

TATIANI MAYARA GALERIANI

**SUPLEMENTAÇÃO FOLIAR DE CÁLCIO E BORO MELHORA A EFICIÊNCIA
FOTOSSINTÉTICA E AUMENTA PRODUTIVIDADE DA SOJA**

TATIANI MAYARA GALERIANI

**SUPLEMENTAÇÃO FOLIAR DE CÁLCIO E BORO MELHORA A EFICIÊNCIA
FOTOSSINTÉTICA E AUMENTA PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia – (Agricultura).

Orientador (a): Carlos Alexandre Costa
Crusciol

Botucatu

2021

G154s	Galeriani, Tatiani Mayara Suplementação foliar de cálcio e boro melhora a eficiência fotossintética e aumenta produtividade da soja / Tatiani Mayara Galeriani. -- Botucatu, 2021 48 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol 1. Glycine max (L.) Merr; fertilização foliar; cálcio; boro; floração.. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SUPLEMENTAÇÃO FOLIAR DE CÁLCIO E BORO MELHORA A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E AUMENTA A PRODUTIVIDADE DA SOJA

AUTORA: TATIANI MAYARA GALERIANI

ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

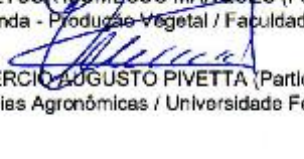
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof.ª Dr.ª LETUSA GOMES DE MORAES (Participação Virtual)
Pós-Doutoranda - Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. LAÉRCIO AUGUSTO PIVETTA (Participação Virtual)
Depto. Ciências Agrônômicas / Universidade Federal do Paraná

Botucatu, 05 de julho de 2021

*Dedico a toda minha família,
em especial aos meus queridos pais
Moacir Galeriani e Rosalina Dutra da Silva
Galeriani.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por concederem tantas graças em minha vida e por me permitirem concluir mais um sonho, além de colocar pessoas iluminadas no meu caminho.

Aos meus pais, Rosalina Dutra da Silva Galeriani e Moacir Galeriani, por todo o apoio, carinho, amor, paciência, ensinamentos, conselhos e, por serem meus maiores exemplos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, por ter me proporcionado essa oportunidade, pela orientação, ensinamentos e paciência.

Ao meu namorado Bruno Marcos Nunes Cosmo, por todo amor e carinho, pela paciência, atenção, incentivo, apoio e conselhos.

Aos Dr. José Roberto Portugal, Dr. Luiz Gustavo Moretti de Souza, Me. João William Bossolani e ao Me. Vitor Alves Rodrigues, pela amizade, pelos ensinamentos, conselhos, contribuições e apoio durante a pesquisa.

Agradeço a todos que fizeram parte dessa caminhada, Fabrizio Bianchi, Fernanda Marcolan, Guilherme Duarte, Gustavo Barreto, Marcela Checco, Natália Oliveira, Pedro Aguiar, Pedro Viotto, Rafael Vilela, Leila Bernart, Willian Zanetti e, em especial ao Alisson Mariano, Guilherme Noronha, Gabriel Neves, Pedro Viotto, Sirlene Oliveira e Vitor Rodrigues, pelas viagens e boas risadas.

As minhas amigas, Andressa Vogt, Bruna Ricini, Fabiula Novakoski, Luana Garcia, Sirlene Oliveira e Tamara Mundt.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa por meio do processo 133936/2019-8.

A Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), pela oportunidade de realização do mestrado.

E a todos os professores e profissionais envolvidos.

Meu muito obrigada!

“Tudo posso naquele que me fortalece”

BÍBLIA SAGRADA. Filipenses, 4:13. In: **BÍBLIA SAGRADA**. São Paulo: Editora Canção Nova, 2011. p.1447.

