

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Modos e fontes de fertilização boratada: efeitos na fixação biológica de
nitrogênio e produção da soja**

Hugo Henrique Andrade Meneghette

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2023**

Hugo Henrique Andrade Meneghette
Engenheiro Agrônomo

Modos e fontes de fertilização boratada: efeitos na fixação biológica de nitrogênio e produção da soja

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAVRES JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Meneghette, Hugo Henrique Andrade

Modos e fontes de fertilização boratada: efeitos na fixação biológica de nitrogênio e produção da soja / Hugo Henrique Andrade Meneghette - - Piracicaba, 2023.

59 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Abundância natural 2. *Glycine max* L. Merr. 3. Nutrição mineral 4. Micronutriente I. Título

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 A cultura da soja	11
2.2 Fixação biológica de nitrogênio	13
2.3 Boro na agricultura	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Descrição experimental	19
3.2 Condução do experimento	20
3.3 Avaliações realizadas	21
3.3.1 Determinação do índice de clorofila, flavonoides, balanço de nitrogênio e das trocas gasosas	21
3.3.2 Determinação da composição química de nutrientes	22
3.3.3 Determinação de N total e quantificação da FBN	22
3.3.4 Número e massa de matéria seca de nódulos e de plantas em R2	23
3.3.5 Altura de plantas, massa de matéria seca na colheita e produção de grãos	23
3.4 Análise dos resultados	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49

RESUMO

Modos e fontes de fertilização boratada: efeitos na fixação biológica de nitrogênio e produção da soja

O entendimento dos mecanismos fisiológicos e nutricionais que modulam a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN) na agricultura é de suma importância para um desenvolvimento produtivo de forma sustentável. O exato papel fisiológico do boro no processo de FBN ainda é pouco explorado. Objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos dos modos e fontes de fertilização boratada na FBN e os impactos na produção de grãos e acúmulo de biomassa. O experimento foi realizado no ano de 2022, em casa de vegetação com um LATOSSOLO Vermelho-amarelo distrófico de textura arenosa, em delineamento experimental de blocos casualizados, com os tratamentos dispostos em esquema fatorial $3 \times 2 + 1$, com quatro repetições, sendo três formas de aplicação de B (100% solo; 50% solo + 50% foliar; 50% solo + 25% foliar + 25% reaplicação foliar) e duas fontes de B (H_3BO_3 e $Na_4BO_7 \cdot 5H_2O$), além de uma testemunha absoluta (-B). A composição química de tecidos foliares, as trocas gasosas, os índices de clorofila, flavonoides e de balanço de nitrogênio, a quantificação da eficiência FBN, nodulação e composição isotópica do ^{15}N ($\delta^{15}N$ ‰) foram avaliadas no estágio fenológico de R2. Na maturação plena da cultura, foram avaliados os parâmetros produtivos, estado nutricional das plantas, acúmulo de matéria seca das plantas e porcentagem de nitrogênio nos grãos derivado da FBN ($\delta^{15}N$ ‰). A concentração de boro e de potássio foliar foi reduzida pela aplicação de $Na_4BO_7 \cdot 5H_2O$, porém com incremento da massa de matéria seca da parte aérea, caracterizando efeito diluição. A aplicação do ácido bórico incrementou a produção de grãos e a concentração foliar de B. A FBN e o número de nódulos foram mais elevados quando se aplicou B de forma via solo e foliar, com reaplicação em R2. O suprimento adequado e eficiente de B influencia positivamente o processo de FBN, nodulação e metabolismo e acúmulo de N na soja, e, por consequência, o acúmulo de biomassa e produção de grãos.

Palavras-chave: Abundância natural, *Glycine max* L. Merr., Nutrição mineral, Micronutriente

ABSTRACT

Modes and sources of boron fertilization: effects on biological nitrogen fixation and soybean production

Understanding the physiological and nutritional mechanisms that modulate the efficiency of biological nitrogen fixation (BNF) in agriculture is of paramount importance for sustainable productive agriculture. The exact physiological role of B in the BNF still is little studied. The objective was to evaluate how BNF is modulated by the modes and sources of boron fertilization, as well as the impacts on grain yield and biomass accumulation. The experiment was carried out in 2022, in a greenhouse condition, with sandy textured LATOSSOLO Vermelho-amarelo, in a randomized block experimental design with treatments arranged in a 3x2+1 factorial scheme, with eight replications, with three forms of B application (100 % soil; 50% soil + 50% foliar; 50% soil + 25% foliar + 25% foliar reapplication) and two sources of B (H_3BO_3 and $Na_4BO_7 \cdot 5H_2O$), in addition to an absolute control (-B). In the phenological stage of R2, the chemical composition of leaf tissues, leaf gas exchange-parameters, chlorophyll, flavonoids, and nitrogen balance indexes and the quantification of FBN efficiency, nodulation, and leaf isotopic composition of ^{15}N ($\delta^{15}N\%$) were evaluated. At the physiological maturity of the culture, the productive parameters, nutritional status of the plants, accumulation of dry matter of the plants and percentage of nitrogen derived from BNF in the grains were evaluated ($\delta^{15}N\%$). Despite of the leaf boron and potassium concentrations were reduced by the application of $Na_4BO_7 \cdot 5H_2O$ – due to dilution effect -, the shoot dry matter mass was increased. The application of boric acid promoted higher grain production and B concentration in the leaves. BNF and number of nodules were higher when B was applied via soil and foliar, with reapplication at R2. The adequate and efficient supply of B positively influences the BNF process, nodulation and N metabolism as well as the accumulation of plants biomass and grain production.

Keywords: *Glycine max* L. Merr., Micronutrient, Mineral nutrition, Natural abundance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Médias obtidas para o índice de clorofila em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B	25
Figura 2 – Médias obtidas para o índice de flavonoides em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B	27
Figura 3 – Médias obtidas para o índice de balanço de nitrogênio em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B	28
Figura 4 – Médias calculadas para eficiência instantânea de uso de água (WUE) em plantas de soja em função de fontes e modos de aplicação de B	31
Figura 5 – Médias calculadas para eficiência instantânea de carboxilação (ICE) em plantas de soja em função de fontes e modos de aplicação de B	32
Figura 6 – Médias obtidas para a concentração de macronutrientes em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada	44
Figura 7 – Médias obtidas para a concentração de micronutrientes em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo dos tratamentos utilizados no delineamento experimental sendo fontes e modos de aplicação de B	20
Tabela 2 – Desdobramento da interação significativa para o índice de clorofila em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada	26
Tabela 3 – Médias obtidas para a avaliação dos parâmetros de trocas gasosas: taxa de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO ² (Ci) e taxa transpiratória (E) em plantas de soja no estágio R2 em função de fontes e modos de adubação boratada	29
Tabela 4 – Médias obtidas para altura de plantas (AP), massa seca de raiz em R2 (MSRR2), massa seca de raiz na colheita (MSRC) e massa seca de parte aérea em R2 (MSPAR2) e na colheita (MSPAC) de plantas de soja em função de fontes e modos de adubação boratada .	33
Tabela 5 – Desdobramento da interação significativa para a massa seca de parte aérea ao fim do ciclo produtivo de plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada	34
Tabela 6 – Médias obtidas para massa seca de nódulos (MN), número de nódulos (NN), número de vagens (NV) e produtividade de grãos de soja de em função de fontes e modos de adubação boratada	36
Tabela 7 – Desdobramento da interação significativa para a produção de grãos em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada	38
Tabela 8 – Médias obtidas para o acúmulo de nitrogênio (AN) na folha e no grão, porcentagem de N proveniente da fixação biológica de nitrogênio (FBN) em folhas (R2) e em grãos (R7), e concentração de boro (B) em plantas de soja em função de fontes e modos de adubação boratada.....	39
Tabela 9 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de nitrogênio em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada.....	39
Tabela 10 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de nitrogênio em grãos de soja em função das fontes e modos de adubação boratada.....	40
Tabela 11 – Desdobramento da interação significativa para o cálculo de FBN em grãos de soja em função das fontes e modos de adubação boratada.....	41
Tabela 12 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de boro em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada	42

1. INTRODUÇÃO

No sistema de produção de grandes culturas, a soja [*Glycine max* (L.) Merr] possui papel de destaque devido a sua área de ocupação e valor econômico agregado. A cultura é umas das principais *commodities* no cenário mundial, em que o complexo soja possui diversas finalidades industriais e apresenta alta demanda no setor pecuário (COLUSSI et al., 2016).

A introdução do processo de fixação biológica de N (FBN) no contexto produtivo da soja reflete um progresso tecnológico e sustentável significativo (BRITO et al., 2011). Bactérias diazotróficas utilizadas na agricultura no processo simbiótico entre planta e bactéria permitem agregar altos níveis de NH_3 para o sistema - transformado a partir de N_2 atmosférico -, sem a necessidade, na grande maioria dos casos, de utilização de quantidades expressivas de fertilizantes nitrogenados, perfazendo assim uma alternativa altamente eficiente e sustentável (MALAVOLTA, 1994; LAVRES et al., 2016).

Nesse contexto, o entendimento das dinâmicas e mecanismos fisiológicos que regem o estabelecimento, atividade e durabilidade da associação simbiótica no processo da FBN e a maneira como os nutrientes interagem nesse viés é de grande relevância para a agricultura moderna, visando um maior aproveitamento do potencial genético das culturas.

Muito se tem relatado na literatura sobre a atuação do boro (B) no metabolismo de N, inclusive em leguminosas, porém, pouco se sabe de forma detalhada como essa atividade a nível de metabolismo é desempenhada.

Dalton et al. (1986) verificaram em nódulos de soja que a deficiência de B foi limitante a atividade e produção de ácido ascórbico das células, o qual tem a função de proteger a nitrogenase contra espécies reativas de oxigênio (EROs). Segundo Azevedo et al. (2002), o B exerce papel estável no sistema vascular, que permite o transporte de nutrientes, água e fotoassimilados de duas vias entre o nódulo e a planta – via xilema e floema.

Yamagishi e Yamamoto (1994) mencionaram fortes alterações na fixação de N_2 em plantas de soja cultivadas em solo com baixa disponibilidade de B. Em espécies fixadoras de N que apresentem deficiência desse micronutriente, o número médio de rizóbios infectantes foram reduzidos e apresentaram mutações morfológicas (BOLAÑOS et al., 1996).

A baixa disponibilidade de B no solo em razão da baixa fertilidade natural de solos tropicais e da extração pelos cultivos constitui uma séria limitação para o desenvolvimento, em razão da baixa fertilidade natural de solos tropicais e da extração pelos cultivos (MOSCHINI; SILVA, 2018).

As quantidades relativamente baixas de B exigidas pelas culturas, em geral podem ser satisfeitas por meio da adubação foliar. Porém, a baixa mobilidade do B quanto à redistribuição nos tecidos vegetais pode constituir um desafio ao atendimento da exigência nutricional da cultura, fazendo com que sejam necessárias várias aplicações (MONTOVANI et al., 2013), quando os teores disponíveis de B no solo são baixos.

Sarkar, Mandal e Kundu (2007) apontam que a aplicação parcelada de B é benéfica para culturas com alta demanda de B durante o florescimento. Entretanto, o uso de produtos com baixa solubilidade pode não favorecer adequada disponibilidade para o atendimento da demanda inicial em B, comprometendo o estabelecimento da cultura e, por fim, reduzindo a produção (SILVA et al., 2018).

Diante do exposto, o presente trabalho parte da hipótese de que o suprimento adequado de B - em função do modo de aplicação: solo e foliar -, nos períodos fenológicos de maior demanda, independentemente das fontes, é efetivo para atender a demanda nutricional de B pelas plantas, com impacto positivo na nodulação, na fixação biológica de nitrogênio - evidenciado pela análise da abundância natural ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$ ‰) – e na produção de grãos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de modos e fontes de fertilização boratada em plantas de soja e investigar a dinâmica desse nutriente no processo de FBN, no metabolismo de N e produtividade das plantas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

No cenário global, a soja representa a principal oleaginosa em termos de produção e demanda, sendo importante tanto para o setor animal, através do farelo da soja, quanto para o consumo humano, através do óleo, além de diversos usos industriais. No Brasil, a partir dos anos 1970, a produção da soja passou a ter grande relevância para o agronegócio, notavelmente pela expansão das áreas cultivadas em todas as regiões do país e, principalmente, pelo incremento da produtividade em função da utilização de novas tecnologias (SILVA et al. 2011).

A soja foi uma das principais responsáveis pela introdução do conceito de agronegócio no país, não só pelo volume da atividade, mas também pela necessidade de capacitação empresarial por todas as partes envolvidas no negócio, desde o produtor até o receptor final do produto (BRUM et al., 2005).

O complexo soja compreende uma cadeia produtiva extensa e complexa que envolve desde a produção à campo até a transformação do produto voltada para a indústria de esmagamento, que processa a soja em farelo ou óleo para a exportação ou para consumo interno (GABBI, 2021).

A melhoria da competitividade da agricultura no Brasil nos últimos anos e o empenho do governo e da iniciativa privada em estimular e divulgar o produto agrícola brasileiro no exterior tem proporcionado aumento das exportações de produtos agrícolas (ANHOLETO; MASSUQUETTI). Para a soja, aproximadamente 63% da produção nacional é destinada à exportação (REZENDE, 2021).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a área cultivada com a cultura na safra de 2022/23 foi de aproximadamente 43.460 mil há, com produtividade média de 3.514 kg ha⁻¹, representando, respectivamente, um aumento de 4,7% e 16,1% em relação à safra passada, perfazendo uma produção total de 152.712,8 mil t.

A alta procura do grão é um fator estimulante para o desenvolvimento de pesquisas e obtenção de novas tecnologias, a fim de agregar valor ao produto e aumentar de forma significativa a produção por unidade de área (FRANCHINI et al., 2015).

Atualmente, a maioria da área plantada com soja é conduzida na forma de rotação com outras culturas e manejada sob sistema de plantio direto, que ganhou espaço no cenário agrícola nacional a partir do início da década de 90 (SILVA et al., 2022). Estes sistemas de rotação de culturas ocupam hoje mais de 33 Mha (RODRIGUES, 2021).

Segundo Sfredo (2008), a agricultura moderna exige o uso de insumos em quantidades adequadas, de modo a atender critérios econômicos e, ao mesmo tempo, conservar o solo, possibilitando manter ou elevar a produtividade das culturas.

