

AMANDA MATOS NUNES DOS SANTOS

**DINÂMICA DO BORO NA SOLUÇÃO DO SOLO EM CULTIVO IRRIGADO DE
SOJA *Glycine max. (L) Merrill.***

São Cristóvão – SE

Fevereiro - 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA – DEA

**DINÂMICA DO BORO NA SOLUÇÃO DO SOLO EM CULTIVO IRRIGADO DE
SOJA *Glycine max. (L) Merrill.***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Agrônoma da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

APROVADO em:

ORIENTADO: Amanda Matos Nunes dos Santos
ORIENTADOR: Cícero Renê Almeida Barboza Júnior
COORIENTADORA: Aline de Almeida Vasconcelos

Prof. Dr. Cícero Renê Almeida Barboza Júnior (Orientador)

Me. Michel Antoni da Silva
(Banca examinadora)

Prof. Dr. Marcos Cabral de V. Barreto
(Banca examinadora)

*A Deus, que me concedeu vida, direção e propósito;
e à minha família, que foi abrigo, força e alicerce
em cada passo desta caminhada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo fôlego de vida, pela existência e por ter me concedido uma trajetória marcada por cuidado e provisão, mesmo sem que eu jamais fosse merecedora de tamanha graça. Sou grata também por ter sido filha de duas pessoas de caráter íntegro, que dedicaram a vida inteira ao trabalho para que eu pudesse desfrutar de oportunidades e de um conforto que eles próprios não tiveram.

Minhas lembranças mais antigas são do meu pai chegando em casa tarde da noite, após longos dias de trabalho, inclusive aos domingos. Recordo-me dos dias em que fazíamos mercado em família e de como ele nunca negou um pedido, sempre fazendo o possível — e muitas vezes o impossível — para oferecer o melhor a mim e ao meu irmão. Hoje compreendo o privilégio de ter crescido em um lar como o meu. Não seria quem sou, não teria os mesmos valores e princípios, se não fosse pela formação que recebi de meus pais. Migraram do interior para a capital em busca de uma vida melhor e, com coragem, sempre me incentivaram a estudar e apoiaram minha decisão de buscar oportunidades em outro estado. Mais do que incentivo, deram-me estrutura para viver essa etapa. Dedico esta formação acadêmica e todas as minhas futuras conquistas em vida aos meus pais, Luciana e Jenilson.

Ao meu irmão, Luã, primeiro da família a concluir o ensino superior, agradeço pelo exemplo, pelo incentivo constante e pela parceria de sempre.

Às minhas amigas Lorena Hellem, Maria Gabriela e Priscila Santos, por terem sido alívio, refúgio e alegria ao longo desses anos de graduação. Foi especial e genuíno trilhar esse caminho ao lado de vocês.

Ao meu colega de sala, e agora parceiro de vida, Luiz Miguel, agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, pelo apoio mútuo, por acreditar em mim até mais do que eu mesma, pelo esforço e dedicação para que possamos construir e sustentar nossa nova vida. Estou ansiosa para viver esse novo capítulo ao seu lado.

Aos amigos que cultivei durante a graduação — Soenne, João, Ryan, Marcos, Felipe, Vinicius, Larissa, Gustavo, Maurício, Khawê, Glauber, Jamille, Juciele, Victor, Thiago, Henrique, Gabriel e Domingos — obrigada por transformarem a rotina exaustiva em risadas e memórias inesquecíveis. Levo cada um de vocês com carinho no coração.

Aos meus orientadores, Cícero Renê Almeida Barboza Jr e Aline de Almeida Vasconcelos, agradeço pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho, pela confiança e pela excelência com que conduzem suas disciplinas. Obrigada pela troca, pela dedicação e

pela contribuição fundamental na minha formação. Ao doutorando Willian, agradeço pelo apoio técnico e pela disponibilidade ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Antenor de Aguiar O. Netto, Marcos Cabral de V. Barreto, Leandro Bacci, Pedro Viegas, Renata Silva Mann, Maria Aparecida Moreira e Jailson Lara Fagundes, minha profunda gratidão pela contribuição imensurável à minha formação acadêmica. Vocês são a base e a estrutura do nosso departamento, e agradeço por compartilharem seus conhecimentos com tanta dedicação.

À banca examinadora, Michel Antoni e Marcos Cabral, agradeço pela disponibilidade e pela dedicação na avaliação deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS	7
LISTAS DE TABELAS	8
RESUMO	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Contexto econômico e expansão agrícola da Soja no Brasil	12
2.2 Exigência nutricional e a racionalização operacional no sistema produtivo da soja	13
2.3 Origem e ocorrência natural do boro no ambiente	14
2.4 Dinâmica do boro e fatores que afetam a disponibilidade no solo	15
2.4.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)	16
2.4.2 Textura do solo	16
2.4.3 Umidade do solo	17
2.5 Boro em solos tropicais brasileiros	17
2.6 A dinâmica do boro na fisiologia vegetal da soja: transporte, absorção, funções, deficiências, toxicidade e exportação	18
2.7 Manejo de adubação e aplicação de boro	19
3. METODOLOGIA	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Avaliação das concentrações de B e da dinâmica das fontes boratadas nas duas profundidades de coleta da solução do solo	27
4.2 Produtividade final da soja por tratamento	29
5. CONCLUSÃO	30
6. REFERÊNCIAS	31

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Croqui dos solos ocorrentes no Campus Rural	21
Figura 2 – Croqui do dimensionamento da área do experimento e delineamento experimental dos tratamentos.	23
Figura 3 – Extratores de cápsula de porcelana porosa instaladas no experimento.	24
Figura 4 – Produto comercial contendo Bradyrhizobium japonicum posicionado no Tratamento de Sementes.	25
Figura 5 – Exemplar de amostra de solução do solo coletada no experimento durante o ciclo da cultura.	25
Figura 6 – Aspectos visuais da cultura no dia da colheita.	26
Figura 7 – Processo de colheita e trilha manual das vagens do experimento de soja.	26
Figura 8 – Teor de B da solução do solo do experimento com soja obtida por meio de extratores de capsula porosa. Letras maiúsculas iguais comparam fontes de B. Letras minúsculas comparam profundidade dentro da mesma fonte.	27
Figura 9 – Produtividade média de soja em função das fontes de boro avaliadas no experimento. Letras minúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 10%.	29

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Fração granulométrica e classe textural na camada 0–20 cm do solo utilizado no presente estudo	22
Tabela 2 – Caracterização química do solo utilizado no presente estudo	22
Tabela 3 - Concentrações de B por fonte para a dose de 2,5 kg ha ⁻¹	24

RESUMO

O boro (B) é um micronutriente essencial para a formação estrutural da parede celular e o desenvolvimento de estruturas reprodutivas, desempenhando papel fundamental na polinização e no florescimento das plantas. Em solos tropicais altamente intemperizados, que apresentam baixa matéria orgânica, textura arenosa e alta mobilidade hídrica, a deficiência de boro é comum, o que exige reposição frequente para garantir sua disponibilidade às plantas ao longo do ciclo dos cultivos agrícolas. Após aplicadas ao solo, as fontes comerciais de fertilizantes boratados sofrem hidrólise e passam a predominar na forma de ácido bórico (H_3BO_3), espécie neutra e absorvível pelas plantas, porém altamente móvel no perfil, favorecendo sua movimentação vertical sob ação da precipitação pluvial ou da irrigação. Na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), a racionalização das operações agrícolas, visando à viabilidade econômica, leva à associação da aplicação de micronutrientes às práticas de dessecação e manejo de plantas daninhas, demandando fontes solúveis, compatíveis com a calda de herbicidas e capazes de promover maior permanência do nutriente na camada de 0–20 cm, correspondente à zona de maior atividade radicular. O presente estudo avaliou o comportamento de quatro tratamentos: controle (ausência de fonte de boro), Boro A (cuja fonte é segredo industrial), octaborato e ácido bórico, aplicados via solo, em associação à calda de herbicidas, com foco na mobilidade vertical e na permanência na camada superficial do solo. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, em solo franco-arenoso, classificado como Neossolo Flúvico Psamítico, no município de São Cristóvão – SE. As fontes foram aplicadas na dose comercial de 2,5 kg ha⁻¹, em duas épocas do ciclo, sendo a dinâmica monitorada por extratores de cápsula porosa instalados nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm. As coletas da solução do solo foram realizadas 53 dias após a primeira aplicação dos tratamentos na dessecação pré-plantio, para avaliar o residual antes da aplicação do segundo tratamento, e aos 15, 30 e 45 dias após a segunda aplicação, na fase V4 da cultura. Os teores de boro foram determinados laboratorialmente e analisados estatisticamente por ANOVA, com comparação de médias pelo teste de Tukey a 10% de significância. As fontes de boro promoveram diferenças pontuais nos teores de B na solução do solo, destacando-se Boro A e Octaborato, que apresentaram maiores concentrações na camada de 0–20 cm aos 15 dias após a segunda aplicação em relação às demais fontes. Para essas fontes, observou-se ainda maior concentração na camada superficial em comparação à de 20–40 cm, indicando menor mobilidade do nutriente no perfil. Contudo, o efeito residual foi reduzido nas avaliações subsequentes. Não houve diferença significativa na produtividade da soja entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 10%.