RESUMO

O Brasil destaca-se por ser um dos maiores produtores de soja do mundo. Dentre as tecnologias adotadas para o aumento da produtividade, encontra-se a fertilização foliar. A adubação suplementar com cálcio (Ca) e boro (B) é uma prática que vem sendo utilizada no estágio de florescimento da soja com o propósito de aumentar o número de vagens por planta, decorrente da maior retenção de flores e da fixação das vagens, podendo consequentemente elevar a produtividade da cultura. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da suplementação foliar de Ca e B durante a floração no desempenho nutricional, metabólico e da produtividade da soja. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em Botucatu-SP nas safras de soja 2018/2019 e 2019/2020. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), os tratamentos consistiam da presença (+ Ca e B) e ausência de (- Ca e B). As doses utilizadas foram a de 400 g de Ca e 40 g de B ha⁻¹, cujas as aplicações foram realizadas no estágio R1 da soja. Avaliaram-se o estado nutricional da cultura, parâmetros de trocas gasosas, enzima fotossintética (Rubisco), concentração de açúcar solúvel total, teor de proteína na folha, parâmetros agrônômicos e produtividade de grãos. A suplementação de Ca e B proporcionaram aumento do teor de B foliar. A fotossíntese líquida, a condutância estomática, a eficiência do uso da água e a carboxilação aumentaram quando Ca e B foram aplicados. Consequentemente, a melhora da fotossíntese levou ao aumento da concentração de açúcar e proteína na folha. A melhora na atividade metabólica não afetou a massa de grãos por planta, mas aumentou o número de vagens por planta e a produtividade. A alteração na produtividade foi influenciada por uma cascata de eventos, a melhora na atividade fotossintética associada com o aumento da produção de açúcar pode ter aumentado o número de estruturas reprodutivas, culminando diretamente no aumento da produtividade de grãos da soja.

Palavra-chave: *Glycine max* (L.) Merr; fertilização foliar; cálcio; boro; floração.

ABSTRACT

Brazil stands out for being one of the largest producers of soy in the world. Among the technologies used to increase yields is foliar fertilization. Supplemental fertilization with calcium (Ca) and boron (B) is a practice used in the flowering stage of soybean to increase the number of pods per plant, as the flowering is better maintained and the pods are corrected, which can lead to an increase in crop yield. The objective of this work was to evaluate the effects of foliar supplementation of Ca and B on nutritional, metabolic and yield components of soybean. The experiment was conducted in the Experimental Farm Lageado of the Faculty Agronomic Sciences of the State College of São Paulo "Júlio de Mesquita Filho", in Botucatu- SP in the 2018/2019 and 2019/2020 harvest seasons. The experimental design consisted of randomized blocks (DBC), treatments consisted of the presence (+Ca and B) and absence of (-Ca and B). The doses used were 400 g Ca and 40 g B ha⁻¹, which were made as applications at stage R1 of soybean. Plant nutritional status, gas exchange parameters, photosynthetic enzyme (Rubisco), total soluble sugar concentration, leaf protein content, agronomic parameters and grain yield. Addition of Ca and B resulted in an increase in leaf B content. Net photosynthesis, stomatal conductance, water use efficiency and carboxylation increased when Ca and B were obtained. Consequently, the improvement of photosynthesis increased the concentration of sugar and protein in the leaf. Improvement in metabolic activity did not affect grain mass per plant, but increased the number of pods per plant and yield. The change in yield was influenced by a cascade of events. The improvement in photosynthetic activity combined with the increase in sugar production may have increased the number of reproductive structures, which directly led to an increase in soybean grain yield.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr, foliar fertilization, calcium, boron, flowering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Balanço hídrico em Botucatu (SP), durante as safras de soja 2018/2019 (a) e 2019/2020 (b).....31
- Figura 2 – Teores foliares de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e), S (f), B (g), Cu (h) e Zn (i) na soja em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2018/2019 e 2019/2020.....32
- Figura 3 – Fotossíntese líquida (A) (a), condutância estomática (g_s) (b), concentração de CO_2 na câmara subestomática (C_i) (c), transpiração foliar (E) (d), eficiência do uso da água (EUA) (e) e eficiência de carboxilação (A/C_i) (f) em função da aplicação de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2019/2020.....33
- Figura 4 – Proteína foliar (a) e concentração de açúcar total (c) na safra 2018/2019 e 2019/2020 e atividade da enzima Rubisco (b) na safra 2019/2020, em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B).....34
- Figura 5 – Componentes de produção: altura de plantas (a), número de vagens por planta (b), número de grãos por vagem (c) e número de grãos por planta (d) e produtividade em função da aplicação de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2018/2019 e 2019/2020.....35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Importância da cultura da soja	21
2.2	Adubação foliar de cálcio e boro.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Área de estudo	25
3.2	Delineamento experimental	26
3.3	Condução do experimento.....	26
3.4	Avaliações e análise estatística.....	27
4	RESULTADOS	31
4.1	Caracterização de fatores climáticos da região	31
4.2	Nutrição foliar, trocas gasosas e metabolismo do carbono	32
4.3	Componentes de produção e produtividade de grãos	34
5	DISCUSSÃO.....	36
5.1	Estado nutricional da cultura.....	36
5.2	Trocas gasosas, metabolismo do carbono e proteína foliar.....	36
5.3	Componentes de produção e produtividade	38
6	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de grãos, sendo a produção da safra 2019/2020 foi em torno de 257 milhões de toneladas, com uma área cultivada de aproximadamente 66 milhões de ha. A produção brasileira de soja na safra 2019/2020 foi de quase 125 milhões de t, com uma área cultivada de aproximadamente 37 milhões de ha, elevando o Brasil ao posto de maior produtor mundial, conforme o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2021).

