

UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

MANEJO DA ADUBAÇÃO COM BORO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO
SOJA/SORGO

GABRIEL ELIAS SOARES DE ARAUJO

Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL

2026

GABRIEL ELIAS SOARES DE ARAUJO

**MANEJO DA ADUBAÇÃO COM BORO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO
SOJA/SORGO**

**Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de
Rio Verde, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae***

**RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL**

2026

Universidade de Rio Verde
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira

A689m Araujo, Gabriel Elias Soares de

Manejo da adubação com boro em sistema de produção soja/sorgo. /
Gabriel Elias Soares de Araujo. – 2026.
56 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa
de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2026.

Inclui índice de figuras e tabelas.

1. *Glycine max*. 2. *Sorghum bicolor*. 3. Micronutriente. 4. Fertilidade do
solo. I. Cantão, Veridiana Cardozo Gonçalves. II. Título.

CDD: 631.8

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

GABRIEL ELIAS SOARES DE ARAÚJO

“MANEJO DA ADUBAÇÃO COM BORO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO SOJA/SORGO”

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 07 de agosto de 2026

Documento assinado digitalmente
 VERIDIANA CARDOZO GONCALVES CANTAO
Data: 07/08/2026 09:21:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão
Presidente da Banca Examinadora
PPGPV – UniRV

**Paulo Fernandes
Boldrin**

Assinado de forma digital por
Paulo Fernandes Boldrin
Dados: 2026.08.07 10:23:17
-03'00'

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin
Membro – PPGPV/UniRV

Assinado de forma digital por Gilmar Oliveira Santos
DN: cn=Gilmar Oliveira Santos, o=Universidade de
Rio Verde, ou=Universidade de Rio Verde,
email=gilmar@unirv.edu.br, c=BR
Dados: 2026.08.07 10:30:33 -03'00'

Prof. Dr. Gilmar Oliveira Santos
Membro – PPGPV/UniRV

Documento assinado digitalmente
 RICARDO DE CASTRO DIAS
Data: 07/08/2026 10:49:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo de Castro Dias
Membro – externo ESALQ- USP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a **Deus**, fonte de toda força, sabedoria e esperança. Foi Ele quem guiou meus passos, iluminou minhas decisões e me sustentou nos momentos de dificuldade, concedendo-me discernimento, perseverança e a oportunidade de concluir mais esta importante etapa da minha vida. A Ele, toda honra, toda glória e minha eterna gratidão.

Dedico este trabalho à minha **mãe, Eliane Soares dos Santos**, que, com amor incondicional, fez tudo o que esteve ao seu alcance e, muitas vezes, até o que parecia impossível para que eu pudesse estudar, crescer e realizar meus sonhos. Seu esforço, suas renúncias, seus ensinamentos e sua confiança em mim foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista é, acima de tudo, fruto do seu amor e da sua dedicação.

Dedico, com profundo amor e saudade, ao meu **pai, João Elias Soares de Araújo (in memoriam)**. Embora sua presença física não esteja mais entre nós, seus ensinamentos, seus valores e seu exemplo permanecem vivos em minha memória e continuam guiando minha caminhada. Espero que, onde quer que esteja, possa sentir orgulho desta conquista.

Dedico este trabalho à minha **irmã, Nayara**, pelo carinho, companheirismo e incentivo ao longo de toda essa jornada.

Dedico esta conquista à minha orientadora, **Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão**, por toda confiança depositada em meu trabalho, pelos ensinamentos compartilhados, pela paciência, dedicação e incentivos constantes. Mais do que uma orientadora, encontrei uma pessoa generosa, que esteve ao meu lado nos momentos de incerteza, oferecendo apoio, amizade, e acreditando no meu potencial até mesmo quando os desafios pareciam maiores do que minhas próprias forças. Minha eterna gratidão.

Dedico este trabalho aos meus avós, **Gabriel Soares dos Santos e Cleunice**, que sempre me acolheram com amor e dedicação, assumindo, em muitos momentos da minha vida, o papel de pai e mãe quando meus pais precisaram se ausentar. O carinho, os conselhos, o exemplo de vida e o apoio incondicional de vocês foram fundamentais para a construção da pessoa que sou hoje.

Por fim, dedico este trabalho à minha companheira de vida **Débora Helena Gonçalves**, por caminhar ao meu lado, compartilhando os desafios, as incertezas e as conquistas desta etapa. Seu amor e apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Àqueles que, em um momento importante da minha trajetória, acreditaram em mim quando eu mesmo duvidava da minha capacidade, e me incentivaram a seguir em frente. Esta conquista também carrega um pouco de cada palavra de apoio recebida ao longo do caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a **Deus**, por me conceder o dom da vida, por iluminar meus caminhos, fortalecer minha fé e renovar minhas forças diariamente. Em todos os momentos desta caminhada, foi Ele quem me sustentou diante dos desafios, concedendo-me sabedoria, perseverança e a oportunidade de alcançar mais esta importante conquista.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade de Rio Verde (UniRV)**, pela oportunidade de realização deste mestrado, proporcionando-me um ambiente de aprendizado, crescimento científico e desenvolvimento profissional, contribuindo assim, significativamente para minha formação como pesquisador.

À minha orientadora, **Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão**, minha sincera gratidão pela confiança depositada em meu trabalho, pela orientação segura, pela paciência, dedicação e por nunca medir esforços para contribuir com meu crescimento acadêmico e profissional. Seus ensinamentos, conselhos e incentivos foram fundamentais para a realização desta pesquisa e para minha formação como pesquisador.

À minha mãe, **Eliane Soares dos Santos**, por todo amor, dedicação e pelos inúmeros sacrifícios realizados para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado por sempre fazer o possível e, muitas vezes, o impossível para proporcionar-me oportunidades e acreditar nos meus sonhos, mesmo quando eles pareciam distantes. Esta conquista também é sua.

Ao meu pai, **João Elias Soares de Araújo (in memoriam)**, que, mesmo não estando mais presente fisicamente, permanece vivo em minhas lembranças e valores.

Seu exemplo de vida e tudo o que me ensinou continuam sendo fonte de inspiração para seguir em frente em busca dos meus objetivos.

Aos meus avós, **Gabriel Soares dos Santos e Cleunice Maria dos Santos**, por todo amor, acolhimento, incentivo e pelos ensinamentos transmitidos ao longo da minha vida.

Cada palavra de carinho, cada conselho e cada gesto de apoio contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Aos meus tios, **Jeosimar Soares dos Santos e Sandra**, pelo incentivo, pelo carinho e por sempre acreditarem em mim durante esta caminhada.

A todos os meus amigos, colegas e demais pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta conquista, meu sincero agradecimento. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada momento compartilhado fizeram diferença nesta trajetória e permanecerão para sempre em minha memória.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Culturas da soja e do sorgo no sistema de produção do cerrado.....	3
2.2 Exigências nutricionais da soja e do sorgo com ênfase em micronutrientes.....	4
2.3 Boro no solo: disponibilidade e dinâmica.....	6
2.4 Absorção, transporte e funções fisiológicas do boro nas plantas.....	9
2.5 Boro na cultura do sorgo.....	11
2.6 Boro na cultura da soja.....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
4 RESULTADOS.....	18
4.1 Resultados do sorgo na área 1.....	18
4.2 Resultados do sorgo na área 2.....	20
4.3 Resultados da soja na área 1.....	24
4.4 Resultados da soja na área 2.....	28
5 DISCUSSÃO.....	32
5.1 Discussão dos resultados do sorgo na área 1.....	32
5.2 Discussão dos resultados do sorgo na área 2.....	33
5.3 Discussão dos resultados da soja na área 1.....	36
5.4 Discussão dos resultados da soja na área 2.....	38
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Balanço hídrico no sistema soja- sorgo cultivados em sucessão no ano agrícola 2020/21 em Rio Verde, GO.....	14
FIGURA 2	Teor de boro no solo aos 50 dias após a semeadura (A) e teor foliar de boro aos 70 dias após a semeadura (B) em sorgo cultivado em Latossolo Vermelho, safrinha 2020, Área 1.....	19
FIGURA 3	Relação entre clorofila <i>a</i> e <i>b</i> (A) em sorgo e matéria orgânica do solo (B) na área 1 após o cultivo de sorgo com doses de boro aplicados na dessecação.....	20
FIGURA 4	Teor de boro no solo 50 dias após a semeadura (A) e massa de grãos por panícula (B) do sorgo em Latossolo Vermelho, safrinha 2020 na área 2...	21
FIGURA 5	População de plantas de sorgo, 50 dias após a semeadura em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2.....	22
FIGURA 6	Clorofilas <i>a</i> (A), <i>b</i> (B), total (D) e relação entre <i>a</i> e <i>b</i> (C) aos 70 dias após a semeadura em sorgo cultivado em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2.....	23
FIGURA 7	Produtividade do sorgo cultivado em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2.....	23
FIGURA 8	Matéria orgânica do solo pré (A) pós cultivo de sorgo em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2.....	24
FIGURA 9	Altura de plantas de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 1 safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	27
FIGURA 10	Vagens com um grão por planta de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO..	27
FIGURA 11	Boro foliar (A) em plantas de soja e matéria orgânica do solo após o cultivo de soja sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	28
FIGURA 12	Clorofila <i>a</i> (A), inserção da primeira vagem (B) e produtividade (C) em soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	30

FIGURA 13	Boro foliar (A) e vagens com quatro grãos (B) em plantas de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	31
FIGURA 14	Estande de plantas (A) e vagens com dois grãos (B) em soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	32

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Tratamentos utilizados no experimento.....	16
TABELA 2	Conversão das doses do produto comercial (8% p/p B; 104 g L ⁻¹) em doses de boro elementar.....	17
TABELA 3	Resumo da análise de variância <i>p valor</i> e significância, para as características avaliadas no sorgo sob manejo da adubação com boro na área 1 safrinha 2020, Rio Verde, GO.....	19
TABELA 4	Resumo da análise de variância <i>p valor</i> e significância, para as características avaliadas no sorgo sob manejo da adubação com boro na área 2, safrinha 2020, Rio Verde, GO.....	21
TABELA 5	Resumo da análise de variância com <i>p valor</i> e significância, para as características avaliadas na soja sob manejo da adubação com boro na área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	26
TABELA 6	Resumo da análise de variância para as características avaliadas na soja sob manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.....	29

RESUMO

ARAÚJO, G. E.S., UniRV - Universidade de Rio Verde, agosto de 2026. **Manejo da adubação com boro em sistema de produção soja/sorgo**. Orientadora: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão.

O boro (B) é um micronutriente essencial ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, com participação na integridade da parede celular e no desenvolvimento das estruturas reprodutivas. Em solos altamente intemperizados do Cerrado, os baixos teores naturais de B e sua suscetibilidade à lixiviação tornam necessário o estabelecimento de estratégias de manejo que considerem doses e épocas de aplicação. Objetivou-se avaliar os efeitos de doses e estratégias de aplicação de B em sistema de produção soja/sorgo, bem como o efeito residual da adubação sobre a soja cultivada em sucessão. O experimento foi conduzido em duas áreas experimentais da Fazenda Fontes do Saber, da Universidade de Rio Verde (UniRV), em Rio Verde, Goiás, em Latossolo Vermelho. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5×3 , com quatro repetições. Foram avaliadas cinco doses de B (0,0; 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 L ha⁻¹) e três estratégias de aplicação: dessecação; dessecação + R1; e dessecação + R1 + R5. Após a colheita do sorgo, a soja foi cultivada nas mesmas áreas, sem nova aplicação de B, para avaliação do efeito residual. Foram determinados atributos nutricionais, fisiológicos, vegetativos, produtivos e químicos do solo. No sorgo, as respostas ao manejo foram mais evidentes na Área 2, com efeito sobre atributos fisiológicos e componentes de rendimento. A aplicação de 1,0 L ha⁻¹ na dessecação destacou-se pelo desempenho produtivo, enquanto aplicações complementares em R1 e R5, embora tenham influenciado características como a massa de grãos por panícula, não proporcionaram incremento consistente na produtividade. Na soja cultivada em sucessão, verificou-se efeito residual da adubação boratada, com respostas distintas entre as áreas. Na Área 1, as alterações observadas não resultaram em aumento da produtividade, enquanto, na Área 2, a produtividade apresentou resposta quadrática, com máximo estimado em aproximadamente 1,55 L ha⁻¹. Conclui-se que, nas condições deste estudo, doses intermediárias de B foram mais adequadas ao sistema soja/sorgo, destacando-se 1,0 L ha⁻¹ aplicado na dessecação para o sorgo. Para a soja em sucessão, o efeito residual da adubação deve ser considerado antes de novas aplicações, não havendo evidências que sustentem o uso sistemático de doses elevadas ou a intensificação das aplicações foliares.

Palavras-chave: *Glycine max*; *Sorghum bicolor*; micronutriente; fertilidade do solo.

ABSTRACT

ARAÚJO, G. E. S. UniRV – University of Rio Verde, August 2026. **Boron fertilization management in a soybean/sorghum production system.** Advisor: Prof. Dr. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão.

Boron (B) is an essential micronutrient for plant growth and development, playing important roles in cell wall integrity and reproductive development. In highly weathered Cerrado soils, naturally low B availability and its susceptibility to leaching make it necessary to establish management strategies that consider both application rates and timing. This study aimed to evaluate the effects of B rates and application strategies in a soybean/sorghum production system, as well as the residual effect of B fertilization on soybean grown in succession. The experiment was conducted in two experimental areas at Fazenda Fontes do Saber, University of Rio Verde (UniRV), Rio Verde, Goiás, Brazil, on a Rhodic Oxisol. The experimental design was a randomized complete block design arranged in a 5×3 factorial scheme with four replications. Five B rates (0.0, 0.5, 1.0, 2.0, and 4.0 L ha^{-1}) and three application strategies were evaluated: burndown; burndown + R1; and burndown + R1 + R5. After sorghum harvest, soybean was grown in the same experimental areas without additional B application to evaluate the residual effect of fertilization. Nutritional, physiological, vegetative, yield-related, and soil chemical attributes were evaluated. In sorghum, responses to B management were more pronounced in Area 2, affecting physiological traits and yield components. The application of 1.0 L ha^{-1} at burndown stood out for grain yield performance, whereas supplemental applications at R1 and R5, although affecting traits such as grain mass per panicle, did not consistently increase grain yield. In soybean grown in succession, a residual effect of B fertilization was observed, with different responses between the experimental areas. In Area 1, the observed changes did not result in increased grain yield, whereas in Area 2, grain yield showed a quadratic response, with an estimated maximum at approximately 1.55 L ha^{-1} . Under the conditions of this study, intermediate B rates were more suitable for the soybean/sorghum production system, particularly 1.0 L ha^{-1} applied at burndown for sorghum. For soybean grown in succession, the residual effect of B fertilization should be considered before additional applications, with no evidence supporting the systematic use of higher rates or intensified foliar applications.

Keywords: boron; *Glycine max*; *Sorghum bicolor*; micronutrient; soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro constitui uma das principais regiões produtoras de grãos do país, caracterizado por sistemas intensivos de cultivo nos quais a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) ocupa posição de destaque durante a safra de verão. Após sua colheita, a utilização da área com culturas de segunda safra possibilita maior aproveitamento do período agrícola e diversificação do sistema produtivo. Nesse contexto, o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) apresenta importância estratégica por sua adaptação às condições tropicais e maior tolerância à restrição hídrica, característica relevante diante da redução progressiva das precipitações durante a segunda safra no Cerrado (COELHO, 2025).

A intensificação desses sistemas e a obtenção de elevadas produtividades promovem maior extração e exportação de nutrientes, aumentando a importância do manejo da fertilidade do solo. Essa condição assume particular relevância nos solos altamente intemperizados do Cerrado, naturalmente ácidos e de baixa fertilidade, nos quais a construção e a manutenção da fertilidade são fundamentais para sustentar sistemas produtivos intensivos. Embora os macronutrientes sejam requeridos em maiores quantidades, deficiências ou desequilíbrios de micronutrientes também podem limitar o desenvolvimento e a produtividade das culturas (OLIVEIRA et al., 2024).

Entre os micronutrientes, o boro (B) desempenha funções essenciais no crescimento e desenvolvimento vegetal. Sua atuação está particularmente relacionada à estrutura e estabilidade da parede celular, por meio da formação de ligações envolvendo a ramnogalacturonana II, além de sua participação na integridade das membranas, no crescimento de tecidos meristemáticos e no desenvolvimento das estruturas reprodutivas.

Durante a fase reprodutiva, o adequado suprimento de B apresenta importância para processos como germinação do pólen, crescimento do tubo polínico e fecundação, podendo repercutir sobre a formação de grãos e demais componentes de rendimento (O'NEILL et al., 2004; VERA-MALDONADO et al., 2024).