PALAVRAS-CHAVE: Boro; solução do solo; lixiviação.

1. INTRODUÇÃO

Nos solos tropicais brasileiros, o boro (B) é reconhecido como um dos micronutrientes mais frequentemente deficientes, especialmente em ambientes altamente intemperizados, caracterizados por elevada precipitação e baixo teor de matéria orgânica. Nesses sistemas, o B encontra-se predominantemente na forma de ácido bórico (H_3BO_3), espécie neutra e absorvível pelas plantas, cujo transporte até a rizosfera ocorre principalmente por fluxo de massa, sendo fortemente dependente do teor de umidade do solo. Assim, tanto o déficit hídrico quanto o excesso de água podem comprometer sua disponibilidade: a limitação da água reduz o transporte até as raízes, enquanto a intensa percolação favorece sua movimentação vertical no perfil e potenciais perdas para camadas mais profundas. Em solos de baixa capacidade de retenção, essa dinâmica intensifica a ocorrência de deficiência, especialmente em sistemas de monocultivo intensivo voltados a altas produtividades.

Do ponto de vista fisiológico, o B desempenha papel fundamental na formação estrutural da parede celular, atuando na ligação de pectinas e na estabilidade do ramnogalacturonano II, além de participar do alongamento celular e da integridade dos tecidos meristemáticos. Também está envolvido na translocação de açúcares, no metabolismo de auxinas e em processos reprodutivos, como germinação do pólen e crescimento do tubo polínico. Na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), essas funções assumem relevância ainda maior, uma vez que o nutriente influencia diretamente o florescimento, o pegamento de vagens e a formação e funcionamento dos nódulos associados à fixação biológica de nitrogênio. Dessa forma, o manejo adequado do B torna-se estratégico para assegurar elevado desempenho fisiológico e produtivo da cultura, especialmente considerando a estreita faixa entre suficiência e toxicidade.

Entretanto, justamente por exercer funções estruturais e reprodutivas tão específicas, a disponibilidade contínua de B na faixa explorada pelas raízes é determinante para o sucesso do cultivo. Assim, não basta apenas suprir o nutriente, mas garantir que ele permaneça na zona radicular em concentrações adequadas ao longo do ciclo. Em sistemas irrigados, a dinâmica da água no solo pode intensificar a movimentação vertical do B, deslocando-o para camadas mais profundas e reduzindo sua eficiência agrônômica. Nesse contexto, compreender o comportamento das diferentes fontes do micronutriente no sistema solo-planta torna-se essencial para ajustar estratégias de manejo mais eficientes.

No sistema produtivo da soja, a racionalização das operações agrícolas tem levado à prática recorrente de associar a aplicação de micronutrientes, como o boro, às operações de dessecação e manejo de plantas daninhas, por meio de caldas combinadas com

herbicidas. Embora essa estratégia contribua para a redução de custos e maior eficiência operacional, ela envolve desafios técnicos relevantes, especialmente quanto à compatibilidade química e solubilidade das fontes na calda, estabilidade da solução e comportamento do nutriente no solo. Após a aplicação, todas as fontes boratadas sofrem hidrólise e se convertem predominantemente em ácido bórico, forma não carregada e de elevada mobilidade, o que favorece sua movimentação no perfil, sobretudo em solos tropicais, sob condições de chuva ou irrigação. Em solos de textura mais leve, com menor capacidade de adsorção, essa dinâmica pode intensificar a lixiviação, reduzindo a permanência do B na camada superficial e, conseqüentemente, sua disponibilidade na zona radicular. Assim, a definição da fonte e da dose adequada deve considerar não apenas a exigência da cultura, mas também os atributos edáficos, como textura, teor e tipo de argila, matéria orgânica e pH, que regulam os processos de adsorção, dessorção e mobilidade do nutriente. Nesse contexto, compreender o comportamento das diferentes fontes de boro no sistema solo-planta torna-se essencial para assegurar maior eficiência agrônômica, especialmente em condições irrigadas.

Sob essa perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes fontes solúveis de boro aplicadas via solo, na forma líquida e em calda combinada com herbicidas, quanto à dinâmica do nutriente na solução do solo. Buscou-se analisar a mobilidade vertical e as concentrações de boro em duas profundidades de coleta, com ênfase na camada de 0–20 cm, correspondente à zona de maior atividade radicular da cultura da soja, a fim de identificar a fonte que proporcionasse maior permanência e disponibilidade do nutriente nessa faixa do perfil. Adicionalmente, foram aferidas as produtividades de cada tratamento, com o propósito de comparar o desempenho agrônômico das diferentes fontes avaliadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Contexto econômico e expansão agrícola da Soja no Brasil

A cultura da soja constitui um dos principais pilares do agronegócio brasileiro, sendo matéria-prima essencial para a produção de biocombustíveis, óleo vegetal e farelo proteico destinado à alimentação animal, além de representar parcela expressiva das exportações nacionais. Essa ampla aplicabilidade impulsiona o setor agroindustrial e resulta em elevados índices de produtividade. Na safra 2024/2025, o Brasil produziu cerca de 171,47 milhões de toneladas de soja, consolidando-se como o maior produtor mundial da cultura (CONAB, 2025).

A janela de cultivo da soja no Brasil ocorre, predominantemente, entre os meses de outubro e março, período que coincide com a estação chuvosa nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e em parte das regiões Norte e Nordeste. Essa coincidência entre o ciclo da cultura e o regime pluviométrico favorece o estabelecimento da safra principal e possibilita a adoção de sistemas de sucessão de culturas em áreas tropicais, contribuindo para o aumento da eficiência produtiva e do uso da terra (BIGOLIN; TALAMINI, 2025). Nesse contexto, a produção nacional de soja apresenta forte concentração regional. De acordo com Monaco (2025), a região Centro-Oeste foi responsável por quase metade da produção brasileira na safra 2023/2024, consolidando-se como o principal polo produtor do país. Paralelamente, a região do MATOPIBA — composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia — tem se destacado como a principal fronteira agrícola em expansão, respondendo por aproximadamente 14% da produção total nacional (MONACO, 2025).

Em contraste com esse cenário, no estado de Sergipe a cultura da soja ainda apresenta baixa expressividade. Essa limitação está associada a um conjunto de fatores estruturais, econômicos e socioculturais, entre os quais se destacam a deficiência de infraestrutura logística e de armazenamento, os elevados custos e o maior grau de complexidade técnica do sistema produtivo. Somam-se fatores sociais, como a denominada expressão utilizada por Almeida (2023, p. 226–227) para descrever aspectos comportamentais da região marcados por aversão ao risco e baixa adoção tecnológica, que acabam por frear a expansão da produção de soja no estado. Além disso, o histórico de uso agrícola voltado a pastagens e cultivos alimentares da agricultura familiar resultou em propriedades fragmentadas e pouco adequadas a monocultivos de larga escala (MOURA et al., 2024).

2.2 Exigência nutricional e a racionalização operacional no sistema produtivo da soja

Programas de melhoramento genético têm desenvolvido cultivares de soja com maior potencial produtivo e adaptabilidade a distintas condições edafoclimáticas. Como consequência desses avanços, aliados à intensificação dos sistemas de produção, tem-se observado aumento na demanda nutricional da cultura, refletido em maiores índices de extração e exportação de nutrientes ao longo do ciclo produtivo (VARGAS-ALMENDRA et al., 2024). O manejo nutricional da cultura da soja está diretamente relacionado ao suprimento adequado de macronutrientes e micronutrientes essenciais, condição indispensável para que a planta expresse seu potencial produtivo e produza grãos de elevada qualidade. Estima-se que, para cada saca de 60 kg de grãos produzida, sejam exportados aproximadamente 3,8 kg de nitrogênio (N), 0,9 kg de fósforo (P_2O_5) e 1,6 kg de potássio (K_2O), evidenciando a necessidade de reposição adequada desses elementos no sistema solo-planta (MALAVOLTA, 2018; SILVA et al., 2022). Embora requeridos em menores quantidades, os micronutrientes desempenham funções fundamentais na fisiologia vegetal.

