pois tem maior adsorção do B na superfície de óxidos de Fe e hidróxidos de Fe e Al diminuindo a lixiviação deste nutriente no perfil do solo. Na região de clima tropical predomina o Latossolo com vasta área com textura argilosa, fato que potencializa a possibilidade de sucesso do uso da adubação corretiva de B.

O uso da Ulexita incorporada no solo é capaz de aumentar a disponibilidade do B no solo, pois na dose de 69 kg ha^{-1} atingiu teores de B relativamente altos igual a $7,7 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0 a 20 cm de profundidade (Figura 3). Esse teor de B no solo superou a indicação de muito alto ($>0,6 \text{ mg dm}^{-3}$) (BOARETTO et al., 2022) presumindo-se que a perda deste B no solo foi relativamente baixa permanecendo na camada superficial do solo. No entanto, esse teor de B considerado muito alto indicado por Boaretto (2022) está relativamente baixo possivelmente isso se deve a fonte utilizada que é comumente utilizada o ácido bórico de liberação rápido do nutriente para solução do solo. Cabe salientar que a Ulexita foi capaz de liberar essa alta quantidade de B no solo possivelmente devido a sua incorporação no solo pois aumenta a superfície de contato do fertilizante com os coloides do solo favorecendo a solubilização da fonte.

Outro aspecto que fortaleceu a tese de baixa perda de B no sistema solo-planta seria o fato que o incremento do teor de B disponível no solo proporcionou ajuste linear crescente no acúmulo de B na parte aérea da planta atingindo 30 g ha^{-1} na maior dose de B (Figura 4b). Observou-se ainda, que a absorção de B ocorreu de forma rápida devido ao coeficiente angular da reta indicando para cada kg de B na forma de Ulexita aplicada no solo promoveu incremento de 0,32

g há^{-1} na parte aérea da planta. Portanto, a fonte utilizada embora seja de liberação lenta proporcionou ótima absorção de B para a cultura do milho e consequentemente incrementou o teor de B na folha diagnóstica da planta atingindo 57 mg kg^{-1} na dose máxima de 31 kg há^{-1} (Figura 4c), o que comprovou que a folha escolhida na base da espiga na época de florescimento da cultura do milho foi sensível as variações de B disponível do solo.

Diante da melhoria da absorção de B na planta resultou em incremento da produtividade atingindo o máximo de 6391 kg ha^{-1} na dose de 31 kg ha^{-1} de B, sendo o primeiro relato sobre a dose ótima de B na forma de Ulexita incorporada no solo para a cultura do milho cultivado em Latossolo de textura argilosa em regiões tropicais. Isso se deve ao efeito do B na melhoria dos teores de flavonoides e de clorofila favorecendo a taxa fotossintética especialmente em doses moderadas de Ulexita.

O aumento da dose de B a partir de 31 kg há^{-1} que foi evoluindo atingindo máximo de prejuízo na dose de 69 kg há^{-1} de B ficando visível os sintomas de toxicidade de B na planta a partir da clorose e início da necrose na margem das folhas (Figura 7a,b) onde ocorre maior taxa de transpiração e consequentemente intensifica o teor de B nesta região da folha. Esses prejuízos da toxicidade de B ficou evidenciado em alguns aspectos fisiológicos como decréscimo da antocianina, clorofila e consequentemente na taxa fotossintética (Figura 6). Além destes efeitos Behara et al. (2023) complementou que a toxicidade de B induziu a infertilidade, falha na germinação e na formação do tubo polínico, comprometimento da formação da parede celular e da membrana plasmática.

A toxicidade de B na cultura do milho foi estimada com base na redução em 10% da produtividade máxima (5752 kg há^{-1}) que ocorreu na dose de 69 kg ha^{-1} de B (Figura 3a). Evidenciamos que nestas doses tóxicas de B induziu sistema de defesa para lidar com essa desordem nutricional. Descobrimos que esse efeito está ligado ao aumento da síntese do composto antioxidante flavonoides do que antocianina, pois esse último foi degradado na planta assim como a clorofila e consequentemente diminuiu a taxa fotossintética (Figura 5).

Existem relatos sobre outras respostas das plantas a toxicidade de B a nível molecular a partir da alteração na estrutura da parede celular e produção de vários metabólitos como ribose com grupos hidroxilas na posição cis (REID et al. 2004). A dose tóxica de B (69 kg ha^{-1}) esteve associada com teor tóxico de B no

solo igual a $7,7 \text{ mg dm}^{-3}$ de B (Figura 4a) e o teor tóxico na folha diagnóstica igual a 118 mg kg^{-1} de B (Figura 4c). Esse foi o primeiro achado que indicou nitidamente os níveis críticos de toxicidade de B no solo e na folha para a cultura do milho fertilizado com a Ulexita incorporada em solo de textura argilosa.