O manejo desse micronutriente, entretanto, apresenta particularidades decorrentes de sua dinâmica no sistema solo-planta. A disponibilidade de B é condicionada por fatores como pH, textura, matéria orgânica, mineralogia e regime hídrico, enquanto sua absorção e transporte estão estreitamente relacionados à disponibilidade de água e ao fluxo transpiratório. Além disso, sua redistribuição pelo floema é limitada em muitas espécies, tornando o suprimento do

nutriente aos tecidos um crescimento dependente de sua disponibilidade durante o ciclo da cultura (BROWN; SHELPS, 1997; YOSHINARI; TAKANO, 2017).

Essas características tornam a definição da dose e da época de aplicação aspectos relevantes para a eficiência da adubação boratada. Em sistemas de sucessão, a definição do manejo torna-se ainda mais complexa, uma vez que os efeitos da fertilização podem ultrapassar o ciclo da cultura em que o nutriente foi aplicado. Parte do B pode permanecer no sistema e influenciar sua disponibilidade para culturas subsequentes, dependendo das características do solo, das condições ambientais e das quantidades previamente aplicadas.

Dessa forma, o manejo da adubação boratada deve ser analisado sob a perspectiva do sistema de produção, considerando não apenas a resposta imediata da cultura fertilizada, mas também a possibilidade de efeitos residuais sobre a cultura cultivada em sucessão.

Embora a importância fisiológica do B esteja bem estabelecida, as respostas agrônômicas à sua aplicação apresentam elevada variabilidade em função da dose, ambiente, material genético e estratégia de manejo. Em soja, respostas à fertilização boratada podem variar entre genótipos e condições de cultivo (LIBÓRIO et al., 2024), enquanto para o sorgo ainda são mais restritas as informações relacionadas à combinação entre doses e épocas de aplicação em condições de Cerrado. Essa lacuna é particularmente relevante em sistemas soja-sorgo, nos quais ainda há necessidade de compreender se diferentes estratégias de fornecimento de B ao longo do sistema resultam em benefícios produtivos e se seus efeitos permanecem sobre a soja cultivada posteriormente.

Diante disso, a avaliação integrada das respostas do sorgo e da soja ao manejo da adubação boratada pode contribuir para o estabelecimento de estratégias mais eficientes de utilização do micronutriente em sistemas de produção do Cerrado. A determinação de doses e épocas de aplicação, associada à avaliação de atributos do solo, estado nutricional, características fisiológicas, componentes de rendimento e produtividade, permite compreender não apenas a resposta imediata ao B, mas também sua persistência no sistema.

Assim, objetivou-se avaliar o efeito de doses e épocas de aplicação de boro em sistema de produção soja/sorgo, bem como o efeito residual da adubação sobre a cultura da soja cultivada em sucessão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Culturas da soja e do sorgo no sistema de produção do cerrado

O Cerrado constitui uma das principais regiões produtoras de grãos do Brasil, com destaque para a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), que ocupa posição central nos sistemas agrícolas estabelecidos na região. A expansão da cultura foi favorecida pela adaptação de cultivares às condições tropicais, pela correção da fertilidade dos solos e pelo desenvolvimento de tecnologias de manejo que possibilitaram a consolidação de sistemas intensivos de produção. Na safra 2025/2026, a produção brasileira de soja foi estimada em aproximadamente 180,3 milhões de toneladas, evidenciando a relevância econômica e produtiva da cultura para a agricultura nacional (CONAB, 2026).

Nos sistemas de produção do Cerrado, a soja é predominantemente cultivada durante o período de maior disponibilidade hídrica, permitindo que, após sua colheita, outras espécies sejam estabelecidas em sucessão durante a segunda safra. Essa intensificação do uso da terra possibilita a obtenção de mais de uma produção na mesma área ao longo do ano agrícola e contribui para a diversificação dos sistemas. Entretanto, a escolha das culturas utilizadas em sucessão deve considerar não apenas o retorno econômico imediato, mas também seus efeitos sobre a cobertura do solo, ciclagem de nutrientes, matéria orgânica e atributos físicos e químicos do solo, os quais podem repercutir sobre o desempenho da soja cultivada posteriormente (ALVES et al., 2024).

Nesse contexto, o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) apresenta-se como alternativa para cultivo em segunda safra, particularmente em ambientes nos quais a redução da disponibilidade hídrica aumenta o risco para culturas mais exigentes em água.

Características como adaptação às condições tropicais e maior tolerância ao déficit hídrico conferem ao sorgo importância estratégica para a diversificação e para o aumento da resiliência dos sistemas de produção. O avanço tecnológico e a expansão do cultivo têm aumentado sua participação na agricultura brasileira, especialmente na segunda safra, período em que a cultura pode aproveitar áreas anteriormente ocupadas pela soja (COELHO, 2025).

Além da produção de grãos, a inserção do sorgo em sistemas de sucessão pode contribuir para a manutenção de resíduos vegetais sobre o solo e para a diversificação das espécies cultivadas. Em sistemas de plantio direto no Cerrado, a cultura estabelecida na segunda safra pode modificar características do ambiente edáfico e influenciar o desempenho da soja

cultivada na safra subsequente. Dessa forma, a avaliação do sistema deve considerar as interações entre culturas sucessivas e seus efeitos acumulados, uma vez que os benefícios ou limitações de determinado manejo podem se manifestar não apenas na cultura imediatamente cultivada, mas também nos ciclos posteriores (ALVES et al., 2024; SODRÉ FILHO et al., 2020).

A sucessão soja–sorgo apresenta, portanto, interesse agrônômico para as condições do Cerrado por associar uma cultura de elevada importância econômica a uma espécie adaptada à segunda safra. Contudo, a intensificação do sistema também aumenta a necessidade de planejamento do manejo da fertilidade, uma vez que a sucessão de culturas promove extração e exportação contínuas de nutrientes, e pode alterar sua disponibilidade para a cultura subsequente. Nesse sentido, compreender as exigências nutricionais da soja e do sorgo e a dinâmica dos nutrientes no sistema solo–planta torna-se fundamental para estabelecer estratégias de adubação capazes de sustentar a produtividade das duas culturas ao longo dos ciclos de produção.

2.2 Exigências nutricionais da soja e do sorgo com ênfase em micronutrientes

A produtividade das culturas da soja e do sorgo está diretamente relacionada à adequada disponibilidade de nutrientes durante o ciclo de desenvolvimento. Embora as quantidades absorvidas variem em função da cultivar, produtividade, condições edafoclimáticas e práticas de manejo, sistemas agrícolas intensivos promovem elevada extração e exportação de nutrientes, tornando necessária a manutenção de condições adequadas de fertilidade do solo.

No Cerrado, essa atenção é particularmente importante em razão das características naturais de grande parte dos solos, que apresentam elevada acidez, baixa fertilidade natural e disponibilidade limitada de determinados nutrientes (SANTOS; RESENDE; COELHO, 2015).

Na cultura da soja, a elevada produção de biomassa e de grãos resulta em expressiva demanda nutricional. Além dos macronutrientes, micronutrientes como boro (B), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e cobalto (Co) participam de processos metabólicos essenciais ao crescimento e ao desenvolvimento da cultura. Apesar de serem requeridos em menores quantidades, esses elementos desempenham funções relacionadas à atividade enzimática, fotossíntese, metabolismo do nitrogênio, formação e integridade de tecidos e desenvolvimento reprodutivo. Em sistemas de elevada produtividade, o aumento da extração e exportação de nutrientes pode tornar o equilíbrio nutricional

progressivamente mais importante para a manutenção do potencial produtivo da cultura (SFREDO; CARRÃO-PANIZZI, 1990).

Entre os micronutrientes relacionados à nutrição da soja, o Mo e o Co apresentam importância particular devido à sua participação na fixação biológica de nitrogênio.

O Mo integra enzimas envolvidas no metabolismo do nitrogênio, incluindo a nitrogenase, enquanto o Co está associado ao adequado funcionamento da simbiose entre a soja e bactérias fixadoras de nitrogênio. Outros micronutrientes, como Zn, Mn e Fe, também participam de diferentes sistemas enzimáticos e processos metabólicos. Estudos de diagnóstico nutricional em lavouras comerciais demonstram que desequilíbrios envolvendo micronutrientes podem ocorrer mesmo em sistemas produtivos tecnificados, reforçando a necessidade de considerar a disponibilidade desses elementos no manejo nutricional da soja (CAMPO; LANTMANN, 1998; URANO et al., 2006).

O sorgo também apresenta demanda nutricional diretamente relacionada ao seu potencial produtivo e às condições de cultivo. Por ser frequentemente estabelecido em segunda safra, seu desenvolvimento ocorre em um ambiente caracterizado pela redução progressiva da disponibilidade hídrica, o que pode interferir na absorção e no transporte de nutrientes no sistema solo-planta. O suprimento equilibrado de nutrientes é, portanto, necessário para sustentar o crescimento vegetativo, a formação das estruturas reprodutivas e o enchimento de grãos. Embora os macronutrientes sejam absorvidos em maiores quantidades, a disponibilidade adequada de micronutrientes é igualmente necessária para o funcionamento dos processos fisiológicos e metabólicos da cultura (SANTOS; RESENDE; COELHO, 2015).

No Cerrado, o manejo de micronutrientes merece atenção adicional em razão da interação entre as características do solo e as práticas utilizadas para sua correção.

A disponibilidade dos micronutrientes é influenciada por fatores como pH, textura, matéria orgânica, umidade e histórico de manejo. A elevação do pH decorrente da calagem, por exemplo, pode reduzir a disponibilidade de alguns micronutrientes, enquanto solos com menores teores de matéria orgânica e determinadas condições texturais podem apresentar menor capacidade de suprimento. Dessa forma, a necessidade de adubação com micronutrientes deve ser fundamentada no diagnóstico da fertilidade do solo, no estado nutricional das plantas e no histórico produtivo da área, evitando tanto deficiências quanto aplicações desnecessárias (OLIVEIRA et al., 2024).

Entre os micronutrientes, o B apresenta particular relevância para culturas produtoras de grãos, em razão de sua participação em processos relacionados à estrutura e integridade da parede celular, funcionamento de membranas, metabolismo de carboidratos, desenvolvimento

dos tecidos vegetais e estruturas reprodutivas. Na soja, estudos recentes demonstram a importância do diagnóstico adequado do estado nutricional de B para o estabelecimento de estratégias de fertilização, sobretudo porque alterações na disponibilidade desse micronutriente podem comprometer processos fisiológicos relacionados ao desenvolvimento e à produção da cultura (TRASPADINI et al., 2023).

A resposta das culturas à adubação com micronutrientes, entretanto, não depende apenas da quantidade aplicada. A disponibilidade no solo, a forma química do elemento, as condições ambientais, a época e a via de aplicação, além do estado nutricional da planta, interferem na eficiência do manejo. Para o B, essa questão assume importância adicional, pois seu comportamento no sistema solo-planta e sua interação com outros nutrientes podem determinar tanto sua disponibilidade quanto seus efeitos fisiológicos. Assim, compreender a dinâmica do B no solo constitui etapa fundamental para definir estratégias de adubação adequadas em sistemas de sucessão soja-sorgo (RIAZ et al., 2024).

2.3 Boro no solo: disponibilidade e dinâmica

O boro (B) apresenta dinâmica complexa no solo, pois sua disponibilidade para as plantas é condicionada pelas propriedades químicas e físicas do ambiente edáfico.

Na solução do solo, em condições de pH normalmente encontradas em solos agrícolas, o B ocorre predominantemente na forma de ácido bórico não dissociado $[B(OH)_3]$, enquanto a participação da forma borato $[B(OH)_4^-]$ aumenta com a elevação do pH. A concentração do nutriente na solução, resulta do equilíbrio entre processos de adsorção e dessorção, mineralização da matéria orgânica, absorção pelas plantas e perdas por lixiviação, fazendo com que sua disponibilidade possa apresentar variações ao longo do ciclo das culturas (GOLDBERG, 1997; SHORROCKS, 1997).

Entre os principais fatores que controlam a disponibilidade de B no solo destacam-se o pH, a textura e o teor de matéria orgânica. A adsorção do B pode ocorrer em minerais de argila, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e componentes da matéria orgânica. Em solos altamente intemperizados, característicos de grande parte do Cerrado brasileiro, a presença expressiva de óxidos de Fe e Al influencia as reações de retenção do micronutriente.

Dessa forma, solos com diferentes atributos mineralógicos, texturais e químicos podem apresentar comportamentos distintos quanto à retenção e à disponibilidade do B para as plantas (AMARAL et al., 2012).

A textura exerce papel importante nessa dinâmica. Em solos com maior teor de argila, geralmente ocorre maior capacidade de adsorção do B devido à maior superfície específica e à presença de constituintes minerais capazes de reter o elemento. Em contrapartida, solos arenosos apresentam menor capacidade de retenção e, conseqüentemente, maior susceptibilidade às perdas do nutriente por lixiviação. Esse comportamento tem implicações diretas para o manejo da adubação boratada, uma vez que a aplicação de determinada quantidade de B pode resultar em disponibilidade distinta dependendo das características texturais do solo (AMARAL et al., 2012).

A matéria orgânica também constitui importante componente na dinâmica do B. Parte considerável do nutriente presente nas camadas superficiais do solo encontra-se associada à fração orgânica, podendo ser liberada para a solução durante os processos de mineralização.

Assim, solos com maiores teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior capacidade de suprimento de B, embora essa relação seja dependente das condições que controlam a decomposição dos resíduos orgânicos e a atividade microbiana.

Em solos tropicais, a relação entre propriedades físico-químicas do solo e os teores de B disponível demonstra que a disponibilidade do micronutriente não depende apenas do seu teor total, mas das formas em que se encontra e das interações estabelecidas com os constituintes do solo (OLIVEIRA; SINGH; CRUZ, 1999). O pH constitui outro fator determinante para o comportamento do B. A elevação do pH modifica as formas químicas do elemento e suas interações com as superfícies dos constituintes do solo.

Em valores elevados de pH, especialmente acima de aproximadamente 6,5 a 7,0, pode ocorrer aumento da adsorção de B, particularmente da forma borato, reduzindo sua concentração na solução do solo. Esse efeito apresenta relevância em solos altamente intemperizados e demonstra que práticas corretivas, como a calagem, embora essenciais para a construção da fertilidade dos solos ácidos do Cerrado, podem alterar a disponibilidade de micronutrientes e devem ser consideradas no diagnóstico nutricional (AMARAL et al., 2012).

A disponibilidade de B também apresenta estreita relação com o regime hídrico, por estar presente na solução do solo e ser transportado até as raízes principalmente pelo fluxo de massa, alterações na umidade podem modificar significativamente seu suprimento às plantas.

Períodos de déficit hídrico reduzem o movimento de água no solo e, conseqüentemente, o transporte do B até a superfície radicular. Por outro lado, em condições de elevada precipitação, especialmente em solos de textura mais arenosa e com menor capacidade de retenção, podem ocorrer perdas do nutriente por lixiviação. Portanto, a disponibilidade de B resulta da interação entre atributos do solo e condições ambientais, e não somente da quantidade

aplicada por meio da fertilização (SHORROCKS, 1997). Essa dinâmica assume importância particular em solos do Cerrado, nos quais a baixa fertilidade natural, o elevado grau de intemperismo e, em determinadas condições, os baixos teores de matéria orgânica podem contribuir para limitações na disponibilidade de B.

Trabalhos conduzidos no Brasil demonstram que o B está entre os micronutrientes cuja baixa disponibilidade pode ocorrer em solos do Cerrado, podendo limitar o desenvolvimento das culturas quando as condições de fertilidade não são adequadamente manejadas (SFREDO et al., 2001).

Além da possibilidade de deficiência, o manejo do B requer atenção devido à relação entre a dose aplicada, as características do solo e a concentração alcançada na solução. Resultados recentes da Embrapa Soja demonstram que a resposta e o risco de toxicidade dependem, entre outros fatores, da textura do solo, do posicionamento do fertilizante e das condições hídricas. Em solos arenosos, por exemplo, aplicações concentradas de B próximas à linha de semeadura podem favorecer concentrações elevadas do nutriente e ocasionar sintomas de toxicidade, sobretudo quando associadas à restrição hídrica (OLIVEIRA et al., 2024).

Diante dessas características, a avaliação da disponibilidade de B no solo constitui ferramenta importante para o estabelecimento de estratégias de adubação. No Brasil, a extração com água quente é tradicionalmente empregada para estimar o B disponível, embora a interpretação dos resultados deva considerar as características do solo e as limitações inerentes aos métodos de diagnóstico. A própria dinâmica do elemento e sua interação com pH, matéria orgânica e textura podem dificultar o estabelecimento de relações consistentes entre o B extraído do solo e aquele efetivamente absorvido pelas culturas (MOREIRA; CASTRO, 2006; AMARAL et al., 2012).

Portanto, a dinâmica do B no solo é resultado da interação entre processos de retenção, liberação, transporte e perdas, fortemente condicionados pelos atributos edáficos e pelas condições ambientais. A compreensão desses processos é fundamental para interpretar a disponibilidade do micronutriente e estabelecer estratégias de adubação mais eficientes, particularmente em sistemas intensivos de produção no Cerrado. Entretanto, a eficiência do B não depende apenas de sua disponibilidade no solo, mas também dos mecanismos envolvidos em sua absorção, transporte e atuação no metabolismo vegetal, aspectos abordados no tópico seguinte.