Em sistemas de alta produtividade, estima-se que a exportação por saca de 60 kg de soja seja da ordem de 2,2–2,3 g de B, 0,66–0,78 g de Cu, 7,3–14,8 g de Fe, 0,84–0,96 g de Mn e 2,6–2,8 g de Zn (ICL Growing Solutions, 2025). Em virtude da estreita faixa entre suficiência e toxicidade dos micronutrientes e baixa dosagem, é prática recorrente no manejo agrícola a integração dos micronutrientes às aplicações de herbicidas. Assim, o fornecimento é frequentemente realizado no momento da dessecação ou durante o controle de plantas daninhas nas fases iniciais da cultura, aproveitando a mesma operação. Essa estratégia reduz o número de entradas na área, diminui os custos com operadores e combustível e ainda previne risco de compactação do solo (BRIGHENTI et al., 2006).

Nesse contexto, a associação de fontes de B à calda de herbicidas constitui prática recorrente no manejo agrícola, motivada pela hipótese de que parte do micronutriente possa ser absorvida pelas plantas daninhas e posteriormente liberada ao sistema por meio da decomposição da biomassa, contribuindo para a dinâmica do B no solo. Contudo, a aplicação conjunta de fertilizantes e herbicidas exige avaliação criteriosa das interações entre os produtos, uma vez que incompatibilidades físico-químicas podem comprometer o desempenho agrônômico da pulverização. Alterações na estabilidade da calda, como precipitação, formação de grumos, separação de fases ou mudanças no pH da solução, podem interferir tanto na eficácia do herbicida sobre as plantas daninhas quanto na

eficiência de disponibilização do micronutriente à cultura. As interações decorrentes dessa mistura podem ser classificadas como positivas, negativas ou neutras: interações positivas ocorrem quando a presença do fertilizante favorece a absorção do herbicida ou atua como adjuvante, aumentando a eficiência de controle ou melhora a absorção do nutriente; interações negativas envolvem antagonismo químico, redução da solubilidade ou formação de compostos insolúveis, resultando em perda de eficiência; e interações neutras caracterizam-se pela ausência de efeitos significativos na performance dos produtos aplicados conjuntamente (GANDINI et al., 2020; DARAMOLA et al., 2023). Diante dessas possibilidades, recomenda-se a realização prévia de ensaios de compatibilidade em pequena escala, bem como a observância rigorosa da sequência correta de incorporação dos produtos e das recomendações técnicas dos fabricantes, a fim de minimizar riscos de instabilidade da mistura e perdas operacionais (GANDINI et al., 2020).

2.3 Origem e ocorrência natural do boro no ambiente

O B faz parte da composição natural dos solos, formações rochosas e ambientes aquáticos. Sua presença no meio resulta, sobretudo, da alteração das rochas pelo intemperismo, da atividade vulcânica e geotérmica e da volatilização de ácido bórico a partir da água do mar (DAS; PURKAIT, 2020). Apesar de também ocorrer em minerais silicatados insolúveis, como a turmalina, as fontes mais comuns de B estão associadas a minerais boratados de sódio e cálcio, geralmente encontrados em depósitos sedimentares, especialmente de origem evaporítica. Entre esses compostos destacam-se o bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), a colemanita ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), a ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) e a kernita ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (BRDAR- JOKANOVIC, 2020).

A composição do material parental exerce influência decisiva sobre os teores de B presentes no solo, uma vez que determina o aporte inicial do elemento e condiciona sua distribuição ao longo do perfil. Em geral, menores concentrações de B são observadas em solos desenvolvidos a partir de rochas ígneas, localizados em regiões tropicais e temperadas, bem como em solos derivados de granito ácido, de depósitos sedimentares de água doce e naqueles com textura grosseira e baixo teor de matéria orgânica (SUGANYA et al., 2019). Maiores concentrações de B são observadas em solos situados ao longo da costa marítima, derivados de rochas sedimentares ou de argilito (mudstone), em regiões áridas e semiáridas e também em solos formados a partir de materiais parentais ricos em folhelhos marinhos (LIU; ZHU; TONG, 1983).

Apesar de sua ocorrência natural, o B é um dos elementos que mais frequentemente apresenta deficiência nos solos, e diversos fatores afetam sua disponibilidade (GOLI;

HIEMSTRA; RAHNEMAIE, 2019). Entre os principais fatores que regulam sua concentração e dinâmica no solo destacam-se o material de origem, a textura, a natureza dos minerais de argila, o pH, a prática da calagem, o teor de matéria orgânica e as interações com outros elementos presentes no sistema solo, os quais determinam os processos de adsorção, dessorção, lixiviação e retenção do nutriente (AHMAD et al., 2012).

2.4 Dinâmica do boro e fatores que afetam a disponibilidade no solo

O boro (B) encontra-se no solo distribuído em diferentes frações que permanecem em equilíbrio dinâmico, incluindo B prontamente solúvel, B especificamente adsorvido, B ligado a óxidos, B ligado à matéria orgânica e B residual (BARMAN et al., 2017). A fração prontamente solúvel constitui a principal forma disponível para as plantas, sendo regulada pelos processos de adsorção e dessorção que controlam a troca entre a solução do solo e as superfícies sólidas (PRINCI et al., 2016). Após sua liberação por intemperismo, mineralização da matéria orgânica ou aplicação via fertilizantes e irrigação, parte do B permanece na solução e parte é fixada às partículas do solo, estabelecendo um equilíbrio que, ao longo do tempo, tende a favorecer a retenção (TLILI et al., 2019).

Entre os fatores que condicionam esse equilíbrio, o pH destaca-se como o principal regulador da adsorção de B em solos agrícolas (SANTOS; GOLDBERG; COSTA, 2020). Em solos ácidos, o B ocorre predominantemente como ácido bórico não ionizado, enquanto em valores mais elevados de pH aumentam a proporção do ânion borato, modificando sua interação com os colóides do solo (DEY et al., 2014). Além do pH, características como textura, tipo e teor de argila, presença de óxidos de alumínio e ferro, teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica influenciam a partição do B entre solução e fase sólida (REHMAN et al., 2018; NIAZ et al., 2013).

Fatores ambientais também exercem papel determinante na disponibilidade do nutriente. Clima, topografia e material de origem condicionam sua distribuição no perfil do solo (KAVITHA; SUJATHA; TATA, 2019; ZHANG et al., 2020). Em regiões de alta pluviosidade, especialmente em solos ácidos e de textura leve ou de origem ígnea, a lixiviação associada à adsorção por óxidos de Al e Fe favorece a deficiência de B (BARMAN et al., 2014; DAS et al., 2019; SARKAR; MANDAL; KUNDU, 2007). Assim, a dinâmica do boro resulta da interação entre processos químicos, características mineralógicas e condições ambientais, o que explica a complexidade do seu manejo em sistemas agrícolas.

2.4.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um dos fatores mais importantes que afetam a biodisponibilidade de boro no solo. A máxima disponibilidade ocorre em faixas de pH entre 5 e 7, nas quais predomina o ácido bórico neutro (H_3BO_3), facilitando a absorção pelas plantas. Contudo, essa disponibilidade diminui em solos muito ácidos ($\text{pH} < 5$), que, apesar de apresentarem maior solubilidade química do H_3BO_3 , favorecem o aumento da sorção por óxidos de Fe e Al.

Em faixas de pH superiores a 7, ocorre aumento da adsorção por meio de ligações de superfície na forma de borato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$), associando-se a óxidos de Fe, Al e Mn e a argilominerais, seguindo isoterma de Langmuir ou Freundlich, com pico próximo a pH 9. Acima de pH 9, a competição com OH^- pode promover a liberação de B; entretanto, em solos tropicais, essa condição é rara.

Além disso, o manejo com calagem excessiva em solos ácidos pode reduzir a disponibilidade de B, reforçando a relação entre o pH da solução do solo e os níveis de adsorção. Contudo, esse comportamento não depende exclusivamente do pH, sendo também influenciado por propriedades do solo, como teor de matéria orgânica, argila e óxidos de alumínio (STEINER; DO; LANA, 2013).

2.4.2 Textura do solo

A textura do solo exerce influência direta sobre a disponibilidade de boro (B), pois está associada tanto ao teor nativo do elemento quanto à sua capacidade de retenção (TLILI et al., 2019; NIAZ et al., 2013). De modo geral, o aumento do teor de argila eleva a quantidade de B adsorvida, especialmente em interação com o pH da solução do solo, enquanto solos com menor fração argilosa apresentam menor capacidade de retenção (TLILI et al., 2019).

Solos de textura grosseira, particularmente arenosos e bem drenados, tendem a apresentar menores teores de B disponível devido à maior suscetibilidade à lixiviação (MALHI et al., 2003; DA SILVA et al., 2018). Em contraste, solos de textura fina retêm maiores quantidades do nutriente, em parte pela maior superfície específica e pela capacidade das argilas de formar complexos estáveis com micronutrientes.

Além da retenção diferenciada, a textura também influencia as estratégias de manejo, estudos mostraram que solos de textura fina geralmente requerem maiores quantidades de B do que solos de textura grosseira para produzir concentrações

semelhantes de B nas plantas. Concentrações de 3,5 mg/kg em solo franco-arenoso e 4,5 mg/kg em solo franco-argiloso resultaram em níveis semelhantes de B em grão-de-bico (KUMARI et al., 2017).