O nível crítico de toxicidade de B no solo de $7,7 \text{ mg dm}^{-3}$ (extrator água quente) em área de cultivo em campo com milho utilizando a Ulexita proporcionou precisão pois a indicação geral para cultivos anuais de que teor alto de B foi considerado acima de $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ (Boaretto et al., 2022) ou de 1 mg kg^{-1} (Sun et al., 2019). Houveram tentativas em indicar nível crítico de toxicidade de B em Latossolo para o cultivo do milho em vasos variando de $4,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (Lima et al., 2007) a $5,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (Fageria, 2000), ambos com mesmo extrator em água quente. Estes estudos foram realizados em plantas jovens de milho em condição controlada utilizando o ácido bórico como fonte de B. Outros fatores também alteraram os níveis crítico de B no solo como tipo de solo e valor pH e extratores (MOREIRA et al., 2011). Esse achado do nível crítico de toxicidade de B no solo obtido em campo para a cultura do milho utilizando a Ulexita será de relevância para o manejo desta fonte nos cultivos anuais de modo a ampliar o uso na agricultura sustentável com efeito residual e boa baixa taxa de lixiviação no solo. De tal maneira, evitaria o uso de aplicações anuais no sulco de semeadura na qual a literatura citou para a cultura do milho (2 kg ha^{-1} de B) (DUARTE E CANTARELLA, 2022) sem efeito residual. Portanto, uso de fertilizantes boratado de liberação lenta permite o eventual estoque de B no solo que será utilizado em cultivos subsequentes (BOARETTO, CANTARELLA E MATTOS JUNIOR, 2022).

Outra informação relevante nesta pesquisa foi o estabelecimento do nível crítico de toxicidade de B na folha diagnóstica do milho (118 mg kg^{-1}) (Figura 2c). Esses valores estão acima dos indicados por outros autores como níveis críticos de toxicidade de B em plantas jovens de milho considerando a parte aérea (50 mg kg^{-1}) (LIMA et al., 2007); (68 mg kg^{-1}) (FAGERIA, 2000), (100 mg kg^{-1}) (PRADO, 2021) mas isso seria apenas indicativos não aplicáveis ao campo. A descoberta do nível crítico de toxicidade de B para a cultura do milho usando como fonte a Ulexita foi indicativo relevante para o manejo desta fonte nesta espécie. Acredita-se que esse alto valor de 118 mg kg^{-1} de B pode estar relacionado a fonte utilizada a Ulexita por ter liberação mais lenta do B no solo

diferentemente do ácido bórico dada alta solubilidade em água daria tempo da planta modificar o sistema de defesa contra esse estresse fato que não ocorreria com fontes altamente solúveis. Os resultados desta pesquisa ao estabelecer os níveis críticos de toxicidade de B indicaram que a recomendação para doses de B não devem ultrapassar 69 kg ha^{-1} de B e ou teor de no solo de $7,7 \text{ mg dm}^{-3}$ e/ou teor foliar de 118 g ha^{-1} , pois podem ocasionar diversos danos fisiológicos e consequentemente na produtividade da cultura.

Os dados encontrados neste estudo são relevantes para regiões semi-áridas com maior risco de toxicidade ou em áreas irrigadas que utiliza água com altos teores de B (MARSCHNER, 1995) ou em cultivos intensivos com uso frequente de B sem critério dos níveis tóxicos no solo. Portanto, esta pesquisa propõe novos indicadores para nortear o uso agrônomo da Ulexita para a adubação corretiva do solo beneficiando a produtividade do milho de forma sustentável e segura evitando possíveis riscos de toxicidade ao sistema solo-planta. As perspectivas futuras é que estudos complementares são necessários para estabelecer os níveis críticos de deficiência e/ou faixas adequadas de B no solo e na folha, fatos que não foram abordados nesta pesquisa porque o aumento da produção com uso do B foi inferior a 10% dado fato que os teores de B no solo ($0,4 \text{ mg dm}^{-3}$) da área experimental não estavam baixo ($<0,2 \text{ mg dm}^{-3}$) segundo Boaretto et al. (2022) e também não eram o objetivo desta pesquisa e sim de estudar a toxicidade de B a nível de campo dada a lacuna que existia na literatura. É possível estimar que as doses e os níveis críticos no solo e na folha de deficiência de B seja inferior aos indicadores que resultaram a máxima produtividade nesta pesquisa que esteve associada a dose de 31 kg ha^{-1} de B; teor no solo de $4,9 \text{ mg dm}^{-3}$ de B e na folha de 57 mg kg^{-1} de B.