2.4 Absorção, transporte e funções fisiológicas do boro nas plantas

O boro (B) é absorvido pelas plantas predominantemente na forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$, espécie química que prevalece na solução do solo em condições de pH normalmente encontradas em sistemas agrícolas. A absorção radicular é influenciada pela concentração do nutriente na solução do solo, disponibilidade hídrica, taxa transpiratória e características do sistema radicular. Em condições adequadas de disponibilidade, parte expressiva da absorção pode ocorrer de forma passiva, acompanhando o fluxo de água em direção às raízes; entretanto, sob baixa disponibilidade, proteínas transportadoras específicas presentes nas membranas celulares participam ativamente da aquisição e do transporte do B (MIWA; FUJIWARA, 2010; YOSHINARI; TAKANO, 2017).

Após a absorção, o B é transportado predominantemente pelo xilema, acompanhando a corrente transpiratória das raízes para a parte aérea. Dessa forma, fatores ambientais que modificam a transpiração, como disponibilidade de água no solo, temperatura e umidade relativa do ar, também podem interferir na distribuição do nutriente entre os diferentes órgãos da planta. Em condições de déficit hídrico, a redução do fluxo de água até as raízes e da transpiração pode limitar a absorção e o transporte do B, mesmo quando o solo apresenta teores potencialmente adequados do micronutriente. Essa relação ajuda a explicar a ocorrência de deficiência fisiológica de B associada a períodos de restrição hídrica (OLIVEIRA et al., 2020).

A mobilidade do B no floema é limitada na maioria das espécies cultivadas, fazendo com que o nutriente acumulado em tecidos mais velhos apresente baixa capacidade de redistribuição para órgãos jovens. Existem exceções em espécies que produzem quantidades expressivas de polióis, nas quais a formação de complexos B-poliol permite maior mobilidade floemática. Nas espécies em que essa redistribuição é restrita, entretanto, o suprimento contínuo de B torna-se particularmente importante para regiões de crescimento ativo, como meristemas, raízes jovens e estruturas reprodutivas (BROWN; SHELPS, 1997; BROWN et al., 2002).

Entre as funções fisiológicas do B, sua participação na estrutura e estabilidade da parede celular é considerada uma das mais bem estabelecidas. O micronutriente participa da formação de ligações entre moléculas de ramnogalacturonano II (RG-II), um polissacarídeo péctico da parede celular. A formação desses complexos contribui para a organização, resistência e integridade estrutural da parede, sendo essencial para os processos de expansão e diferenciação celular. Consequentemente, a deficiência de B compromete principalmente tecidos com intensa divisão e expansão celular, explicando a elevada sensibilidade dos meristemas apicais e

radiculares à insuficiência do nutriente (O'NEILL et al., 2004; CAMACHO-CRISTÓBAL; REXACH; GONZÁLEZ-FONTES, 2008).

Além da parede celular, o B está associado à manutenção da integridade e funcionalidade das membranas plasmáticas. A deficiência do micronutriente pode alterar a permeabilidade das membranas, o transporte de íons e a atividade de proteínas relacionadas aos processos de transporte através da membrana. Essas alterações podem afetar a homeostase celular e interferir indiretamente na absorção e utilização de outros nutrientes, demonstrando que os efeitos da deficiência de B ultrapassam sua função estrutural na parede celular (CAMACHO-CRISTÓBAL; REXACH; GONZÁLEZ-FONTES, 2008).

O B também apresenta relação com o metabolismo e a translocação de carboidratos.

A deficiência do nutriente pode ocasionar alterações no metabolismo de açúcares e na distribuição de fotoassimilados entre órgãos fonte e dreno, comprometendo o suprimento energético necessário ao crescimento dos tecidos. Em razão da intensa demanda metabólica das regiões meristemáticas e das estruturas reprodutivas, alterações na disponibilidade de carboidratos podem contribuir para os efeitos observados sobre crescimento, florescimento e desenvolvimento dos órgãos reprodutivos (MARSCHNER, 2012).

A importância fisiológica do B torna-se particularmente evidente durante o desenvolvimento reprodutivo. O nutriente participa de processos relacionados à germinação do grão de pólen, crescimento do tubo polínico, fecundação e desenvolvimento inicial das estruturas reprodutivas. A deficiência durante esses períodos pode comprometer a polinização e a fecundação, favorecer o abortamento de flores e reduzir a formação de frutos, vagens ou grãos. Por essa razão, a demanda fisiológica por B para assegurar a reprodução pode ser elevada mesmo em situações nas quais sintomas vegetativos de deficiência não sejam claramente observados (DELL; HUANG, 1997; EMBRAPA, 2025).

A atuação do B sobre tecidos meristemáticos também explica alterações morfológicas frequentemente associadas à deficiência do micronutriente. O comprometimento da formação da parede celular e dos processos de divisão e elongação celular pode resultar em redução do crescimento radicular e da parte aérea, morte de pontos de crescimento, encurtamento de entrenós e deformação de tecidos jovens. Em condições adequadas de nutrição, por outro lado, o B contribui para a manutenção do crescimento dos tecidos e para o desenvolvimento normal dos órgãos vegetativos e reprodutivos (DELL; HUANG, 1997; MARSCHNER, 2012).

A participação do B em diferentes processos fisiológicos demonstra que sua importância não deve ser avaliada exclusivamente pela quantidade acumulada nos tecidos. Embora seja requerido em pequenas concentrações quando comparado aos macronutrientes, sua atuação

sobre parede celular, membranas, crescimento meristemático e desenvolvimento reprodutivo faz com que alterações em sua disponibilidade possam repercutir diretamente sobre o estabelecimento e o potencial produtivo das culturas. A Embrapa destaca, entre as funções atribuídas ao B, sua participação no transporte de carboidratos, lignificação, metabolismo de compostos celulares, florescimento, crescimento do tubo polínico e processos de frutificação.

Portanto, a eficiência da nutrição boratada depende não apenas da presença do B no solo, mas da manutenção de condições que possibilitem sua absorção e seu transporte até os tecidos metabolicamente ativos. A limitada redistribuição do nutriente em muitas espécies e sua importância para tecidos jovens e estruturas reprodutivas, tornam necessário compreender a relação entre disponibilidade, estágio fenológico e forma de aplicação. Essas características fisiológicas constituem a base para interpretar as respostas das culturas à adubação boratada e, especificamente, os efeitos do manejo do B no sorgo e na soja, abordados nos tópicos seguintes.

2.5 Boro na cultura do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) apresenta elevada capacidade de adaptação a ambientes sujeitos a restrições hídricas e condições de cultivo de segunda safra, porém, a expressão de seu potencial produtivo depende do adequado suprimento de nutrientes durante o ciclo. Embora os micronutrientes sejam requeridos em menores quantidades, sua disponibilidade é fundamental para o funcionamento metabólico e para a formação das estruturas vegetativas e reprodutivas da cultura. Nesse contexto, o boro (B) merece atenção em solos do Cerrado, nos quais limitações na disponibilidade de micronutrientes podem ocorrer em função das características químicas do solo e das condições ambientais (SANTOS; RESENDE; COELHO, 2015).

Na cultura do sorgo, o B está relacionado aos processos fisiológicos gerais atribuídos ao micronutriente nas plantas, especialmente à manutenção da integridade da parede celular, crescimento dos tecidos meristemáticos e desenvolvimento das estruturas reprodutivas.

Dessa forma, condições de deficiência podem comprometer o crescimento de tecidos jovens e, durante a fase reprodutiva, interferir na formação e no desenvolvimento adequado das estruturas responsáveis pela produção de grãos. Como o sorgo apresenta aumento expressivo do acúmulo de matéria seca e nutrientes após os estádios iniciais de desenvolvimento, a manutenção do equilíbrio nutricional ao longo do ciclo constitui fator relevante para a obtenção de elevada produtividade (SANTOS et al., 2019).

A resposta do sorgo à adubação, entretanto, depende da fertilidade inicial do solo, do potencial produtivo do híbrido, das condições climáticas e do sistema de cultivo. A diagnose adequada da fertilidade é, portanto, fundamental para definir a necessidade de correção e fertilização, evitando tanto limitações nutricionais quanto aplicações desnecessárias, em sistemas de alta produtividade, o manejo nutricional deve considerar não somente os macronutrientes, mas também a disponibilidade de micronutrientes potencialmente limitantes (RESENDE et al., 2009; SANTOS; RESENDE; COELHO, 2015).

No caso específico do B, o manejo exige atenção adicional devido à dependência de sua disponibilidade das condições de solo e umidade e à necessidade de adequação da dose e da forma de fornecimento. A aplicação via solo pode contribuir para a disponibilidade do nutriente durante maior período do ciclo, enquanto aplicações foliares constituem uma alternativa para o fornecimento em momentos específicos de desenvolvimento. Entretanto, a eficiência dessas estratégias depende das condições de cultivo, do teor inicial de B no solo e do estágio fenológico em que o nutriente é fornecido, não sendo adequado estabelecer uma estratégia única de manejo para diferentes ambientes de produção.

Apesar da importância fisiológica do B, a disponibilidade de informações específicas sobre doses, épocas e formas de aplicação do micronutriente em sorgo grânifero ainda é relativamente limitada, principalmente quando comparada à literatura existente para macronutrientes e para culturas como soja e milho. Essa lacuna torna relevante a realização de estudos em condições de campo, que avaliem diferentes estratégias de adubação boratada, sobretudo em sistemas de produção do Cerrado, permitindo estabelecer relações entre disponibilidade do nutriente, crescimento, componentes de produção e produtividade do sorgo.

2.6 Boro na cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) apresenta elevada importância econômica e expressiva demanda nutricional para sustentar seu potencial produtivo. Entre os micronutrientes, o boro (B) merece atenção devido à sua participação no crescimento vegetativo e, principalmente, no desenvolvimento das estruturas reprodutivas. A adequada disponibilidade do nutriente contribui para processos relacionados à formação da parede celular, crescimento dos tecidos meristemáticos, germinação do pólen e crescimento do tubo polínico, tornando o equilíbrio nutricional de B relevante durante o florescimento, a fecundação e a formação das vagens (TRASPADINI et al., 2023).

A deficiência de B pode comprometer o desenvolvimento da soja, mesmo antes da manifestação evidente de sintomas visuais, tornando importante o acompanhamento do estado nutricional da cultura. Traspadini et al. (2023), ao avaliarem o diagnóstico nutricional de B em soja, destacaram a importância do micronutriente para a produtividade, e demonstraram que o diagnóstico adequado de seu estado nutricional pode contribuir para o estabelecimento de estratégias mais eficientes de fertilização. Entretanto, a resposta da cultura depende da disponibilidade inicial do nutriente e das condições de solo e ambiente, reforçando a necessidade de associar análise de solo e diagnose foliar no planejamento da adubação.

Em condições de Cerrado, a adubação boratada pode modificar características vegetativas e reprodutivas da soja. Libório et al. (2024), avaliando diferentes genótipos em duas safras, observaram efeitos positivos do fornecimento de B sobre características como altura de inserção da primeira vagem, número de ramos, diâmetro do caule e número de vagens por planta. A resposta produtiva, entretanto, variou entre os genótipos, com cultivares responsivas e outras sem incremento significativo de produtividade, demonstrando que os benefícios da adubação boratada não ocorrem de maneira uniforme entre materiais genéticos e condições de cultivo.

A variabilidade de resposta também evidencia que baixos teores de B, determinados na análise de solo, não implicam necessariamente resposta produtiva à fertilização.

Resultados de experimentos conduzidos pela Embrapa Soja demonstram situações em que teores reduzidos de B no solo coexistem com concentrações foliares adequadas e ausência de incremento consistente de produtividade após a fertilização, indicando limitações no uso isolado da análise de solo para prever a resposta das culturas ao micronutriente (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018). Dessa forma, o manejo deve considerar conjuntamente o diagnóstico do solo, o estado nutricional das plantas e o histórico de fertilização da área.

Em sistemas de sucessão, outro aspecto relevante é a possibilidade de efeito residual da adubação boratada. A quantidade de B disponível para a soja não depende exclusivamente da fertilização realizada durante seu próprio ciclo, mas também, das aplicações anteriores e dos processos de retenção e liberação do nutriente no solo. Assim, a definição de doses e épocas de aplicação deve considerar o sistema de produção como um todo, evitando aplicações sucessivas sem diagnóstico prévio e buscando conciliar disponibilidade adequada, eficiência agrônômica e segurança nutricional. Essa abordagem é particularmente importante devido à variabilidade das respostas da soja à fertilização boratada e à influência das características edáficas e ambientais sobre a disponibilidade do micronutriente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Fontes do Saber, pertencente à Universidade de Rio Verde (UniRV), localizada no município de Rio Verde, GO, sob as coordenadas geográficas 17°47'18" S e 50°57'31" W, a 739 m de altitude. A área encontra-se inserida na região do Cerrado brasileiro, cujo clima é classificado como Aw, segundo Köppen, caracterizado por duas estações bem definidas: verão chuvoso e inverno seco. Dados de precipitação e temperatura podem ser visualizados na figura 1.

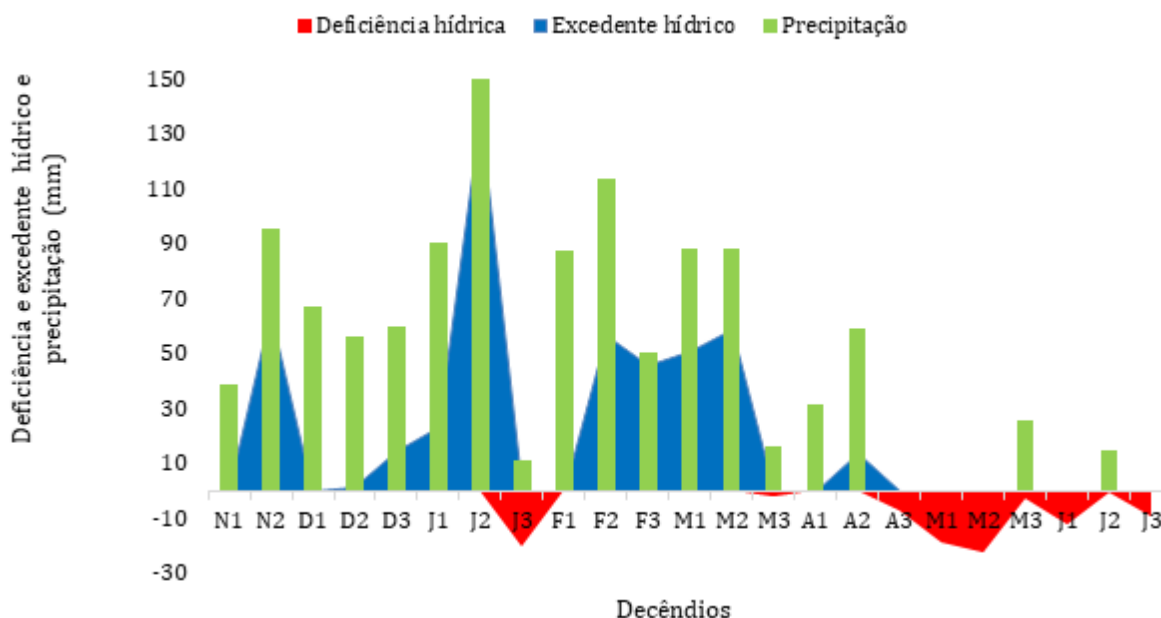


FIGURA 1 - Balanço hídrico no sistema soja- sorgo cultivados em sucessão no ano agrícola 2020/21 em Rio Verde, GO.

Os dados meteorológicos foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Estação Meteorológica Automática de Rio Verde (A025) em parceria com a Universidade de Rio Verde, localizada na latitude 17,78°S, longitude 50,96°O e à 780 m do nível do mar. Os dados meteorológicos analisados correspondem ao período de condução do experimento.

A área experimental foi subdividida em duas áreas contíguas, denominadas Área 1 e Área 2, ambas conduzidas sob as mesmas condições edafoclimáticas e de manejo.

O solo da área foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO de textura argilosa, apresentando teor inicial de boro inferior a 0,20 mg dm⁻³, determinado previamente por análise

química do solo, condição considerada adequada para avaliação da resposta das culturas ao manejo da adubação boratada. O estudo foi desenvolvido em sistema de produção soja/sorgo, representativo das condições predominantes da agricultura do Cerrado brasileiro.