Entre os principais responsáveis pela promoção do aumento de produtividade e tecnificação agrícola, destaca-se o avanço nos conhecimentos relacionados à fertilidade do solo e à nutrição de plantas (FAGERIA, 2001), principalmente quanto à elucidação de mecanismos e dinâmicas relacionadas a fixação biológica de nitrogênio (FBN), o metabolismo de nitrogênio (N) e o uso correto de micronutrientes na agricultura.

A FBN é um processo muito importante para a cultura da soja, pois constitui uma fonte renovável de N para os sistemas agrícolas, de forma totalmente sustentável e de baixo custo, possibilitando a dispensa da adubação nitrogenada de forma parcial ou até mesmo total (RESENDE, 2019).

O produtor deve prover os requerimentos para o pleno funcionamento do sistema simbiótico e metabólico da planta, garantindo seu estabelecimento e funcionamento pleno, que se refere ao manejo adequado do solo e água, uso correto de inoculantes, corretivos e fertilizantes, etapas de plantio e colheita de alta performance e eficiência, e etc, adequando a sistematização do manejo à plenitude das necessidades vegetais, principalmente sob o aspecto físico, ambiental, nutricional e biológico (MARTIN et al., 2022).

A soja é uma cultura muito exigente nutricionalmente. Para que os nutrientes possam ser eficientemente aproveitados pela cultura, devem estar presentes no solo em quantidades suficientes e em relações equilibradas (VENDRUSCULO; RAIMUNDO; SCHONINGER, 2020). A insuficiência ou o desequilíbrio entre os nutrientes pode resultar numa absorção deficiente de alguns e excessiva de outros nutrientes (MARIOTT, 2022).

Segundo Furlani et al. (2001), a soja é uma das culturas anuais mais exigentes em B, sendo comum a deficiência. A baixa disponibilidade de B no solo constitui uma séria limitação para o desenvolvimento de diversas culturas de interesse econômico, em razão da baixa fertilidade natural de solos tropicais e da extração pelos cultivos (MOSCHINI; SILVA, 2018).

De acordo com Silva et al. (2022) a absorção de nutrientes pela soja é medida pela quantidade acumuladas nas folhas e caules da planta e é crescente até atingir o ponto de máximo acúmulo próximo da formação e enchimento de grãos (R5), e a partir daí o acúmulo é decrescente devido à retranslocação dos nutrientes para os grãos em formação. Ainda segundo os autores, a maior velocidade de absorção ocorre no início do estágio R1 até R2, na floração das plantas. Esse período médio de 30 dias, entre o ponto de maior velocidade e o ponto de

máximo acúmulo, compreendido da floração ao enchimento de grãos, constitui o “período crítico” da cultura, onde fatores adversos como estiagem, carência nutricional, ataque de pragas e doenças podem reduzir drasticamente a produção de grãos.

2.2 Fixação biológica de nitrogênio

A FBN é um processo muito relevante, tanto no contexto da fertilidade dos solos e nutrição de plantas, como na redução dos possíveis impactos ambientais decorrentes da agricultura (MALAVOLTA, 1994; LAVRES et al., 2016).

A quebra da ligação tripla da molécula de nitrogênio nos nódulos e posterior formação de amônia é realizada em uma reação química catalisada pela enzima nitrogenase, utilizando como substrato a energia obtida do carbono fixado na fotossíntese pela planta e armazenada nas células na forma de ATP (HUNGRIA; NEVES; DÖBEREINER, 1989).

Todas as reações de troca de metabólitos entre as duas partes simbióticas (bacteróide e a planta) são realizadas através da membrana peribacteriana (MP), uma membrana de origem da planta que cerca os bacteróides fixadores de N dentro dos nódulos (WHITEHEAD; DAY, 1997).

Graças à essa maquinaria biológica e suas contribuições à agricultura moderna, muita economia financeira em razão da menor ou nula aquisição de fertilizantes nitrogenados foi gerada, aumentando a rentabilidade da atividade. Estima-se que, no mínimo, 75% do N demandado pela cultura da soja é derivado da FBN (Alves et al., 2002, 2006). Dado ao alto teor proteico dos grãos, aproximadamente 81% do N na parte aérea é exportado na colheita (ZAMBON, 2020).

Em termos práticos, os custos da FBN para a planta hospedeira são extremamente altos devido à ineficiência da atividade da nitrogenase e por todo custo auxiliar para o desenvolvimento e manutenção do nódulo, além do custo de assimilação e transporte de NH_4^+ . Uma estimativa de custos metabólicos da FBN indica custos acima de 28 moles ATP mol^{-1} N (SAARI; LUDDEN, 1986), excluindo-se os custos de formação nodular e transporte.

Assim, até 33% dos fotoassimilados da planta podem ser requeridos, quando o custo total da fixação simbiótica de N_2 e do transporte de NH_4^+ é considerado (MINCHIN et al., 1981), demonstrando que a fixação de N_2 atmosférico não é uma reação favorável energeticamente.

Para reduzir a molécula de N_2 , a atividade da nitrogenase se inicia com aquisição de elétron por uma Fe-proteína do doador ferredoxina ou flavodoxina, capazes de transferir um e dois elétrons, respectivamente (DIAS, 2018). Estes elétrons são transferidos da Fe-proteína

para a FeMo-proteína. A Fe-proteína, em adição ao *cluster* da proteína Fe-sulfúrica, teria duas moléculas de Mg-ATP associada a ela.

A redução da Fe-proteína possibilita a ligação com a MoFe-proteína. Em seguida um elétron é transferido da Fe-proteína para a MoFe-proteína com concomitante hidrólise de ambos os sítios ATP para ADP (SILVA, 2012).

Finalmente os dois componentes da nitrogenase são dissociados. A provável via de transferência de prótons tem sido identificada, mas a evolução de hidrogênio observada resulta da proporção desses elétrons e prótons desperdiçados antes de serem utilizados na redução de N₂ (BODDEY et al., 2007). A evolução de H₂ parece ser uma parte essencial do mecanismo de redução de N₂.

Uma vez que a amônia foi incorporada em glutamato e glutamina, estes dois aminoácidos servem como doadores de nitrogênio (doadores de amina e amida, respectivamente) para a síntese de todos os outros componentes nitrogenados, incluindo outros aminoácidos, ácidos nucleicos e metabólitos secundários, e é claro, utilizado diretamente em síntese de proteína.

Leguminosas podem ser agrupadas em três classes, dependendo da forma em que o N fixado biologicamente é exportado do nódulo: as que produzem aminoácidos, ou amida ou as que produzem ureídeos (CAMARGOS, 2002). Os exportadores de ureídeos, como a soja, transportam o N na forma de alantoína e ácido alantoico.

A síntese destes ureídeos é complexa e baseada na síntese e catabolismo parcial de purinas (ATKINS; SMITH, 2000). Em essência, nas células infectadas a glutamina derivada da atividade da glutamina sintetase (GS) é translocada para dentro dos plastídios de células infectadas, e a metade do N fixado termina em xantina, convertida para ácido úrico no citoplasma e transferido para uma célula adjacente não infectada, onde a síntese final de alantoína e ácido alantoico, ocorre no peroxissomos e retículo endoplasmático, respectivamente (THU et al., 2020).

Em termos de transporte, parece haver diferença entre a planta transportar N na forma amida ou de ureídeos, e isto depende da razão entre N:C dos componentes de transporte. Em alantoína e ácido alantoico a razão N:C é 1:1, enquanto em asparagina e glutamina é 1:2 e 2:5, respectivamente. Assim, ureídeos constituem um meio mais eficiente de transporte de N, mas em termos de custos de síntese e reassimilação, parece haver pouca diferença de custo energético entre os dois tipos de transporte (SPRENT; SPRENT, 1990).

Na simbiose com leguminosas, a regulação da fixação de N₂ em resposta ao N fixado disponível é mediada pela leguminosa hospedeira e não pelo simbionte bacteriano. Os

primeiros eventos de infecção na raiz produzem um sinal que é transmitido para a parte aérea e a parte aérea produz de volta um sinal igual que é transmitido para todas as raízes, e assim favorece o desenvolvimento dos nódulos (OKA-KIRA; KAWAGUCHI, 2006).

Parsons et al. (1993) sugerem que, além disso, a regulação do crescimento e atividade do nódulo é provocada pela concentração reduzida de componentes nitrogenados no floema. O mecanismo de *feedback* de N fornece uma explicação de como a planta pode regular o grau da infecção e a atividade e extensão da fixação de N₂ em nódulos.

Segundo Lopes et al. (2016), o N mineral do solo é geralmente um pouco mais enriquecido em ¹⁵N em comparação com a abundância deste isótopo natural no N₂ atmosférico. Em estudos que utilizam esta técnica, a abundância isotópica é expressa em unidades de delta ($\delta^{15}\text{N}$). Assim, uma unidade delta equivale a 0,0003663% de átomos de ¹⁵N em excesso.

As plantas que fixam 100% do N do ar teriam 0,0% de átomos de ¹⁵N em excesso, ou 0 delta. Plantas que não são capazes de apenas acumulam N derivado do solo, normalmente apresentam tecidos com sinal positivo em ¹⁵N. A partir dessa diferença, pode-se então distinguir a proporção entre o N fixado do ar e o N do solo que estão presentes no tecido vegetal (BRITO; MURAOKA; SILVA, 2009).

Valores negativos de ¹⁵N são comumente observados na parte aérea de muitas espécies leguminosas quando o seu crescimento é inteiramente dependente da fixação de N₂ indicando uma distribuição diferenciada na planta do ¹⁵N durante o processo de fixação de N₂ (GUIMARÃES, 2010).

2.3 Boro na agricultura

Em 1923, uma publicação de Warrington apontou que o elemento boro satisfazia os critérios de essencialidade, logo devendo ser classificado como nutriente de plantas. Durante 75 anos a função deste nutriente não tinha sido devidamente estabelecida e provada, sendo uma incógnita para a agricultura.

Apenas em 1996 sua função foi determinada tanto em plantas vasculares como em algas. Ainda se acredita que as funções do B em plantas superiores não estão completamente estabelecidas (LEWIS, 2019), porém, sabe-se que seu papel estrutural na parede celular é importante (BISSOTO, 2022).

Não obstante, o B está relacionado a muitos outros processos fisiológicos do vegetal além da síntese e estruturação da parede celular, como lignificação, metabolismo de carboidratos, metabolismo de RNA, respiração celular, metabolismo de AIA, metabolismo

fenólico, metabolismo de ascorbato, manutenção da integridade da membrana plasmática, germinação do grão de pólen e no desenvolvimento do tubo polínico e metabolismo de N (LEWIS, 1980; MALAVOLTA, 1980; BOLAÑOS et al., 1996; BROWN; HU, 1996).

A literatura cita que o B está envolvido no metabolismo do N e tanto a deficiência quanto a toxidez de B podem reduzir a atividade da redutase do nitrato, provavelmente como consequência da desorganização e perda da função da membrana celular (CERVILLA et al., 2009). Ainda, a deficiência de B pode influenciar na fotossíntese, resultando em baixa produtividade quântica e menor eficiência do PS II, provavelmente como resultado da peroxidação lipídica nas membranas do tilacóide, devido ao aumento da concentração de compostos fenólicos (LEHTO et al., 2010).

A diversidade de processos metabólicos afetados pelo B pode resultar em efeito pleiotrópico durante o desenvolvimento vegetal quando submetido a condições de deficiência desse micronutriente (BONILLA; BOLAÑOS, 2009).

Notavelmente, a exigência nutricional das plantas cultivadas torna-se, em geral, mais intensa com o início da fase reprodutiva, pois as lavouras encontram-se em pleno desenvolvimento vegetativo, somado à forte demanda por nutrientes para a formação das estruturas reprodutivas (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). Malavolta (2006) enfatiza que o B aumenta o pegamento de flores e a granação em diferentes culturas, e propicia menor esterilidade masculina e menor chochamento de grãos.

A adubação boratada na soja vem ganhando destaque no sistema produtivo brasileiro (HANSEL; OLIVEIRA, 2016), devido ao maior investimento em pesquisas e o esforço coletivo para elucidação dos mecanismos e dinâmicas desse nutriente controverso, e o seu potencial no aumento da produtividade de lavouras (BISSOTO, 2022).

Devido as baixas quantidades de B exigidas pelas culturas, a adubação via foliar pode ser uma estratégia de manejo nutricional eficiente, podendo ser realizada em conjunto com outras operações, como a pulverização, podendo contribuir para a redução de custos operacionais concomitantemente ao fornecimento deste micronutriente.

Ao contrário da adubação com micronutrientes via solo, a adubação foliar possibilita aplicações mais uniformes por unidade de área, com menor segregação dos componentes do fertilizante e propiciando respostas relativamente mais rápidas, mesmo em lavouras que encontram se em fases mais avançadas de desenvolvimento (CERUTTI et al., 2019).

Não há um consenso quanto a melhor época e forma de aplicação do boro na soja, no entanto muitos estudos vem mostrando efeito positivo quando aplicado na época de floração, reduzindo a chance de abortamento floral (BEVILAQUA et al., 2002). Todavia, cabe

mencionar que o boro apresenta mobilidade restrita quanto à redistribuição - via floema – para muitas espécies vegetais e, portanto, a adubação foliar deverá ser uma suplementação da adubação via solo, garantindo o atendimento da exigência nutricional do elemento às plantas, em fase fenológica de alta demanda – geralmente o período reprodutivo.

Segundo Pinho et al. (2009), solos tropicais, particularmente os de textura arenosa e com baixa disponibilidade de matéria orgânica ou de baixa CTC, tendem a apresentar baixa disponibilidade de B, o que pode vir a provocar grandes perdas de produtividade em diferentes culturas de interesse econômico (TOMICIOLI et al., 2020). Desse modo, o conhecimento da dinâmica no solo de diferentes fertilizantes boratados é de grande importância para o fornecimento adequado desse nutriente ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

A absorção de B é dependente do teor de B na solução. Por sua vez, o teor de B na solução é dependente de dois fundamentais processos: lixiviação e adsorção. Segundo Soares et al. (2005), pH, granulometria do solo e a prática de calagem são os fatores que mais influenciam a adsorção e lixiviação de B. Dessa forma, o comportamento dos diversos fertilizantes boratados é objeto de pesquisa, principalmente quanto à solubilização e dissociação, influenciando diretamente na quantidade de B disponível para as plantas.