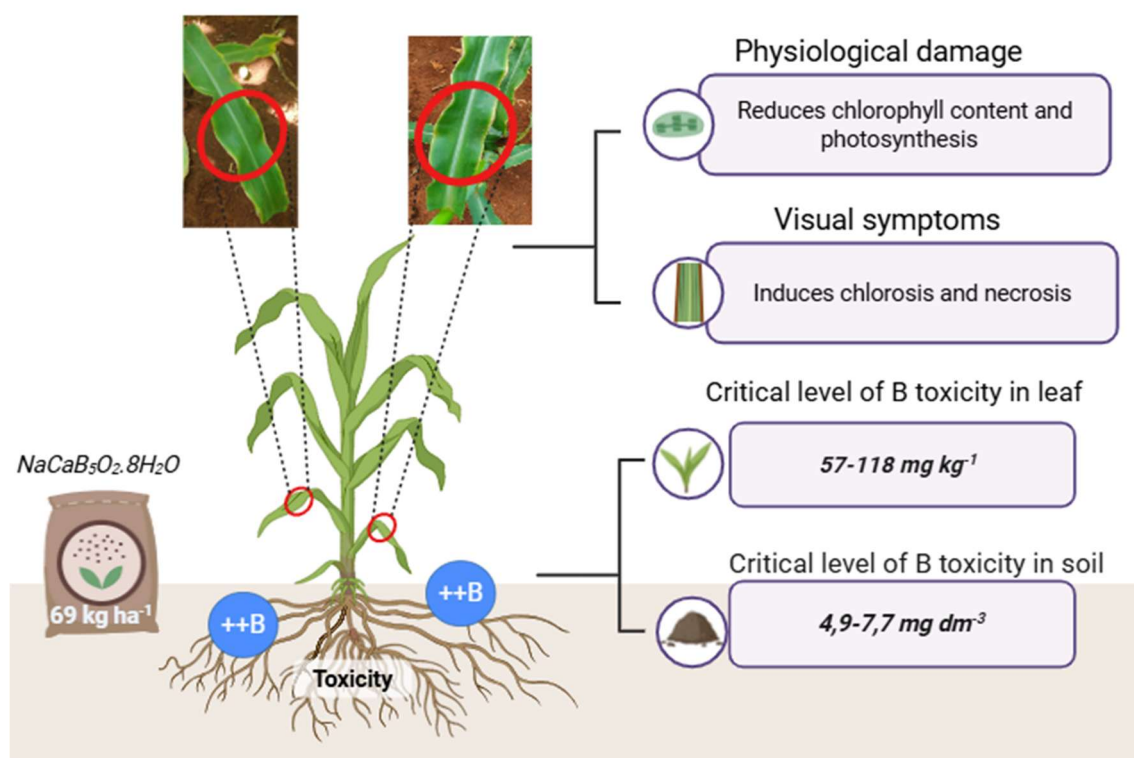


Figura 6. Danos no aparato fisiológico e sintomas de toxicidade de B nas folhas de plantas de milho na dose de 69 kg há^{-1} de B na forma de Ulexita e os respectivos níveis tóxicos de B no solo ($4,9-7,7 \text{ mg dm}^{-3}$) e na folha ($57-118 \text{ mg kg}^{-1}$).

Vale ressaltar que as plantas absorveram alto teor de B do solo e o excesso ocasionaram acúmulo nas células vegetais, perturbando atividades significativas como a fotossíntese e atividades de pigmentos fotossintetizantes. Behera et al., (2023) revisaram que o maior acúmulo de B nos tecidos fonte e dreno nas plantas amplamente cultivadas, em geral, tendem a ter menor conteúdo fotossintético e de clorofila, infertilidade, falha na formação do tubo polínico e germinação, comprometimento da formação da parede celular e rompimento dos sistemas de membrana. O mal funcionamento interno dessas atividades levou ao desenvolvimento visual de sintomas como necrose das bordas das folhas, conforme exposto na Figura 7.

Estudos que descrevam a toxicidade de B na relação solo-plantas aliado a ocorrência de picos de déficit hídrico a campo são escassos e mais pesquisas são necessárias para fomentar os níveis críticos obtidos de altas dosagens de B

aplicado via solo em plantas que são altamente tolerantes ao nutriente, como o milho. Desta maneira, esta pesquisa pode ajudar produtores e cientistas a ajustarem os níveis considerados adequados e tóxicos de B para esta cultura.

5.2. Cultura do algodão

A influência da toxicidade do B em plantas de algodão foi relacionada com os níveis do nutriente considerados nesta pesquisa como doses ótimas e tóxicas (100 e 90% da produtividade relativa), mas avaliando as características intrínsecas sobre o conteúdo genético do material (cultivar 1 e 2) e a resposta fisiológica e metabólica ao fornecimento do B via solo, isolados ou combinados com o fator genético. O modo de aplicação de B no sulco de semeadura é amplamente recomendado considerando a solubilidade lenta da fonte Ulexita, favorecendo efeito residual da adubação durante todo o ciclo da cultura do algodão. Ainda, o efeito residual deve ser amplamente elucidado devido ao uso da Ulexita em solos de textura média ser maior na adsorção do B na superfície de óxidos de Fe e hidróxidos de Fe e Al aumentando a lixiviação deste nutriente no perfil do solo. Em região de clima tropical, como o do presente estudo, há predomínio de Latossolo com vasta área com textura média, fato que necessitam de informações sobre a possibilidade de sucesso do uso da adubação corretiva com B. Os estudos desta modalidade de adubação boratada é limitado especialmente em regiões tropicais de elevada taxa de precipitação pluvial.

Diante da absorção de B na relação solo-planta foi evidenciado incremento em produtividade de algodão em caroço atingindo o máximo em 245 e 206 @ ha⁻¹ para a cultivar e 1 e 2, respectivamente, na dose ótima de 9 e 11 kg de B ha⁻¹, consideradas neste estudo como recomendadas para a cultura do algodão em solo considerado de textura média em região tropical com alto índice de pluviosidade média (Figura 2). Além disso, evidenciamos que o uso da fonte Ulexita (10% de B) incorporado no solo foi capaz de aumentar a disponibilidade e rápida absorção de B as plantas, pois na dose de 18,6 e 19,6 kg de B ha⁻¹, consideradas nesta pesquisa como tóxicas, atingiram teores de 105,61 a 110,84 mg kg⁻¹ nas folhas diagnoses, nas duas cultivares testadas, respectivamente (Figura 9b) demonstrado pelo ajuste linear crescente. A gravidade dos sintomas de toxicidade de B variou entre os cultivares, com queda em produtividade

acentuada após a dose considerada tóxica ($>18 \text{ kg de B ha}^{-1}$) o que demonstrou sensibilidade ao fator genético em relação a disponibilidade de B via solo.