O experimento teve início durante o cultivo da soja (2019/2020), prosseguindo posteriormente com a cultura do sorgo em segunda safra (2020), onde deu-se início às avaliações, e, por fim, com uma nova safra de soja (2020/2021), implantada sobre a mesma área experimental, permitindo avaliar tanto os efeitos imediatos quanto o efeito residual do boro no sistema de produção. Essa abordagem experimental foi adotada com o objetivo de compreender a dinâmica do micronutriente ao longo das sucessões de cultivo, aproximando as condições experimentais da realidade observada nas propriedades agrícolas da região.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 5×3 , com quatro repetições. O fator A foi constituído por cinco doses de boro aplicadas durante a dessecação da área, correspondentes a $0,0\text{L ha}^{-1}$; $0,5\text{L ha}^{-1}$; $1,0\text{L ha}^{-1}$; $2,0\text{L ha}^{-1}$ e $4,0\text{L ha}^{-1}$ do produto comercial. O fator B foi composto por três épocas de aplicação (Dessecação, Dessecação + R1 e Dessecação + R1 + R5). Os estádios R1 e R5 correspondem a cultura da soja anterior ao experimento.

No sorgo, os tratamentos correspondentes às aplicações nas fases reprodutivas foram realizados aos 50 e 70 dias após a semeadura (DAS), respeitando a equivalência fisiológica entre as culturas. A combinação dos fatores originou quinze tratamentos, distribuídos aleatoriamente em quatro blocos, totalizando sessenta parcelas experimentais (Tabela 1). As doses avaliadas durante a dessecação tiveram como objetivo modificar a disponibilidade inicial de boro no sistema solo-planta, enquanto as aplicações realizadas nos estádios reprodutivos buscaram sincronizar o fornecimento do micronutriente com períodos de maior demanda fisiológica das culturas.

Nas aplicações foliares, empregou-se dose fixa de $1,1\text{ L ha}^{-1}$ por aplicação, permitindo que o efeito quantitativo fosse determinado, exclusivamente, pelas doses aplicadas na dessecação, enquanto o fator qualitativo foi representado pelas diferentes estratégias de parcelamento da adubação boratada. Dessa forma, tornou-se possível avaliar simultaneamente o efeito da quantidade de boro disponibilizada ao sistema e o efeito do momento de aplicação sobre o desenvolvimento das culturas.

As aplicações do produto comercial foram feitas por meio da bomba costal de CO_2 de 6 pontas, em uma taxa de aplicação de 150L ha^{-1} , com vazão de bicos (padrão da bomba costal) de 10Lmin^{-1} , em cada tratamento foi feito a dosagem em garrafas pet (necessária utilização de

garrafas para a aplicação, pois a bomba CO₂ não apresenta reservatório), sendo designado conforme o arranjo experimental ilustrado na Tabela 1.

O produto comercial utilizado apresenta garantia de 8% (p/p) de boro solúvel em água, equivalente a 104 g L⁻¹ (p/v), com densidade de 1,30 g mL⁻¹, sendo formulado como fluido de solução verdadeira para aplicação foliar. Considerando essa concentração, as doses de B aplicadas na dessecação corresponderam a 0; 52; 104; 208 e 416 g ha⁻¹ de B elementar (0 a 0,416 kg ha⁻¹). Cada aplicação foliar complementar (1,1 L ha⁻¹) correspondeu a 114,4 g ha⁻¹ de B, totalizando 228,8 g ha⁻¹ na estratégia com duas aplicações (R1 + R5). A dose máxima avaliada (4,0 L ha⁻¹; 416 g ha⁻¹ de B) situa-se de quatro a cinco vezes acima da faixa recomendada pelo fabricante para dessecação em soja e milho (0,5 a 1,0 L ha⁻¹), o que subsidia a interpretação de respostas quadráticas com redução de desempenho nas doses mais elevadas, discutida adiante.

TABELA 1 - Tratamentos utilizados no experimento

TRATAMENTOS	ÉPOCA	DOSES NA DESSECAÇÃO (L ha ⁻¹)	DOSE NO ESTÁGIO REPRODUTIVO (L ha ⁻¹)
1	DESSECAÇÃO	0,0	0
2		0,5	0
3		1,0	0
4		2,0	0
5		4,0	0
6	R1 (Soja) 50 DAS* (Sorgo)	0,0	1,1
7		0,5	1,1
8		1,0	1,1
9		2,0	1,1
10		4,0	1,1
11	R1 + R5 (Soja) 50 + 70 DAS (Sorgo)	0,0	1,1 + 1,1
12		0,5	1,1 + 1,1
13		1,0	1,1 + 1,1
14		2,0	1,1 + 1,1
15		4,0	1,1 + 1,1

* Dias após a semeadura.

TABELA 2 - Conversão das doses do produto comercial (8% p/p B; 104 g L⁻¹) em doses de boro elementar

Dose comercial (L ha ⁻¹)	B elementar (g ha ⁻¹)	B elementar (kg ha ⁻¹)
0,0	0	0,000
0,5	52	0,052
1,0	104	0,104
2,0	208	0,208
4,0	416	0,416

Cada aplicação foliar (1,1 L ha⁻¹) corresponde a 114,4 g ha⁻¹ de B (0,1144 kg ha⁻¹).

Ao término do primeiro ciclo da soja, foi realizada nova amostragem de solo para determinação do teor de boro disponível. Os resultados demonstraram que, mesmo após a condução inicial do experimento, os teores permaneceram próximos de 0,20 mg dm⁻³, indicando manutenção da condição de baixa disponibilidade do micronutriente. Com base nesses resultados, optou-se pela continuidade do experimento durante o cultivo do sorgo. O plantio do sorgo foi realizado com o híbrido comercial 1G100 (Brevant®), amplamente utilizado na região de Rio Verde – GO.

O material apresenta porte baixo, altura média de 1,15 m e ciclo considerado superprecoce, características que favorecem sua adaptação às condições edafoclimáticas do cerrado e ao cultivo em segunda safra. Foi repetido integralmente os tratamentos originalmente estabelecidos. Após a colheita do sorgo, uma nova avaliação química do solo indicou elevação dos teores de boro em relação à condição inicial do experimento, passando de uma faixa considerada baixa para níveis interpretados como altos, de acordo com os critérios de interpretação adotados. Em razão desse incremento e da presença residual do nutriente no solo, decidiu-se não realizar nova aplicação de boro na safra subsequente de soja, permitindo que a resposta da cultura fosse atribuída exclusivamente ao efeito residual do nutriente acumulado no sistema. Essa estratégia experimental, possibilitou acompanhar a evolução dos teores de boro no solo ao longo dos ciclos agrícolas, e avaliar a persistência do efeito da adubação boratada em sucessão de culturas. Após o encerramento do ciclo da cultura do sorgo, foi realizada a semeadura da soja na mesma área experimental, mantendo-se o delineamento e a disposição original das parcelas. Foi utilizada a cultivar NS 7709 IPRO RR2, classificada como superprecoce, com grupo de maturação 7,2.

Durante a condução do experimento, todas as práticas culturais referentes à implantação, adubação de manutenção, controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizadas de maneira uniforme em todas as parcelas experimentais, seguindo as recomendações técnicas

para cada cultura, de forma que as diferenças observadas entre os tratamentos fossem atribuídas exclusivamente às estratégias de manejo da adubação com boro.

Foram realizadas avaliações vegetativas, fisiológicas, nutricionais e produtivas nas culturas da soja e do sorgo. As variáveis analisadas no sorgo foram: clorofila *a*, *b*, relação *a/b* e total; Teor foliar de B; População final de plantas; Altura de plantas; Massa de grãos e produtividade final. Na cultura da soja foram realizadas avaliações referentes à clorofila *a*, *b*, relação *a/b* e total; Altura de plantas; Teor de B foliar; Número de grãos por vagens; Massa de mil grãos e produtividade. Ao final de cada ciclo de cultivo foram realizadas análises de teor de B no solo, permitindo acompanhar a dinâmica do micronutriente ao longo da sucessão soja–sorgo–soja, e subsidiar as decisões experimentais relacionadas à continuidade do estudo e à avaliação do efeito residual. Seguindo esse critério também foram realizadas análises dos teores de matéria orgânica. Essa determinação foi incluída devido ao uso de uma fonte de ácido bórico complexada com substâncias húmicas, permitindo avaliar possíveis efeitos dessa formulação sobre esse atributo do solo. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando verificado efeito significativo para doses de boro, procedeu-se à análise de regressão, selecionando-se os modelos com base na significância dos coeficientes e no comportamento biológico das respostas observadas. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do sorgo na área 1

Na Área 1, a análise de variância (Tabela 2) revelou efeito significativo do fator aplicação sobre o teor de boro no solo aos 50 DAS ($p = 0,0004$) e sobre o teor foliar de boro aos 70 DAS ($p = 0,0014$). A interação dose $\times$ aplicação foi significativa apenas para a relação clorofila *a/b* ($p = 0,0381$) e para a matéria orgânica do solo após o cultivo do sorgo ($p = 0,0351$). As demais variáveis nutricionais, fisiológicas e vegetativas não apresentaram efeito significativo dos fatores avaliados.

TABELA 3 - Resumo da análise de variância *p* valor e significância, para as características avaliadas no sorgo sob manejo da adubação com boro na área 1 safrinha 2020, Rio Verde, GO

Variável	Dose (D)	Sig.	Aplicação (A)	Sig.	D × A	Sig.
MOS pré sorgo	0.5319	ns	0.7920	ns	0.1943	ns
B solo 50 DAS	0.1497	ns	0.0004	**	0.4354	ns
B solo 70 DAS	0.5823	ns	0.1157	ns	0.6031	ns
População 50 DAS	0.5457	ns	0.4958	ns	0.9850	ns
População 70 DAS	0.8548	ns	0.4709	ns	0.4218	ns
B foliar 50 DAS	0.3775	ns	0.1321	ns	0.9621	ns
B foliar 70 DAS	0.5538	ns	0.0014	**	0.0589	ns
Clorofila <i>a</i> 50 DAS	0.6819	ns	0.2969	ns	0.6485	ns
Clorofila <i>b</i> 50 DAS	0.7783	ns	0.7460	ns	0.8704	ns
Relação <i>a/b</i> 50 DAS	0.9779	ns	0.5801	ns	0.7327	ns
Clorofila total 50 DAS	0.6916	ns	0.4300	ns	0.7468	ns
Clorofila <i>a</i> 70 DAS	0.8048	ns	0.5188	ns	0.3755	ns
Clorofila <i>b</i> 70 DAS	0.3596	ns	0.9829	ns	0.1698	ns
Relação <i>a/b</i> 70 DAS	0.2197	ns	0.7168	ns	0.0381	*
Clorofila total 70 DAS	0.6548	ns	0.7377	ns	0.3285	ns
Altura de plantas 50 DAS	0.1777	ns	0.3512	ns	0.1294	ns
Altura de plantas 70 DAS	0.8136	ns	0.0887	ns	0.3914	ns
MOS pós sorgo	0.3453	ns	0.5048	ns	0.0351	*

* Significativo a 5%; ** Significativo a 1%.

O teor de boro (B) no solo (Figura 2A) e o teor foliar de boro (Figura 2B) apresentaram variação entre as estratégias de aplicação, evidenciando que o parcelamento da adubação influenciou a disponibilidade do nutriente. O B no solo foi maior quando houve aplicação do micronutriente 50 DAS. E a aplicação em R1 e R5 (50 e 70 DAS no sorgo), foram os métodos que resultaram em maior teor do micronutriente nas folhas do sorgo.

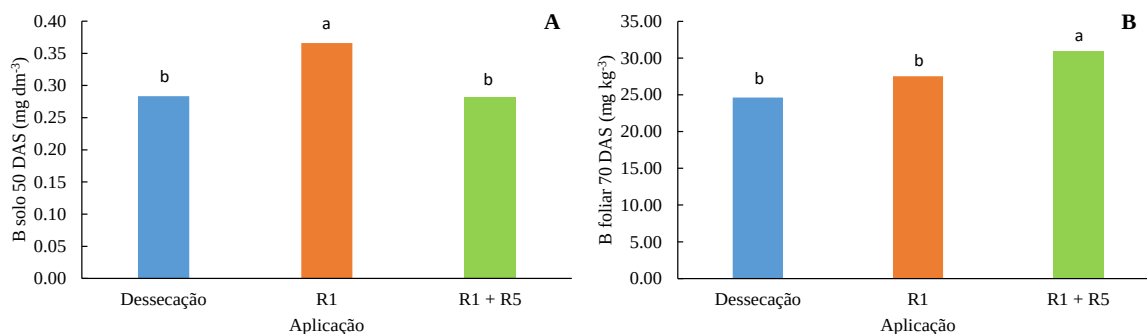


FIGURA 2 - Teor de boro no solo 50 dias após a semeadura (A) e foliar 70 dias após a semeadura (B) do sorgo em Latossolo Vermelho, safrinha 2020 na área 1. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A relação entre clorofila *a* e *b* (Figura 3A) e a matéria orgânica do solo após o cultivo (Figura 3B) também responderam à interação entre dose e época de aplicação. As doses aplicadas na dessecação apresentaram significância quando associadas à aplicação foliar em R1 (50 DAS no sorgo), mostrando um ajuste quadrático, tendo-se aumento da relação entre as clorofilas *a* e *b* (Figura 3A). Além disso, na dose de 4 L ha⁻¹ do micronutriente associado à aplicação foliar em R1 destacou-se em relação à aplicação foliar em R1+R5 (50 + 70 DAS).

As doses aplicadas na dessecação associadas a aplicações foliares em R1 e R5 obtiveram resposta quadrática para a MOS (Figura 3B). Observa-se que houve redução da MOS até a dose de 2 L ha⁻¹, e após, aumento nessa característica do solo quando aplicou-se 4 L ha⁻¹ do micronutriente. Dentre as estratégias de fornecimento do B, a dessecação foi mais eficiente quando comparada aos tratamentos foliares associadas, na dose de 2 L ha⁻¹ (Figura 3B).

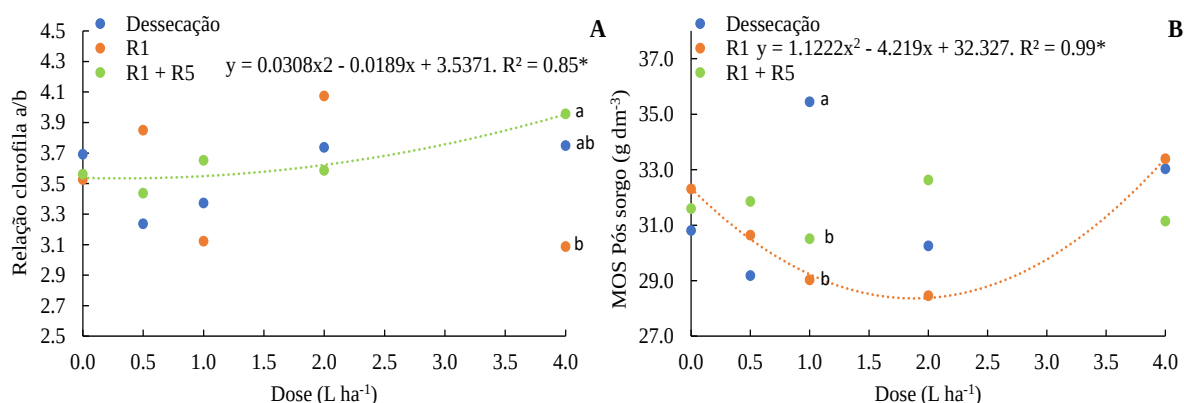


FIGURA 3 - Relação entre clorofila *a* e *b* (A) em sorgo e matéria orgânica do solo (B) na área 1 após o cultivo de sorgo com doses de boro aplicados na dessecação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.2 Resultados do sorgo na área 2

Na Área 2, os resultados evidenciaram maior magnitude de resposta à adubação boratada em comparação à Área 1 (Tabela 3). O fator dose foi significativo para a matéria orgânica do solo pré-sorgo ($p = 0,0045$), as clorofilas *a*, *b* e total aos 70 DAS ($p < 0,0001$) e a produtividade de grãos ($p < 0,0001$). O fator aplicação foi significativo para o teor de boro no solo aos 50 DAS ($p = 0,0256$), massa de grãos por panícula ($p = 0,0003$) e clorofila total aos 70 DAS ($p = 0,0003$). A interação dose $\times$ aplicação foi significativa para MOS pré-sorgo ($p < 0,0001$), população de plantas aos 50 DAS ($p = 0,0323$), relação *a/b* ($p = 0,0001$), produtividade ($p < 0,0001$) e MOS pós-sorgo ($p = 0,0266$).