2.4.3 Umidade do solo

A disponibilidade de boro (B) no solo é fortemente influenciada pelo regime hídrico, uma vez que seu transporte até a superfície radicular ocorre predominantemente por fluxo de massa, acompanhando o movimento da água em direção às raízes impulsionado pela transpiração (FLEMING, 1980). Em condições de déficit hídrico, a redução do teor de água no solo limita o fluxo de massa, diminuindo o aporte de B à rizosfera e aumentando o risco de deficiência. Além disso, o ressecamento do solo reduz a continuidade da fase líquida nos poros, aumentando a tortuosidade e diminuindo a difusividade efetiva do B, o que compromete a reposição do nutriente na zona de depleção próxima às raízes (HAJIBOLAND; FARHANGHI, 2011). Estudos indicam que, embora a adsorção de B possa não variar significativamente entre 50% e 100% da capacidade de campo, a redução da umidade pode intensificar a fixação do nutriente, especialmente após ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (TLILI et al., 2019; AHMAD et al., 2012). Por outro lado, condições de submersão podem aumentar temporariamente o teor de B disponível em solos ácidos, evidenciando que a dinâmica do nutriente resulta da interação entre transporte hídrico, adsorção e condições estruturais do solo (MONDAL et al., 1991).

Assim, a interação entre textura, teor de argila, competição e interação com outros nutrientes, pH da solução do solo e regime hídrico explica grande parte das variações na disponibilidade de B em diferentes ambientes edáficos.

2.5 Boro em solos tropicais brasileiros

O boro é o micronutriente mais deficiente nos solos brasileiros, sendo o zinco o segundo mais limitante. Nos solos tropicais do Brasil, caracterizados por intenso intemperismo, acidez ($\text{pH} < 6,5$), textura arenosa e baixo teor de matéria orgânica, há maior suscetibilidade a perdas por lixiviação, enquanto a calagem excessiva pode intensificar a sorção do B em óxidos de Fe e Al, reduzindo sua disponibilidade.

Nesse contexto, a matéria orgânica constitui a principal fonte de B nos solos brasileiros. A decomposição dos resíduos orgânicos promove a liberação gradual do nutriente, compensando parcialmente as perdas por lixiviação. O papel da matéria orgânica dissolvida (DOM) na disponibilidade e adsorção de B no sistema solo-planta foi relatado

por Dhaliwal et al. (2019), estando sua dinâmica associada à assimilação do B por microrganismos do solo. O B presente na matéria orgânica do solo (MOS) não se encontra imediatamente disponível às plantas; contudo, torna-se acessível após o processo de mineralização.

2.6 A dinâmica do boro na fisiologia vegetal da soja: transporte, absorção, funções, deficiências e toxicidade e exportação

No solo, o boro predomina na forma neutra H_3BO_3 , sendo transportado pela água por meio do fluxo de massa até as raízes, movimento impulsionado pela transpiração da planta, podendo ser complementado pela difusão, especialmente em condições de déficit hídrico. Ao chegar à zona radicular, atravessa a membrana plasmática por difusão direta ou por transporte facilitado através de canais do tipo aquaporina (NIP5;1), sem gasto de energia metabólica. A permanência na forma de ácido bórico facilita sua penetração na membrana em razão da ausência de carga elétrica.

No citosol, por apresentar pH médio em torno de 7,5, o ácido bórico pode se dissociar, transformando-se em íon borato ($B(OH)_4^-$), passando a exercer funções que fundamentam o critério direto de essencialidade do boro nas plantas. Entre essas funções destaca-se a formação de ligações cruzadas no ramnogalacturonano II (RG-II), atuando como componente estrutural da parede celular e em conjunto com o cálcio contribuindo na estabilização dessa estrutura, promovendo alongamento e diferenciação celular, especialmente em tecidos meristemáticos.

Na cultura da soja, o boro contribui para a melhoria da fixação biológica de nitrogênio, protegendo a atividade da nitrogenase nos nódulos e favorecendo o processo simbiótico. Também participa do transporte de auxinas e da síntese de proteínas e ácidos nucleicos, além de atuar na translocação de açúcares, no alongamento celular e no transporte de carboidratos. É essencial para a germinação do pólen, o crescimento do tubo polínico e a formação de estruturas reprodutivas, sendo, portanto, indispensável para o pegamento de flores, formação de vagens e enchimento de grãos e impactando diretamente na produtividade da cultura (CAMACHO-CRISTÓBAL et al., 2018; SHIREEN et al., 2018).

Por ser pouco móvel no floema e ser transportado em maiores quantidades para tecidos com maior atividade transpiratória, os sintomas de toxicidade do boro manifestam-se inicialmente nas folhas mais maduras; por outro lado, seguindo a mesma lógica fisiológica, os sintomas de deficiência aparecem nas folhas mais jovens. Na cultura da soja,

a deficiência de boro manifesta-se por redução do crescimento radicular, encurtamento de entrenós, deformação de folhas jovens, abortamento floral e diminuição do número de vagens, refletindo diretamente em perdas de produtividade. Em contrapartida, o excesso desse micronutriente pode resultar em toxicidade, caracterizada por clorose e necrose marginal das folhas, evidenciando a estreita faixa entre deficiência e toxicidade nas plantas (MASOOD; ZHAO; SHEN, 2023).

Estima-se que a soja exporte entre 20 e 30 g de boro por tonelada de grãos produzidos, o que reforça a necessidade de manejo criterioso desse nutriente, especialmente em solos tropicais com baixa disponibilidade natural e elevada suscetibilidade à lixiviação (DAS; PURKAIT, 2020; BREURE et al., 2024).

2.7 Manejo de adubação e aplicação de boro

Independentemente da fonte utilizada, os fertilizantes boratados, quando dissolvidos na solução do solo, sofrem hidrólise e entram em equilíbrio químico formando predominantemente ácido bórico (H_3BO_3) nas faixas de pH adequadas à maioria das culturas. Considerando que o ácido bórico apresenta elevada mobilidade na solução do solo e, conseqüentemente, alto potencial de lixiviação — sobretudo em solos arenosos — torna-se indispensável adotar estratégias criteriosas de manejo e reposição anual do nutriente. A definição das doses e da forma de aplicação deve considerar fatores como textura, teor de matéria orgânica e pH do solo, de modo a maximizar a eficiência agrônômica e reduzir perdas, garantindo adequado suprimento de boro ao longo do ciclo da cultura (KEREN, 1996; SÁ, 2016; GOLI; HIEMSTRA; RAHNEMAIE, 2019).

O fornecimento de boro pode ser realizado via solo, em formulações sólidas ou líquidas, por fertirrigação ou por pulverizações foliares. Entre os principais minérios utilizados pela indústria na formulação de fertilizantes boratados destacam-se ulexita, colemanita, tincal (bórax), kernita, sasolita, datolita e boracita, os quais originam produtos com diferentes teores de B e distintos graus de solubilidade. Essa variabilidade influencia diretamente a velocidade de liberação do nutriente e sua dinâmica no solo, sendo determinante para a escolha da fonte mais adequada às condições edafoclimáticas e ao sistema de cultivo.

Na aplicação via solo, as formulações sólidas, como ácido bórico e boratos — incluindo tetraborato de sódio e boratos de cálcio, a exemplo de ulexita, colemanita e datolita — são amplamente empregadas no plantio ou em cobertura. As fontes menos solúveis tendem a apresentar efeito mais gradual e residual, podendo ser interessantes para

fornecimento mais prolongado em solos de texturas arenosas. Contudo, essa modalidade apresenta limitações operacionais, especialmente em função das baixas doses recomendadas, que dificultam a distribuição uniforme do fertilizante no campo.

Ainda via solo, a aplicação líquida surge como alternativa estratégica para integrar operações agrícolas, permitindo o posicionamento do boro em associação com práticas como dessecação e controle de plantas daninhas. Nessa modalidade, são exigidas fontes mais puras, com elevado grau de solubilidade e melhor desempenho em faixas de pH levemente ácidas, como ácido bórico, boratos alcalinos e complexos de boro-etanolamina. Embora essa estratégia otimize o manejo operacional e possibilite distribuição mais uniforme, essas fontes apresentam elevada suscetibilidade à lixiviação. Mesmo quando associadas à calda de herbicidas — cuja absorção pelas plantas daninhas pode resultar na posterior liberação do nutriente com a decomposição da biomassa — o efeito residual de boro nem sempre consegue coincidir com as fases de maior exigência da cultura, como o período reprodutivo, tornando necessário o parcelamento das doses (BRIGHENTI et al., 2004; BRIGHENTI et al., 2006; VITTI; VALE, 2020).