Também relatamos desordem no sistema fotossintético com ajuste linear crescente com o aumento B (Figura 12a), influenciado também pela característica genética do material utilizado (Figura 12b). Também foi verificado superioridade da cultivar 1 em relação a condutância estomática quando esta foi submetida ao fornecimento de B via solo (Figura 11). Assim como a deficiência do nutriente para a planta, a toxicidade também é considerada prejudicial e permite adaptação do cultivar em relação ao estresse oxidativo induzido. Vale ressaltar que o excesso de amido acumulado prejudica a estrutura dos cloroplastos (Cave et al., 1981) e o acúmulo de hexoses, que podem suprimir as expressões gênicas que codificam enzimas fotossintéticas, aumentando a taxa de fotossíntese (Jeannette et al., 2000; Moore et al., 2003; Han et al., 2008) e posteriormente diminuição da produtividade e qualidade da fibra do algodoeiro. Portanto, o mecanismo da planta de algodão foi aumentar a taxa fotossintética para aliviar a toxicidade de B e aumentar a tolerância fisiológica a prevenção do estresse oxidativo, conforme relatado também por Antonopoulou e Chatzissavvidis (2022) e Hua et al., (2020).

As doses consideradas tóxicas nestes estudos variaram de 18,6 a 19,6 kg de B ha^{-1} de acordo com a sensibilidade do material genético utilizado, com diferença de 1 kg de B ha^{-1} entre cultivares (Figura 9b). Com o aumento da dose de B via solo os danos metabólicos ficaram evidentes e os sintomas de toxicidade visíveis (Figura 28). Os sintomas iniciaram nas folhas velhas aos 27 DAE, com enrijecimento das folhas, indicando que internamente as plantas já sofriam por estresses. Os prejuízos foram indicados quando foram avaliados os aspectos metabólicos como a atuação do sistema de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), pois a medida que as doses de B aumentasse, as enzimas do sistema de defesa (SOD) também aumentavam, independente da cultivar avaliada (Figura 10a). Para a CAT, notamos que a cultivar 1 também demonstrou o mesmo comportamento (Figura 10b). A toxicidade de B ocasionou aumento das ERO, o que também encontramos outros relatos através de danos oxidativos nas células de plantas de algodão (Hua et al., 2020). Assim, durante a redução de O_2 para H_2O no processo fotossintético pode haver transferência de energia para o O_2 , formando

o oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$), que possui alta reatividade comparado ao O_2 . Além da possibilidade de ocorrência da transferência de um, dois ou três elétrons para O_2 e formar as ERO, superóxido ($\text{O}_2^\cdot$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($^\cdot\text{OH}$), respectivamente, que promovem danos, devido à peroxidação lipídica (Gratão et al., 2005). Logo, a planta de algodão apresentou mecanismos de defesa para eliminação de ERO, que incluiu o aumento da CAT e SOD. A SOD atua na dismutase do $\text{O}_2^\cdot$ em H_2O_2 enquanto a CAT na desintoxicação de H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Weydert and Cullen 2010; Hasanuzzaman et al., 2020; Hua et al., 2020). O estresse oxidativo evidenciado pelas altas doses de B ocasionou peroxidação lipídica, possivelmente danificou ácidos nucleicos e proteínas e alterou o metabolismo de carboidratos, resultando em disfunção e desregulação metabólica. Logo, evidenciamos em nosso estudo que o sistema antioxidante eliminou direta ou indiretamente as ERO e ou controlou sua produção.

Além das alterações no sistema antioxidante enzimáticos (SOD e CAT) também verificamos os mecanismos de defesa não enzimáticos como ácido glutâmico, ácido aspártico, cistina, histidina, metionina, tirosina, fenilalanina, isoleucina, leucina, treonina, tirosina, serina, valina, prolina, glicina, alanina, lisina e asparagina. Apesar destes mecanismos serem mencionados em plantas de algodão cultivadas sob estresse abiótico (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013; Moldes et al., 2013), os estudos relacionados ao sistema de defesa antioxidante não enzimático são escassos em plantas de algodão. No entanto, estes mecanismos de defesa e adaptação das plantas devem ser considerados devido à sua importância, principalmente aqueles relacionados à ação da prolina (Hua et al., 2020) e da glicina-betaína (GB) (Ahmed et al., 2020; Sun et al., 2020).

O agrupamento dos aminoácidos em plantas pode ser feito com base nas características químicas do grupamento R (cadeia lateral), o que diferencia cada aminoácido, conforme dividido na figura 29. Essa classificação é bioquimicamente funcional, pois as propriedades do grupo R determinam o comportamento dos aminoácidos no metabolismo da planta, estrutura das proteínas e resposta a estresses, principalmente aos danos oxidativos. Desta forma, dividimos os aminoácidos por cadeia lateral ácida ($-\text{COOH}$) como ácido aspártico e glutâmico, por cadeia lateral básica ($-\text{NH}_2$ e imidazol) como arginina, histidine e lisina, pela cadeia lateral não polar (hidrofóbicos) como alanine,

glicina, isoleucine, leucina, metionina, valina, prolina e pela cadeia lateral polar ($-\text{OH}$, $-\text{OH}$ aromático e $-\text{SH}$) como serina, treonina, cistina, fenilalanina e tirosina (Figura 29).