Considerando a importância econômica mundial da cultura e alinhando-se com a crescente demanda por alimentos, é necessário aumentar a produção agrícola da cultura da soja. O aumento da produtividade das culturas está associado com os avanços tecnológicos do setor produtivo. Dentre tais tecnologias, está a adubação foliar, que tem se mostrado uma ferramenta importante, não apenas com a função nutricional, mas também é uma estratégia adicional que permite melhorias no rendimento (GOMES et al., 2017).

Dessa forma, a adubação foliar assume a função suplementar que, quando aplicada em baixas doses do nutriente e em determinados estádios fenológicos, pode proporcionar um efeito estimulante, e, ainda pode melhorar a atividade fotossintética, a translocação de açúcares e aumentar o crescimento e a produtividade vegetal (RODRIGUES et al., 2021).

A suplementação foliar de Cálcio (Ca) e boro (B) na soja, é um manejo cujos os efeitos ainda não são totalmente esclarecidos. O Ca e o B são elementos de baixa mobilidade e possuem funções semelhantes (BROW; SHELP, 1997). O Ca é necessário como um elemento estrutural e desempenha um papel na sinalização celular (WILKINS et al., 2016; BANG et al., 2020). Além de estar envolvido na estabilidade da membrana, na integridade e divisão celular (WHITE; BROADLEY, 2003), na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico (ZHENG et al., 2019).

A importância do B não se resume apenas à função estrutural, mas também a sua participação em vários processos no metabolismo da planta. Muitas de suas funções ainda não são esclarecidas, acredita-se que este atua na estrutura da parede celular e da membrana (por ser um agente ligante) (CHORMOVA; MESSENGER;

FRY, 2013), na reprodução (formação do tubo polínico) e no metabolismo vegetal (ciclo ascorbato, fenóis, nitrogênio e fotossíntese) (WANG et al., 2015).

A adubação suplementar com Ca e B é uma prática que vem sendo utilizada pelos agricultores, quando a planta está no estágio de florescimento, como é o caso da cultura da soja. Dentre as funções desses elementos, em específico, ambos estão envolvidos na germinação do pólen e no crescimento do tubo polínico (MUSSKOPF; BIER, 2010; GOMES et al., 2017; FIOREZE et al., 2018; VARANDA et al., 2018) e a falta destes na soja interfere na retenção de flores e fixação de vagens (MUSSKOPF; BIER, 2010).

Como o Ca e o B das folhas não são redistribuídos para os órgãos jovens (brotações novas, flores e vagens) (BROWN; SHELP, 1997; WHITE; BROADLET, 2003) e, associado ao elevado potencial abortivo das estruturas reprodutivas da soja. Acredita-se que o xilema das flores de soja não são funcionais, por ser um órgão jovem o xilema encontra-se vivo, portanto, não funcional fisiologicamente (MILFONT et al., 2013).