As pulverizações foliares, por sua vez, permitem maior uniformidade de aplicação em comparação às formas sólidas, sendo indicadas especialmente para correções rápidas de deficiência. Entretanto, é fundamental atenção à composição das caldas combinadas, à possibilidade de efeitos antagônicos entre insumos e ao risco de fitotoxicidade. Além disso, devido à baixa mobilidade do boro no floema na maioria das culturas, a aplicação foliar corrige predominantemente deficiências localizadas, sem promover redistribuição significativa do nutriente para novos tecidos em crescimento.

Na fertirrigação, o manejo requer cuidados adicionais relacionados à concentração de sais e à condutividade elétrica da solução nutritiva, exigindo fertilizantes de elevada pureza e solubilidade, semelhantes aos utilizados em pulverizações. O monitoramento da qualidade da água e do equilíbrio nutricional é essencial para evitar problemas de salinidade e assegurar eficiência no fornecimento do micronutriente.

Dessa forma, o manejo do boro deve ser conduzido de maneira integrada, considerando a escolha da fonte, a forma de aplicação, as características do solo e o estágio fenológico da cultura. Apenas com planejamento técnico adequado é possível conciliar eficiência agrônômica, segurança operacional e sustentabilidade do sistema produtivo.

3 METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido em campo, em experimento com a variedade BRS 8980 de soja (*Glycine max*), sob irrigação por gotejamento, no Campus Rural, localizado na zona rural de São Cristóvão, Sergipe (10°55' S, 37°11' O). A área está inserida na Zona da Mata Nordestina e apresenta clima classificado como As segundo Köppen, caracterizado por estação seca no verão e período chuvoso concentrado principalmente entre fevereiro e setembro, sob condições tropicais (INMET, 2023). Os solos da área de estudo são formados por sedimentos fluviais e depósitos argilosos oriundos do Grupo Barreiras, com ocorrência, do ponto de vista pedológico, das classes Neossolo Flúvico Psamítico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Plintossolo Háplico Distrófico, conforme descrito por Nascimento e Pedrotti (2004), distribuídas de acordo com a Figura 1.

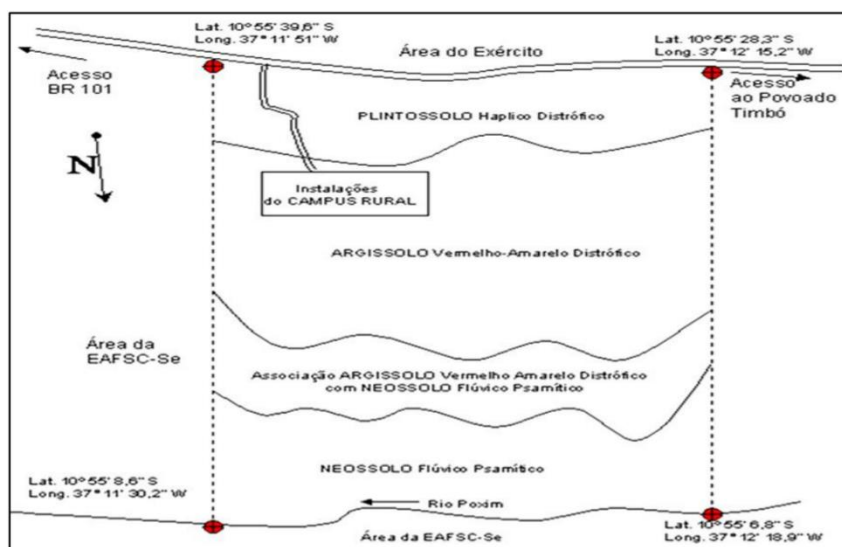


Figura 1 – Croqui dos solos ocorrentes no Campus Rural. Fonte: Moreira (2017).

Doze meses antes da instalação do experimento, foi realizada a amostragem do solo para posterior caracterização química e física, cujos resultados encontram-se apresentados nas Tabelas 1 e 2. A textura franco-arenosa observada é compatível com a classe Neossolo Flúvico Psamítico, cuja ocorrência na área já havia sido descrita por Nascimento e Pedrotti (2004), evidenciando a predominância de material de origem aluvial e elevada fração arenosa no perfil superficial.

Tabela 1 – Fração granulométrica e classe textural na camada 0–20 cm do solo utilizado no presente estudo

Profundidade (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe Textural
0–20	71,84	18,92	9,24	Franco-arenosa

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 2 – Caracterização química do solo utilizado no presente estudo

Determinações	Unidade	Resultado
pH (água, 1:2,5)	-	5,4
Matéria Orgânica	dag/dm ³	1,5
Fósforo (Mehlich-1)	mg/dm ³	20,8
Potássio (Mehlich-1)	mg/dm ³	40
Cálcio (KCl 1 mol/L)	cmolc/dm ³	1,3
Magnésio (KCl 1 mol/L)	cmolc/dm ³	0,5
H + Al	cmolc/dm ³	2
CTC Total	cmolc/dm ³	3,9
Saturação por bases (V%)	%	48,7
B (Água quente)	mg/dm ³	0,3
Zinco (Mehlich-1)	mg/dm ³	3,6
Manganês (Mehlich-1)	mg/dm ³	3,1
Cobre (Mehlich-1)	mg/dm ³	0,3
Ferro (Mehlich-1)	mg/dm ³	34

Fonte: elaborada pela autora a partir da análise química do solo (Labominas, 2024).

Sete meses antes da semeadura, realizou-se a correção da acidez do solo com o objetivo de elevar o pH, reduzir a saturação por hidrogênio e alumínio — que representava 51,3% da capacidade de troca catiônica potencial (CTC a pH 7,0) — e incrementar a saturação por cálcio e magnésio na CTC. Para esse fim, aplicou-se calcário dolomítico na dose de 7 t ha⁻¹. A adoção dessa superdosagem configurou-se como estratégia técnica para compensar possíveis perdas de calcário durante a aplicação, decorrentes da deriva causada por ventos intensos na região. Posteriormente, realizou-se o preparo do solo, com incorporação até 40 cm de profundidade e nivelamento da área, com o propósito de assegurar melhores condições químicas e físicas para o adequado estabelecimento e desenvolvimento inicial da cultura da soja.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, composto por três tratamentos e um controle, com quatro repetições cada. Os tratamentos consistiram na ausência de suplementação de boro (B) e na aplicação de três fontes do micronutriente: Boro A (segredo industrial), octaborato e ácido bórico, totalizando duas aplicações ao longo do ciclo da cultura. As parcelas experimentais foram previamente dimensionadas com 3 m de largura e 5 m de comprimento por repetição, estrategicamente para implementação da cultura, conforme ilustrado na Figura 2.