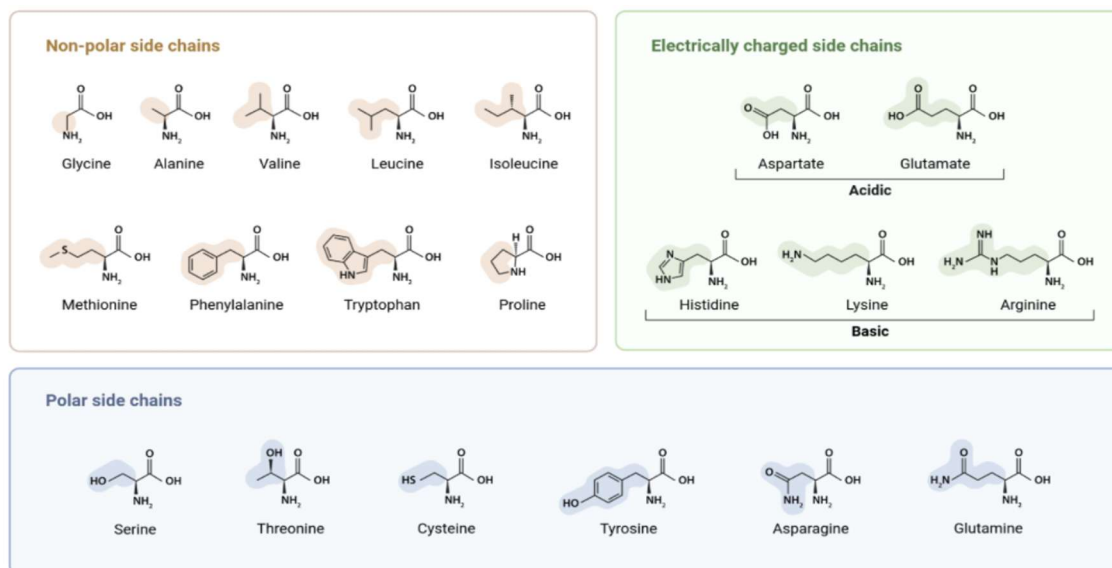


Figura 29. Agrupamento R dos aminoácidos por cadeia lateral ácida ($-\text{COOH}$) como ácido aspártico e glutâmico, por cadeia lateral básica ($-\text{NH}_2$ e imidazol) como arginina, histidina e lisina, pela cadeia lateral não polar (hidrofóbicos) como alanina, glicina, isoleucina, leucina, metionina, valina, prolina e pela cadeia lateral polar ($-\text{OH}$, $-\text{OH}$ aromático e $-\text{SH}$) como serina, treonina, cistina, fenilalanina e tirosina.

O ácido aspártico em sua forma protonada, ou seja, como grupo carboxila lateral ($-\text{COOH}$) não ionizado, demonstrou menores valores nas doses entre 3 e 9 kg ha⁻¹, na qual os maiores valores foram obtidos sem a aplicação de B (tratamento controle, 0 kg de B ha⁻¹) e na toxicidade (>18 kg de B ha⁻¹), conforme ilustrado na Figura 14. Em plantas cultivadas, o ácido aspártico é predominante na forma de aspartato, desprotonada ($-\text{COO}^-$) e ionizada, caracterizado como a forma metabolicamente ativa nos tecidos vegetais (NELSON and COX, 2014). Os autores ainda citaram que este aminoácido atua no metabolismo nitrogenado das plantas cultivadas, sendo fundamental na transferência de grupos amina por meio de reações de transaminação. Além de sua função como precursor de outros aminoácidos, como lisina, metionina, treonina e isoleucina, o aspartato participa de importantes vias metabólicas e a biossíntese de nucleotídeos. A sua

interconversão com o oxaloacetato, catalisada por aminotransferases, é um exemplo clássico da ligação entre o metabolismo do nitrogênio e o ciclo do ácido cítrico. Essas funções refletem a centralidade do aspartato como intermediário metabólico versátil e regulador bioquímico (HILDEBRANDT et al., 2015). De acordo com Coruzzi e Last (2000), a conversão reversível entre aspartato e oxaloacetato conecta o ciclo do ácido cítrico ao metabolismo nitrogenado, regulando a homeostase energética e nitrogenada da planta. Além disso, sob estresse por excesso de B, a regulação dos níveis de aspartato pode estar ligada à manutenção do pH celular e à produção de compostos intermediários da resposta antioxidante (HILDEBRANDT et al., 2015). Assim, em doses elevadas de B, observamos em nosso estudo um acúmulo de aspartato, possivelmente associado à inibição parcial da síntese proteica e ao redirecionamento metabólico para rotas de tolerância ao estresse oxidativo. Essa resposta pode refletir a ativação de vias ligadas à transaminação, nas quais o aspartato atua como doador ou aceptor de grupos amina em reações catalisadas por aminotransferases. Assim, os dados obtidos reforçaram que o aspartato funcionou não apenas como intermediário metabólico, mas também como indicador da condição fisiológica da planta frente à disponibilidade de B, desempenhando um papel-chave na adaptação ao ambiente e no equilíbrio entre os metabolismos energético, carbonado e nitrogenado.