TABELA 4 - Resumo da análise de variância *p* valor e significância, para as características avaliadas no sorgo sob manejo da adubação com boro na área 2, safrinha 2020, Rio Verde, GO

Variável	Dose (D)	Sig.	Aplicação (A)	Sig.	D × A	Sig.
MOS pré sorgo	0.0045	**	0.0001	**	0.0000	**
B solo 50 DAS	0.0634	ns	0.0256	*	0.0911	ns
B solo 70 DAS	0.2848	ns	0.9092	ns	0.3869	ns
População 50 DAS	0.3867	ns	0.3642	ns	0.0323	*
População 70 DAS	0.6236	ns	0.9144	ns	0.2828	ns
B foliar 50 DAS	0.1948	ns	0.3978	ns	0.0771	ns
B foliar 70 DAS	0.8618	ns	0.4984	ns	0.9650	ns
Clorofila <i>a</i> 50 DAS	0.6819	ns	0.2969	ns	0.6485	ns
Clorofila <i>b</i> 50 DAS	0.7783	ns	0.7460	ns	0.8704	ns
Relação <i>a/b</i> 50 DAS	0.9779	ns	0.5801	ns	0.7327	ns
Clorofila total 50 DAS	0.6916	ns	0.4300	ns	0.7468	ns
Clorofila <i>a</i> 70 DAS	0.0000	**	0.0000	**	0.0000	**
Clorofila <i>b</i> 70 DAS	0.0000	**	0.0000	**	0.0000	**
Relação <i>a/b</i> 70 DAS	0.3393	ns	0.0217	*	0.0001	**
Clorofila total 70 DAS	0.0000	**	0.0003	**	0.0000	**
Altura de plantas 50 DAS	0.2109	ns	0.8086	ns	0.7867	ns
Altura de plantas 70 DAS	0.2180	ns	0.1903	ns	0.6915	ns
MGP	0.5272	ns	0.0003	**	0.6026	ns
Produtividade	0.0000	**	0.1708	ns	0.0000	**
MOS pós sorgo	0.4611	ns	0.4844	ns	0.0266	*

* Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; MGP: Massa de grãos por panícula.

O teor de boro no solo aos 50 DAS (Figura 4A) e a massa de grãos por panícula (Figura 4B) apresentaram variação em função das estratégias de aplicação. A aplicação foliar em R1 resultou em maior teor de B no solo aos 50 dias após a semeadura do sorgo (Figura 4A) e, quando o manejo da adubação do micronutriente ocorreu nos estágios fenológicos do sorgo 50 e 70 DAS (R1+R5 na soja) houve maior massa de grãos por panícula no sorgo (Figura 4B).

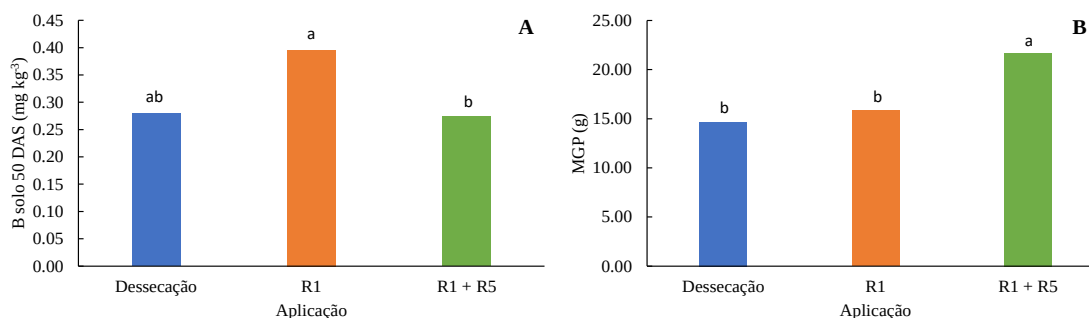


FIGURA 4 - Teor de boro no solo 50 dias após a semeadura (A) e massa de grãos por panícula (B) do sorgo em Latossolo Vermelho, safrinha 2020 na área 2. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A população de plantas aos 50 DAS (Figura 5) foi influenciada pela interação dose $\times$ aplicação. As doses de B aplicadas na dessecação, resultaram em aumento significativo da população de plantas. Efeito oposto pode ser visualizado quando foi aplicado B no vegetativo em R1. Sem a aplicação de boro, a aplicação foliar em R1 (50 DAS no sorgo) resultou em maior população de plantas. Entretanto, a dose de 1,0 L ha⁻¹ na dessecação foi mais efetiva quando associada às aplicações no vegetativo.

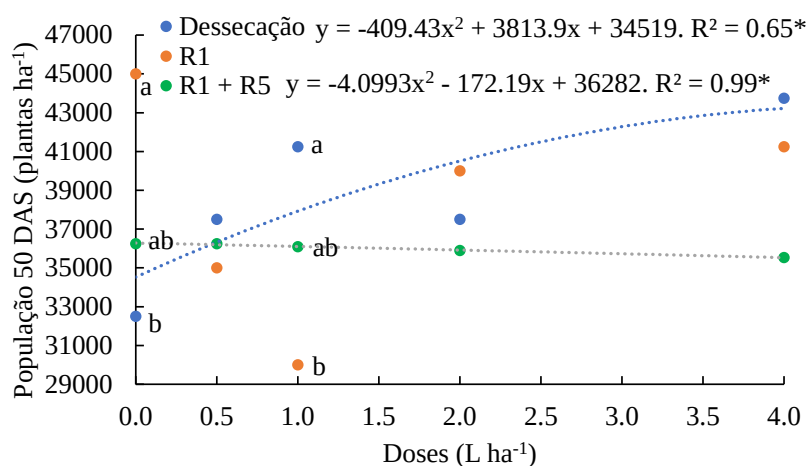


FIGURA 5 - População de plantas de sorgo, 50 dias após a semeadura em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os índices de clorofila aos 70 DAS (Figura 6) evidenciaram resposta acentuada às doses de boro, com efeitos significativos para clorofila *a*, *b*, total e relação *a/b*. O efeito das doses ocorreu com ajuste quadrático *a*, *b* e total. Verifica-se nas Figuras 6A, B e D que houve aumento até a aplicação de 2 Lha⁻¹ na dessecação, com posterior queda. O efeito entre as formas de aplicação ocorreu na mesma dose (2 Lha⁻¹). Observa-se que a aplicação na dessecação isoladamente, se destacou em relação à associação com as foliares (Figuras 6 A e B). Por outro lado, a clorofila total apresentou menor valor quando da aplicação foliar em R1+R5 na dose de 2 Lha⁻¹ (Figura 6D).

A relação entre as clorofilas apresentou efeito inverso às demais no que se refere às doses na dessecação, sendo o menor índice na dose de 2 Lha⁻¹ (Figura 6 C). Ainda na mesma figura, verifica-se que as doses na dessecação associadas à foliar em R1 apresentaram efeito de incremento linear para a característica.

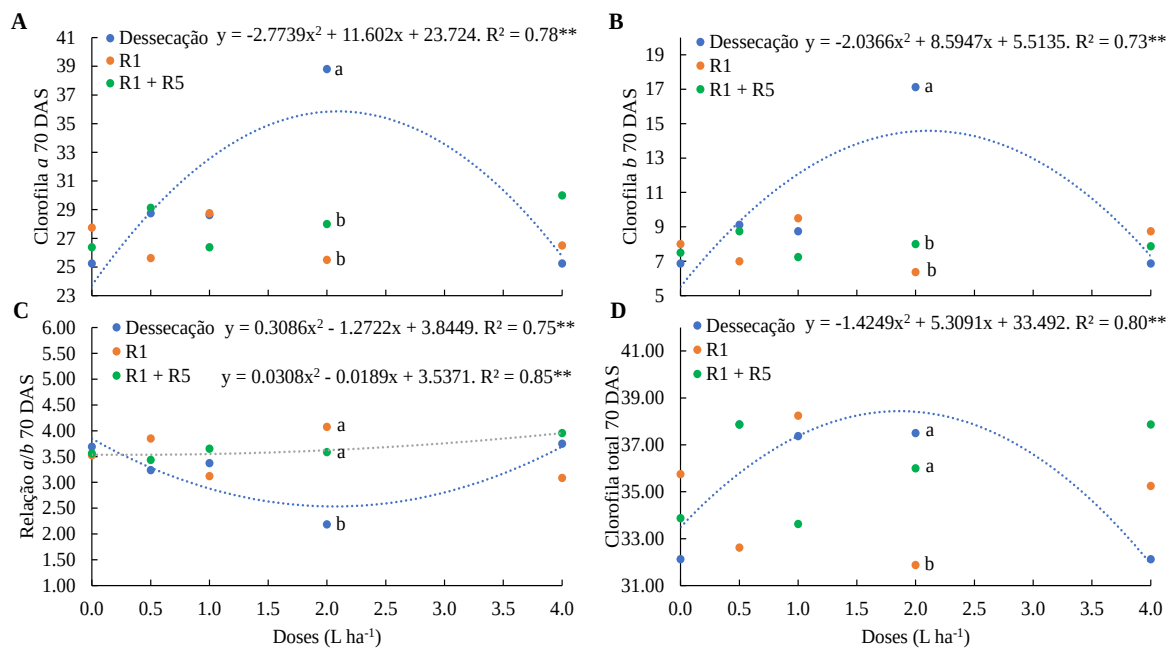


FIGURA 6 - Clorofilas *a* (A), *b* (B), total (D) e relação entre *a* e *b* (C) aos 70 dias após a semeadura em sorgo cultivado em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A produtividade de grãos apresentou interação significativa entre os fatores (Figura 7). Verifica-se resposta quadrática das doses associadas à aplicação complementar no R1. Entretanto, nota-se redução da produtividade até a dose de 2 Lha⁻¹ e posterior aumento. As formas de aplicação diferenciaram-se na dose zero, sendo a aplicação em R1 o tratamento com maior produtividade. Na dose 1 Lha⁻¹, a dessecação proporcionou maior produtividade do sorgo, e na 2 Lha⁻¹ associada a foliar em R1 resultou em menor produtividade da cultura.

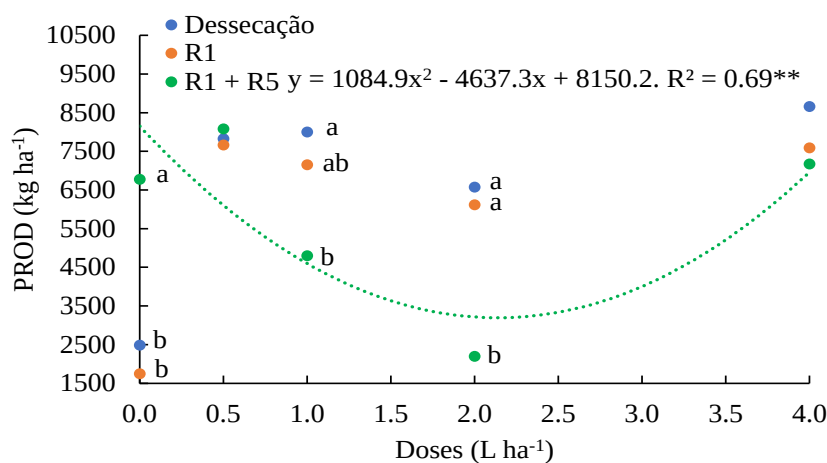


FIGURA 7 - Produtividade do sorgo cultivado em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A matéria orgânica do solo antes e após o cultivo também apresentaram variação em função dos fatores avaliados (Figura 8). Antes da implantação do sorgo, as doses ajustaram-se a modelos quadráticos, sendo decrescente na dessecação, de aumento associado ao R1 e com tendência de aumento e posterior redução no R1+R5. Nas doses 0,0 e 0,5 L ha⁻¹ o tratamento dessecação foi superior, e na dose 4,0 L ha⁻¹ o R1 obteve destaque (Figura 8A).

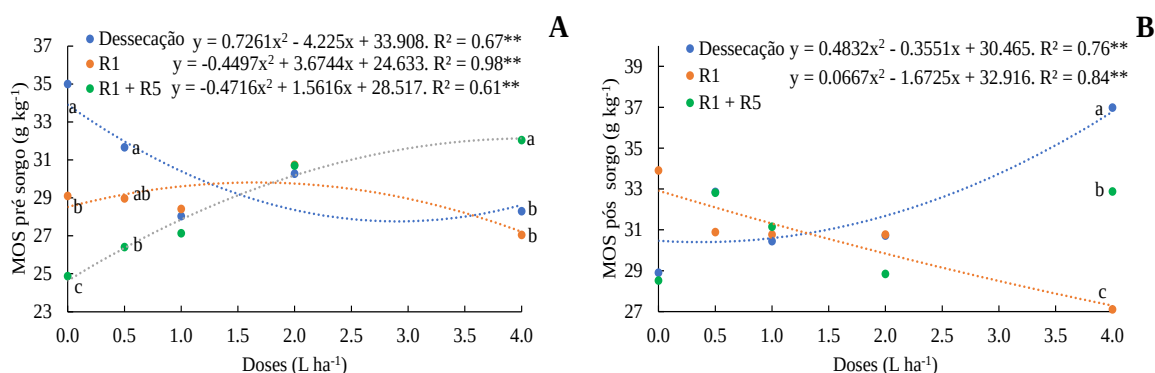


FIGURA 8 - Matéria orgânica do solo pré (A) pós cultivo de sorgo em Latossolo Vermelho com doses e épocas de aplicação de boro na área 2. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Após a colheita do sorgo as doses ajustaram-se ao modelo quadrático crescente para a dessecação e modelo linear decrescente para R1+R5. Somente a dose 4,0 L ha⁻¹ resultou diferença entre as formas de aplicação, sendo a dessecação a forma que resultou maior MOS no solo (Figura 8B).

4.3 Resultados da soja na área 1

A análise de variância (Tabela 3) demonstrou que o teor de boro no solo após a colheita do sorgo e as variáveis avaliadas até o estágio R1 não foram influenciados significativamente pelas doses de boro, pelas estratégias de aplicação ou pela interação entre esses fatores. No estágio R5, verificou-se efeito significativo das doses, das estratégias de aplicação e da interação entre os fatores sobre o teor foliar de boro. Observou-se ainda, efeito significativo das estratégias de aplicação para a altura de plantas em R5. Entre os componentes de produção, apenas o número de vagens com um grão apresentou efeito significativo das doses de boro. Para o teor de matéria orgânica do solo, após a colheita da soja, foram observados efeitos significativos das doses, das estratégias de aplicação e da interação entre os fatores. As demais variáveis avaliadas não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$).

Observou-se efeito significativo das estratégias de aplicação sobre a altura de plantas no estágio R5 (Figura 9). A aplicação de boro em R1+R5 proporcionou a maior altura de plantas, diferindo estatisticamente da aplicação realizada apenas na dessecação. A aplicação em R1 apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente dos demais tratamentos.

O número de vagens com um grão por planta foi influenciado significativamente pelas doses de boro (Figura 10), ajustando-se ao modelo de regressão quadrático. Observou-se redução no número de vagens com um grão nas menores doses aplicadas, seguida de incremento com o aumento das doses de boro, evidenciando comportamento quadrático da variável em função do manejo adotado.

O teor foliar de boro em R5 apresentou interação significativa entre as doses e as estratégias de aplicação (Figura 11A). Observou-se comportamento quadrático para a estratégia de aplicação em R1+R5, com incremento nos teores foliares de boro até as doses intermediárias, seguido de redução nas maiores doses. Nas doses de 1,0 e 2,0 L ha⁻¹, a estratégia R1+R5 proporcionou os maiores teores foliares de boro, diferindo estatisticamente das demais formas de aplicação.

TABELA 5 - Resumo da análise de variância com *p* valor e significância, para as características avaliadas na soja sob manejo da adubação com boro na área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO

Variável	Dose (p)	Sig.	Aplicação (p)	Sig.	D × A (p)	Sig.
Teor B solo pós sorgo	0.5855	ns	0.1173	ns	0.6047	ns
Teor B Foliar R ₁	0.9324	ns	0.0672	ns	0.8652	ns
Stand R ₁	0.5569	ns	0.4213	ns	0.4309	ns
Altura de plantas R ₁	0.4924	ns	0.6022	ns	0.5938	ns
Clorofila <i>a</i> R ₁	0.8201	ns	0.4448	ns	0.9660	ns
Clorofila <i>b</i> R ₁	0.9950	ns	0.4848	ns	0.7225	ns
Relação <i>a/b</i> R ₁	0.9464	ns	0.6037	ns	0.7312	ns
Clorofila total R ₁	0.9273	ns	0.4297	ns	0.9035	ns
Teor B Foliar R ₅	0.0003	**	0.0014	**	0.0140	*
Stand R ₅	0.2345	ns	0.6417	ns	0.4555	ns
Altura de plantas R ₅	0.8879	ns	0.0055	**	0.8849	ns
Clorofila <i>a</i> R ₅	0.1524	ns	0.3176	ns	0.8201	ns
Clorofila <i>b</i> R ₅	0.2745	ns	0.8077	ns	0.8971	ns
Relação <i>a/b</i>	0.5479	ns	0.5155	ns	0.7514	ns
Clorofila total R ₅	0.1155	ns	0.3201	ns	0.8404	ns
Altura de plantas final	0.8382	ns	0.7127	ns	0.9995	ns
Nº nós	0.5045	ns	0.9654	ns	0.8667	ns
Nº entrenós	0.5921	ns	0.9651	ns	0.8586	ns
Nº ramificações	0.8455	ns	0.7135	ns	0.6679	ns
Inseção 1º vagem	0.4387	ns	0.2616	ns	0.5654	ns
Vagens com 1 grão	0.0444	*	0.8056	ns	0.2622	ns
Vagens com 2 grãos	0.5566	ns	0.8170	ns	0.2719	ns
Vagens com 3 grãos	0.0541	ns	0.8993	ns	0.5773	ns
Vagens com 4 grãos	0.1506	ns	0.3939	ns	0.5212	ns
Vagens por planta	0.0552	ns	0.8231	ns	0.1728	ns
Peso mil grãos	0.8735	ns	0.3503	ns	0.6900	ns
População de plantas	0.2345	ns	0.6417	ns	0.4555	ns
Grãos por vagem	0.7566	ns	0.8887	ns	0.5359	ns
Prod soja	0.2598	ns	0.8748	ns	0.6739	ns
MOS pós soja	0.0044	**	0.0001	**	0.0000	**

* Significativo a 5%; ** Significativo a 1%.