Assim, insumos de rápida e intensa solubilização podem ser mais efetivos em correção de deficiências, ao passo que insumos de lenta e gradual solubilização podem vir a ser mais indicados para fins de fertilização corretiva (MALAVOLTA, 2006). Ressalva-se que, o suprimento imediato de altas quantidades de B para as culturas pode causar desequilíbrio nutricional e manifestação de sintomas de toxicidade (LEHTO et al., 2010).

Byers et al. (2001), estudando a nutrição de B em alfafa cultivada em condições controladas, constataram que a concentração de B na parte aérea foi maior com o uso de fontes solúveis, como o bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – solubilidade em água: $26,5 \text{ g L}^{-1}$), e atribuíram que esse tipo de fonte apresenta melhor performance em condições cuja lixiviação do elemento no solo não é significativa.

Por outro, em solos arenosos, em que há maior probabilidade de lixiviação de B, fontes menos solúveis, (e.g., ulexita $[\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})]$ - solubilidade em água: $10,9 \text{ g L}^{-1}$), mostram-se mais eficientes no fornecimento do micronutriente para as plantas (PAGE & COOPER, 1955).

Brennan et al. (2015) compararam o efeito de fertilizantes boratados de liberação rápida e lenta ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ e $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$, respectivamente), via solo e via foliar, nas culturas da canola e lúpulo. Observaram que quando fontes de liberação rápida foram

utilizadas em ambas as modalidades de aplicação, ocorreram sintomas de toxicidade e, conseqüentemente, redução na produtividade.

No Brasil, por ser uma fonte barata e de fácil acesso, o ácido bórico (H_3BO_3 - solubilidade em água: $47,2 \text{ g L}^{-1}$) é amplamente utilizado na agricultura, tanto em fertilização via solo quanto via foliar em diversos ambientes de produção (BRIGHENTI et al., 2006).

Segundo Mascarenhas et al. (1988), a deficiência de B desorganiza os vasos condutores, diminui a germinação do grão de pólen e o crescimento do tubo polínico. Em função da baixa mobilidade no floema, os sintomas de deficiência se manifestam inicialmente nos tecidos jovens e recém-formados. A toxicidade de B caracteriza-se pelo aparecimento de manchas pardas nos bordos das folhas, progredindo para a necrose das margens e pontuações internervais, o encarquilhamento das folhas mais velhas, encurtando os internódios e causando a morte da gema apical (SFREDO, 2008).

Comparativamente com trabalhos relacionados a macronutrientes, poucas informações são encontradas na literatura para micronutrientes, inclusive para o B. Dessa forma, em vista das lacunas ainda existentes em relação à adubação boratada, torna-se importante conhecer a resposta de diferentes fontes, doses, épocas e métodos a serem aplicados na cultura da soja.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição experimental

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação localizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), durante o ano de 2022. O solo utilizado foi classificado como LATOSSOLO Vermelho-amarelo distrófico de textura arenosa (EMBRAPA, 2018), coletado em área não cultivada, previamente selecionado por apresentar baixos teores disponíveis de B.

A caracterização química do solo referente a camada de 0,0 – 0,20m de profundidade, previamente à adubação e correção, segundo a metodologia de (RAIJ et al., 2001), teve como resultado: pH (CaCl₂): 4,2; M.O. (g dm⁻³): 5; P (Mehlich-1) (mg dm⁻³): 2; S-SO₄(mg dm⁻³): 6; K (mmolc dm⁻³): 0,3; Ca (mmolc dm⁻³): 1; Mg (mmolc dm⁻³): 1; H+Al (mmolc dm⁻³): 25; Al (mmolc dm⁻³):3; SB (mmolc dm⁻³): 2; CTC (mmolc dm⁻³): 27; V%: 8; m%: 57; Cu (mg dm⁻³): 0,6 Fe (mg dm⁻³): 33; Zn (mg dm⁻³): 0,8; Mn (mg dm⁻³): 0,8; B (mg dm⁻³): 0,14 – teor baixo (RAIJ et al., 1996).

Foi utilizado o cultivar TMG2158 IPRO, que apresenta como características ciclo médio entre 120 e 135 dias, desenvolvimento de tipo indeterminado e pertencente ao grupo de maturação relativa de 6,5. Os vasos utilizados tinham capacidade de 5 L, onde foram semeadas quatro sementes por vaso e realizados os desbastes para obter duas plantas por vasos.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos totalmente casualizados (DBC) com os tratamentos dispostos em esquema fatorial duplo com tratamento adicional na ordem de 3 x 2 + 1, sendo três formas de adubação borratada (i: 100% solo, ii: 50% solo + 50% foliar em V4, iii: 50% solo + 50% foliar em duas aplicações [V4 e R1]), duas fontes compatíveis para utilização via solo e foliar [ácido bórico (H₃BO₃) e tetraborato de sódio (Na₂B₄O₇.5H₂O)] aplicadas na dose recomendada por literatura (1,5 kg ha⁻¹) (EMBRAPA, 2013), e um controle absoluto (-B) (Tabela 1).

O experimento foi composto por oito repetições, em que plantas de quatro repetições foram conduzidas até atingirem o florescimento (R2; FEHR & CAVINISS, 1971), a fim de avaliar os parâmetros fotossintéticos, nutricionais e referentes a nodulação, e as demais plantas de quatro repetições restantes avaliadas durante a maturidade fisiológica (R6; FEHR & CAVINISS, 1971), para fins de avaliação da produção e caracterização da composição química dos grãos.

Tabela 1 - Modelo dos tratamentos utilizados no delineamento experimental sendo fontes e modos de aplicação de B

Tratamentos	Modo de aplicação	Fonte de B
T1	Solo (100%)	H ₃ BO ₃
T2	Solo (100%)	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O
T3	Solo (50%) + Foliar (50%)	H ₃ BO ₃
T4	Solo (50%) + Foliar (50%)	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O
T5	Solo (50%) + Foliar (25%) (x2)	H ₃ BO ₃
T6	Solo (50%) + Foliar (25%) (x2)	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O
T7	Controle absoluto (-B)	

Fonte: Próprio autor.

3.2 Condução do experimento

A adubação de fundação com os macronutrientes N, P, K, S e micronutrientes – com exceção do B - foi realizada como preconiza a literatura (NOVAES, 1991), e posteriormente incorporados e homogeneizados. Para o fornecimento adequado de N, as sementes de soja foram inoculadas com bactérias fixadoras de N₂ (*Bradyrhizobium japonicum* – estirpe SEMIA 5079, *Bradyrhizobium elkanii* – estirpe SEMIA 5019). Ainda, para assegurar um bom desenvolvimento inicial de plantas, foi adicionado ao solo uma pequena dose de ureia, na ordem de 20 mg dm⁻³, como preconiza a literatura (HATFIELD et al., 1974; PIEROZAN et al., 2015).

A aplicação de calcário agrícola (CaCO₃) foi realizada de forma individual em cada parcela, a fim de se elevar a saturação por bases no solo (V%) a 70%, ficando incubados por 45 dias. A variação de pH resultante desse procedimento foi de 1,6. O fornecimento de K foi realizado de forma parcelada, em que 1/3 da dose foi aplicada na semeadura e 2/3 aplicados em cobertura aos 40 dias após a semeadura (DAS).

Os tratamentos que compreendem aplicação de B via solo foram realizados juntamente a adubação de fundação, visando praticidade. As aplicações foliares foram realizadas no estágio vegetativo V4 e a reaplicação em R1 (FEHR & CAVINISS, 1971), sendo realizadas com o auxílio de um pulverizador manual. Para evitar que a solução de ácido bórico escorresse para o substrato e fosse absorvida pela raiz, mascarando assim os resultados,

superfícies plásticas cuidadosamente atadas ao caule das plantas foram colocadas em cada vaso no momento da aplicação (DEUNER et al., 2008).

Após a correção e adubação inicial amostras de solo dos vasos foram coletadas e analisadas quimicamente, sendo os resultados: pH (CaCl₂): 5,6; M.O. (g dm⁻³): 9; P (Mehlich¹) (mg dm⁻³): 17,9; S-SO₄(mg dm⁻³): 44; K (mmolc dm⁻³): 3,9; Ca (mmolc dm⁻³): 23; Mg (mmolc dm⁻³): 7; H+Al (mmolc dm⁻³): 14; Al (mmolc dm⁻³): 0; SB (mmolc dm⁻³): 34; CTC (mmolc dm⁻³): 47; V%: 69; m%: 0; Cu (mg dm⁻³): 2; Fe (mg dm⁻³): 38; Zn (mg dm⁻³): 3,1; Mn (mg dm⁻³): 4,3; B (mg dm⁻³): 0,25 – teor médio (RAIJ et al., 1996).

O plantio do experimento foi realizado em 10 de janeiro de 2022. Os tratos culturais, bem como o controle fitossanitário foi realizado de acordo com as necessidades da cultura. As irrigações foram realizadas diariamente com água deionizada, mantendo a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

Uma espécie não noduladora foi cultivada no mesmo solo utilizado no experimento (arroz [*Oryza sativa* L.]), servindo como referencial quantitativo para indicar a abundância natural de ¹⁵N no solo (PEOPLES et al., 1989; BODDEY et al., 2001; BRITO et al., 2009; LAVRES et al., 2016).

A primeira etapa de coleta de amostras foi em ocasião do florescimento pleno das plantas (R2), amostrando-se o terceiro trifólio totalmente expandido do ápice das plantas – para as avaliações nutricionais -, bem como os nódulos radiculares – avaliação da massa de matéria seca e número total de nódulos. Nesse estágio também foram realizadas avaliações morfofisiológicas e de eficiência fotossintética diretamente nas plantas “in vivo”. A segunda etapa de coleta de material vegetal foi no estágio fenológico R7 (FEHR & CAVINISS, 1971). Portanto, foram colhidos os grãos produzidos em cada vaso, bem como a parte aérea – folhas, hastes - e raízes em cada vaso.

3.3 Avaliações realizadas

3.3.1 Determinação do índice de clorofila, flavonoides, balanço de nitrogênio e das trocas gasosas

Foi realizada a quantificação não destrutiva dos índices de clorofila, flavonoides e balanço de nitrogênio (NBI) utilizando o analisador de folhas portátil Force-A (Dualex®, França). As leituras foram realizadas utilizando o terço médio da planta diagnose, no período da manhã, quando as plantas atingiram o estágio fenológico R2, a fim de contemplar o pico de fotossíntese da cultura (DORNHOF & SHIBLES, 1970; KOLLER, NYQUIST & CHORUSH, 1986). Foram computadas em média de 20 leituras por planta. Ademais, as

medições de condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) e transpiração (E) foram realizadas em folhas totalmente expandidas, entre as 7:00 e 09:00 horas da manhã, por meio do analisador a gás infravermelho portátil (IRGA), *LI 6400 XT Portable Photosynthesis System (LI-COR, Lincoln, NE, USA)*, utilizando uma fonte luminosa fixa em 1000 mmol m⁻² s⁻¹ de intensidade de fluxo fotólico. Também, foi calculado o índice de eficiência de uso de água (WUE) (A/E) e índice de eficiência instantânea de carboxilação (ICE) (A/Ci).

3.3.2 Determinação da composição química de nutrientes

As amostras de folhas coletadas, devidamente estratificadas e identificadas, foram acondicionadas em sacos de papel, secas em estufa a 65°C durante 72 horas e pesadas em balança de precisão. Posteriormente, foram trituradas em moinho tipo Willey e enviado para o laboratório para a determinação das concentrações de macro e micronutrientes, conforme metodologia descrita em Malavolta et al. (1997). O procedimento de análise química de nutrientes foi novamente realizado nos grãos produzidos, na ocasião da colheita das plantas (estádio fenológico R7 – maturação plena (FEHR & CAVINSS, 1971).

3.3.3 Determinação de N total e quantificação da FBN

Foi empregada a técnica da abundância natural de ¹⁵N (TRIVELIN et al., 1984; SHEARER; KOHL, 1986) para quantificar a FBN, quando as plantas atingiram o estágio fenológico R2 e em R7 (grãos). Esse método tem como premissa fundamental que o N do solo, geralmente, tende a ser levemente enriquecido com o isótopo ¹⁵N quando comparado a concentrações de N₂ do ar. O N do ar apresenta cerca de 0,3663% de ¹⁵N e o restante (99,6337%) de ¹⁴N (BODDEY et al., 2001). A proporção de N das plantas fixadoras de N₂ provenientes do ar pelo processo da FBN foi calculada pela equação de Shearer & Kohl (1986):

$$\%FBN = 100 \times \frac{(\delta^{15}N \text{ referência} - \delta^{15}N \text{ soja})}{\delta^{15}N \text{ referência} - B} \quad (1)$$

Em que:

- %FBN: porcentagem de N proveniente da FBN na planta de soja;
- $\delta^{15}N$ referência: Abundância natural de ¹⁵N na planta referência (não fixadora de N);
- $\delta^{15}N$ soja: Abundância natural de ¹⁵N na soja.

- B: valor de fracionamento do ^{15}N em relação ao ^{14}N pela planta de soja ao absorver N do solo. Neste experimento, será usado o valor médio de -1.17 ‰ com bases nos dados obtidos por Guimarães et al. (2008).

3.3.4 Número e massa de matéria seca de nódulos e de plantas em R2

As plantas coletadas em R2 tiveram seus nódulos destacados do sistema radicular e contados. As plantas foram separadas em parte aérea e parte radicular. A quantificação da massa de matéria seca tanto de plantas quanto de nódulos foi obtida por pesagem após a alocação em estufa, a 65 °C por 48 h.

3.3.5 Altura de plantas, massa de matéria seca na colheita e produção de grãos

Por ocasião da colheita da soja, foram determinados o acúmulo de biomassa e produtividade de grãos e altura de plantas com auxílio de uma régua. Para a determinação da produtividade, as vagens produzidas foram colhidas, identificadas, contadas e secas para se realizar a limpeza e trilhagem manual. Os grãos foram pesados em balança analítica e expressaram a produção em g vaso⁻¹. As plantas foram secas em estufa de circulação forçada por 72h e pesadas para quantificação biomassa produzida.