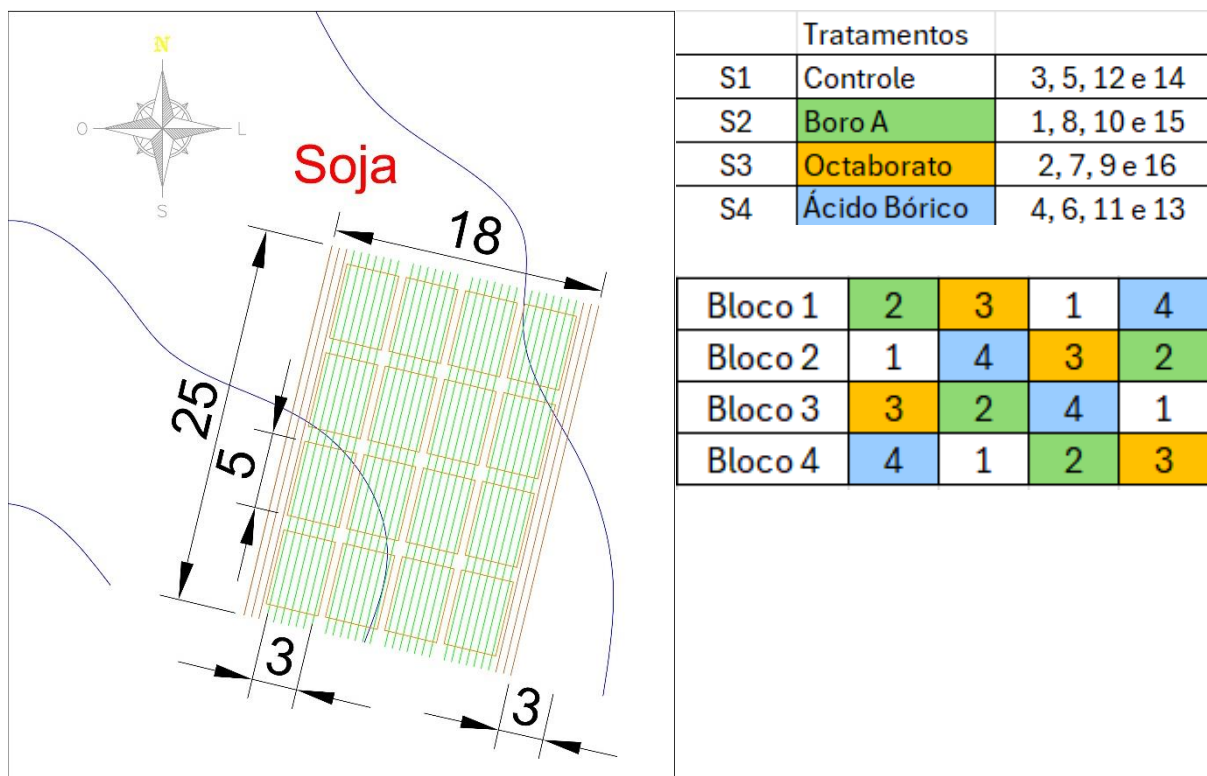


Figura 2 – Croqui do dimensionamento da área do experimento e delineamento experimental dos tratamentos. Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira aplicação, realizada com o objetivo de promover a dessecação pré-plantio, consistiu na utilização de uma calda composta pelas respectivas fontes de B (tratamentos), associadas a glifosato, glufosinato, óleo mineral e adjuvante. A dose de B não foi ajustada em função das diferentes concentrações do nutriente em cada fonte, adotando-se uma dose fixa de 2,5 kg do produto comercial por hectare em todos os tratamentos. As concentrações de B correspondentes a cada fonte, considerando a dose estabelecida, encontram-se descritas na Tabela 3. Foram instalados dois extratores de solução do solo (cápsula porosa de porcelana) por repetição, ambos dividindo a área de 1 m² centralizados na parcela, em duas profundidades distintas de coleta (0-20 cm e 20-40 cm) conforme a figura 3, para posterior análise comparativa do teor de B na solução das duas profundidades.

Tabela 3 – Concentrações de B por fonte para a dose de 2,5 kg ha⁻¹

Produto	Dose aplicada (kg ha ⁻¹)	Teor de B (%)	B fornecido (kg ha ⁻¹)
Octaborato	2,5	15%	0,375 kg ha⁻¹
Boro A	2,5	16%	0,400 kg ha⁻¹
Ácido Bórico	2,5	17%	0,425 kg ha⁻¹

Fonte: elaborada pela autora.



Figura 3 – Extratores de cápsula de porcelana porosa instaladas no experimento. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Após a dessecação, as sementes foram previamente inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*, na dose de 1,2g do produto comercial para cada quilograma de sementes. A semeadura foi realizada no dia 10 de abril de 2025, com espaçamento de 50 cm entre linhas e 12,5 cm entre plantas, com o objetivo de alcançar uma população final de 160.000 plantas por hectare. A adubação de fundação foi feita com a aplicação de 300 kg ha⁻¹ da formulação 10-30-00.

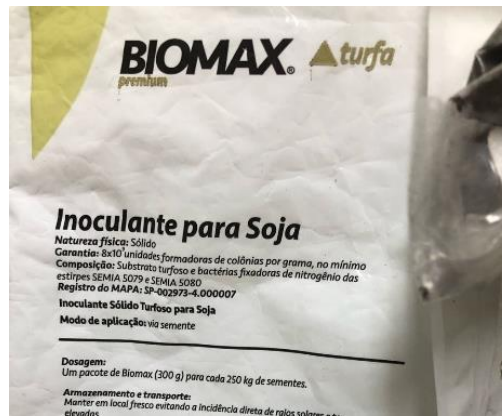


Figura 4 – Produto comercial contendo *Bradyrhizobium japonicum* posicionado no Tratamento de Sementes. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

A segunda aplicação, foi realizada no estágio fenológico V4 da soja, sendo composta pelas respectivas fontes de B (tratamentos), associadas a glifosato e adjuvante, com o objetivo de promover o controle de plantas daninhas durante o período crítico de prevenção à interferência. Previamente à segunda aplicação, procedeu-se à primeira coleta da solução do solo por meio de cápsulas porosas de porcelana. As amostras obtidas foram encaminhadas para análise laboratorial visando à determinação dos teores de B, com a finalidade de avaliar o efeito residual do nutriente proveniente das fontes aplicadas na dessecação pré-plantio.

Após a segunda aplicação dos tratamentos, foram realizadas três coletas subsequentes da solução do solo, aos 15, 30 e 45 dias, para monitoramento da dinâmica do B no sistema. A determinação dos teores do micronutriente foi conduzida conforme a metodologia descrita por Teixeira (2017). As médias obtidas para os teores de B, considerando as diferentes fontes e profundidades de coleta, foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste de Tukey (10%).



Figura 5 – Exemplar de amostra de solução do solo coletada no experimento durante o ciclo da cultura. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

A soja foi colhida em 16 de julho de 2025, correspondendo a três meses e seis dias após a semeadura. Para a avaliação, foram consideradas apenas as três linhas centrais de cada parcela, sendo desconsideradas as linhas de bordadura. Em cada parcela, realizou-se a contagem e a colheita das plantas ao longo de três metros lineares, visando à posterior estimativa e análise da correlação dos dados dos teores de B sobre a produtividade final de cada tratamento.



Figura 6 – Aspectos visuais da cultura no dia da colheita. Fonte: Arquivo pessoal da autora.



Figura 7 – Processo de colheita e trilha manual das vagens do experimento de soja. Fonte: Arquivo pessoal da autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das concentrações de B e da dinâmica das fontes boratadas nas duas profundidades de coleta da solução do solo

A primeira extração da solução do solo pelas cápsulas porosas para determinação de B foi realizada na fase fenológica V4 da soja, antes da segunda aplicação dos tratamentos para avaliar o efeito residual presente no solo da primeira aplicação realizada na dessecação pré-semeadura. Os resultados da determinação descritos na Figura 8, evidenciaram que os teores de B na solução estavam abaixo de 0,2 mg/dm³ e não diferiram estatisticamente entre os tratamentos. A ausência do efeito residual pode ser atribuída à alta solubilidade das fontes de B utilizadas nos tratamentos, ao efeito da lixiviação do nutriente provocada pela lâmina de água da irrigação por gotejamento frente à textura franco arenosa do solo. Contudo, ao comparar as profundidades dentro de cada tratamento, o controle apresentou uma maior concentração de B na camada de 20-40 cm, sugerindo uma maior mobilidade do micronutriente.

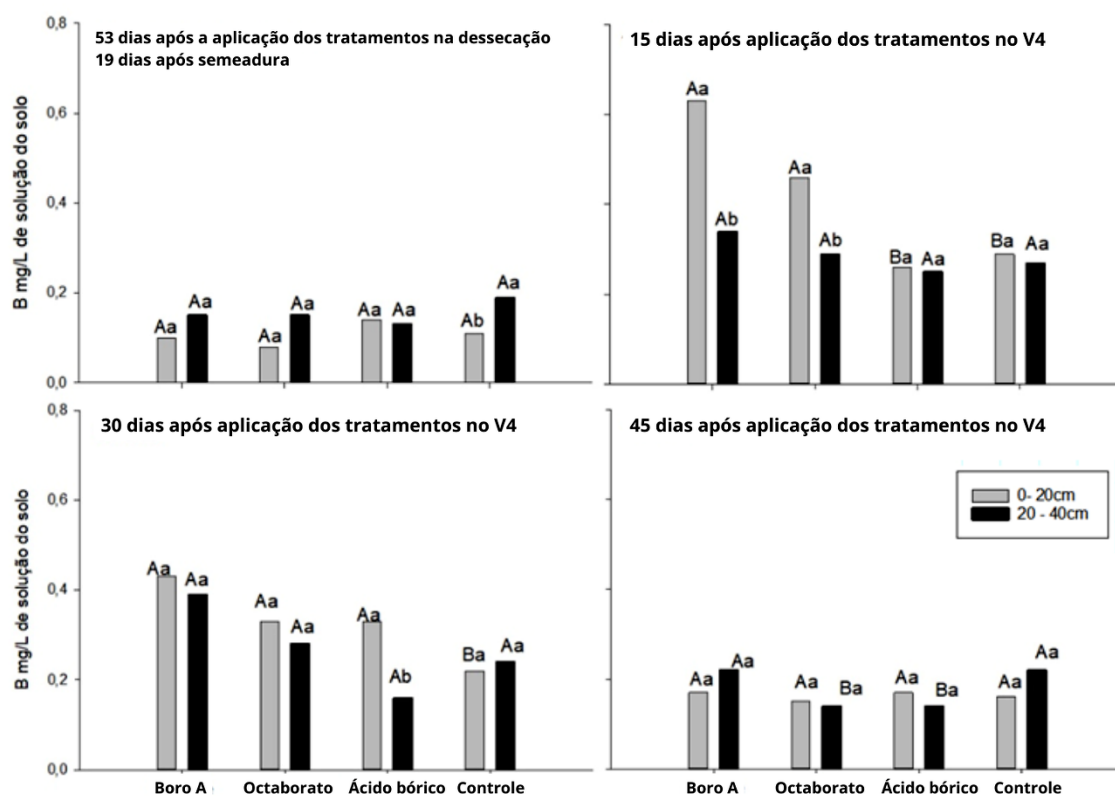


Figura 8 - Teor de B da solução do solo do experimento com soja obtida por meio de extratores de capsula porosa. Letras maiúsculas iguais comparam fontes de B. Letras minúsculas comparam profundidade dentro da mesma fonte. Tuckey a 10%

A análise química das soluções extraídas após 15 dias da segunda aplicação dos tratamentos mostrou um aumento considerável nos teores de B em comparação à primeira

coleta, reforçando o efeito positivo da aplicação na disponibilidade do nutriente no sistema.