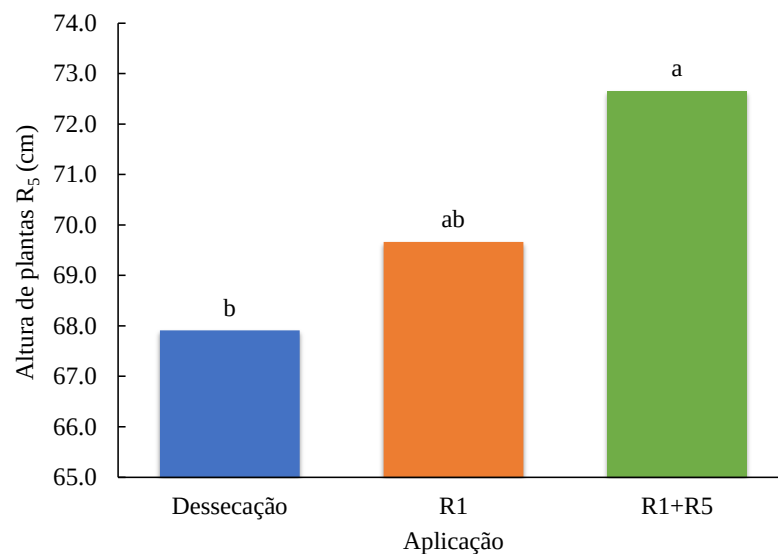


FIGURA 9 - Altura de plantas de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 1 safra 2020/2021, Rio Verde, GO. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

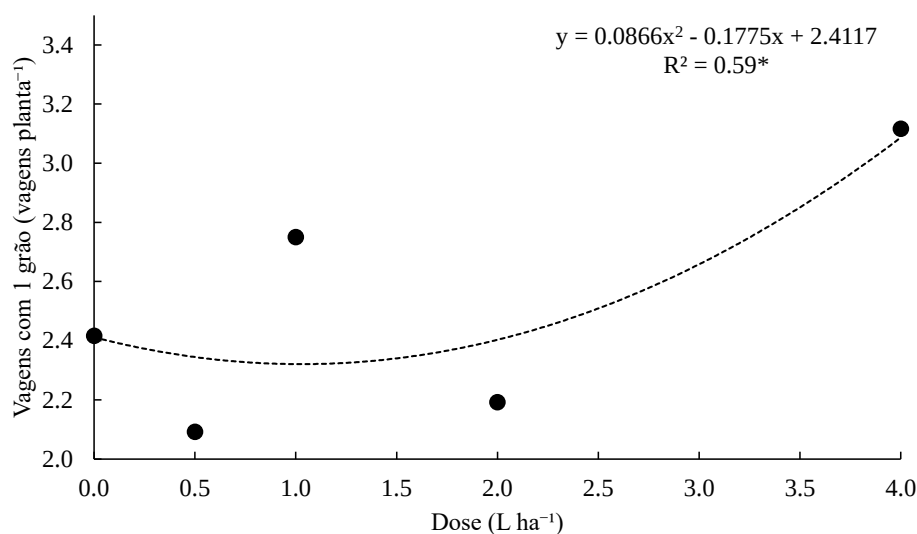


FIGURA 10 - Vagens com um grão por planta de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.

Para o teor de matéria orgânica do solo após a colheita da soja (Figura 11B), também foi observada interação significativa entre as doses e as estratégias de aplicação. A estratégia de aplicação apenas na dessecação apresentou comportamento quadrático, enquanto a aplicação em R1 apresentou ajuste linear decrescente, e a estratégia R1+R5 apresentou ajuste linear crescente em função das doses de boro.

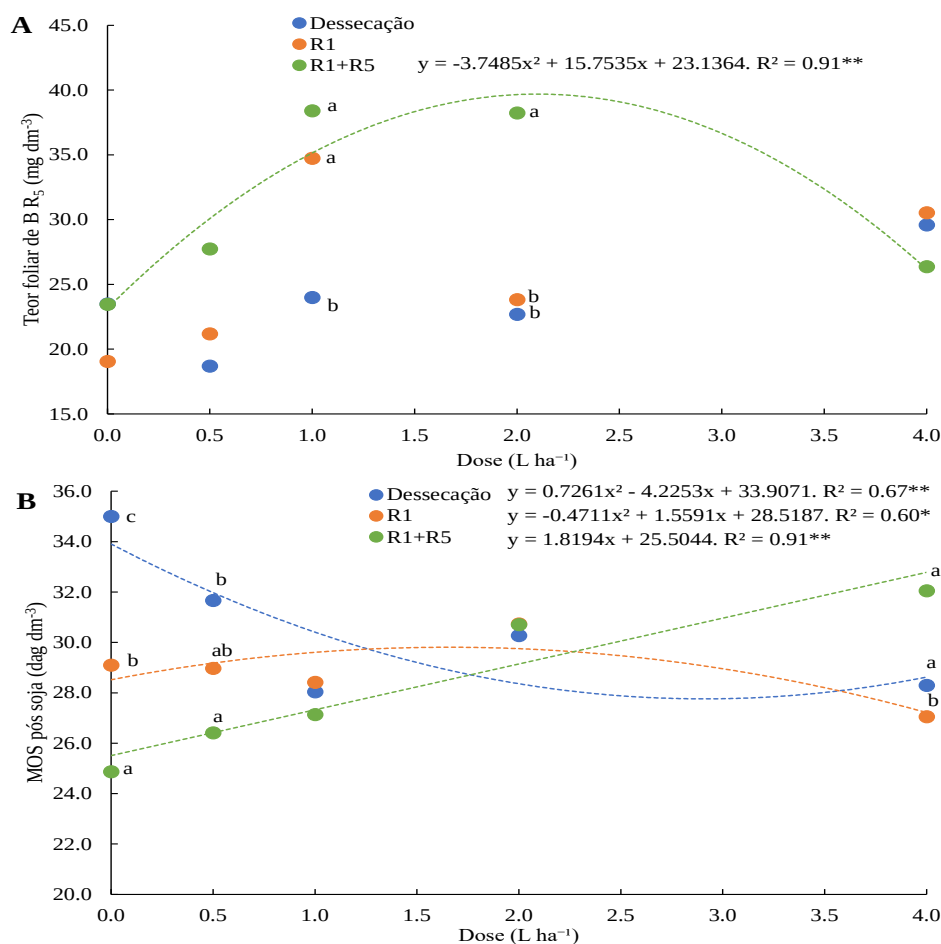


FIGURA 11 - Boro foliar (A) em plantas de soja e matéria orgânica do solo após o cultivo de soja sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 1, safra 2020/2021, Rio Verde, GO. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4.4 Resultados da soja na área 2

Na Área 2, a análise de variância (Tabela 6) demonstrou interação significativa entre doses e estratégias de aplicação para o estande de plantas em R1 ($p = 0,0075$) e para o número de vagens com dois grãos ($p = 0,0151$). O fator aplicação influenciou significativamente o teor foliar de boro em R5 ($p = 0,0014$) e o número de vagens com quatro grãos ($p = 0,0041$). O fator dose apresentou efeito significativo sobre o teor de clorofila *a* em R5 ($p = 0,0229$), a altura de inserção da primeira vagem ($p = 0,0360$), o número de vagens com dois grãos ($p = 0,0395$) e a produtividade de grãos da soja ($p = 0,0085$). As demais variáveis avaliadas não apresentaram efeito significativo das doses, das estratégias de aplicação ou da interação entre esses fatores ($p > 0,05$).

TABELA 6 - Resumo da análise de variância para as características avaliadas na soja sob manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO

Variável	Dose (D)	Sig.	Aplicação (A)	Sig.	D × A	Sig.
Teor B solo pós sorgo	0.2863	ns	0.9099	ns	0.3882	ns
Teor B Foliar R ₁	0.3776	ns	0.1321	ns	0.9621	ns
Stand R ₁	0.9055	ns	0.2404	ns	0.0075	**
Altura de plantas R ₁	0.4967	ns	0.1855	ns	0.9052	ns
Clorofila <i>a</i> R ₁	0.5892	ns	0.5066	ns	0.8223	ns
Clorofila <i>b</i> R ₁	0.6998	ns	0.8910	ns	0.9219	ns
Relação <i>a/b</i> R ₁	0.6686	ns	0.7163	ns	0.7609	ns
Clorofila total R ₁	0.6775	ns	0.6847	ns	0.9047	ns
Teor B Foliar R ₅	0.5536	ns	0.0014	**	0.0588	ns
Stand R ₅	0.2194	ns	0.8493	ns	0.8708	ns
Altura de plantas R ₅	0.6823	ns	0.3808	ns	0.7322	ns
Clorofila <i>a</i> R ₅	0.0229	*	0.8574	ns	0.3171	ns
Clorofila <i>b</i> R ₅	0.2796	ns	0.3856	ns	0.8237	ns
Relação <i>a/b</i>	0.2060	ns	0.3089	ns	0.9881	ns
Clorofila total R ₅	0.0844	ns	0.6330	ns	0.3423	ns
Altura de plantas final	0.1341	ns	0.4876	ns	0.9372	ns
Nº nós	0.3898	ns	0.2805	ns	0.5064	ns
Nº entrenós	0.3503	ns	0.2651	ns	0.5107	ns
Nº ramificações	0.4561	ns	0.2465	ns	0.8722	ns
Inseção 1º vagem	0.0360	*	0.4665	ns	0.9913	ns
Vagens com 1 grão	0.9831	ns	0.7660	ns	0.4486	ns
Vagens com 2 grãos	0.0395	*	0.8232	ns	0.0151	*
Vagens com 3 grãos	0.3823	ns	0.8050	ns	0.9162	ns
Vagens com 4 grãos	0.1892	ns	0.0041	**	0.0613	ns
Vagens por planta	0.2161	ns	0.9396	ns	0.1757	ns
Peso mil grãos	0.1871	ns	0.4414	ns	0.6015	ns
População de plantas	0.2194	ns	0.8493	ns	0.8708	ns
Grãos por vagem	0.9264	ns	0.3430	ns	0.5077	ns
Prod soja	0.0085	**	0.6815	ns	0.2038	ns
MOS pós soja	0.5311	ns	0.7915	ns	0.1939	ns

* Significativo a 5%; ** Significativo a 1%.

Observou-se efeito significativo das doses de boro sobre o teor de clorofila *a* no estágio R₅, a altura de inserção da primeira vagem e a produtividade da soja (Figura 12). A clorofila *a* não apresentou ajuste significativo aos modelos de regressão avaliados (Figura 12A). A altura de inserção da primeira vagem ajustou-se ao modelo quadrático, apresentando incremento até as doses intermediárias de boro, seguido de redução nas maiores doses (Figura 12B). Comportamento semelhante foi observado para a produtividade de grãos, que também

apresentou ajuste quadrático, com aumento da produtividade até as doses intermediárias e redução na maior dose avaliada (Figura 12C).

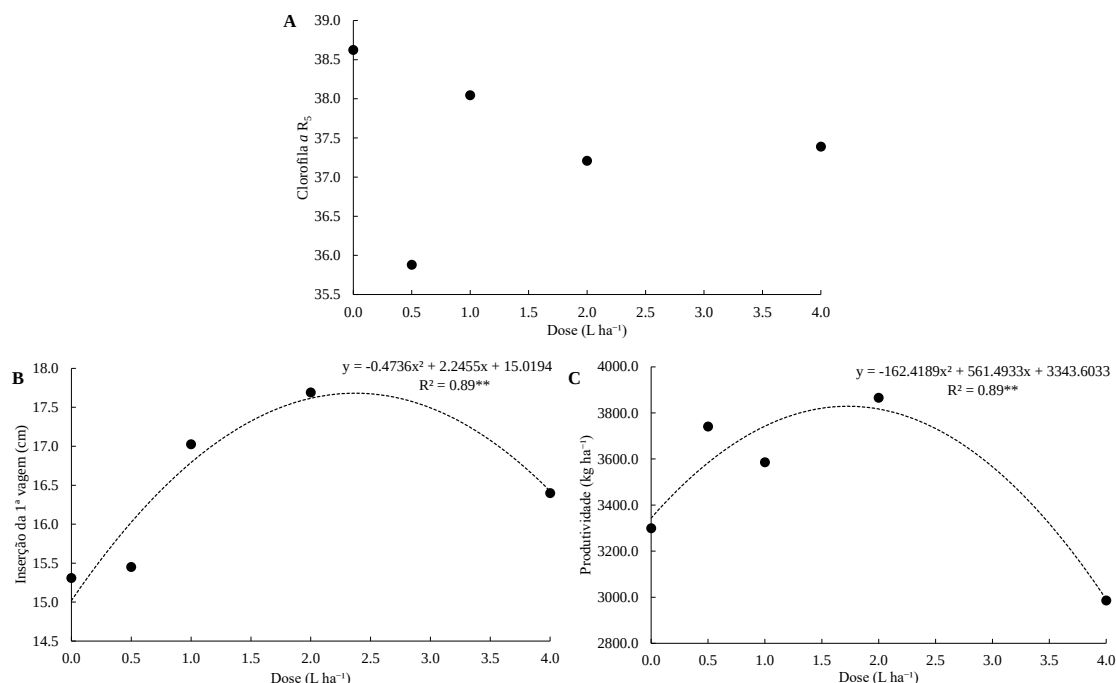


FIGURA 12 - Clorofila *a* (A), inserção da primeira vagem (B) e produtividade (C) em soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO.

As estratégias de aplicação influenciaram significativamente o teor foliar de boro no estágio R5 e o número de vagens com quatro grãos por planta (Figura 13). Para o teor foliar de boro em R5, a estratégia de aplicação em R1+R5 proporcionou os maiores valores, diferindo da aplicação realizada apenas em R1, enquanto a aplicação na dessecação apresentou comportamento intermediário (Figura 13A). Para o número de vagens com quatro grãos, as aplicações em R1 e R1+R5 promoveram valores superiores em relação à aplicação realizada apenas na dessecação, não diferindo entre si (Figura 13B).

O estande de plantas no estágio R1 e o número de vagens com dois grãos por planta apresentaram interação significativa entre as doses e as estratégias de aplicação de boro (Figura 14). Para o estande de plantas em R1 (Figura 14A), verificaram-se diferenças entre as estratégias de aplicação nas doses de 0,5 e 2,0 L ha⁻¹, com destaque para a aplicação em R1+R5, que apresentou o menor estande na dose de 0,5 L ha⁻¹ e o maior na dose de 2,0 L ha⁻¹.

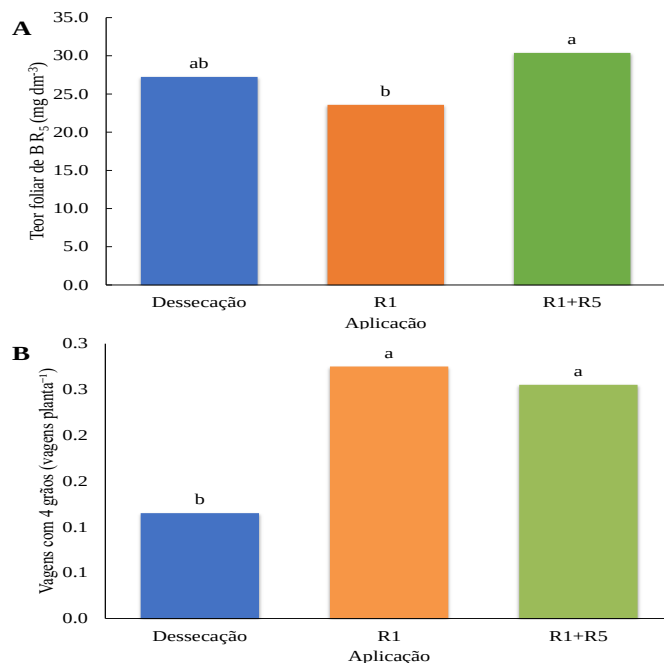


FIGURA 13 - Boro foliar (A) e vagens com quatro grãos (B) em plantas de soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para o número de vagens com dois grãos (Figura 14B), observaram-se diferenças entre as estratégias de aplicação na dose de $2,0 \text{ L ha}^{-1}$, em que a aplicação em R1+R5 proporcionou maior número de vagens com dois grãos por planta em relação às demais estratégias. Nas demais doses, não foram observadas diferenças significativas entre as formas de aplicação.