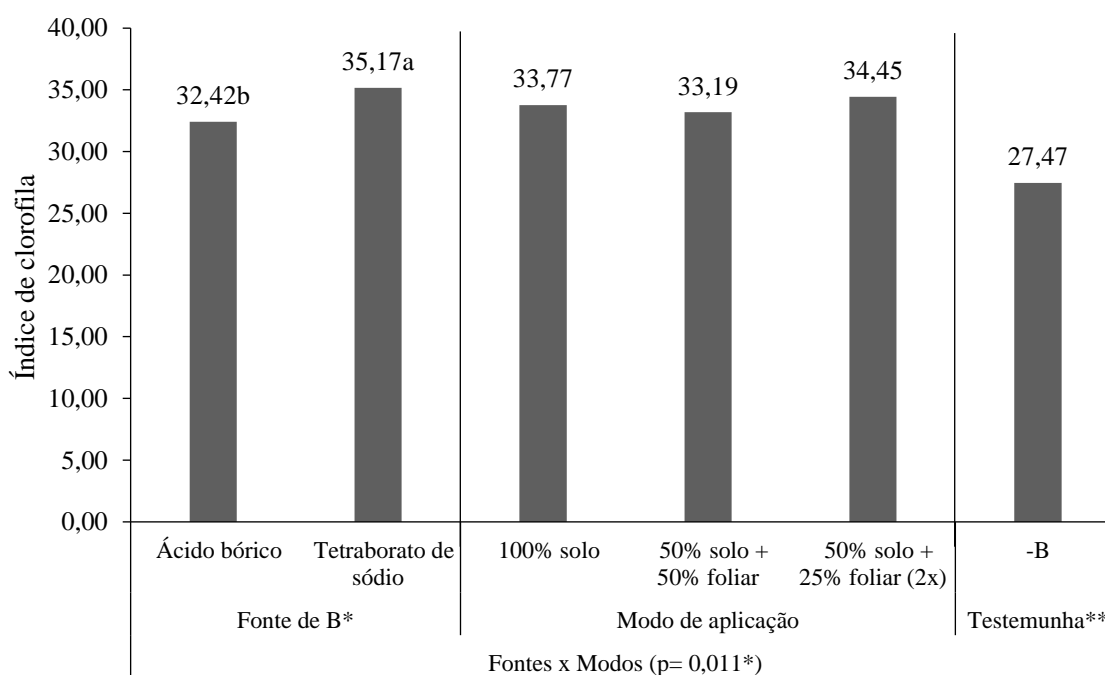
3.4 Análise dos resultados

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, e em seguida a análise de variância individual ANOVA pelo teste F ($p \leq 0,05$) e de acordo com o nível de significância no teste F para os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para os tratamentos entre si e pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) para os tratamentos em comparação à testemunha. A análise estatística foi realizada utilizando o software AGROESTAT® (BARBOSA & MALDONADO, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para o índice de clorofila na avaliação com o analisador de folhas “Force-A” (Dualex®) em R2 apontaram a interação para o conjunto dos tratamentos como significativa, como também para as fontes isoladas e para a testemunha (Figura 1). Altos valores de clorofila são desejáveis pois este é o principal pigmento responsável pela captação de energia luminosa, além de ser um componente crucial para eficácia do maquinária fotossintética e crescimento vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2017). Frequentemente o teor de clorofila está relacionado à concentração de N, que, no caso da soja, pode ser influenciado pela FBN (GELAIN et al., 2011).

Figura 1 – Médias obtidas para o índice de clorofila em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B



*; ** Diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e ($p \leq 0,01$), respectivamente.

Barras seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor.

No estudo do desdobramento da interação (Tabela 2), é possível inferir que o uso de tetraborato de sódio em comparação ao de ácido bórico como fonte de B propiciou os maiores valores médios para o índice de clorofila na aplicação realizada de forma conjunta (solo + foliar) e ainda maior incremento com o parcelamento da dose foliar. Todos os valores encontrados para os tratamentos do fatorial foram superiores à testemunha, que possivelmente foi prejudicada pela baixa disponibilidade de B no solo (teor disponível de $0,25 \text{ mg dm}^{-3}$).

Tabela 2 – Desdobramento da interação significativa para o índice de clorofila em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada

Fonte de Variação		Fonte de B	
Modo de aplicação	Ácido bórico	Tetraborato de sódio	
100% solo	35,16aA*	32,37aB*	
50% solo + 50% foliar	30,75bA*	35,61aAB*	
50% solo + 25% foliar (2x)	31,34bA*	37,55aA*	
Testemunha		27,47	
DMS AdB	4,24		
DMS BdA	5,51		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

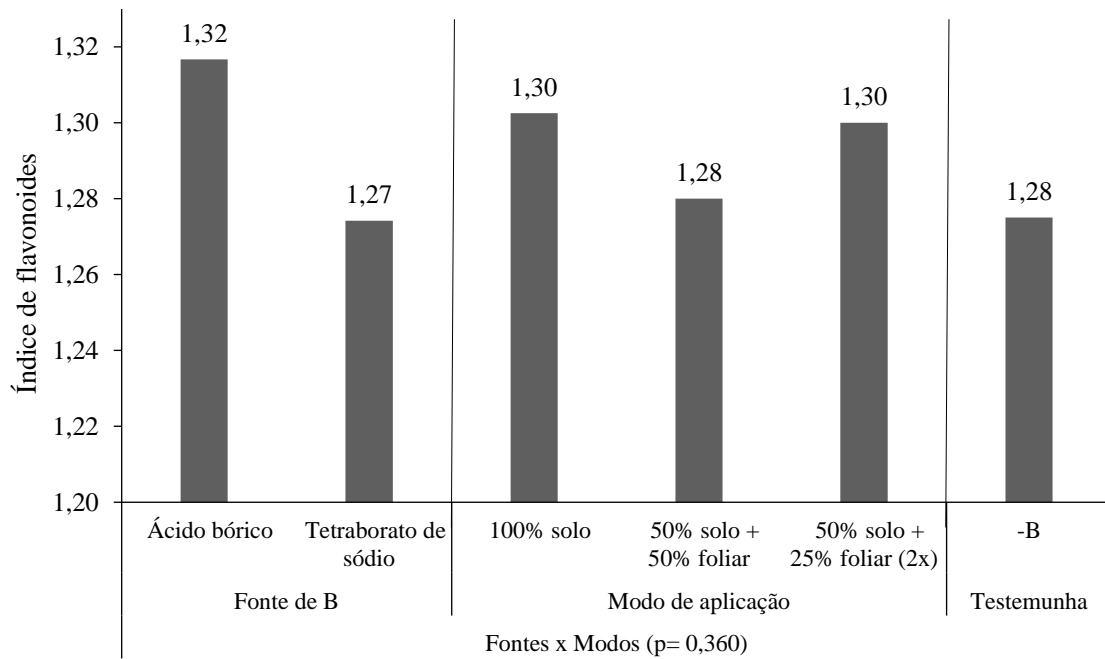
Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Wimmer e Eichert (2013) apontam que a baixa disponibilidade de B prejudica a fotossíntese pela redução na concentração de clorofila e/ou a capacidade fotossintética do fotossistema II em função de danos na membrana por elevação dos níveis de espécies reativas de oxigênio (EROs) ou por regulação *feedback* devido ao acúmulo de amido e açúcares nas folhas, que pode ser consequência de danos no floema e limitações na translocação de fotoasssimilados (ROSOLEM; LEITE, 2007; HAJIBOLAND et al., 2012).

O índice de flavonoides não apresentou diferença estatística para os tratamentos em estudo (Figura 2), para a interação ou para a testemunha. Valores absolutos levemente mais elevados foram observados para o uso de ácido bórico. Salienta-se que os valores para o índice de flavonoides são calculados de forma indireta e variam na escala de 0,0 a 3,5 e valores entre 1,0 e 2,0 são usualmente os mais encontrados, principalmente na cultura da soja (ZORAN et al., 2012; MINÕ, 2020; NEUGART; TOBLER; BARNES, 2021).

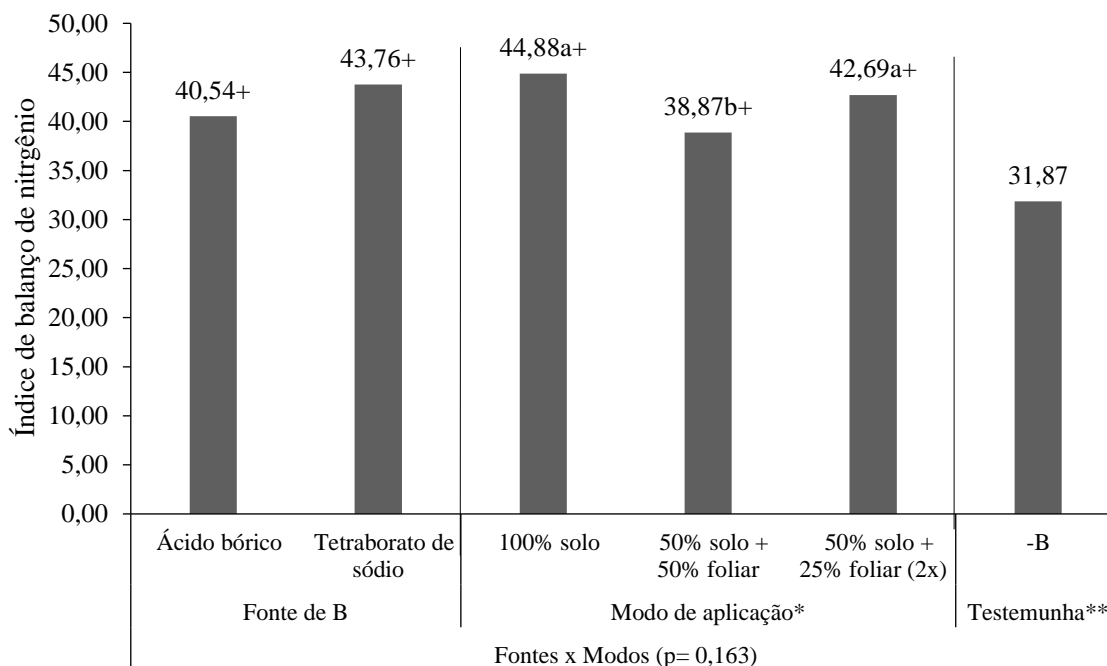
Figura 2 – Médias obtidas para o índice de flavonoides em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B



Fonte: Próprio autor.

O índice de balanço de nitrogênio (Figura 3) respondeu significativamente para os modos de aplicação, em que a adubação 100% via solo e a 50% via solo e 50% via foliar feita em duas aplicações tiveram médias mais elevadas. Nesse parâmetro, tanto as fontes de B, como os modos de aplicação diferiram em relação à testemunha, apresentando valores superiores. Não foi constatada interação entre as fontes de variação.

Figura 3 – Médias obtidas para o índice de balanço de nitrogênio em folhas de soja no estágio R2 em função das fontes e modos de aplicação de B



*; ** Diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e ($p \leq 0,01$), respectivamente.

Barras seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey.

Barras seguidas de + diferem da testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

De acordo com avaliação de trocas gasosas, a forma de aplicação afetou a taxa de fotossíntese líquida (A) (Tabela 3), na qual a forma de aplicação da dose de B entre solo e foliar e o parcelamento da dose foliar promoveram resultados superiores. Comportamento similar é observado para a concentração interna de CO_2 (C_i) (Tabela 3), além da constatação que o tetraborato foi superior como fonte e que é meritório a redução do acúmulo de CO_2 na câmara subestomática em relação à testemunha. Alinhados os fatos, é certo que com o aumento da taxa fotossintética ocorra redução da concentração interna de CO_2 em razão do consumo e fixação, potencialmente elevando o acúmulo de fitomassa, como o observado a seguir.

Ainda que os tratamentos não tenham influenciado a condutância estomática (gs) em nenhum nível (Tabela 3), a taxa transpiratória (E) incidiu na mesma tendência observada para fotossíntese líquida e concentração de gás carbônico, em que a aplicação totalmente via solo foi inferior, até mesmo que a testemunha quando observado números absolutos (Tabela 3).

Tabela 3 – Médias obtidas para a avaliação dos parâmetros de trocas gasosas: taxa de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO² (Ci) e taxa transpiratória (E) em plantas de soja no estádio R2 em função de fontes e modos de adubação boratada

Fontes de Variação	A μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	Ci mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	gs mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	E mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Fonte de B (B)				
Ácido bórico	19,28	291,63b ⁺	0,63	6,79
Tetraborato de sódio	20,79	278,86a ⁺	0,59	6,95
Modo de aplicação (M)				
100% solo	17,55b	293,89b ⁺	0,69	5,70b
50% solo + 50% foliar	20,87a	282,80a ⁺	0,59	7,11a
50% solo + 25% foliar (2x)	21,69a	279,05a ⁺	0,56	7,80a
Ausência de B (T)				
	18,03	333,64	0,51	6,66
<i>Teste F (valor de p)</i>				
B	0,176	0,001**	0,329	0,756
M	0,017*	0,007**	0,052	0,017*
B x M	0,186	0,141	0,063	0,223
T	0,175	0,000**	0,095	0,767
Média geral	19,74	292,16	0,60	6,84
Média do fatorial	20,03	285,25	0,62	6,87
C.V. (%)	11,29	2,42	15,23	15,88

Médias seguidas de * e ** diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% e 1% de significância, respectivamente.

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de + diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

O B entra em contato com as raízes por fluxo de massa que por sua vez é dependente da corrente respiratória. A manutenção da condutividade hidráulica e o status hídrica é efeito da adequada estruturação celular. Como o funcionamento do B no vegetal está ligado à formação e integridade de parede e membrana celular, situações de não fornecimento ou de baixa disponibilidade no solo podem ser limitantes para a formação dos vasos condutores, em especial o xilema, prejudicando de forma retroativa a sua própria absorção e movimento, além de reduzir a taxa transpiratória (MACHO-RIVERO et al., 2018). Ademais, não se pode descartar que as aquaporinas, cuja expressão é responsiva ao fornecimento de B, estão envolvidas nas relações de transporte de água.