Assim, a adubação foliar de Ca e B no florescimento da soja pode aumentar o número de vagens por planta, decorrente de maior retenção de flores e da fixação das vagens, e, por consequente, na produtividade da cultura. Ainda, para que isto ocorra, é provável que a adubação suplementar com Ca e B incremente a eficiência fisiológica da planta, tanto na assimilação de carbono, quanto na síntese de carboidratos, dada a função destes nutrientes. Porém, ainda existem poucas informações em relação a eficiência dessa aplicação, sendo necessários mais estudos com este foco.

Diante disso, objetivou-se com este trabalho, avaliar os efeitos proporcionados pela suplementação nutricional de Ca e B via foliar no estado nutricional, metabólico, nos componentes de produção e na produtividade da cultura da soja.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da cultura da soja

A soja (*Glycine max* L.) é uma das principais *commodities* agrícolas mundiais, a produção brasileira na safra 2019/2020 foi de quase 125 milhões de toneladas, com uma área cultivada de aproximadamente 37 milhões de ha e produtividade próxima de 3,4 t ha⁻¹, colocando o Brasil como maior produtor mundial do grão, conforme o levantamento da Conab (2021).

A produção de soja apresenta grande importância para a economia nacional e mundial, sendo a oleaginosa mais consumida e produzida no mundo. Seu cultivo é realizado em praticamente todas as regiões brasileiras, além de ser a principal cultura em expansão em área e volume produzido (OLIVEIRA NETO, 2016; COSMO; GALERIANI; ZANETTI, 2019).

A sua importância é advinda da sua ampla utilização, que envolve tanto a alimentação humana, quanto animal em virtude da qualidade nutricional do grão. A soja é uma rica fonte de proteína e de óleo vegetal, seus grãos também podem ser utilizados na produção de biocombustíveis (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014; SPARKS, 2015; OLIVEIRA NETO, 2016).

2.2 Adubação foliar de cálcio e boro

O aumento da produtividade das culturas está associado com os avanços tecnológicos do setor produtivo. Dentre tais tecnologias, está a aplicação de fertilizantes e bioestimulantes foliares, pois entre os fatores que afetam o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas, encontram-se o fornecimento dos nutrientes (SILVA et al., 2017; VARANDA et al., 2018).

A adubação foliar tem a finalidade de fornecer nutrientes no momento de maior necessidade e, em muitos casos prevenir, corrigir, complementar e/ ou suplementar as exigências nutricionais da cultura, de forma rápida e eficiente (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Ainda pode ser utilizada como um estimulante, com o objetivo de garantir a produção em situações de estresse (ROSOLEM, 2002; RODRIGUES et al., 2021).

Assim como as raízes, as folhas têm a capacidade de absorver água e nutrientes depositados em sua superfície, sendo tão eficiente quanto a absorção radicular, porém, a diferença é o tempo de absorção. Nas raízes a solução pode penetrar até a endoderme (em regiões velhas limitada pela estria de Caspary), enquanto, nas folhas, uma das maiores dificuldades dessa técnica é a penetração das substâncias na folha devido a existência de estruturas anatômicas que protegem as plantas contra o dessecamento, impedindo a livre movimentação dos gases e solução, o que não ocorre com as raízes (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013).

A adubação foliar é uma valiosa alternativa complementar e/ ou suplementar ao manejo nutricional da soja, sendo empregada em situações específicas, não substituindo a adubação convencional (via solo) (CALONEGO; PALMA; FOLONI, 2012), principalmente na fase reprodutiva, quando as plantas apresentam alta demanda nutricional e altas taxas de translocação de fotoassimilados e nutrientes para a produção de grãos (DOMINGOS et al., 2021).

O cálcio (Ca) e o boro (B) são nutrientes essenciais, importantes no crescimento e desenvolvimento das plantas (ZOZ et al., 2016). O Ca é considerado um nutriente estrutural, sendo um dos principais integrantes da parede celular, pois na lamela média é responsável por interligar as cadeias pécticas, formando o pectato de cálcio (este liga a grupos $R-COO^-$ de ácidos poligalacturônicos – pectinas), que forma um complexo firme de pectina, essencial para o fortalecimento das paredes celulares e dos tecidos vegetais (MARSCHNER, 2012; KAMESHWAR; QIN, 2018). Também está envolvido na estabilidade da membrana e a integridade celular, além de atuar como um sinalizador modulado pela sua concentração no citoplasma (THOR, 2019).