Outro achado importante, foram as concentrações de arginina (Figura 15b) que demonstrou maior concentração do aminoácido na cultivar 1. Com o aumento da disponibilidade de B, as concentrações de arginina foram aumentando, até se manterem estáveis (Figura 15a). Este aminoácido possui função como precursora na síntese biológica de produção do óxido nítrico (NELSON and COX, 2014). Os autores explicaram que a síntese do óxido nítrico (ON) é devido a atividade da arginina em uma reação dependente de NADPH, catalisada pela óxido-nítrico-sintase, enzima dimérica estruturalmente relacionada à NADPH-citocromo-P-450-redutase.

O aminoácido histidina também demonstrou comportamento semelhante (Figura 16a), exceto na dose de 3 kg de B há^{-1} , em que a cultivar 2 relatou maior concentração e na cultivar 1 nas outras doses restantes (Figura 16b). Por outro lado, a lisina (Figura 17a) demonstrou aumento da concentração quanto os teores de B aumentaram, mas a características do cultivar foi levado em

consideração pois para a cultivar 1 não foram obtidos oscilações entre as doses de B. A alanina apresentou menores concentrações em doses de 3 kg de B há⁻¹ (Figura 18). A glicina demonstrou oscilações nas concentrações com o aumento do B para a cultivar 1 (Figura 19a,b). A isoleucina se concentrou mais na cultivar 2 e na cultivar 1 não foi identificada variações entre as doses de B (Figura 20a,b). A metionina não oscilou na cultivar 1 ao avaliar as doses de B, todavia a cultivar 2 demonstrou sensibilidade a altas doses de B (>18 kg de B há⁻¹) (Figura 21a). Em condições de estresses a cultivar 2 se mostrou mais sensível do que a cultivar 1 para a metionina (Figura 21b). As concentrações de valina demonstraram comportamento diferente entre as cultivares, com predomínio na cultivar 2 (Figura 22b), o que elucidou a diferença de concentração em relação ao material genético estudado se mostrando mais sensíveis ao estresse induzido por altas doses de B (>18 kg de B há⁻¹). A prolina se concentrou mais na cultivar 2 do que na cultivar 1, porém a medida que aumentasse a dose de B a concentração de prolina aumentava e ao ultrapassar o limite tóxico de (>18 kg de B há⁻¹) a prolina diminuiu (Figura 23a,b). Para a serina, a partir da dose recomendada de B (9-11 kg de B há⁻¹) para ambas as cultivares, foi possível notar aumento das concentrações do aminoácido, porém a partir da dose tóxica (18-19 kg de B há⁻¹) foi relatado decréscimo nas concentrações. Apenas nas menores doses de B houve ranqueamento das cultivares, com a cultivar 2 superior as concentrações de serina (Figura 24a,b). A treonina aumentou de concentração a medida que aumentassem as doses de B, evidente após as doses recomendadas de B (9-11 kg de B há⁻¹) para ambas as cultivares (Figura 25 a), com concentrações menor nas doses menores que a recomendada (<9 kg de B há⁻¹). A tirosina aumentou sua concentração a medida que aumentasse as doses de B para a cultivar 1, conforme ajuste linear (Figura 26a). Todavia, demonstrou comportamento diferente para a cultivar 2, que diminuiu a concentração até a dose recomendada de 11 kg de B há⁻¹, porém a partir desta dosagem foi relatado aumento da concentração. Para a cistina, evidenciamos aumento linear para ambas as cultivares, com diferença de aumento de concentração a partir da dose recomendada de 9 kg de B há⁻¹ para a cultivar 1 (Figura 27a,b).

Portanto, nossos achados elucidaram a diferença de comportamento de cultivares de algodão no contexto fisiológico, bioquímico e de produção em

relação as doses recomendadas de B no solo evidenciado pela dose ótima e também os danos metabólicos ocasionados pela concentração excessiva de B na relação solo-planta. Assim, estudos em nutrição de plantas relacionados ao conteúdo de B e a influência no sistema solo-planta são importantes para direcionamento da sensibilidade do nutriente aplicado, assim como desvendar os mecanismos de defesa enzimáticos e não enzimáticos na tolerância ao estresse oxidativo induzido.

6. ORIENTAÇÕES

Não se aplica

7. DISCIPLINAS MINISTRADAS COM A RESPECTIVA CARGA HORÁRIA E/OU A REALIZAÇÃO DE ATIVIDADES DE EXTENSÃO

Não se aplica

8. COMENTÁRIOS DO SUPERVISOR

9. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.E.P.; RESENDE, M.; Cultivo do milho. Embrapa Milho e Sorgo, sistemas de produção, 3 ed, 2007.

BRDAR-JOKANOVIĆ, MILKA. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. International journal of molecular sciences, v. 21, n. 4, p. 1424, 2020.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas: IAC, 1983. 48p.

BATAGLIA, O.C.; RAIJ, B.V. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 14:25-31, 1990.

BEHERA, B.; KANCHETI, M.; RAZA, M.B.; SHIV, A.; MANGAL, V.; RATHOD, G.; ALTAF, M.A.; KUMAR, A.; AFTAB, T.; KUMAR, R.; TIWARI, R.K.; LAL, M.K.; SINGH, B. Mechanistic insight on boron-mediated toxicity in plant vis-a-vis its mitigation strategies: a review. Int J Phytoremediation. 25, 1, 9-26, 2023. doi: 10.1080/15226514.2022.2049694.