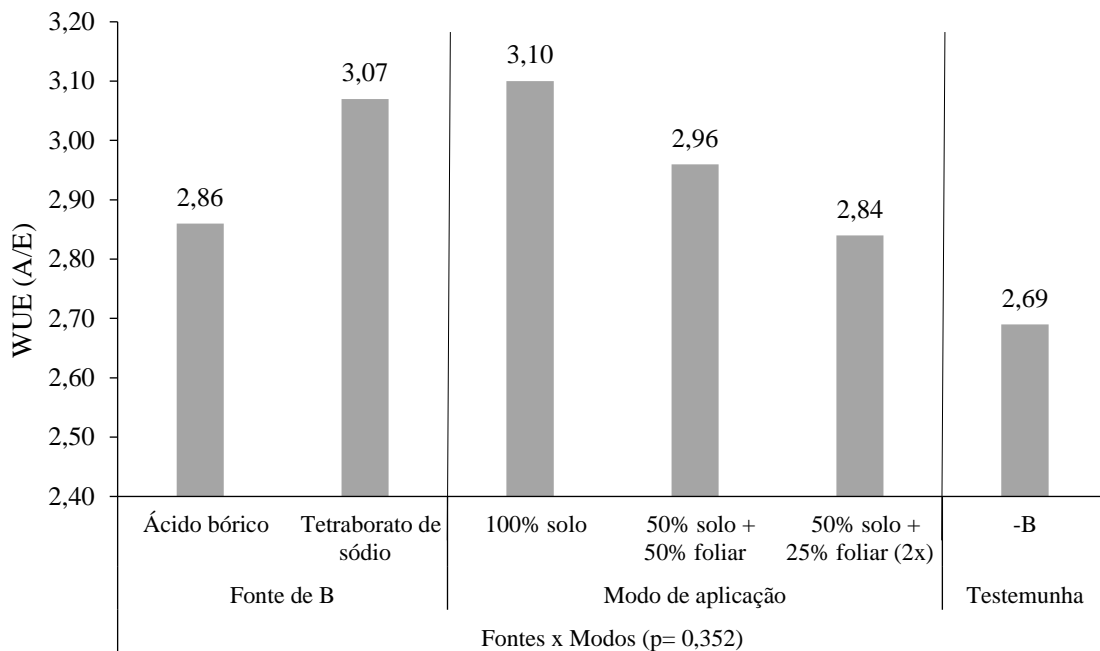
O fechamento estomático é um mecanismo limitador para a taxa de fotossíntese e é essencial quando há condições ambientais adversas (PAPADAKIS et al., 2014). Tem-se que a taxa de transpiração é reduzida em condições de deficiência de B, mesmo quando há boa

disponibilidade hídrica. Limitações estomáticas podem ocorrer se células guardas estão com redução em seu número ou apresentam dano estrutural, dificultando a abertura normal (WILL, et al., 2012). Essa redução da condutância estomática não foi observada neste trabalho.

Os tratamentos que receberam B via solo, foram, no geral, inferiores para as avaliações de trocas gasosas, talvez por uma pequena elevação seguida de restrição do pleno funcionamento, ocasionado pelo possível efeito fitotóxico do acúmulo progressivo de B em razão de sua disponibilização constante e em maior quantidade em contato com o sistema radicular, resultando em danos no desenvolvimento da soja, como observado durante a condução do experimento.

Nenhuma diferença foi percebida pelo teste F para a eficiência instantânea de uso de água (WUE) (Figura 4). Essa medida avalia a relação direta entre as taxas de fotossíntese líquida e de transpiração, e relaciona a quantia de carbono possivelmente assimilado à quantia de água evaporada via corrente respiratória pelos estômatos (TAIZ; ZEIGER, 2017). A depender da interação entre as variáveis coletadas, essa medida pode complementar o entendimento do processo morfofisiológico por trás dos efeitos dos tratamentos na fotossíntese. Porém, medidas instantâneas de trocas gasosas podem não refletir o real desempenho da planta ao longo do tempo e, portanto, devem ser consideradas cautelosamente (COELHO FILHO et al., 2011).

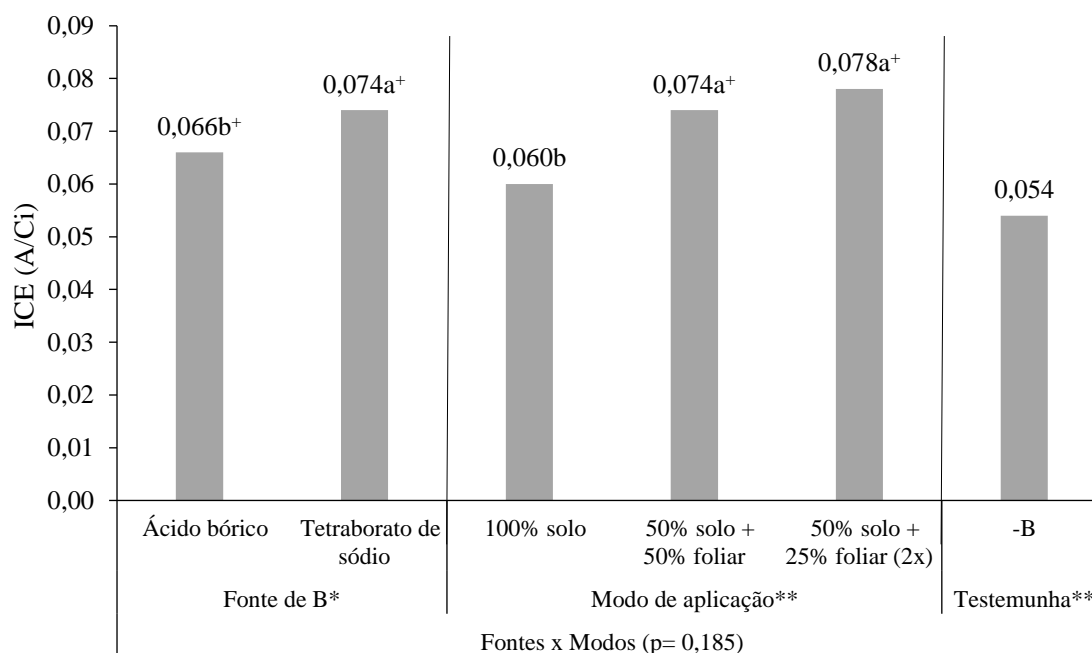
Figura 4 – Médias calculadas para eficiência instantânea de uso de água (WUE) em plantas de soja em função de fontes e modos de aplicação de B



Fonte: Próprio autor.

A eficiência instantânea de carboxilação (ICE) foi alterada pelos tratamentos (Figura 5). Nota-se que o emprego de tetraborato possibilitou maiores médias. A aplicação integralmente via solo expressou os menores valores, sendo o único tratamento a não diferir da testemunha pelo teste de Dunnett. O tratamento de maior eficiência observada foi a divisão da dose com aplicação foliar e no solo, com valor 44% superior à testemunha e 30% ao tratamento via solo. Provavelmente, o fornecimento de B em totalidade no solo foi fator restritivo para a máxima eficiência fotossintética das plantas de soja, reduzindo a taxa de fixação de carbono, prejudicando o aporte de fitomassa e afetando de forma negativa o processo de FBN, pela possível restrição de esqueletos de carbono, prejudicando as relações de troca entre o bacteroide e a planta, acarretando menores acúmulos de N nas plantas e grãos, como apontado a posteriori.

Figura 5 – Médias calculadas para eficiência instantânea de carboxilação (ICE) em plantas de soja em função de fontes e modos de aplicação de B



*; ** Diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e ($p \leq 0,01$), respectivamente.

Barras seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey.

Médias seguidas de ⁺ diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados e à luz do que se preconiza na literatura, é plausível dizer que a fertilização boratada é positiva para as reações de trocas gasosas e fotossíntese na cultura da soja, desde que evitado o excesso e respeitados os limites de toxicidade para o nutriente, e que sua influência é exercida não somente sobre a maquinaria estomática, mas também sobre fatores não-estomáticos (WIMMER; EICHERT, 2013; LANDI et al., 2019). Uma vez que as limitações fotossintéticas não estomatais reduzem a demanda interna por CO₂, a fotossíntese pode, portanto, ser reduzida por uma gama de outros efeitos relacionados com a baixa concentração de B em tecidos, que também dependem de fatores externos adicionais, como luminosidade, temperatura ou outros eventos potencialmente estressantes para a cultura da soja (WANG et al., 2015).

A altura de plantas foi influenciada por ambos os conjuntos de tratamentos (Tabela 4), porém não pela interação deles. Para fontes, o tetraborato de sódio se destacou, propiciando uma altura de plantas de 33,09cm. Para modos, maiores valores foram observados na aplicação em conjunto (solo + foliar), com a média de 33,89cm. Na ausência de fertilização

boratada, a altura média das plantas foi de 27,22cm, estatisticamente inferior a todos os outros tratamentos, certamente em razão do encurtamento dos internódios.

Tabela 4 – Médias obtidas para altura de plantas (AP), massa seca de raiz em R2 (MSRR2), massa seca de raiz na colheita (MSRC) e massa seca de parte aérea em R2 (MSPAR2) e na colheita (MSPAC) de plantas de soja em função de fontes e modos de adubação boratada

Fontes de Variação	AP	MSRR2	MSRC	MSPAR2	MSPAC
	cm	----- g -----			
Fonte de B (B)					
Ácido bórico	30,52b ⁺	8,02	9,48b	6,01	12,26b
Tetraborato de sódio	33,09a ⁺	8,08	12,90a ⁺	6,38	15,60a
Modo de aplicação (M)					
100% solo	31,18b ⁺	7,91	8,91 ⁺	6,35	10,62c
50% solo + 50% foliar	33,89a ⁺	8,21	12,38 ⁺	5,76	14,02b
25% solo + 25% foliar (2x)	30,37b ⁺	8,05	11,93 ⁺	6,46	17,15a
Ausência de B (T)	27,22	8,13	10,70	6,65	9,51
<i>Teste F (valor de p)</i>					
B	0,029*	0,677	0,004**	0,485	0,006**
M	0,041*	0,226	0,054	0,381	0,001**
B x M	0,067	0,846	0,717	0,563	0,000**
T	0,004**	0,985	0,041*	0,117	0,000**
Média geral	31,15	8,05	11,50	6,27	13,30
Média do fatorial	32,91	8,05	11,06	6,21	13,93
C.V. (%)	8,51	3,58	18,91	16,18	9,88

Médias seguidas de * e ** diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% e 1% de significância, respectivamente.

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de ⁺ diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Nas avaliações de massa de matéria seca acumulada por vaso (Tabela 4), a massa de raízes coletadas em R2 não diferiu para nenhum dos tratamentos em questão. No início de ciclo vegetativo da soja, a absorção de água e nutrientes é restrita devido ao pequeno volume radicular, influenciando o acúmulo de matéria seca. Para a maioria dos cultivares, entre os 30 e 60 dias após emergência, a taxa de absorção aumenta gradualmente e vai declinando no período de formação de grãos (ARANTES; SOUZA, 1993).

Já quando realizada ao fim do experimento, o tetraborato de sódio mostrou médias superiores (Tabela 4). O uso de ácido bórico como fonte não diferiu da testemunha pelo teste de Dunnett, apresentando média inferior, juntamente com a aplicação via solo, que prejudicou o desenvolvimento radicular normal. A disponibilização total de B via solo foi inferior até

mesmo que à testemunha, apontando possíveis danos ao estabelecimento do sistema radicular. Ghanati, Morita e Yokota (2004) demonstraram que um dos possíveis mecanismos induzidos pelo excesso de B é o acúmulo progressivo de suberina em paredes celulares do córtex, inibindo o crescimento radicular e o movimento radial de água e solutos, podendo afetar a absorção de nutrientes e as relações fotossintéticas de fixação de carbono. Ademais, a má formação radicular é um relato frequente de problemas morfológicos relacionados ao B em diversos vegetais, similar a toxidez por alumínio.

Analisando a massa seca de parte aérea (Tabela 4), nota-se um comportamento similar ao do desenvolvimento do sistema radicular, uma vez que os tratamentos não foram bem-sucedidos em influenciar o acúmulo de fitomassa na primeira coleta, porém, em posterior avaliação, houve efeito dos tratamentos para a variável-resposta, sendo possível constatar diferença para todos os conjuntos, inclusive a interação significativa entre fontes e modos de fornecimento de B.

Em desdobramento (Tabela 5), observa-se que as médias para biomassa da parte aérea na colheita, quando da aplicação via solo, foram inferiores para ambas as fontes de B, com vantagem para o tetraborato, e os maiores valores foram observados na aplicação conjunta e conjunta com reaplicação, para o tetraborato de sódio e ácido bórico, respectivamente.

Tabela 5 – Desdobramento da interação significativa para a massa seca de parte aérea ao fim do ciclo produtivo de plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada

Fonte de Variação	Fonte de B	
	Ácido bórico	Tetraborato de sódio
100% solo	10,44bB	12,82aB*
50% solo + 50% foliar	11,83bB	17,67aA*
50% solo + 25% foliar (2x)	18,44aA*	16,86bA*
Testemunha	9,51	
DMS AdB	2,34	
DMS BdA	2,86	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

A fitomassa aérea acumulada no uso de tetraborato, independente da forma de fornecimento, foram superiores ao acúmulo registrado pelo controle. Layek et. (2014) afirmar que o B ajuda a aumentar o acúmulo de matéria seca da planta como um todo. O mesmo desempenho positivo não foi observado quando se aplicou ácido bórico com maior disposição

da dose no tempo, no entanto quando se fracionou a aplicação em três etapas, uma por solo e duas por folha a maior massa foi observada.

O B é um nutriente complexo e que com baixíssimas concentrações desempenha seu papel no metabolismo vegetal (MARSCHNER, 2012). Em função da estreita relação entre níveis ótimos e toxidez ou deficiência (KAUR; NELSON, 2015), variações na efetividade de sua disponibilização podem ser fatores chaves para definir o útil e o prejudicial. É possível que o ácido bórico, em razão da maior velocidade de liberação (MASCARENHAS et al., 1998), na dose e condições experimentais desse estudo, quando aplicado totalmente via solo ou com maior dosagem única via foliar, instaure ser um limitante para o pleno funcionamento do aparato fisiológico, dificultando o pleno desenvolvimento de plantas de soja.