Muitas das funções do B ainda não são bem esclarecidas, acredita-se que este atua na estrutura da parede celular e na manutenção da integridade da membrana celular, onde o B atuaria estabilizando-a, por meio do seu uso como ponto para ligações em cruz, mediante a ligação dos dois pares hidroxilas livres do borato com componentes da pectina que possuem grupos cis-diois, formando o borato diéster de ramnogalacturonanos II (RG II). Essa ligação reversível, estabiliza essa pectina na parede celular, garantindo a forma e a rigidez às células (CHORMOVA; MESSENGER; FRY, 2013), na formação do tubo polínico (DOMINGOS et al., 2021) e no metabolismo das plantas (ciclo ascorbato, metabolismo de fenóis, nitrogênio (N) e fotossíntese) (WANG et al., 2015). A dificuldade de identificar as demais funções do

B são prejudicadas como consequência da sua função principal na parede celular e membrana (MARSCHNER, 1995).

A combinação do Ca e B são essenciais para a germinação do grão de pólen e crescimento do tubo polínico, auxiliando no processo de fertilização e, conseqüentemente, evitando o abortamento das flores (CALONEGO et al., 2010). Na cultura da soja é comum a ocorrência de abortamento de grande quantidade flores e vagens, isso foi atribuído a menor disponibilidade de fotoassimilados e nutrientes (FIOREZE et al., 2013).

As funções denominadas ao Ca e B são fundamentais para os tecidos meristemáticos e na fase reprodutiva, em situações de deficiência, os órgãos em crescimento ativo como as pontas de caules e raízes, a germinação do pólen e o crescimento do tubo polínico, também são prejudicados (MARSCHNER, 2012; FAGAN et al., 2015; WANG et al., 2015).

Em geral, as plantas absorvem Ca e B principalmente pelas raízes na forma de Ca^{2+} e ácido bórico (H_3BO_3), respectivamente, sendo redistribuídos para a parte aérea da planta, via xilema pelo fluxo de transpiração (PEREIRA et al., 2020). Ambos os nutrientes apresentam mobilidade restrita no floema, porém, o B é o único elemento cuja mobilidade é altamente dependente da espécie, nota-se alta mobilidade em plantas que translocam açúcares álcoois (como sorbitol, manitol e dulcitol) (BROWN; HU, 1996) e, baixa mobilidade nas plantas que translocam sacarose (STANGOULIS et al., 2010).

Embora o Ca e B sejam elementos essenciais para a soja, os resultados de pesquisa mostraram que a aplicação foliar desses nutrientes tem sido contraditória. Muitos experimentos mostraram aumento da produtividade, como o trabalho de Weaver et al. (1984) observaram que a pulverização em flores de feijão com nitrato de Ca e ácido bórico pode aumentar a retenção de vagens e elevar a produtividade de grãos. Bevilaqua et al. (2002) verificaram que a aplicação foliar de Ca e B durante a fase de floração aumentou o número de vagens por planta, grãos por vagem e o peso de grãos, e que a aplicação de Ca aumentou a resistência do tegumento das sementes de soja a danos mecânicos. Enquanto outros não obtiveram resultados significativos na aplicação de Ca e/ ou B (KAPPES; GOLO; CARVALHO, 2008; CALONEGO et al., 2010; FIOREZE et al., 2017).

Com isso, a aplicação foliar de CaB é uma forma de complementar o manejo nutricional da soja, principalmente durante os estádios reprodutivos, pois durante esse período as plantas apresentam maiores necessidades nutricionais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O experimento foi realizado nas safras de soja 2018/2019 e 2019/2020 na Fazenda Experimental Lageado pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), no município de Botucatu - SP, localizada sob as coordenadas: Latitude 22°49' S e Longitude 48°45' W, com altitude de 786 m. O solo da área experimental é classificado como Latossolo, de textura argilosa, caulínica, térmico típico Haplorthox (USDA, 2014). O clima da região é classificado como Cwa (Temperado quente mesotérmico) (KÖPPEN; GEIGER, 1928), com chuvas no verão e seca no inverno. As médias anuais de precipitação é 1.360 mm por ano e de temperatura média anual de 20,7°C (média de 50 anos) (UNICAMP, 2020). Os dados de temperatura máxima e mínima, precipitação e evapotranspiração foram coletados em uma estação meteorológica próxima da área experimental. O balanço climatológico foi calculado pelo método proposto por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), seguindo o procedimento de Thornthwaite e Mather (1995).