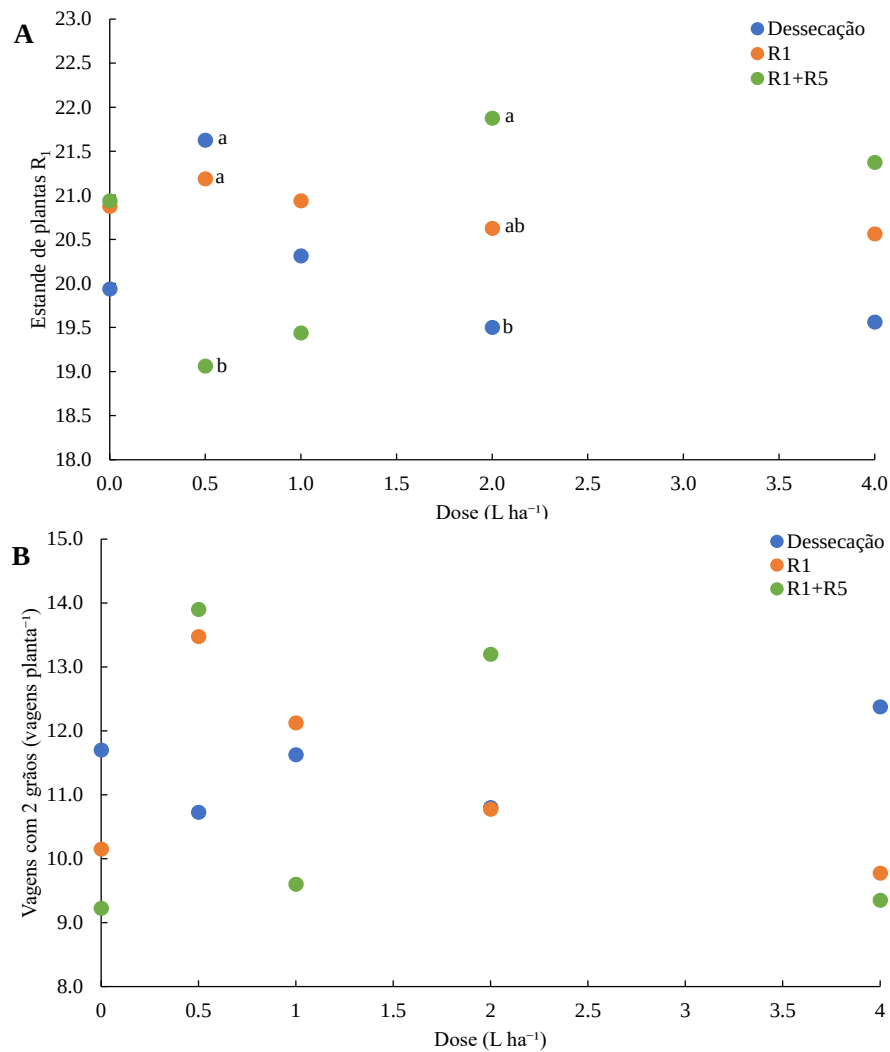


FIGURA 14 - Estande de plantas (A) e vagens com dois grãos (B) em soja cultivada sob efeito residual do manejo da adubação com boro na área 2, safra 2020/2021, Rio Verde, GO. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre as formas de aplicação do micronutriente na mesma dose pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5 DISCUSSÃO

5.1 Discussão dos resultados do sorgo na área 1

Na Área 1, o manejo da adubação boratada apresentou efeito restrito sobre as variáveis avaliadas. Houve efeito significativo das estratégias de aplicação sobre o teor de B no solo aos 50 DAS e o teor foliar de B aos 70 DAS, enquanto a interação entre dose e aplicação foi significativa para a relação clorofila *a/b* aos 70 DAS e para a matéria orgânica do solo após o cultivo (Tabela 3). As demais variáveis não foram influenciadas pelos tratamentos, indicando que as alterações na disponibilidade e no estado nutricional de B não se refletiram de forma

generalizada sobre o crescimento e os parâmetros fisiológicos do sorgo. Essa resposta seletiva é compatível com a complexidade da nutrição boratada, cuja eficiência depende da disponibilidade do nutriente e de sua absorção e transporte na planta, além da estreita faixa entre deficiência e toxicidade (BOLAÑOS et al., 2023; ZHOU et al., 2025).

As estratégias de aplicação alteraram a distribuição do B entre o solo e a planta (Figura 2). Aos 50 DAS, a aplicação em R1 proporcionou maior teor de B no solo em relação às demais estratégias (Figura 2A), enquanto, aos 70 DAS, o maior teor foliar foi observado com aplicações em R1 + R5 (Figura 2B). A diferença entre as respostas do solo e do tecido vegetal evidencia que a concentração de B no solo não necessariamente acompanha seu acúmulo foliar, uma vez que sua disponibilidade e absorção são condicionadas por processos de retenção no solo, absorção radicular e transporte na planta (ZHAO et al., 2024).

Em sorgo, Javed et al. (2021) também observaram que a fertilização boratada modificou as frações de B no solo e seu acúmulo na planta, evidenciando a relação entre disponibilidade edáfica e absorção do micronutriente.

A interação entre dose e estratégia de aplicação influenciou a relação entre clorofila *a* e *b* aos 70 DAS (Figura 3A). Na estratégia R1 + R5, observou-se resposta quadrática às doses de B, enquanto, na dose de 4,0 L ha⁻¹, essa estratégia apresentou maior relação *a/b* em comparação a R1. Entretanto, como os teores individuais de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total não foram significativamente alterados (Tabela 3), a variação da relação *a/b* deve ser interpretada com cautela, não constituindo, isoladamente, evidência de aumento da capacidade fotossintética.

A matéria orgânica do solo também apresentou interação entre dose e estratégia de aplicação (Figura 3B), com resposta quadrática para R1. Apesar da significância estatística, não é possível atribuir diretamente essa variação ao fornecimento de B, uma vez que alterações na matéria orgânica dependem do balanço entre aporte de resíduos, decomposição e estabilização do carbono no solo. Além disso, a matéria orgânica constitui importante compartimento de retenção de B e pode modificar sua disponibilidade e eficiência no sistema solo-planta (SARKIS et al., 2024).

5.2 Discussão dos resultados do sorgo na área 2

Na Área 2, o manejo da adubação boratada promoveu respostas mais abrangentes em comparação à Área 1, com interação entre dose e estratégia de aplicação para população de plantas aos 50 DAS, pigmentos fotossintéticos aos 70 DAS, produtividade e matéria orgânica

do solo após o cultivo (Tabela 4). O teor de B no solo aos 50 DAS e a massa de grãos por panícula também foram influenciados pelas estratégias de aplicação.

Em contrapartida, o teor foliar de B e a altura de plantas não responderam aos tratamentos, evidenciando que as respostas ao manejo não ocorreram uniformemente entre as variáveis avaliadas. A ocorrência de interações indica que, para os atributos responsivos, o efeito das doses de B dependeu da estratégia de aplicação, devendo esses fatores ser interpretados conjuntamente nas respectivas figuras.

As estratégias de aplicação influenciaram o teor de B no solo e a massa de grãos por panícula (Figura 4). Aos 50 DAS, a aplicação em R1 apresentou maior teor de B no solo em relação a R1 + R5, enquanto a aplicação na dessecação apresentou comportamento intermediário (Figura 4A). Entretanto, o maior teor de B no solo não correspondeu à maior massa de grãos por panícula, que foi obtida com aplicações em R1 + R5 (Figura 4B).

Esse comportamento indica que a concentração do micronutriente no solo, isoladamente, não foi suficiente para explicar a resposta do componente de rendimento, sendo relevante considerar a época de disponibilização do B em relação à demanda da cultura.

A maior massa de grãos por panícula com R1 + R5 sugere benefício do fornecimento de B em períodos relacionados ao desenvolvimento reprodutivo. O micronutriente desempenha papel relevante na formação das estruturas reprodutivas, incluindo germinação do pólen e crescimento do tubo polínico, processos diretamente relacionados à fecundação e formação de sementes (ZHOU et al., 2025). Em sorgo, respostas semelhantes foram observadas por Das et al. (2022), que verificaram aumento de componentes de rendimento com o fornecimento de B associado a aplicações foliares na iniciação da panícula e no florescimento.

Da mesma forma, Shivasimpiger et al. (2023) observaram maior rendimento do sorgo com a combinação do fornecimento de B via solo e aplicações foliares em estádios reprodutivos.

A população de plantas aos 50 DAS foi influenciada pela interação entre doses e estratégias de aplicação de B (Figura 5), com respostas quadráticas para a dessecação R1 + R5. Entretanto, não se observou um padrão consistente de aumento da população com o incremento das doses, indicando que o B não exerceu efeito uniforme sobre o estabelecimento do estande. Embora o micronutriente seja essencial à divisão e expansão celular e à integridade estrutural dos tecidos vegetais, sua atuação está predominantemente relacionada ao crescimento de tecidos meristemáticos e ao desenvolvimento reprodutivo (MATTHES et al., 2020; ZHOU et al., 2025). Assim, as oscilações observadas na população devem ser interpretadas com cautela e em conjunto com os demais componentes agrônômicos da cultura.

As doses e estratégias de aplicação de B alteraram os teores de clorofila *a*, *b*, total e a relação *a/b* aos 70 DAS (Figura 6). Na aplicação realizada na dessecação, as clorofilas *a*, *b* e total apresentaram respostas quadráticas, com maiores valores estimados em doses intermediárias, e redução nas doses superiores (Figura 6A, B e D). Esse comportamento sugere que a resposta dos pigmentos ao B não foi linear, evidenciando uma faixa de maior resposta fisiológica e reforçando a necessidade de equilíbrio no fornecimento desse micronutriente.

A deficiência de B pode comprometer o conteúdo de clorofila e processos associados ao aparato fotossintético, enquanto concentrações excessivas também podem provocar alterações metabólicas e redução do desempenho fisiológico das plantas (VERA MALDONADO et al., 2024; YANG et al., 2024).

A relação clorofila *a/b* apresentou resposta distinta das concentrações individuais dos pigmentos (Figura 6C), indicando alteração na proporção relativa entre as clorofilas em função do manejo do B. Como essa relação está associada à organização e à composição do aparato coletor de luz, sua variação pode refletir ajustes na composição dos pigmentos; entretanto, não permite, isoladamente, inferir aumento da eficiência fotossintética.

Assim, os resultados da Figura 6 demonstram efeito do manejo boratado sobre o perfil de pigmentos do sorgo, mas sua associação direta com a assimilação de CO₂ exigiria avaliações específicas de trocas gasosas ou fluorescência da clorofila.

A produtividade do sorgo foi influenciada pela interação entre doses e estratégias de aplicação de B (Figura 7), demonstrando que a resposta produtiva dependeu da combinação entre esses fatores. Para R1 + R5, observou-se resposta quadrática, com redução da produtividade até aproximadamente 2,14 L ha⁻¹, e posterior incremento, enquanto diferenças entre estratégias ocorreram nas doses de 0, 1,0 e 2,0 L ha⁻¹. Esses resultados, associados às respostas observadas para massa de grãos por panícula (Figura 4B) e pigmentos fotossintéticos (Figura 6), evidenciam que os efeitos do manejo boratado ocorreram em diferentes componentes fisiológicos e produtivos, embora não seja possível estabelecer relação causal direta entre essas variáveis.

A resposta não linear é compatível com a estreita faixa entre deficiência, suficiência e excesso de B e com a influência das condições edáficas sobre sua disponibilidade (VERA-MALDONADO et al., 2024). Em sorgo, Javed et al. (2021) também observaram resposta produtiva dependente da dose de B, enquanto Esubalew e Sebnie (2024) demonstraram que os benefícios da adubação variam conforme as condições de cultivo. Dessa forma, os resultados indicam que o manejo do B deve considerar conjuntamente dose e época de aplicação, não sendo possível estabelecer incremento produtivo proporcional ao aumento da dose.

A matéria orgânica do solo apresentou diferenças entre os tratamentos tanto antes quanto após o cultivo do sorgo (Figura 8). A interação significativa observada na condição pré-cultivo (Figura 8A) evidencia heterogeneidade inicial desse atributo entre as unidades experimentais, o que limita a atribuição das diferenças observadas após o cultivo exclusivamente ao manejo da adubação boratada. Embora tenham sido observadas respostas às doses após o sorgo (Figura 8B), essas variações devem ser interpretadas considerando a condição inicial do solo.

Além disso, alterações consistentes na matéria orgânica resultam do balanço entre entrada de resíduos vegetais, decomposição, transformação microbiana e estabilização do carbono, processos cuja magnitude é fortemente dependente do tempo e do manejo do sistema (LAL, 2020; LEHMANN; KLEBER, 2015). No contexto da adubação boratada, a relação mais bem estabelecida ocorre no sentido inverso: a matéria orgânica pode influenciar a retenção, disponibilidade e eficiência agrônômica do B no solo (SARKIS et al., 2024).

Portanto, os resultados não permitem estabelecer relação causal direta entre as doses de B e as alterações de matéria orgânica observadas após um único ciclo de cultivo.

5.3 Discussão dos resultados da soja na área 1

Na Área 1, o efeito residual do manejo da adubação boratada foi observado em um conjunto restrito de variáveis da soja (Tabela 4). Houve interação entre dose e estratégia de aplicação para o teor foliar de B em R5 e para a matéria orgânica do solo após o cultivo, enquanto a altura de plantas em R5 foi influenciada pela estratégia de aplicação e o número de vagens com um grão respondeu às doses residuais de B. As demais características agrônômicas e fisiológicas, incluindo os principais componentes de rendimento e a produtividade de grãos, não foram significativamente alteradas pelos tratamentos. Esses resultados indicam que os efeitos residuais do manejo anterior foram detectáveis em atributos específicos, mas não se refletiram de forma generalizada no desempenho agrônômico da soja.

A altura das plantas em R5 foi influenciada pelo efeito residual das estratégias de aplicação de B, sendo maior no tratamento correspondente a R1 + R5 em relação à aplicação realizada na dessecação, enquanto R1 apresentou comportamento intermediário (Figura 9).

O resultado sugere que a distribuição temporal do B no ciclo anterior pode ter repercutido sobre o crescimento vegetativo da soja subsequente. O B participa da estruturação da parede celular, da manutenção da integridade das membranas e do desenvolvimento de tecidos meristemáticos, processos relacionados à expansão e ao crescimento vegetal (VERA-MALDONADO et al., 2024). Entretanto, como a altura final das plantas não diferiu entre os

tratamentos (Tabela 4), o efeito observado em R5 foi transitório e não se manteve até o final do ciclo.

O número de vagens com um grão por planta apresentou resposta quadrática às doses residuais de B, com redução até aproximadamente $1,02 \text{ L ha}^{-1}$, e posterior incremento nas maiores doses (Figura 10). Embora o B desempenhe papel relevante no desenvolvimento reprodutivo, particularmente na germinação do pólen, crescimento do tubo polínico e formação das estruturas reprodutivas, sua influência sobre os componentes de rendimento depende da disponibilidade do micronutriente e das condições de cultivo (VERA-MALDONADO et al., 2024). Entretanto, como o número total de vagens por planta, o número de grãos por vagem, o peso de mil grãos e a produtividade não foram alterados pelos tratamentos (Tabela 4), a resposta observada para vagens com um grão deve ser interpretada como uma alteração específica desse componente, sem evidência de repercussão sobre o rendimento final da cultura.

O teor foliar de B em R5 foi influenciado pela interação entre as doses residuais e as estratégias de aplicação realizadas no ciclo anterior (Figura 11A). Para R1 + R5, observou-se resposta quadrática, com máximo estimado próximo de $2,10 \text{ L ha}^{-1}$, enquanto diferenças entre estratégias foram observadas em doses específicas. Esse resultado demonstra que o manejo prévio do micronutriente ainda repercutiu sobre o estado nutricional da soja em estágio reprodutivo, mesmo sem nova aplicação de B nesse ciclo. A persistência desse efeito pode estar relacionada à retenção e posterior disponibilização do B no solo, processos influenciados por atributos como matéria orgânica, textura, pH e condições de umidade (SARKIS et al., 2024).

Entretanto, essa alteração no teor foliar não se refletiu em aumento de produtividade, que não diferiu entre os tratamentos (Tabela 4), indicando que maior acúmulo foliar de B não implicou, nas condições deste estudo, resposta produtiva da soja.

A matéria orgânica do solo após o cultivo também apresentou respostas distintas em função dos tratamentos residuais (Figura 11B). Entretanto, essas variações devem ser interpretadas com cautela, uma vez que alterações da matéria orgânica resultam da interação entre aporte de resíduos, decomposição e estabilização do carbono e, em geral, refletem processos de maior duração do que um único ciclo de cultivo (LAL, 2020).

Além disso, a relação entre matéria orgânica e B é particularmente relevante no sentido de a matéria orgânica atuar na retenção e disponibilidade do micronutriente no solo, podendo modificar sua eficiência agrônômica (SARKIS et al., 2024). Dessa forma, os resultados não permitem atribuir diretamente as variações da matéria orgânica ao efeito residual das doses de B.