Com base nos dados obtidos até então, pode-se constatar que o crescimento e desenvolvimento da soja é afetado pela nutrição de B, uma vez que seu não fornecimento ao longo do ciclo de cultivo limita o acúmulo de fitomassa total, sendo este efeito intensificado durante a colheita, talvez pela maior demanda após início do período reprodutivo (MALAVOLTA, 1996). Esse pressuposto corrobora com o padrão observado nas avaliações de trocas gasosas e de clorofila. Outrossim, a maior eficiência em elevar os parâmetros analisados é designada a fonte tetraborato de sódio e ao provimento de B de forma diversa à totalidade via solo.

Analisando a nodulação das plantas de soja do estudo (Tabela 6), embora a massa seca dos nódulos não ter sido influenciada por nenhum dos tratamentos, o número médio de nódulos diferiu para os modos de aplicação, apresentando valores superiores quando foi realizada a adubação de B de modo conjunto e parcelado, alcançando uma média de 78,46 nódulos, sendo 46,90% superior à testemunha e 132,68% superior à aplicação totalmente via solo.

Tabela 6 – Médias obtidas para massa seca de nódulos (MN), número de nódulos (NN), número de vagens (NV) e produtividade de grãos de soja de em função de fontes e modos de adubação boratada

Fontes de Variação	MN g	NN	NV -	Produtividade g vaso ⁻¹
Fonte de B (B)				
Ácido bórico	0,30	52,71	27,44	10,48a
Tetraborato de sódio	0,44	57,69	25,55	8,36b
Modo de aplicação (M)				
100% solo	0,29	33,72c ⁺	18,66b	8,04b
50% solo + 50% foliar	0,36	53,41b	26,84ab	9,28ab
50% solo + 25% foliar (2x)	0,46	78,46a ⁺	34,00a	10,97a
Ausência de B (T)	0,48	52,61	26,33	6,83
<i>Teste F (valor de p)</i>				
B	0,053	0,239	0,496	0,002**
M	0,121	0,000**	0,002**	0,002**
B x M	0,393	0,466	0,061	0,042*
T	0,128	0,036*	0,963	0,003**
Média geral	0,38	55,57	26,47	9,05
Média do fatorial	0,37	55,20	26,50	9,42
C.V. (%)	33,12	15,34	21,56	12,63

Médias seguidas de * e ** diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% e 1% de significância, respectivamente.

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de + diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que, com o fracionamento progressivo do fornecimento de B ao longo do tempo, o número de nódulos foi elevado. Os únicos tratamentos que foram diferentes da testemunha foram o 100% solo e 50% solo + 25% foliar em V4 + 25% foliar em R1, sendo as médias observadas, respectivamente, inferior e superior. Esse resultado pode possivelmente ser explicado em função dos danos no sistema radicular pelo alto estímulo de B disponível.

Dado que o processo de nodulação é sensível e muito preciso, problemas no desenvolvimento da raiz, em principal dos pelos radiculares, podem limitar o processo de emissão e recepção nos eventos de sinalização estabelecidos entre a bactéria e o hospedeiro, caracterizando uma fraca conexão simbiótica e prejudicando o processo de FBN como um todo. Além disso, Bonila et al. (1997) trouxeram resultados que sugeriam alterações estruturais na membrana do periobacterióide e no cordão de infecção na ausência de B, apontando efeito deste nutriente na conformação e estabilidade dessas estruturas.

Para os parâmetros produtivos, o número de vagens não foi influenciado pelas fontes de B, contudo, apontou diferença para os modos de aplicação de B (Tabela 6), com um padrão similar ao encontrado para o número de nódulos, massa de matéria seca na colheita e taxa de transpiração em que a aplicação conjunta e com reaplicação foi superior, indiciando novamente a plethora de eventos que são influenciados pelo B.

Aproximadamente 34 vagens foram contadas para o melhor tratamento contra apenas 19 no menor, demarcando um aumento de 56% no número médio de vagens. Ainda assim, não foi observada diferença em relação à testemunha. O B é um elemento com ligação direta à formação e desenvolvimento sadio do sistema reprodutivo vegetal, influenciando o pegamento de flores, germinação do tubo polínico e, por consequência, a formação de vagens e grãos (MARSCHNER, 2012).

Para a produção de grãos, todas as fontes de variação apontaram diferença significativa, inclusive a interação (Tabela 6). O estudo do desdobramento permite averiguar que, para as fontes dentro de modos, o ácido bórico foi superior quando a aplicação foi realizada de forma conjunta e conjunta parcelada, e avaliando modos dentro de fontes, nota-se que a aplicação via solo demonstrou médias inferiores para o ácido bórico (Tabela 7). Comportamento similar não foi notado para os vasos que receberam tetraborato de sódio como fonte de B. Esse resultado possivelmente é em função da atividade e taxa de disponibilização de B pelo fertilizante, uma vez que em aproximadamente 60 dias após a aplicação, 100% o valor da garantia é liberado, sujeitando a duas hipóteses: pela alta mobilidade e solubilidade na solução do solo, o nutriente fica sujeito a altas perdas por lixiviação, sendo o processo acentuado em solos arenosos (BOLOGNA; VITTI, 2006); ou grandes quantidades são absorvidas em um curta período de tempo, acarretando toxicidade devido a estreita faixa que limita a necessidade da cultura e o excesso (LANDI et al., 2019).

Tabela 7 – Desdobramento da interação significativa para a produção de grãos em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada

Fonte de Variação		Fonte de B	
Modo de aplicação	Ácido bórico	Tetraborato de sódio	
100% solo	8,08aB*	8,00aA*	
50% solo + 50% foliar	11,18aA*	7,33bA*	
50% solo + 25% foliar (2x)	12,18aA*	9,75bA*	
Testemunha		6,83	
DMS AdB	2,03		
DMS BdA	2,49		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Os tratamentos do fatorial foram superiores à testemunha, demonstrando que a não fertilização boratada ou a deficiência de B ao longo do ciclo de cultivo prejudicam a produção final de grãos (Tabela 7). Resultado semelhante foi obtido por Calonego et al. (2010). O parcelamento da dose via foliar também foi eficaz em elevar a produção de grãos de soja em trabalho realizado por Ross et al. (2006). Possivelmente, uma distribuição mais uniforme e constante ao longo do tempo é mais apropriada para o fornecimento de B na cultura da soja, sem causar os danos já comprovados pela exposição à maiores quantidades de fertilizante boratado (YOSHINARO; TAKANO, 2017; LANDI et al., 2019), e suprimindo a demanda nutricional das plantas em seu período de maior exigência.

O acúmulo de N tanto nas plantas como nos grãos de soja foi significativo para a interação dos tratamentos (Tabela 8). Nas plantas, observando fontes dentro de modos (Tabela 9), o ácido bórico apresentou médias superiores quando aplicado de forma conjunta e parcelada, e o tetraborato na aplicação conjunta. Observando modos dentro de fontes, para o tetraborato, é notável o aumento significativo no acúmulo de N quando a dose de B não foi fornecida diretamente na adubação inicial. A combinação de 50% via solo e 50% foliar propiciou maiores valores para essa fonte. Comportamento similar é observado quando se analisa o ácido bórico como fonte, em que o fornecimento pela via conjunta e parcelada se distinguiu dos demais modos. Os tratamentos não diferiram da testemunha quando o fornecimento de B foi realizado em totalidade via solo. Já para os demais modos, as médias obtidas para o acúmulo de N em plantas de soja foram superiores para ambas as fontes (Tabela 9).

Tabela 8 – Médias obtidas para o acúmulo de nitrogênio (AN) na folha e no grão, porcentagem de N proveniente da fixação biológica de nitrogênio (FBN) em folhas (R2) e em grãos (R7), e concentração de boro (B) em plantas de soja em função de fontes e modos de adubação boratada

Fontes de Variação	AN Foliar	AN Grão	FBNR2	FBNR7	B
	mg planta ⁻¹		%		mg kg ⁻¹
Fonte de B (B)					
Ácido bórico	284,03b	512,60	86,59 ⁺	80,53	14,40
Tetraborato de sódio	345,48a	487,97	80,29 ⁺	81,33	12,91
Modo de aplicação (M)					
100% solo	219,84b	417,21c	75,75b ⁺	66,75b	15,25a
50% solo + 50% foliar	363,96a	494,58b	89,10a ⁺	82,80ab	14,43a
50% solo + 25% foliar (2x)	380,49a	589,06a	86,15a ⁺	93,25a	11,39b
Ausência de B (T)					
	210,66	297,62	69,34	88,70	6,81
<i>Teste F (valor de p)</i>					
B	0,002 ^{**}	0,089	0,099	0,857	0,112
M	0,000 ^{**}	0,000 ^{**}	0,025 [*]	0,006 ^{**}	0,008 ^{**}
B x M	0,000 ^{**}	0,007 ^{**}	0,062	0,043 [*]	0,004 ^{**}
T	0,001 ^{**}	0,000 ^{**}	0,010 [*]	0,219	0,000 ^{**}
Média geral	305,61	471,33	81,51	82,04	12,78
Média do fatorial	321,43	500,28	83,52	80,93	13,64
C.V. (%)	13,94	4,98	9,16	18,70	14,65

Médias seguidas de * e ** diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% e 1% de significância, respectivamente.

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de ⁺ diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de nitrogênio em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação boratada

Fonte de Variação	Fonte de B	
	Ácido bórico	Tetraborato de sódio
Modo de aplicação		
100% solo	208,30aB	231,37aC
50% solo + 50% foliar	319,43bB*	476,94aA*
50% solo + 25% foliar (2x)	424,33aA*	368,65bB*
Testemunha	210,66	
DMS AdB	75,79	
DMS BdA	92,80	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

No desdobramento para o acúmulo de N nos grãos (Tabela 10) foi constatado que os maiores valores observados foram, para ambas as fontes, quando se realizou a aplicação de modo conjunto e parcelada. Na aplicação via foliar em conjunto com a via solo, o ácido bórico foi superior quando comparado ao tetraborato. Os tratamentos que dispuseram de B derivado em totalidade do solo culminaram em menor acúmulo de N nos grãos. Ainda assim, todas as médias observadas para os tratamentos foram superiores àquela observada para a testemunha.

Tabela 10 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de nitrogênio em grãos de soja em função das fontes e modos de adubação borratada

Fonte de Variação Modo de aplicação	Fonte de B	
	Ácido bórico	Tetraborato de sódio
100% solo	399,24aB*	435,20aB*
50% solo + 50% foliar	547,90aA*	441,26bB*
50% solo + 25% foliar (2x)	590,68aA*	587,68aA*
Testemunha	297,62	
DMS AdB	45,81	
DMS BdA	51,66	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

O acúmulo de N nos grãos de soja é um indicativo do bom desenvolvimento e estado nutricional equilibrado. Nesse experimento, o suprimento de N via solo foi em quantia baixa, apenas com o intuito de suprir o desenvolvimento inicial até a instalação da FBN. Logo, é plausível assumir que o suprimento adequado de B pode modular a intensidade do processo de FBN, ocasionando em maior concentração de N na planta.

Adicionalmente, para a primeira avaliação isotópica (R2) (Tabela 8), verifica-se que a forma de aplicação de B influenciou a porcentagem calculada de N fixado proveniente da FBN, sendo que ambas as aplicações que combinaram os métodos foram superiores à aplicação totalmente via solo. Todos os tratamentos foram superiores à testemunha, atestando um grande aumento na atividade da FBN (de 6,41 a 19,76%) quando se supre a necessidade de B em plantas de soja. Não foi constatada diferença entre as fontes testadas, reforçando que independentemente do fertilizante utilizado, o fornecimento adequado de nutrientes é sempre mais vantajoso. A intensificação do processo de FBN em função dos tratamentos aqui

considerados reforça os resultados apresentados anteriormente, principalmente aqueles referentes ao acúmulo de N (Tabela 8) e aumento na produção de grãos de soja (Tabela 6).

Para a segunda avaliação isotópica (R7), realizada nos grãos, a interação entre os tratamentos foi significativa (Tabela 8). O tetraborato foi superior ao ácido bórico quando aplicado via solo e foliar sem reaplicação, porém constatou-se valores inferiores quando ele foi aplicado totalmente ao solo com a mesma fonte (Tabela 11). Não foi constatada diferença entre os tratamentos fatorial e a testemunha para esse parâmetro. Ainda assim, para ambas as fontes, o fornecimento da dose de B fracionada via solo e com suplementação foliar parcelada elevou levemente o particionamento de N advindo da FBN, de forma que as plantas se beneficiaram, quase que em totalidade, da fixação do nitrogênio atmosférico, utilizando pouco do N disponível no solo para o desenvolvimento.

Tabela 11 – Desdobramento da interação significativa para o cálculo de FBN em grãos de soja em função das fontes e modos de adubação boratada

Fonte de Variação Modo de aplicação	Fonte de B	
	Ácido bórico	Tetraborato de sódio
100% solo	80,12aA	68,65aB
50% solo + 50% foliar	79,63bA	92,22aA
50% solo + 25% foliar (2x)	93,08aA	93,66aA
Testemunha	88,70	
DMS AdB	18,13	
DMS BdA	22,73	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

A maior fixação de N, potencial nodulação e capacidade de transporte para os grãos, em função dos tratamentos utilizados nas plantas de soja, ocorreram quando se realizou o fornecimento de B dividido entre a adubação de plantio e complementação foliar em V4 e R1, uma vez que esse padrão foi observado para ambas as fontes em estudo (Tabela 11). É dito que o B tem papel na manutenção da parede celular do nódulo, estruturação da membrana, desenvolvimento e maturação do bacterióide (BONILLA et al., 1997), além de participar da organogênese nodular (ABREU et al., 2013), nas interações entre planta e bactéria (REGUERA et al., 2010) e na evolução da nitrogenase (BOLAÑOS et al., 2006). Concomitantemente, esses processos modulam a eficiência e estabilidade da relação biológica, beneficiando o aporte de N em culturas moduladoras, como a soja.