Antes do estabelecimento do experimento, determinou-se a granulometria e as propriedades químicas do solo a uma profundidade de 0-20 cm (Tabela 1). A partir da análise de solo, realizou-se a calagem com calcário dolomítico para elevar a saturação de base (V%) para 70%. O calcário dolomítico utilizado obtinha as seguintes características: 280 g kg⁻¹ de óxido de cálcio (CaO), 200 g kg⁻¹ de óxido de magnésio (MgO) e 81% de equivalente de carbonato de cálcio (CaCO₃), conforme a metodologia descrita por Quaggio e Van Raij (1997).

Tabela 1 - Caracterização física e química do solo da área experimental na camada de 0 - 20 cm, antes da semeadura

Parâmetros Granulométricos do solo							
Argila	Silte		Areia		Densidade		
.....	g kg ⁻¹				 g cm ⁻³		
602,0	281,0		117,0		1,19		
Parâmetros Químicos do solo							
pH (CaCl ₂)	M.O	P (resina)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	Acidez potencial
--	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			mmolc kg ⁻¹		
5,4	26,2	29,0	58,0	15,0	2,8	2,0	34,2
S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	V	CTC pH 7,0
.....	mg kg ⁻¹				(%)		mmolc kg ⁻¹
4,90	0,4	8,8	22,0	26,2	2,0	62,0	90,0

Obs: Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ determinados com resina; Al³⁺ determinado com extrator KCl.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), com oito repetições. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação foliar ou não de Cálcio + Boro (Ca e B). As parcelas foram compostas por 10 linhas de 10 m de comprimento e espaçadas a 0,45 m entrelinhas, resultando em uma área de 45 m².

Para ambas as safras realizou-se a aplicação de Ca e B no estágio fenológico R1 da soja (início do florescimento) (FEHR; CAVINESS, 1977), com aplicação de 400 g de Ca e 40 g de B ha⁻¹ (Cloreto de Cálcio – 10% Ca; Ácido Bórico – 1% B) e um óleo vegetal (30 mL ha⁻¹). As aplicações foram realizadas com auxílio de um pulverizador costal pressurizado a CO₂, equipado com uma barra de 3,0 m, com 6 bicos do tipo leque plano (TTI 110 02 VP), regulados para uma pressão de serviço de 1,8 BAR, resultando em um volume de calda de 150,0 L ha⁻¹. Os tratamentos foram aplicados no período da manhã, com temperatura entre 25-29°C, umidade relativa de 75-80%, solo úmido e velocidade do vento de 6,0-8,0 km h⁻¹.

3.3 Condução do experimento

A implantação da cultura ocorreu no dia 12/11/2018 e 17/11/2019, por meio da semeadura mecanizada. O cultivar de soja utilizado para ambas as safras foi ao TMG 7062 IPRO (Tropical Breeding & Genetics®). As sementes foram tratadas com os

fungicidas carboxin (1 g i.a kg⁻¹ de sementes) e thiram (1 g i.a kg⁻¹ de sementes) e inoculadas com SEMIA 5079 (*Bradyrhizobium japonicum*) e SEMIA 5080 (*Bradyrhizobium diazoefficiens*) antes da semeadura. Utilizou-se 14 sementes m⁻¹, o que representou uma população de aproximadamente 310.000 plantas ha⁻¹. Para ambos os cultivos, a fertilização de semeadura foi com 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O. Os tratos culturais durante a condução do experimento, seguiram as recomendações de manejo conforme a escala fenológica da soja, propostos no trabalho de Cosmo, Galeriani e Zanetti (2019).

3.4 Avaliações e análise estatística

As avaliações foram realizadas em ambas as safras de soja, sendo elas: estado nutricional da cultura, parâmetros de troca gasosa, enzima fotossintética, concentração total de açúcar solúvel e proteína total da folha, parâmetros agrônômicos e produtividade. As avaliações de parâmetros de troca gasosa e enzima fotossintética (Rubisco) foram realizadas apenas na safra 2019/2020.