BOARETTO, R.M.; CANTARELLA, H.; MATTOS JUNIOR., D. Fertilizantes – composição e garantias mínimas. Instituto agrônomo, Campinas, p33-37, 2022, (Boletim 100)

BYERS, D.E.; MIKKELSEN, R.L.; COX, F.R. Greenhouse evaluation of four boron fertilizer materials. *Journal of Plant Nutrition*. V.24, n4/5, p 717-725, 2001.

CHOUDHARY, K.M.; JAT, H.S.; NANDAL, D.P.; BISHNOI, D.K.; SUTALIYA, J.M.; CHOUDHARY, M. Avaliação de alternativas ao sistema arroz-trigo nas planícies indo-gangéticas ocidentais: rendimentos de culturas, produtividade hídrica e rentabilidade económica. *Culturas de Campo Res.*, 218, pp. 1 - 10 , 2018 doi: 10.1016/j.fcr.2017.12.023

DAMETO, L.S.; MORAES, L.A.C.; KRZYZANOWSKI, F.C.; MOREIRA, A. Boron sources and rates on soybean seed physiological quality and root system volume. *Journal of Seed Science*, v.45, e202345019, 2023.

DAY, S.; AASIM, M. Role of boron in growth and development of plant: deficiency and toxicity perspective. In: Aftab, T., Hakeem, K.R. (eds) *Plant Micronutrients*. 1:435–453, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49856-6_19

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R.; CARMELLO, Q.A. DE C.; SANTOS, L.A.; SPERANDIO, M.V. Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R. DE; SANTOS, L.A. (eds) *Nutrição Mineral de Plantas*, 2 th. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, pp 491– 562, 2018.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. *Nutrição Mineral de Plantas*. 2 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.

FAGERIA, N.K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.1, p.57-62, 2000.

FOLONI, J. S. S.; BARBOSA, A. M. DE.; CATUCHI, T. A.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S.; DOMINATO, J. C.; CRESTE, J. E. Efeitos da gessagem e da adubação boratada sobre os componentes de produção da cultura do amendoim. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 15, n. 2, p. 202-208, 2016.

HAMURCU, M.; KHAN, M.K.; PANDEY, A.; AVŞAROĞLU, Z.Z.; ELBASAN, F.; GEZGIN, S. Boron stress exposes differential antioxidant responses in maize cultivars (*Zea mays* L.). *Journal of Elementology*, 25(4): 1291-1304, 2020. DOI: 10.5601/jelem.2020.25.3.1970.

HUA, T.; ZHANG, R.; SUN, H.; LIU, C. Alívio da toxicidade do boro em plantas: mecanismos e abordagens. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* , 51 (24), 2975–3015, 2020. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807451>

KHAN, M.K.; PANDEY, A.; HAMURCU, M.; AVSAROGLU, Z.Z.; OZBEK, M.; OMAI, A.H.; ELBASAN, F.; OMAI, M.R.; GOKMEN, F.; TOPAL, A.; GEZGIN, S. Variability in physiological traits reveals boron toxicity tolerance in *Aegilops* species. *Front Plant Science*, v.12:736614, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.736614>

KHAN, M.K.; PANDEY, A.; HAMURCU, M.; GERM, M.; YILMAZ, F.G.; OZBEK, M.; AVSAROGLU, Z.Z.; TOPAL, A.; GEZGIN, S. Nutrient homeostasis of *aegilops* accessions differing in b tolerance level under boron toxic growth conditions. *Biology*, v.11, n.8, 1094, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11081094>

KHAN, M.K.; PANDEY, A.; HAMURCU, M.; RAJPAL, V.R.; VYHNANEK, T.; TOPAL, A.; RAINA, S.N.; GEZGIN, S. Insight into the boron toxicity stress-responsive genes in boron-tolerant *triticum dicoccum* shoots using rna sequencing. *Agronomy*, v.13, 3, 631, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030631>

KOÇ, C. Effects on environment and agriculture of geothermal wastewater and boron pollution in Great Menderes Basin. *Environ. Monit. Assess.* 2007;125:377–388. doi: 10.1007/s10661-006-9378-3.

KOHLI, S.K.; KAUR, H.; KHANNA, K. et al. Boro em plantas: absorção, deficiência e potencial biológico. *Plant Growth Regul* 100, 267–282, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00844-7>

LANDI, M.; MARGARITOPOULOU, T.; PAPADAKIS, I.E.; ARANITI, F. Boron toxicity in higher plants: An update. *Planta*. 2019;250:1011–1032. doi: 10.1007/s00425-019-03220-4.

LIMA, J.C.P.S.; NASCIMENTO, C.W.A.; LIMA, J.G.C.; LIRA JUNIOR, M.A. Critical and toxic boron levels in corn plants and soils of Pernambuco, Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 31(1):73-9. 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000100008

LIU, C.; LU, W.; MA, Q.; MA, C. Efeito do silício no alívio da toxicidade do boro no crescimento do trigo, acúmulo de boro, atividades de fotossíntese e respostas oxidativas. *Journal of Plant Nutrition*, 40 (17), 2458–2467. 2017. Doi: 10.1080/01904167.2017.1380817

MALAVOLTA A, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MOREIRA, A.; CASTRO, C.; FAGERIA, N.K. Effects of boron application on yield, foliar boron concentration, and efficiency of soil boron extracting solutions in a Xanthic Ferralsol cultivated with banana in Central Amazon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.42, n.18, p.2169-2178, 2011.