A concentração de B no tecido foliar de soja foi influenciada significativamente pelos tratamentos aplicados (Tabela 8). Houve interação entre as fontes e os modos de aplicação de B (Tabela 12). Analisando fontes dentro de modos é possível observar que o ácido bórico foi o mais eficaz em elevar a concentração de B nos tecidos foliares quando aplicado 100% via solo e 50% solo mais 50% foliar quando comparado ao tetraborato. No modo conjunto e parcelado, concentração mais elevada de B foi constatada para o tetraborato de sódio. Pode-se dizer que o padrão observado pelo uso de tetraborato na soja seja um reflexo de suas características físico-químicas, como liberação mais lenta do nutriente. Essa fonte é um sal estável de ácido bórico com pH aproximado de 9,2 e que sofre hidrólise liberando o ânion $[B(OH)_4]^-$. Possivelmente, em razão do pH da solução, a calda com essa fonte pode apresentar dificuldades de penetração nas barreiras cuticulares quando aplicado via foliar, resultando em menor concentração de B na planta.

Tabela 12 – Desdobramento da interação significativa para o acúmulo de boro em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada

Fonte de Variação Modo de aplicação	Fonte de B	
	Ácido bórico	Tetraborato de sódio
100% solo	19,12aA*	14,31bA*
50% solo + 50% foliar	17,49aA*	13,85bA*
50% solo + 25% foliar (2x)	10,88bB*	14,54aA*
Testemunha		7,52
DMS AdB	3,64	
DMS BdA	4,46	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas de * diferem do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

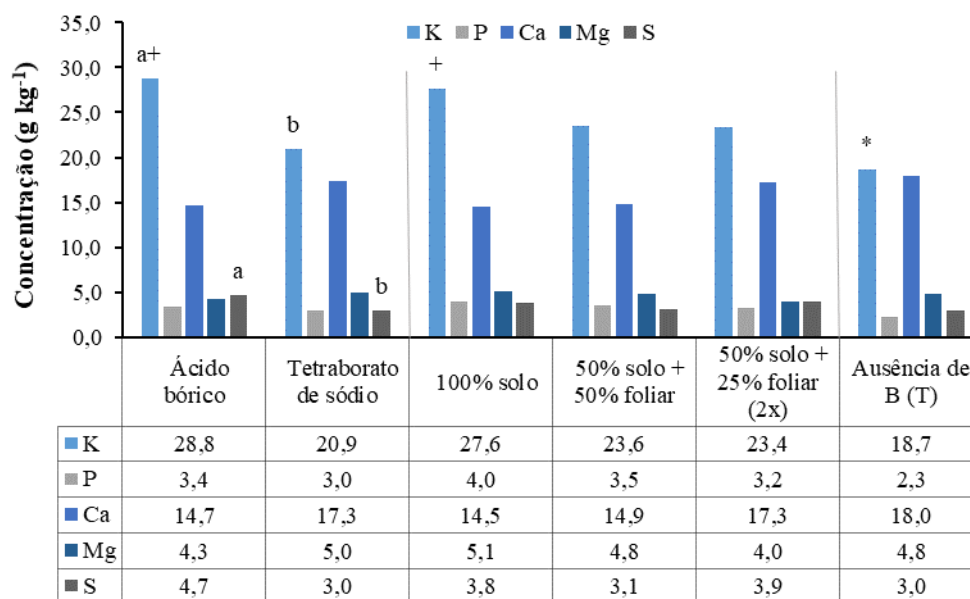
Em relação aos modos dentro de fontes, é possível constatar que houve diferença apenas quando se utilizou ácido bórico (Tabela 12), em que a aplicação parcelada e conjunta obteve menores médias, sendo os demais valores mais elevados nesse parâmetro, demonstrando, nas condições do estudo, que a forma mais eficiente de incrementar a quantidade de B nos tecidos é o seu fornecimento via solo pré-plantio, de forma que a disponibilização do nutriente é contínua e ininterrupta. Para o tetraborato não foi observado efeito das fontes para esta variável-dependente. Além disso, os tratamentos do fatorial foram estatisticamente superiores ao tratamento testemunha, na ordem de 44 a 153%.

A eficiência da fertilização foliar é diretamente relacionada às condições climáticas no momento da aplicação e o grau tecnológico envolvido. As perdas são associadas majoritariamente em função da evaporação, escoamento superficial e deriva (KAUR; NELSON, 2015). Nas condições experimentais, as aplicações foram realizadas de forma isolada e cautelosa para evitar contaminação de vasos adjacentes e perdas de produto. Assim sendo, é possível afirmar que a concentração de B foliar tem resposta positiva quando se é realizada a adubação borratada de forma a disponibilizar a dose calculada em totalidade via solo. Essa situação pode não ser o ideal, visto que as maiores concentrações de B associadas ao fornecimento no plantio podem resultar reduções em processos fisiológicos, como nos vistos neste trabalho, prejudicando o potencial produtivo, a fixação de carbono, o estabelecimento da FBN e sua extensão de atividade.

A literatura sugere que a má nutrição de B pode alterar as propriedades da superfície da folha, interferindo no transporte de água (OZTURK et al., 2010; YOSHINARI; TAKANO, 2017). Pode-se especular que ocorram modificações nas propriedades da superfície foliar induzidas pela má nutrição inicial de B e que também afetarão a absorção de nutrientes aplicados via foliar. A taxa de absorção de ácido bórico aplicado via trifólios foi significativamente reduzida em plantas de soja com baixa concentração de B em trabalho realizado por Will et al. (2011). O mesmo fato foi observado neste trabalho. Essa situação é importante, pois pode resultar em auto amplificação da deficiência de B e impedir sua adequada correção. Vale salientar que a aplicação foliar é uma ferramenta para fins de complementação das necessidades nutricionais em sua própria definição, não devendo o planejamento de adubação ser realizado em total dependência técnica.

A avaliação nutricional dos tecidos foliares para os demais nutrientes não foi influenciada grandemente pelos tratamentos aplicados e não demonstraram tendências conclusivas. As concentrações de K e S foram maiores quando se utilizou o ácido bórico, deferindo positivamente da testemunha no primeiro, enquanto menor no uso de tetraborato, que não diferiu da testemunha (Figura 6).

Figura 6 – Médias obtidas para a concentração de macronutrientes em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borrotada



* Diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Barras seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey.

Barras seguidas de + diferem da testemunha pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

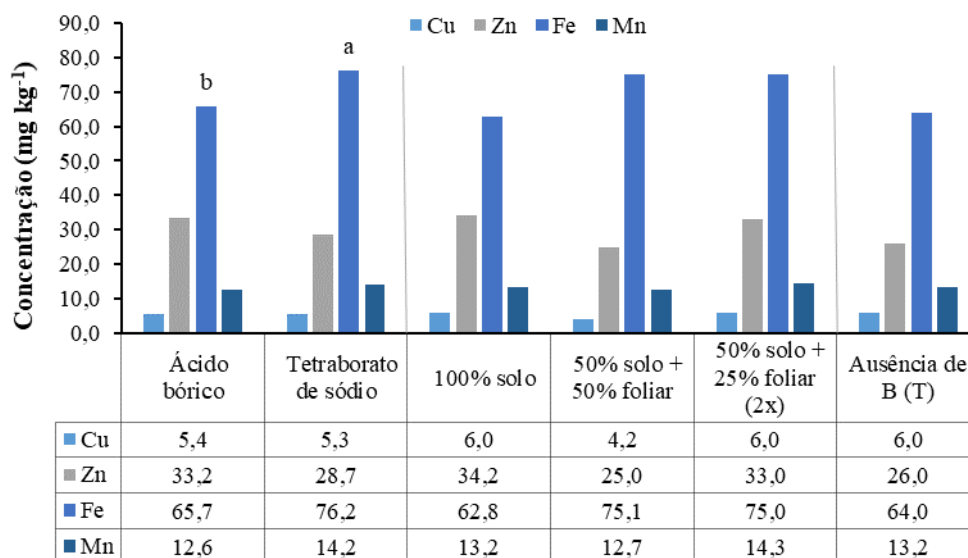
Fonte: Próprio autor.

A aplicação via solo também propiciou maiores concentrações de K quando comparado ao valor da testemunha. Talvez essa resposta esteja relacionada a presença de sódio na segunda fonte, competindo com os carreadores de K (MÄSER et al., 2002).

Hajiboland e Faranghi (2010) verificaram que, embora não essencial, o B pode modular o movimento estomático mediando o aumento da concentração de K^+ nas células guardas, uma vez que a extrusão de K e redução na absorção de rubídio (Rb) foram constatadas na ausência desse nutriente e o oposto em condições de suficiência. Distúrbios no fluxo estomático de K são provavelmente resultado de danos na membrana plasmática e inibição de suas H^+ -ATPases, que são responsáveis pela absorção de K. Presumivelmente esse evento fisiológico pode estar associado a não aplicação de B. Parece factível que tais distúrbios possam prejudicar a capacidade de resposta dos estômatos.

Houve diferença na concentração de Fe foliar para fontes de B (Figura 7), uma vez que, quando se utilizou de tetraborato de sódio, a média obtida foi mais elevada. Para os demais micronutrientes avaliados não foi constatada diferença entre os tratamentos do fatorial, tampouco em relação à média da testemunha (Figura 7).

Figura 7 – Médias obtidas para a concentração de micronutrientes em plantas de soja em função das fontes e modos de adubação borratada



Barras seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância.

Fonte: Próprio autor.

Mesmo que usualmente seja inesperado efeito direto na absorção de outros nutrientes, o B pode influenciar condições limitantes ou potencializadoras, como alterações no sistema radicular e no desenvolvimento do sistema vascular (KOHLI et al., 2022). Ao longo do tempo, mesmo em cultivares de ciclo indeterminado, como o material genético utilizado neste estudo, que tem o crescimento vegetativo estendido, esses efeitos indiretos na absorção de outros nutrientes atribuídos ao B podem influir grandemente na resistência ao ataque de pragas e doenças, potencial de mitigação de estresses ambientais, expressão do potencial genético da cultura, além do processo de fixação biológica de nitrogênio.

Visando a expansão dos conhecimentos científicos acerca da nutrição da soja, com base nas informações coletadas neste trabalho, possivelmente o B tenha um amplo papel no funcionamento da FBN e sua dinâmica no interior da planta bem como seus gatilhos fisiológicos precisam ser mais razoavelmente elucidados. Essa interação é relatada na literatura e alguns vestígios de sua influência nesse processo são aqui relatados. Como viés exploratório, o rol informativo gerado por esta pesquisa pode apontar e encaminhar novas pesquisas à fim de investigar de forma mais aprofundada a interação morfofisiológica entre os fatores aqui apontados.

5. CONCLUSÕES

- i. A fertilização borratada foi eficiente na elevação da concentração de B foliar, no acúmulo de nitrogênio nas folhas e grãos e afetou positivamente proporção de nitrogênio proveniente da FBN em plantas de soja, tanto nos tecidos foliares, como nos grãos, principalmente quando realizada de forma parcelada via solo e via foliar.
- ii. A massa de nódulos não foi influenciada pela aplicação de B, porém o aumento no número foi observado gradativamente com o parcelamento da dose de B.
- iii. O uso de ácido bórico via solo e foliar complementar com reaplicação propiciou os maiores valores para a produção de grãos de soja por vaso.
- iv. O tetraborato de sódio foi superior ao tratamento com ácido bórico no acúmulo de matéria seca da parte aérea e da parte radicular, além da altura de plantas.
- v. A aplicação de B via solo foi a mais eficiente em elevar o acúmulo de B nas plantas de soja.

REFERÊNCIAS

ANHOLETO, C. D.; MASSUQUETTI, A. A soja brasileira e gaúcha no período 1994-2010: uma análise da produção, exportação, renda e emprego. **Revista Economia e Desenvolvimento**, v. 13 n. 2, p. 379-404, 2015.

ATKINS, C.A.; SMITH, P. Ureide syntesis in legume nodules. In: Triplett, E. W. **Prokaryotic Nitrogen Fixation**. Horizon scientific Press, Wymomdham, UK, p. 559-587, 2000.

AZEVEDO, W. R. D. et al. Efeito do boro na nodulação da ervilha cultivada em solos de várzea. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37 n. 8, p. 1137-1143. 2002.

BARBOSA, J. C.; JÚNIOR, M., W. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2015.

BISSOTO, F. P. **Absorção foliar de boro (¹⁰B) proveniente de fontes complexadas e mobilidade do nutriente na soja**. Tese de Doutorado: Instituto Agrônômico, 2022.

BODDEY, L. H. et al. Avaliação da fixação biológica de N₂ associada a leguminosas e não-leguminosas utilizando a técnica da redução do acetileno: história, teoria e prática. **Embrapa Agrobiologia - Documentos (INFOTECA-E)**, 2007.

BODDEY, R. M. et al. Use of the ¹⁵N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N₂ fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, p. 889–895, 2001.

BOLAÑOS, L. Essentially of boron for symbiotic dinitrogen fixation in pea (*Pisum sativum*) rhizobium nodules. **Plant Physiology**, v. 104, p. 85-90, 1996.

BOLAÑOS, L. et al. Nitrogenase inhibition in nodules from pea plants grown under salt stress occurs at the physiological level and can be alleviated by B and Ca. **Plant and Soil**, v. 280, p. 135-142, 2006.

BOLAÑOS, L.; REDONDO-NIETO, M.; BONILLA, I. Boron-calcium relationship in nodulation and nodule organogenesis. In: PEDROSA, F. O. et al. The aberrant cell walls of boron-deficient bean root nodules have no covalently bound hydroxyproline/proline-rich proteins. **Plant Physiology**, v. 115, p. 1329–1340, 1997.

BOLAÑOS, L.; BREWIN, N. J.; BONILLA, I. Effects of boron on rhizobium-legume cell-surface interactions and nodule development, **Plant Physiology**, v. 110, n. 4, p. 249–1256, 1996.

BOLOGNA, I. S.; VITTI, G. C. Produção e qualidade de frutos de laranjeira 'Pêra' em função de fontes e doses de boro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 28, p. 328-330, 2006.

BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; DA SILVA, E. C. Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilizante nitrogenado e nitrogênio do solo no desenvolvimento de feijão e caupi. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 206-215, 2011.

BRITO, M. M. P., MURAOKA, T., SILVA, E. S. Uptake rate of nitrogen from soil and fertilizer, and n derived from symbiotic fixation in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) determined using the ¹⁵N isotope. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p. 895–905, 2009.

BROWN, P.H.; HU, H. Phloem mobility of boron in species dependent: Evidence of boron mobility in sorbitol-rich species. **Annals of Botanics**, v.77, n.5, p.497-505, 1996.