3.4.1 Estado nutricional da cultura

Para determinação do estado nutricional das plantas de soja, coletou-se a terceira folha totalmente expandida com pecíolo, do ápice para a base, de 20 plantas por parcela de acordo com Ambrosano et al. (1970). A amostragem foi realizada no estágio fenológico R3 (Início da formação de vagens) (FEHR; CAVINESS, 1977).

Do material vegetal, realizou-se a determinação das concentrações de nitrogênio (N) através da digestão sulfúrica e determinado pelo método de destilação de Kjeldahl e, os demais nutrientes, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu) e zinco (Zn) foram digeridos pelo método de nitro-perclórica e determinados por espectrofotômetro de absorção atômica, exceto P e S que foram determinados por colorimetria, conforme a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

3.4.2 Parâmetros de troca gasosa

A mensuração da troca gasosa foi realizada apenas na safra de 2019/2020, por meio de um equipamento portátil de troca gasosa modelo CIRAS-3 (PP Systems Inc., Amesbury, MA, USA). A medida de troca gasosa foi realizada no estádio R3. Foram mensurados os seguintes parâmetros: taxa de fotossíntese líquida (A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i - $\mu\text{mol mol}^{-1}$), transpiração (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), eficiência do uso da água (EUA - $\mu\text{mol CO}_2 (\text{mmol H}_2\text{O})^{-1}$) determinada pela razão de A/E e a eficiência de carboxilação que foi determinada pela razão A/C_i .

O equipamento estava calibrado com os seguintes parâmetros: 380-400 $\text{mol mol}^{-1} \text{ CO}_2$ atmosférico, 1.100 $\mu\text{mol quanta m}^{-2} \text{ S}^{-1}$ de radiação fotossintética ativa (PAR) fornecidas por lâmpadas LED, temperatura da câmara foliar de 25-27°C e 60-70% de umidade. As medições foram executadas sob condições naturais em dias limpos, no período entre 10:00 – 12:00 h, com 10 repetições.

3.4.3 Concentração total de açúcar solúvel

A concentração total de açúcar solúvel foi determinada seguindo a metodologia de Dubois et al. (1956). Esse método baseia-se na determinação de açúcares simples, polissacarídeos e seus derivados após a desidratação dos mesmos pelo ácido sulfúrico e posterior formação de complexo dos produtos formados com o fenol. Empregou-se 20 μL do sobrenadante, 0,5 mL de fenol a 5% e 2 mL de ácido sulfúrico. As concentrações foram baseadas na curva padrão de sacarose e os resultados foram expressos em g kg^{-1} .

3.4.4 Concentração de proteína total na folha

A concentração de proteína total na folha foi determinada pelo método de Bradford (1976), que utiliza o corante de “Coomassie brilliant blue” (BG-250). Esse método consiste na interação entre o corante BG-250 e as proteínas (contendo aminoácidos de cadeias laterais básicas ou aromáticas), após a interação foram

realizadas as leituras de absorvência em espectrofotômetro a 595 nm. O teor de proteína total foi obtido através de uma curva padrão feita com albumina de soro bovino e, os resultados foram expressos em mg g^{-1} de matéria fresca da planta.

3.4.5 Enzima fotossintética

A atividade da enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase: oxigenase (Rubisco) foi determinada apenas na safra 2019/2020, pelo método enzimático acoplado à oxidação de NADH (Dinucleotídeo Nicotinamida-Adenina) e foi mensurada por meio do espectrofotômetro a 340 nm, seguindo a metodologia de Reid et al. (1997). Determinou-se a atividade da enzima pela diferença nas leituras de absorvência em 0 e 1 min (sem mover a cubeta do equipamento) e os resultados foram expressos em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}$ de proteína⁻¹.

3.4.6 Parâmetros agronômicos e rendimento de grãos

Após as plantas atingirem a maturidade fisiológica, colheu-se manualmente uma área útil de 4,05 m² em cada parcela (3 linhas com 3 m de comprimento). Os componentes de produção avaliados foram Altura da Planta (AP), Número de Vagens por Planta (NVP), Número de Grãos por Vagem (NGV), Número de Grãos por Planta (NGP) e massa de 100 grãos (MCG), também se avaliou a Produtividade (PROD) (Mg ha^{-1}).