Na camada de 0-20 cm, os tratamentos Boro A e Octaborato apresentaram concentrações de B superiores, com diferenças evidentes em relação ao Ácido Bórico e ao Controle, o que sugere uma melhor performance no incremento de B na zona radicular mais expressiva na fase vegetativa inicial da soja. Embora não tenha configurado distinção estatística, o Boro A mostrou teores ligeiramente mais elevados do que o Octaborato na camada 0-20 cm.

Em relação à camada de 20-40 cm, foi observado similaridade estatística entre os níveis do nutriente em todos os tratamentos. Analisando a dinâmica do B no perfil do solo, observou-se discrepância entre os tratamentos Boro A e Octaborato, com teores de B mais elevados na camada de 0-20 cm, quando comparados à camada de 20-40 cm, enquanto o Ácido Bórico e o Controle apresentaram equivalência estatística entre as diferentes profundidades de coleta. Os tratamentos Boro A e Octaborato, mesmo com doses inferiores ajustadas conforme a concentração de cada fonte, promoveram maior incremento de B e menor mobilidade do nutriente no perfil do solo em comparação ao ácido bórico. Fatores como a compatibilidade das fontes com o herbicida utilizados na calda, a maior solubilidade e a eficiência de absorção do elemento pelas plantas daninhas, que após a dessecação, podem ter liberado o B gradualmente por meio da decomposição da matéria orgânica no sistema.

Após 30 dias da segunda aplicação dos tratamentos, foi realizada uma terceira extração de solução para avaliar o efeito residual do B no solo. Os três tratamentos (Boro A, Octaborato e Ácido Bórico) não apresentaram variação estatística no teor de B em nenhuma das camadas (0-20 cm e 20-40 cm), mas o Controle teve um teor de B significativamente mais baixo na camada de 0-20 cm, quando comparado aos demais tratamentos. Na camada de 20-40 cm, não foram observadas variações relevantes entre os tratamentos. Ao avaliar a dinâmica do nutriente nas duas profundidades dentro de cada tratamento, o Ácido Bórico foi a única fonte que apresentou diferença significativa, com teores mais elevados de B na camada 0-20 cm em comparação à camada 20-40 cm.

Na quarta coleta, realizada após 45 dias da segunda aplicação dos tratamentos, todos os tratamentos apresentaram uma redução no teor de B em comparação com as coletas anteriores. Não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos na camada de 0-20 cm. No entanto, na camada de 20-40 cm, os tratamentos Octaborato e Ácido Bórico

apresentaram teores de B significativamente menores quando comparados ao Boro A e ao Controle. Dentro de cada tratamento, os teores de B não diferiram significativamente entre as profundidades de coleta.

De maneira integrada, a ausência de comportamento definido nos teores de B na solução do solo ao longo das coletas confirma os fundamentos teóricos apresentados no referencial quanto à elevada mobilidade do boro em solos tropicais intemperizados, especialmente sob condições de textura arenosa, baixa matéria orgânica e regime hídrico ativo, cenário compatível com o experimento, conduzido em solo franco-arenoso sob regime de lâmina de irrigação constante, principalmente ao se considerar o uso de fontes extremamente solúveis, sem efeitos de liberação gradual, e ainda sob condições de calda combinada com outros produtos químicos. Além disso, a dose total aplicada, próxima a 800 g de B ha⁻¹, pode ter sido insuficiente para superar o potencial de perdas por lixiviação, especialmente considerando que todas as fontes avaliadas apresentaram comportamento químico semelhante quanto à rápida disponibilização do nutriente e efeito residual insuficiente — que permaneceu, no máximo, pouco acima de 0,4 mg/dm³ — para cobrir a demanda de boro na fase reprodutiva da soja. Assim, os resultados evidenciam que, nas condições edafoclimáticas do experimento, a dinâmica da água no solo exerceu papel preponderante sobre a permanência do boro na camada de maior atividade radicular, minimizando diferenças entre fontes e reforçando que o manejo eficiente do nutriente, em ambientes arenosos irrigados, depende mais do ajuste de dose, do parcelamento e do momento de aplicação do que exclusivamente da escolha da fonte fertilizante.

4.2 Produtividade final da soja por tratamento

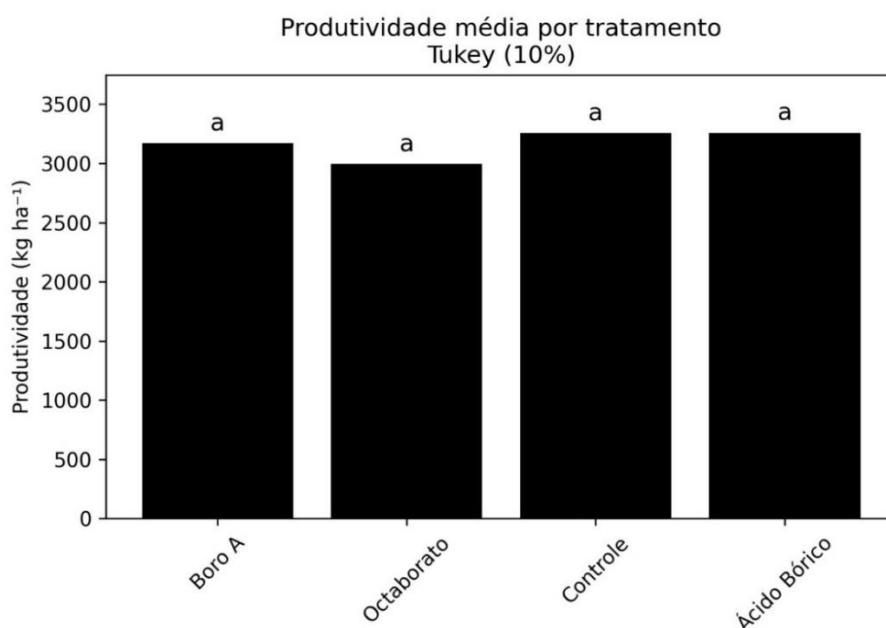


Figura 9 – Produtividade média de soja em função das fontes de boro avaliadas no experimento. Letras minúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 10%.

As produtividades médias observadas na Figura 9 variaram entre 2.994 e 3.258 kg ha⁻¹ entre os tratamentos avaliados. O tratamento com Ácido Bórico apresentou a maior média produtiva (3.258 kg ha⁻¹), seguido pelo Controle (3.255 kg ha⁻¹), Boro A (3.169 kg ha⁻¹) e Octaborato (2.994 kg ha⁻¹). A população média final foi de 98.000 plantas ha⁻¹, valores inferiores à população teórica estimada na semeadura (160.000 plantas ha⁻¹). Diferenças na população final estão associadas a fatores operacionais e ambientais, como uniformidade de semeadura, vigor de sementes e condições edafoclimáticas iniciais, não podendo ser atribuídas às fontes de boro testadas.

Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2025), a produtividade média da soja na safra 2024/25 foi de aproximadamente 3.400 kg ha⁻¹ no Brasil e 3.200 kg ha⁻¹ na Região Nordeste. As produtividades obtidas neste estudo situaram-se próximas à média regional, indicando desempenho agrônômico satisfatório nas condições de solo franco-arenoso irrigado.

Nesse contexto, a análise estatística confirmou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 10% ($p > 0,10$), evidenciando que as fontes de boro avaliadas não influenciaram o rendimento da cultura nas condições do experimento.

5 CONCLUSÃO

As fontes de boro avaliadas promoveram diferenças nos teores de B na solução do solo ao longo das avaliações. Na primeira coleta, realizada 53 dias após a aplicação na dessecação, apenas o controle apresentou maior concentração de B na camada de 20–40 cm em relação à de 0–20 cm, indicando maior mobilidade do nutriente. O efeito mais expressivo foi observado aos 15 dias após a segunda aplicação dos tratamentos, quando Boro A e Octaborato apresentaram teores significativamente superiores na camada de 0–20 cm em comparação ao ácido bórico e ao controle. Nessa mesma avaliação, essas fontes também apresentaram maior concentração na camada superficial em relação à camada de 20–40 cm, evidenciando menor deslocamento do nutriente no perfil do solo. Aos 30 dias, apenas o controle apresentou menor teor de B na camada de 0–20 cm, enquanto aos 45 dias o efeito residual foi reduzido e sem diferenças significativas entre os tratamentos nessa camada.