BRUM, A. L. et al. A economia mundial da soja: impactos na cadeia produtiva da oleaginosa no Rio Grande do Sul 1970-2000. **Anais dos Congressos: XLIII Congresso da Sober em Ribeirão Preto**. São Paulo, 2005.

BYERS, D. E.; MIKKELSEN, R. L.; COX, F. R. Greenhouse evaluation of four boron fertilizer materials. **Journal of plant nutrition**, v. 24, n. 5, p. 717-725, 2001.

CALONEGO, J. C. et al. Adubação boratada foliar na cultura da soja. **Colloquium Agrariae**, v. 6, n. 2, p. 20-26, 2010.

CAMARGOS, L. S. **Análise das alterações no metabolismo de nitrogênio em *Canavalia ensiformes* (L.) em resposta a variações na concentração de nitrato fornecida**. Tese de Doutorado: Universidade de São Paulo, 2002.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Fatores que afetam a produção e o desempenho das sementes. Sementes: ciência, tecnologia e produção. **Jaboticabal: FUNEP**, p. 303-379, 2000.

CERUTTI, P. H.; WILLE, C. L. Adubação foliar com boro em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Revista Científica Rural**, v. 21, n. 1. p. 1-11, 2019.

CERVILLA, L. M., et al. Response of nitrogen metabolism to boron toxicity in tomato plants. **Plant Biology**, v. 11, p. 671–677, 2009.

COELHO FILHO, M. A. et al. Relação solo-planta-atmosfera In: SOUSA, V. F. et al. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. **Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica**, 2011.

COLUSSI, J., WEISS, C. R., de SOUZA, Â. R. L., & de OLIVEIRA, L. (2016). O agronegócio da soja: Uma análise da rentabilidade do cultivo da soja no Brasil. **Revista ESPACIOS**. v. 37, n. 16. 2016.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 4 quarto levantamento, janeiro 2023.

DALTON, D. A. et al. Enzymatic reaction of ascorbate and glutathione that prevent peroxide damage in soybean root nodules. **Proceedings of the National Academy of Sciences of The United State of America**, Washington, v. 83, p. 3811-3815, 1986.

DEUNER, S., et al. Varietal Differences in Net Photosynthesis of Soybean Leaves. **Crop Science**. v. 10, n. 1. 1970.

DIAS, S. M. et al. **Rizóbios isolados de fabáceas forrageiras do semiárido: biodiversidade e eficiência simbiótica**. Tese de Doutorado: Universidade Federal da Paraíba, 2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF. 5 ed., 2018. 356p.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, 2001.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, n.16, 2013. 265p.

FEHR, W. E. et al. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science** v. 11, p. 929–931, 1971.

FRANCHINI, J. C. et al. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 50, n. 12, p. 1131-1138, 2015.

FURLANI, A. M. C. et al. Exigência a boro em cultivares de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 929-937, 2001.

GABBI, M. T. T. et al. Análise da tendência e crescimento das exportações chinesa e seus impactos no complexo soja sul-americano: 1990 a 2020. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 49, 2021.

GELAIN, E. et al. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 259-269, 2011.

GHANATI, F., MORITA, A., & YOKOTA, H. Deposition of suberin in roots of soybean induced by excess boron. **Plant Science**, v. 168, n. 2, p. 397–405, 2005.

GUIMARÃES, A. P. et al. Bradyrhizobium strain and the ¹⁵N natural abundance quantification of biological N₂ fixation in soybean. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 5, p. 516-524, 2008.

GUIMARÃES, A. P. **Bases bioquímicas do fracionamento isotópico de ^{15}N na fixação biológica de nitrogênio e da eficiência energética do processo em diferentes estirpes de bactérias diazotróficas.** Tese de Doutorado: Universidade Federal do Norte Fluminense, 2010.

HATFIELD, J. et al. Effect of applied nitrogen on the nodulation and early growth of soybeans (*Glycine max* (L) MERR.). **Agronomy Journal**, v. 66, p. 112–114, 1974.

HAJIBOLAND R., FARANGHI, F. Remobilization of boron, photosynthesis, phenolic metabolism and antioxidant defense capacity in boron-deficient turnip (*Brassica rapa* L.) plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 56, p. 427–437, 2010.

HAJIBOLAND, R.; FARHANGHI, F.; ALIASGHARPOUR M. Morphological and anatomical modifications in leaf, stem and roots of four plants species under boron deficiency conditions, **Anales de Biologia**, v.34, p. 13–27, 2012.

HANSEL, F. D.; OLIVEIRA, M. L. Importância dos micronutrientes na cultura da soja no Brasil. **Informações Agronômicas**, v. 153, p. 1-8, 2016.

HU, H., BROWN, P. H. Localization of Boron in Cell Walls of Squash and Tobacco and Its Association with Pectin (Evidence for a Structural Role of Boron in the Cell Wall). **Plant Physiology**, v. 105, n. 2, p. 681–689, 1994.

HUNGRIA, M.; NEVES, M.C.P.; DÖBEREINER, J. Relative efficiency, ureide transport and harvest index in soybeans inoculated with isogenic Hup mutants of *Bradyrhizobium japonicum*. **Biology and Fertility of Soils**, v. 7, p. 325-329, 1989.

KAUR, G.; NELSON, K.A. Effect of foliar boron fertilization of fine textured soils on corn yields. **Agronomy**, v. 5, p. 1–18, 2015.

KOHLI, S.K., et al. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. **Plant Growth Regulation**, p. 1-16, 2022.

KOLLER, H. R.; NYQUIST, W. E.; CHORUSH, I. S. Growth Analysis of the Soybean Community. **Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 407, 1970.

LANDI, M.; MARGARITOPOULOU, T.; PAPADAKIS, I. E; ARANITI, F. Boron toxicity in higher plants: an update. **Planta**, v. 250, p. 1011–1032, 2019.

LAVRES JUNIOR, J. et al. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 173-181, 2008.

LAVRES, J., FRANCO, G. C., CÂMARA, G. M. S. Soybean seed treatment with nickel improves biological nitrogen fixation and urease activity. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. 37, 2016.

LEWIS, D. H. Are there interrelations between the metabolic role of boron synthesis of phenolic phytoalexins and the germination of pollen? **New Phytologist**, v. 84, p. 261-270, 1980.

LEWIS, D. H. Boron: the essential element for vascular plants that never was. **New Phytologist**, v. 221, n. 4, p. 1685-1690, 2019.

LEHTO, T., RUUHOLA, T. AND DELL, B. Boron in forest trees and forest ecosystems. **Forest Ecology Management**, v. 260, p. 2053–2069, 2010.

LI, B.; McKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, v. 37, n. 2, p. 613-626, 1991.

LOPES, E. C. P.; DE MORAES, A.; LANG, C. R. Estudo do fracionamento isotópico de nitrogênio aplicado à gramíneas e leguminosas forrageiras. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, 2016.

MACHO-RIVERO, M. A. et al. Boron toxicity reduces water transport from root to shoot in Arabidopsis plants. Evidence for a reduced transpiration rate and expression of major PIP aquaporin genes. **Plant and Cell Physiology**, v. 59, n. 4, p. 841-849, 2018.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 215p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronômica Ceres, 2006.

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

MANTOVANI, J. P. M.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. Adubação foliar de boro em diferentes estádios fenológicos da cultura do amendoim. **Revista Ceres**, v. 60, n. 2, p. 270-278, 2013.

MARIOTT, C. **Boro na cultura da soja: efeito na qualidade fisiológica de sementes durante o armazenamento**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

MARTIN, T. N.; PIRES, J. L. F.; VEY, R. T. **Tecnologias aplicadas para o manejo rentável e eficiente da cultura da soja**. Santa Maria: Editora GR, 2022, 528p.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Deficiência de boro em soja. **Bragantia**, v. 47, p. 325-331, 1988.

MÄSER, P.; GIERTH, M.; SCHROEDER, J. I. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. **Plant and Soil**, v. 247, p. 43-54, 2002.

MINCHIN, F. R. et al. Carbon and nitrogen nutrition of nodulated roots of grain legumes. **Plant, Cell and Environmental**, v. 4, p. 4-26, 1981.

MIÑO, D. A. M. et al. **Determinación de clorofilas, flavonoides y nitrógeno en cerezos (*Prunus Avium L.* "Santina") bajo tres condiciones de cultivo, mediante un método no destructivo**. Tese de Doutorado: Universidad de Talca (Chile). Escuela de Agronomía, 2020.

MOSCHINI, B. P.; SILVA, C. A. Nutrição e crescimento do tomateiro em função da interação ácido húmico-boro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 81-90, 2018.

NEUGART, S., TOBLER, M.A. & BARNES, P.W. Rapid adjustment in epidermal UV sunscreen: Comparison of optical measurement techniques and response to changing solar UV radiation conditions. **Physiologia Plantarum**, v. 173, n. 3, p. 725–735, 2021.

OKA-KIRA, E.; KAWAGUCHI, M. Long-distance signaling to control root nodule number. **Current opinion in plant biology**, v. 9, n. 5, p. 496-502, 2006.

OZTURK, M. et al. Boron and Plants. **Plant Adaptation and Phytoremediation**, Springer, Dordrecht p. 275–311. 2010.

PARSONS, R. et al. Nodule growth and activity may be regulated by a feedback mechanism involving phloem nitrogen. **Plant, Cell and Environment**, v. 16, p. 125-136, 1993.

PEDROSA, F. O. et al. Nitrogen Fixation: From Molecules to Crop Productivity. **Springer Science & Business Media**, v. 38, 2006.

PEOPLES, M. B. et al. **Methods for Evaluating Nitrogen Fixation by Nodulated Legumes in the Field**. Canberra: ACIAR. (ACIAR Monograph, 11 ed.), 1989.

PIEROZAN, C. et al. Uptake and allocation of nitrogen applied at low rates to soybean leaves. **Plant and Soil**, v. 39, p. 83–94, 2015.

PINHO, L. G. R. et al. Absorção e redistribuição de boro em coqueiro-anão-verde. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1769-1775, 2009.

RAHMAN, M. H. H. et al. Adequate range of boron nutrition is more restricted for root nodule development than for plant growth in young soybean plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 45, n. 3, p. 287-296, 1999.

RAIJ, B. van. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996.

RAIJ, B. van et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 284p.

REGUERA, M., BONILLA, I. AND BOLANOS, L. Boron deficiency results in induction of pathogenesis-related proteins from the pr-10 family during the legume-rhizobia interaction. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 625–632, 2010.

RESENDE, A. V., et al. **Balço de nutrientes e manejo da adubaço em solos de fertilidade construída**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE), 2019.

REZENDE, V. T.; BONAUDO, T. C.; GAMEIRO, A. H. **O efeito cascata do nitrogênio na cadeia produtiva da soja brasileira destinada à alimentação animal na Europa**. Tese de Doutorado: Universidade de São Paulo, 2021.

RODRIGUES, R.; PUGAS, J. **O Sistema Plantio Direto (SPD) e a conservação do solo**. Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE), 2021.

ROSOLEM, C.A.; LEITE, V.M. Coffee leaf and stem anatomy under boron deficiency, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 31, p. 477–483, 2007.

SAARI, L.L. and LUDDEN, P.W. The energetics and energy costs of symbiotic nitrogen fixation. In: KOSUGE, T. AND NESTER, E. **Plant-Microbe Interactions. Molecular and Genetic Perspectives**. v. 2, Macmillan, New York, p. 147-193, 1986.

SARKAR, D.; MANDAL, B.; KUNDU, M. C. Increasing use efficiency of boron fertilizers by rescheduling the time and methods of application for crops in India. **Plant and soil**, v. 301, p. 77-85, 2007.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubaço e nutriço mineral**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 148 p.

SHEARER, G., KOHL, D. H. N₂-fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**. v. 13, p. 699–756. 1986.

SILVA, A. C; LIMA, E. P. C; BATISTA, H. R. **A importância da soja para o agronegócio brasileiro: uma análise sob o enfoque da produção, emprego e exportação**. V Encontro de Economia Catarinense (Anais de eventos), 2011.

SILVA, F. et al. **Soja: do plantio à colheita**. 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2022.

SILVA, M. A. et al. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, 2022.

SILVA, M. M. **Papel de ureases na nodulação de *Glycine max* por *Bradyrhizobium japonicum***. Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio Grande de Sul, 2012.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Parâmetros termodinâmicos da reação de adsorção de boro em solos tropicais altamente intemperizados. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1014-1022, 2005.

SPRENT, J.I.; SPRENT, P. **Nitrogen fixing organisms; pure and applied aspects**. Springer, London: Chapman and Hall, v. 256. 1990.

TOMICIOLI, R. M.; LEAL, F. T.; COELHO, A. P. Limitação da produtividade pela deficiência de boro nas culturas da soja, milho, feijão e café. **South American Sciences**. v. 2, n. 1, 2020.

TRIVELIN, P. C. O. et al. Medida da fixação do nitrogênio atmosférico em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv Carioca, empregando-se o método com nitrogênio-15 à baixo enriquecimento. **Energia Nuclear e Agricultura**, v. 6, n. 1, p. 55-74, 1984.

VENDRUSCOLO, B. E.; RAIMUNDO, C. B.; SCHONINGER, E. L. Formas de aplicação e fontes de manganês na soja em solo de cerrado. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.18, n. 2, p. 82-87, 2020.

WANG, M., et al. Effects of different elevated CO₂ concentrations on chlorophyll contents, gas exchange, water use efficiency, and PSII activity on C₃ and C₄ cereal crops in a closed artificial ecosystem. **Photosynthesis Research**, v. 126, n. 3, p. 351–362, 2015.

WHITEHEAD, L. F; DAY, D. A. The peribacteroid membrane. **Physiology Plantarum**, v. 100, n. 1, p. 30-44, 1997.

YAMAGISHI, M.; YAMAMOTO, Y. Effects of boron on nodule development and symbiotic nitrogen fixation in soybean plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 40, p. 265–274, 1994.

YOSHINARI, A.; TAKANO, J. Insights into the Mechanisms Underlying Boron Homeostasis in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1951, 2017.

ZAMBON, L. M. **Caracterização do crescimento e acúmulo de nitrogênio em uma cultura de soja de elevada produtividade**. Tese de Doutorado: Universidade de São Paulo, 2020.