5.4 Discussão dos resultados da soja na área 2

Na Área 2, o efeito residual do manejo da adubação boratada foi observado em atributos vegetativos, fisiológicos e reprodutivos da soja (Tabela 5). Houve interação entre dose e estratégia de aplicação para o estande em R1 e para o número de vagens com dois grãos, enquanto o teor foliar de B em R5 e o número de vagens com quatro grãos foram influenciados pela estratégia de aplicação. As doses residuais também afetaram a clorofila *a* em R5, a altura de inserção da primeira vagem e a produtividade de grãos. Em contrapartida, características como peso de mil grãos, número total de vagens por planta, grãos por vagem e população final não foram alteradas pelos tratamentos.

O efeito residual das doses de B promoveu respostas distintas sobre atributos fisiológicos e agrônômicos da soja na Área 2 (Figura 12). A clorofila *a* em R5 foi influenciada pelas doses residuais, porém sem ajuste de regressão que caracterizasse uma tendência definida de resposta (Figura 12A). A altura de inserção da primeira vagem apresentou comportamento quadrático, com máximo estimado próximo de 2,35 L ha⁻¹ (Figura 12B).

Alterações em características morfológicas da soja em resposta ao fornecimento de B também foram observadas por Libório et al. (2024), que relataram influência da adubação boratada sobre atributos como altura de plantas, inserção de vagens e ramificação em condições de Cerrado.

A produtividade apresentou resposta quadrática às doses residuais de B, com máximo estimado em aproximadamente 1,55 L ha⁻¹, seguido de redução nas maiores doses (Figura 12C). Esse comportamento evidencia a persistência do efeito do manejo realizado nos cultivos anteriores e demonstra que a resposta produtiva ao B não foi proporcional ao aumento da dose. Saldanha (2024), em Latossolo de textura argilosa, também verificou resposta da produtividade da soja às doses de B, com maior rendimento em dose intermediária, enquanto Libório et al. (2024) observaram que a magnitude da resposta produtiva ao B variou entre genótipos e safras. Dessa forma, os resultados da Área 2 indicam que o efeito residual do B permaneceu agronomicamente relevante para a soja, porém dependente da dose, reforçando a necessidade de adequação do manejo às condições do sistema de cultivo.

O efeito residual das estratégias de aplicação influenciou o teor foliar de B em R5 e o número de vagens com quatro grãos (Figura 13). O manejo correspondente a R1 + R5 proporcionou maior teor foliar de B em relação a R1, enquanto a dessecação apresentou comportamento intermediário (Figura 13A), evidenciando que a época de aplicação utilizada no ciclo anterior repercutiu sobre o estado nutricional da soja subsequente. A disponibilidade

residual de B pode ser condicionada por sua retenção no solo e posterior disponibilização às plantas, processos influenciados pelas características do solo e pelo histórico de manejo (SARKIS et al., 2024).

Para vagens com quatro grãos, os manejos correspondentes a R1 e R1 + R5 apresentaram valores superiores à dessecação (Figura 13B). O B exerce funções importantes durante o desenvolvimento reprodutivo, particularmente na germinação do pólen, crescimento do tubo polínico e fecundação, podendo influenciar a formação e o estabelecimento das estruturas reprodutivas (VERA-MALDONADO et al., 2024). Entretanto, como o número total de vagens por planta e o número médio de grãos por vagem não foram alterados (Tabela 5), o aumento dessa categoria específica de vagens deve ser interpretado como uma modificação na composição dos componentes de rendimento, e não isoladamente como aumento do potencial produtivo.

Houve interação entre dose e estratégia de aplicação para o estande de plantas em R1 e o número de vagens com dois grãos (Tabela 5; Figura 14). Para o estande, as diferenças entre as estratégias ocorreram principalmente nas doses de 0,5 e 2,0 L ha⁻¹. Na dose de 0,5 L ha⁻¹, a dessecação apresentou maior estande que R1 + R5, enquanto R1 apresentou comportamento intermediário; na dose de 2,0 L ha⁻¹, R1 + R5 apresentou maior estande que a dessecação, permanecendo R1 em posição intermediária (Figura 14A). Nas demais doses, não foram observadas diferenças entre as estratégias de aplicação.

Para o número de vagens com dois grãos, embora a interação dose × aplicação tenha sido significativa (Tabela 5), a Figura 14B não apresenta letras de comparação nem modelos de regressão ajustados que permitam identificar estatisticamente quais combinações de dose e estratégia diferiram entre si. Assim, a significância da interação demonstra que a resposta às doses dependeu da estratégia de aplicação, mas a interpretação das diferenças específicas entre os tratamentos requer o respectivo desdobramento estatístico.

6 CONCLUSÃO

O manejo da adubação boratada apresentou respostas distintas entre as áreas e culturas avaliadas. No sorgo, os efeitos foram mais evidentes na Área 2, destacando-se a aplicação de 1,0 L ha⁻¹ na dessecação pelo desempenho produtivo, enquanto aplicações complementares em R1 e R5, embora tenham influenciado componentes como a massa de grãos por panícula, não proporcionaram incremento consistente na produtividade.

Na soja cultivada em sucessão, sem reaplicação do micronutriente, verificou-se efeito residual do boro, porém com magnitude distinta entre as áreas. Na Área 1, as alterações observadas não resultaram em aumento de produtividade, enquanto, na Área 2, a produtividade apresentou resposta quadrática, com máximo estimado em aproximadamente 1,55 L ha⁻¹, evidenciando que doses mais elevadas não proporcionaram ganhos produtivos adicionais.

Assim, nas condições deste estudo, doses intermediárias de boro mostraram-se mais adequadas ao sistema soja/sorgo, com destaque para 1,0 L ha⁻¹ aplicado na dessecação para o sorgo. Para a soja em sucessão, o efeito residual deve ser considerado antes de uma nova aplicação, não havendo evidências que sustentem o uso sistemático das maiores doses ou a intensificação das aplicações foliares. Dessa forma, o manejo do boro deve considerar a análise de solo e o histórico de adubação da área, buscando maior eficiência no uso do micronutriente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645–736.
- ALVES, M. S. S.; NASCIMENTO, N. M.; PEREIRA, L. A. F. M.; BARBOSA, T. A.; COSTA, C. H. M.; GUIMARÃES, T. M.; BEZERRA, A. C. T. P.; MACHADO, D. L. Long-term effect of crop succession systems on soil chemical and physical attributes and soybean yield. *Plants*, v. 13, n. 16, art. 2217, 2024. DOI: 10.3390/plants13162217.
- AMARAL, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C. Métodos químicos para extração de boro no solo. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA. Londrina: Embrapa Soja, 2012.
- BADIGANNAVAR, A. et al. Physiological, genetic and molecular basis of drought resilience in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Indian Journal of Plant Physiology*, v. 23, n. 4, p. 670–688, 2018.
- BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. Boron in plant structure and function. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 49, p. 481–500, 1998. DOI: 10.1146/annurev.arplant.49.1.481.
- BOARD, J. E.; KAHN, C. S. Soybean yield formation: what controls it and how it can be improved. In: EL-SHEMY, H. A. (ed.). *Soybean physiology and biochemistry*. Rijeka: InTech, 2011. p. 1–36. DOI: 10.5772/17599.
- BOLAÑOS, L.; ABREU, I.; BONILLA, I.; CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; REGUERA, M. What can boron deficiency symptoms tell us about its function and regulation? *Plants*, v. 12, n. 4, art. 777, 2023. DOI: 10.3390/plants12040777.

BOLAÑOS, L.; LUKASZEWSKI, K.; BONILLA, I.; BLEVINS, D. Why boron? *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 42, n. 11, p. 907–912, 2004. DOI: 10.1016/j.plaphy.2004.11.002.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. *Melhoramento de plantas*. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013.

BROWN, P. H.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M. A.; BASSIL, E. S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DANNEL, F.; RÖMHELD, V. Boron in plant biology. *Plant Biology*, v. 4, n. 2, p. 205–223, 2002.

BROWN, P. H.; CAKMAK, I. Boron. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of plants*. 4. ed. London: Academic Press, 2023. p. 403–430.

BROWN, P. H.; SHELPS, B. J. Boron mobility in plants. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1–2, p. 85–101, 1997. DOI: 10.1023/A:1004211925160.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron deficiency affects root development and cell wall structure in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 97, p. 272–280, 2015.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; REXACH, J.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron in plants: deficiency and toxicity. *Journal of Integrative Plant Biology*, v. 50, n. 10, p. 1247–1255, 2008.

CAMPO, R. J.; LANTMANN, A. F. Effects of micronutrients on biological nitrogen fixation and soyabean productivity. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 8, p. 1245–1253, 1998.

CAVALCANTE, T. J. et al. Marcha de absorção de macronutrientes e micronutrientes em sorgo biomassa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 1, p. 1–9, 2018.

COELHO, A. M. *Situação atual e perspectivas para o sorgo granífero cultivado na segunda safra no Brasil: adaptação e resiliência de sistemas de produção*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2025. 29 p.

COMMUNAR, G.; KEREN, R. Rate-limited boron transport in soils: the effect of soil texture and organic matter. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (ed.). *Boro na agricultura brasileira*. Piracicaba: POTAFOS, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. *Produção de grãos na safra 2025/26 deve atingir 358,6 milhões de toneladas, aponta estimativa da Conab*. Brasília, DF: Conab, 2026.

DAS, P. P.; VADIVEL, N.; KARTHIKEYAN, R.; SENTHIL, A. Influence of boron nutrition on growth and yield attributes of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *The Pharma Innovation Journal*, v. 11, n. 7, p. 2361–2363, 2022. DOI: 10.22271/tpi.2022.v11.i7ad.14264.

DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1–2, p. 103–120, 1997. DOI: 10.1023/A:1004264009230.

- ESUBALEW, T.; SEBNIE, W. Potassium, zinc, and boron nutrients effect on sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) yield in Wag-Lasta, Northern Ethiopia. *International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources*, v. 5, n. 2, p. 111–117, 2024. DOI: 10.46676/ij-fanres. v5i2.323.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1–2, p. 35–48, 1997. DOI: 10.1023/A:1004203723343.
- JAVED, M. B.; MALIK, Z.; KAMRAN, M.; ABBASI, G. H.; MAJEED, A.; RIAZ, M.; BUKHARI, M. A.; MUSTAFA, A.; AHMAR, S.; BUKHARI, S. A. H. Assessing yield response and relationship of soil boron fractions with its accumulation in sorghum and cowpea under boron fertilization in different soil series. *Sustainability*, v. 13, n. 8, art. 4192, 2021. DOI: 10.3390/su13084192.
- LAL, R. Soil organic matter and sustainable agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 75, n. 5, p. 123A–127A, 2020.
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, v. 528, p. 60–68, 2015. DOI: 10.1038/nature16069.
- LI, H.; WAN, L.; LI, C.; WANG, L.; ZHU, S.; CHEN, X.; WANG, P. Hyperspectral imaging technology for phenotyping iron and boron deficiency in *Brassica napus* under greenhouse conditions. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, art. 1351301, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1351301.
- LIBÓRIO, I. F.; CAMPOS, C. N. S.; SANTANA, D. C.; OLIVEIRA, I. C.; OLIVEIRA, J. L. G.; TEODORO, L. P. R.; BAIO, F. H. R.; THEODORO, G. F.; TEODORO, P. E. Boron fertilization improves the agronomic performance of soybean genotypes in the Brazilian Cerrado. *Agriculture*, v. 14, n. 1, art. 27, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14010027.
- LIU, J. et al. Association between reactive oxygen species, transcription factors, and candidate genes in drought-resistant sorghum. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 12, art. 6464, 2024.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. *Informações Agronômicas*, n. 155, p. 1–14, 2016.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Ceres, 2006.
- MARSCHNER, P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of plants*. 4. ed. London: Academic Press, 2023.
- MATTHES, M. S. et al. Defects in meristem maintenance, cell division, and cytokinin signaling are early responses in the boron deficient maize mutant tassel-less1. *Physiologia Plantarum*, v. 174, n. 2, 2022.

- MATTHES, M. S.; ROBIL, J. M.; TRAN, T.; KIMBLE, A. R.; McSTEEN, P. Boron nutrition and the role of the maize boron efflux transporter ROTTEN EAR in maize development. *Plant Signaling & Behavior*, v. 15, n. 8, 2020. DOI: 10.1080/15592324.2020.1788302.
- MIWA, K.; FUJIWARA, T. Boron transport in plants: coordinated regulation of transporters. *Annals of Botany*, v. 105, n. 7, p. 1103–1108, 2010. DOI: 10.1093/aob/mcq044.
- MOREIRA, A.; CASTRO, C. *Extratores ácidos e sais na determinação da disponibilidade de boro no solo*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2006. 5 p. (Comunicado Técnico, 36).
- NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Produtividade da soja, do trigo e do girassol em resposta à aplicação de boro: resultados sumarizados. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA, 2018. *Resumos expandidos...* Londrina: Embrapa Soja, 2018. p. 729–731.
- OLIVEIRA, F. A. et al. *Soil fertility management technologies and nutritional status assessment of soybeans*. Londrina: Embrapa Soja, 2024. (Documentos, 470).
- OLIVEIRA, R. F.; SINGH, R.; CRUZ, E. S. *Disponibilidade de boro em solos do trópico úmido brasileiro*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 21 p. (Boletim de Pesquisa, 11).
- O'NEILL, M. A.; ISHII, T.; ALBERSHEIM, P.; DARVILL, A. G. Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. *Annual Review of Plant Biology*, v. 55, p. 109–139, 2004. DOI: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141750.
- PEREIRA, G. L.; SIQUEIRA, J. A.; BATISTA-SILVA, W.; CARDOSO, F. B.; NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W. L. Boron: more than an essential element for land plants? *Frontiers in Plant Science*, v. 11, art. 610307, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2020.610307.
- RESENDE, A. V. de; COELHO, A. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. C. dos. *Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 8 p. (Circular Técnica, 119).
- RIAZ, M. et al. Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, art. 1425825, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1425825.
- ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 10, p. 1473–1478, 2007.
- SALDANHA, E. C. M. Fertilização boratada aumenta produtividade da soja em solo argiloso. *Agropecuária Catarinense*, v. 37, n. 1, p. 14–18, 2024. DOI: 10.52945/rac.v37i1.1798.
- SANTOS, F. C.; RESENDE, A. V.; COELHO, A. M. Exigências nutricionais e adubação. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). *Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília, DF: Embrapa, 2015. cap. 6, p. 81–97.
- SARKIS, L. F.; RABÊLO, F. H. S.; HIPPLER, F. W. R.; GUELFÍ, D. Soil organic matter influences the agronomic efficiency of boron fertilizers in sandy Oxisol cultivated with soybean. *Scientia Agricola*, v. 81, e20230231, 2024. DOI: 10.1590/1678-992X-2023-0231.

SFREDO, G. J.; CARRÃO-PANIZZI, M. C. *Importância da adubação e da nutrição na qualidade da soja*. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1990. 57 p. (Documentos, 40).

SHIVASIMPIGER, S. S.; BANDIWADDAR, T. T.; HUNDEKAR, S. T.; KUBSAD, V. S. Effect of boron nutrition on growth, yield and economics of rabi sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under rainfed condition in northern transition zone of Karnataka. *The Pharma Innovation Journal*, v. 12, n. 2, 2023.

SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1–2, p. 121–148, 1997. DOI: 10.1023/A:1004216126069.

SODRÉ FILHO, J.; CARMONA, R.; MARCHÃO, R. L.; CARVALHO, A. M. Weed infestations in soybean grown in succession to cropping systems with sorghum and cover plants. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 55, 2020. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.26836.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Plant physiology and development*. 8. ed. New York: Oxford University Press, 2025.

TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; WASSOLOWSKI, C. R. et al. Prescient diagnostic analysis for boron nutritional status in soy crops. *Scientific Reports*, v. 13, art. 2281, 2023. DOI: 10.1038/s41598-022-26263-2.

URANO, E. O. M. et al. Soybean nutritional status evaluation. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 9, p. 1421–1428, 2006.

VERA-MALDONADO, P.; AQUEA, F.; REYES-DÍAZ, M.; CÁRCAMO-FINCHEIRA, P.; SOTO-CERDA, B.; NUNES-NESE, A.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, art. 1332459, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1332459.

WIMMER, M. A. et al. Boron in soils and plants: availability, uptake and physiological functions. *Plant Biology*, v. 22, p. 1–13, 2020.

YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas? In: YAMADA, T.; LOPES, A. S. (ed.). *Balanço de nutrientes na agricultura brasileira*. Piracicaba: POTAFOS, 2000. p. 121–148.

YOSHINARI, A.; TAKANO, J. Insights into the mechanisms underlying boron homeostasis in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, art. 1951, 2017.

ZHAO, S.; HUQ, M. E.; FAHAD, S.; KAMRAN, M.; RIAZ, M. Boron toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies; a review. *Plant Cell Reports*, v. 43, art. 238, 2024. DOI: 10.1007/s00299-024-03317-5.

ZHOU, D.; LUO, R.; MA, B.; CHEN, X. Transport and regulatory mechanisms of boron in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 16, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1653484.