Apesar das diferenças observadas na dinâmica do B na solução do solo, não houve diferença significativa na produtividade da soja entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 10% de significância, indicando que, nas condições do estudo, as fontes avaliadas não influenciaram o rendimento da cultura.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

AHMAD, W. et al. Factors affecting boron availability in soils and its nutrition in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 43, n. 1–2, p. 240–252, 2012.

ALMEIDA, M. R. M. de. Produção de soja na região do SEALBA alagoano: uma análise dos determinantes e dos limites de sua expansão. 2023. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico)—Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.

BARMAN, A. et al. Boron availability in acidic soils under high rainfall conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 60, n. 4, p. 1–15, 2014.

BARMAN, A. et al. Forms and distribution of boron in soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 17, n. 2, p. 1–12, 2017.

BIGOLIN, J. F.; TALAMINI, E. Calendário agrícola e dinâmica produtiva da soja no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, v. 34, n. 1, p. 45–60, 2025.

BRDAR-JOKANOVIC, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural crops. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, 2020.

BREURE, A. M. et al. Boron dynamics and sustainable micronutrient management in tropical agricultural systems. *Agronomy*, v. 14, n. 2, 2024.

BRIGHENTI, A. M. et al. Aplicação simultânea de dessecantes e boro no manejo de plantas daninhas. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 553-560, 2006.

BRIGHENTI, A. M. et al. Aplicação simultânea de dessecantes e boro no manejo de plantas daninhas em pré-semeadura. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 571–578, 2006.

BRIGHENTI, A. M. et al. Interferência do pH da calda na eficiência do glyphosate. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 439–445, 2004.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J. et al. Boron deficiency and plant responses: mechanisms and physiological implications. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 123, p. 84–92, 2018.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR., D. et al. Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 16 Fev. 2026.

DARAMOLA, O. S.; MACDONALD, G. E.; KANISSERY, R. G.; DEVKOTA, P. Effects of co-applied agrochemicals on herbicide performance: A review. *Crop Protection*, v. 168, 106999, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106999>.

DA SILVA, J. et al. Boron losses in sandy and clayey soils. *Journal of Plant Nutrition*, v. 41, n. 3, p. 1–12, 2018.

DAS, Ayan Kumar; PURKAIT, Alope. Boron dynamics in soil: classification, sources, factors, fractions, and kinetics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 51, n. 10, p. 1231–1256, 2020.

DAS, R. et al. Boron deficiency in coarse-textured and igneous soils. *Journal of Plant Nutrition*, v. 42, n. 10, p. 1–12, 2019.

DAS, S.; PURKAIT, B. Boron nutrition and its role in soybean productivity. *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 5, p. 673–689, 2020.

DEY, P. et al. Boron speciation in relation to soil pH. *Geoderma*, v. 213, p. 1–10, 2014.

DHALIWAL, S. S. et al. Dissolved organic matter–boron interactions and implications for boron availability in soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 19, n. 3, p. 632–644, 2019.

FLEMING, G. A. Essential micronutrients I: boron and molybdenum. *Journal of Agricultural Science*, v. 94, p. 219–226, 1980.

GANDINI, E. M. M. et al. Compatibility of pesticides and/or fertilizers in tank mixtures. *Journal of Cleaner Production*, v. 268, p. 122152, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122152>.

GEA-ESALQ. Tecnologias tamponantes de pH em caldas agrícolas e compatibilidade de misturas em tanque. Piracicaba: ESALQ/USP, 2020.

GOLDBERG, S. Adsorção de boro em solos ácidos em função da variação do pH. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1–10, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YVGDdggFRXvDWMqFsLkyRJJ/>. Acesso em: 16 fev. 2026.

GOLI, A.; HIEMSTRA, T.; RAHNEMAIE, R. Boron speciation and availability in soils: a review. *Geoderma*, v. 338, p. 1–13, 2019.

HAJIBOLAND, R.; FARHANGHI, F. Remobilization of boron in plants and its relation to soil water availability. *Plant and Soil*, v. 339, p. 1–15, 2011.

HELYAR, K. Boron availability in eastern Canadian soils. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 74, p. 1–10, 1994.

ICL GROWING SOLUTIONS. Boron dynamics and sources for soil application. 2025. Disponível em: <https://icl-growingsolutions.com/agriculture/knowledge-hub/boron-dynamics-and-sources-for-soil-application/>. Acesso em: 16 fev. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais climatológicas do Brasil 1991–2020. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2026.

KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

KAVITHA, C.; SUJATHA, M.; TATA, S. Boron distribution influenced by climate and parent material. *Catena*, v. 181, 2019.

KEREN, R. Boron. In: SPARKS, D. L. (ed.). *Methods of soil analysis: part 3 – chemical methods*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 603–626.

KUMARI, S. et al. Soil boron concentration and chickpea response in different textures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 48, n. 6, p. 1–12, 2017.

LIU, X.; ZHU, Z.; TONG, Y. Distribution of boron in soils derived from different parent materials. 1983.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALHI, S. S. et al. Boron availability in coarse- and fine-textured soils. *Agronomy Journal*, v. 95, p. 1–10, 2003.

MARSCHNER, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MASOOD, S.; ZHAO, X.; SHEN, R. Boron toxicity and deficiency responses in crop plants: physiological and molecular perspectives. *Plants*, v. 12, n. 3, 2023.

MONACO, L. F. Distribuição espacial e dinâmica da produção de soja no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília*, v. 63, n. 2, p. 1–18, 2025.

MONDAL, S. S. et al. Effect of submergence on boron availability in acid soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, v. 39, p. 322–326, 1991.

MOURA, J. E. A. et al. Desempenho competitivo da agricultura familiar nas microrregiões do Brasil, 2006/2017. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 22, n. 2, 2024.

NELSON, K. A.; MEINHARDT, C. G. Foliar fertilization of boron in crop production. *Agronomy Journal*, v. 103, n. 2, p. 450–457, 2011.

NIAZ, A. et al. Boron deficiency in Punjab soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 62, p. 1–12, 2016.

NIAZ, A. et al. Boron partitioning between soil solution and solid phase. *Soil Research*, v. 51, p. 1–10, 2013.

PRINCI, M. P. et al. Adsorption–desorption processes controlling boron availability. *Plant and Soil*, v. 398, p. 1–15, 2016.

REHMAN, A. et al. Soil properties affecting boron retention. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 18, p. 1–12, 2018.

ROSSI, C. Q. A. et al. Adsorção de boro pelo solo: efeito da concentração e do pH. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2014. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/14985>. Acesso em: 16 fev. 2026.

SÁ, A. A. de. *Micronutrientes na agricultura brasileira: recomendações técnicas e manejo*. São Paulo: ANDA, 2016.

SAHA, B. et al. Boron fertilization strategies according to soil texture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 18, p. 1–12, 2018.

SANTOS, W.; GOLDBERG, S.; COSTA, A. Boron adsorption as affected by soil pH. *Soil Systems*, v. 4, 2020.

SARKAR, D.; MANDAL, B.; KUNDU, M. Boron deficiency in light-textured acidic soils. *Agrochimica*, v. 51, p. 1–10, 2007.

SHIREEN, F. et al. Boron: functions and approaches to enhance its availability in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 19, n. 7, p. 1856, 2018.

SUGANYA, A. et al. Factors affecting boron availability in soils: a review. 2019.

SZULC, W.; RUTKOWSKA, B. Boron accumulation in crops grown in sandy and loamy soils. *Plant, Soil and Environment*, v. 59, n. 2, p. 1–8, 2013.

TLILI, A. et al. Boron adsorption and fixation in soils under varying moisture conditions. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, 2019.

U.S. BORAX. Agronomy notes: boron reactions in soils. 2023. Disponível em: <https://agriculture.borax.com/resources/agronomy-notes/soil-and-crop-issues/boron-reactions-in-soils>. Acesso em: 16 fev. 2026.

U.S. BORAX. Soil tests for available boron. 2023. Disponível em: <https://agriculture.borax.com/resources/agronomy-notes/soil-and-crop-issues/soil-tests-for-available-boron>. Acesso em: 16 fev. 2026.

VARGAS-ALMENDRA, Adriana et al. Advances in Soybean Genetic Improvement. *Plants*, v. 13, n. 21, p. 3073, 2024. DOI: 10.3390/plants13213073.

VITTI, G. C.; VALE, D. W. Manejo da adubação com boro. In: SIMPÓSIO SOBRE BORO NA AGRICULTURA, 1., 2020, Piracicaba. Anais. Piracicaba: ESALQ/USP, 2020.