MILJKOVIĆ N. Ph.D. Thesis. University of Novi Sad, Faculty of Agriculture; Novi Sad, Serbia: 1960. Characteristics of Vojvodina Saline Soils and the Problem of Boron in Them. (In Serbian).

NABLE, R.O.; BAÑUELOS, G.S.; PAULL, J.G. Toxicidade do boro. Solo vegetal. 1997;193:181–198. doi: 10.1023/A:1004272227886.

NASSARAWA, I.S.; LI, Z.; XUE, L.; LI, H.; MUHAMMAD, U.; ZHU, S.; CHEN, J.; ZHAO, T. Nanopartículas de óxido de zinco e sulfato de zinco aliviam a toxicidade do boro em algodão (*Gossypium hirsutum* L.). *Plantas*, 13(9):1184. 2024. Doi: 10.3390/plants13091184

NAZ, T.; ALIHTAR, J.; IQBAL, M. M.; ANWAR-UL-HAQ, M.; MURTAZA, G.; NIAZI, N. K.; ATIQUE-UR-REHMAN, F. O.; ALI, M.; DELL, B. Assessment of gas exchange attributes, chlorophyll contents, ionic composition and antioxidant enzymes of bread wheat genotypes in boron toxic, saline and boron toxic-saline soils. *International Journal of Agriculture and Biology*, 21(6), 1271–1281, 2019. DOI: 10.17957/IJAB/15.1021

NEJAD, S.A.G.; ETESAMI, H. The Importance of Boron in Plant Nutrition. In: DESHMUKH, R.; TRIPATHI, D.K.; GUERRIERO, G. (eds) *Metalloids in Plants*, 1th. Wiley, pp 433–449, 2020.

PANDEY, A.; KHAN, M.K.; HAMURCU, M.; BRESTIC, M.; TOPAL, A.; GEZGIN, S. Insight into the Root Transcriptome of a Boron-Tolerant *Triticum zhukovskyi* Genotype Grown under Boron Toxicity. *Agronomy*. 2022; 12(10):2421. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102421>

PRADO, R.M. *Nutrição de plantas*. 2 ed. São Paulo: Editora Unesp, 2020.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van. et al. (Ed.). *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. p. 233-239. (Boletim Técnico, 100).

REID, R.J.; HAYES, J.E.; POST, A. et al. A critical analysis of the causes of boron toxicity

in plants. *Plant Cell Environ.* 27 (11): 1405–1414, 2004.

ROSOLEM, C.A.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; SILVA, N.M.; CARVALHO, L.H. Tabelas de recomendação de calagem do boletim 100. Cap. 3.1 Algodão. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R.M. van RAIJ, B. In: Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo, Instituto agrônomo, Campinas, p163, 2022.

ROSOLEM, C.A.; ZANCANARO, L.; BISCARO, T. Evaluating available boron and soybean response to boron in an oxisol from central-western Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2375-2383, 2008.

SÁ, A.A.D.; ERNANI, P. R. Boron Leaching Decreases with Increases on Soil pH. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, 2016.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. (Ed.). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SCHERER, E.E. Níveis críticos de potássio para a soja em latossolo húmico de Santa Catarina. *Revista Brasileira Ciência Solo*, 22, 57-62, 1998.

SEEDA, M. A. A.; HELLAL, F.A., SAYED, S.A.A.E.L.; ELNOUR, E. A. A. Boron's Importance in Plant Development and Growth: A Review. *Egypt.J.Agron.* V39,N2, 159-166p, 2017.

SUN, A.; GOU, D.; DONG, Y.; XU, Q.; GUANGJIE, C. Extraction and Analysis of Available Boron Isotopes in Soil Using Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v.67, n.25, p. 7183-7189, 2019.

SOUZA, L.T. de; CARR, N.F.; LAVRES, J.; MAZZAFERA, P. e FAVARIN, J.L. Deficiência de boro afeta a hidrólise de ATP da membrana plasmática e a absorção de nutrientes no café: Consequências para o crescimento das plantas.

Journal of Plant Nutrition, 45 (14), 2123–2134, 2022.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2043371>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Artmed Editora. 2017.

VINUTHA, H.P.; POORNIMA, B.; SAGAR, B.M. Detecção de outliers usando técnica de intervalo interquartil de conjunto de dados de intrusão. Em: SATAPATHY, S., TAVARES, J., BHATEJA, V., MOHANTY, J. (eds) Information and Decision Sciences. Advances in Intelligent Systems and Computing, v701, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7563-6_53

WANG, X.; SONG, B.; WU, Z.; ZHAO, X.; SONG, X.; ADIL, M.F.; RIAZ, M.; LAL, M.K.; HUANG, W. Insights into physiological and molecular mechanisms underlying efficient utilization of boron in different boron efficient Beta vulgaris L. varieties, Plant Physiology and Biochemistry, V 197, 2023, 107619, ISSN 0981-9428, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.02.049>.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas. Informações Agronômicas, v. 90, p. 1-5, 2000.

YAU, S.K.; NACHIT, M.M.; RYAN, J.; HAMBLIN, J. Phenotypic variation in boron toxicity tolerance at seedling stage in durum wheat (*Triticum durum*) Euphytica. 1995;83:185–191. doi: 10.1007/BF01678128