A AP foi mensurada com o uso de trena, determinada entre a base da planta rente ao solo até a extremidade superior. O NVP e NGP foram mensurados pela contagem total de vagens e grãos de 5 plantas com posterior cálculo de média aritmética, enquanto, o NGV foi determinado pela relação de NGP/ NVP.

A MCG foi obtida pela massa média de 4 repetições de 100 grãos, enquanto a PROD foi determinada pela pesagem de todos os grãos colhidos na área útil, a qual foi extrapolada para Mg ha^{-1} . A MCG e a PROD foram corrigidas para 13% de umidade em base úmida. A umidade foi determinada com medidor automático Mini GAC (SOILCONTROL, 2021).

3.4.6 Análise estatística

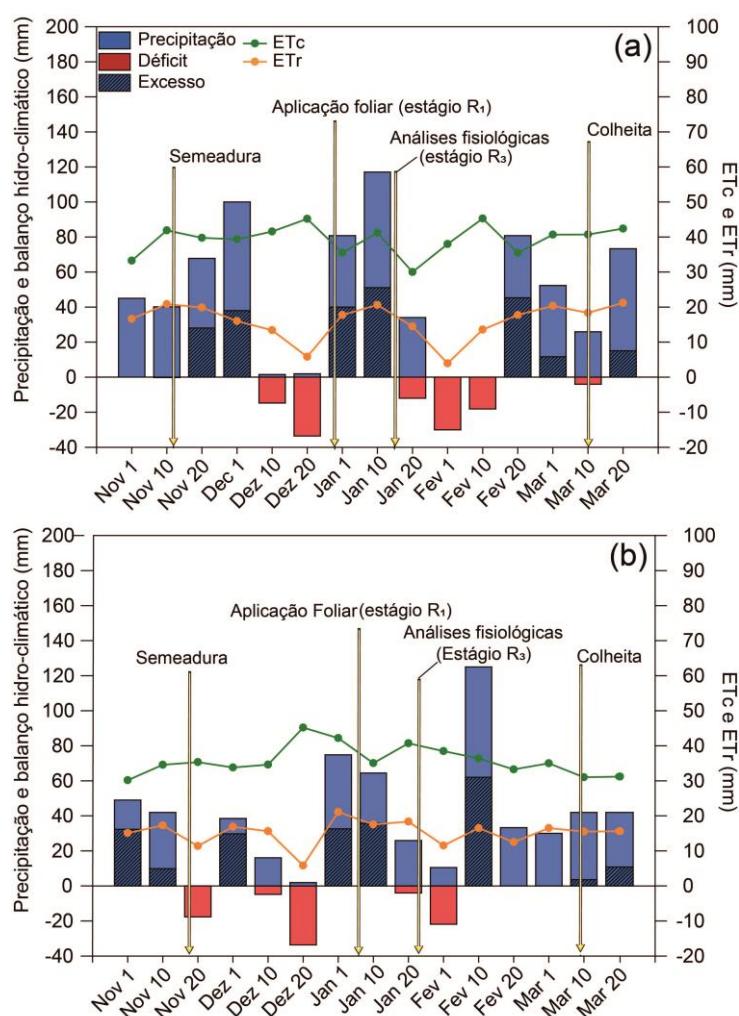
Os dados obtidos nas avaliações foram organizados e submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e teste de homocedasticidade (LEVENE, 1960) ($p \leq 0,1$). Posteriormente, estes dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,1$).

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização de fatores climáticos da região

As precipitações ocorridas nas safras 2018/2019 e 2019/2020 foram de 569 e 434 mm, respectivamente (Figura 1). Para a safra 2018/2019, nota-se que ao longo do desenvolvimento da cultura da soja, ocorreram dois períodos com baixa precipitação, o primeiro coincidiu entre o final do período vegetativo e o início da floração, enquanto o segundo ocorreu entre o final do florescimento até a formação de vagens. Para a safra 2019/2020, o período de veranico foi menos intenso do que na safra anterior, ocorrendo durante o período vegetativo e entre o final de R3 e o final de R5.

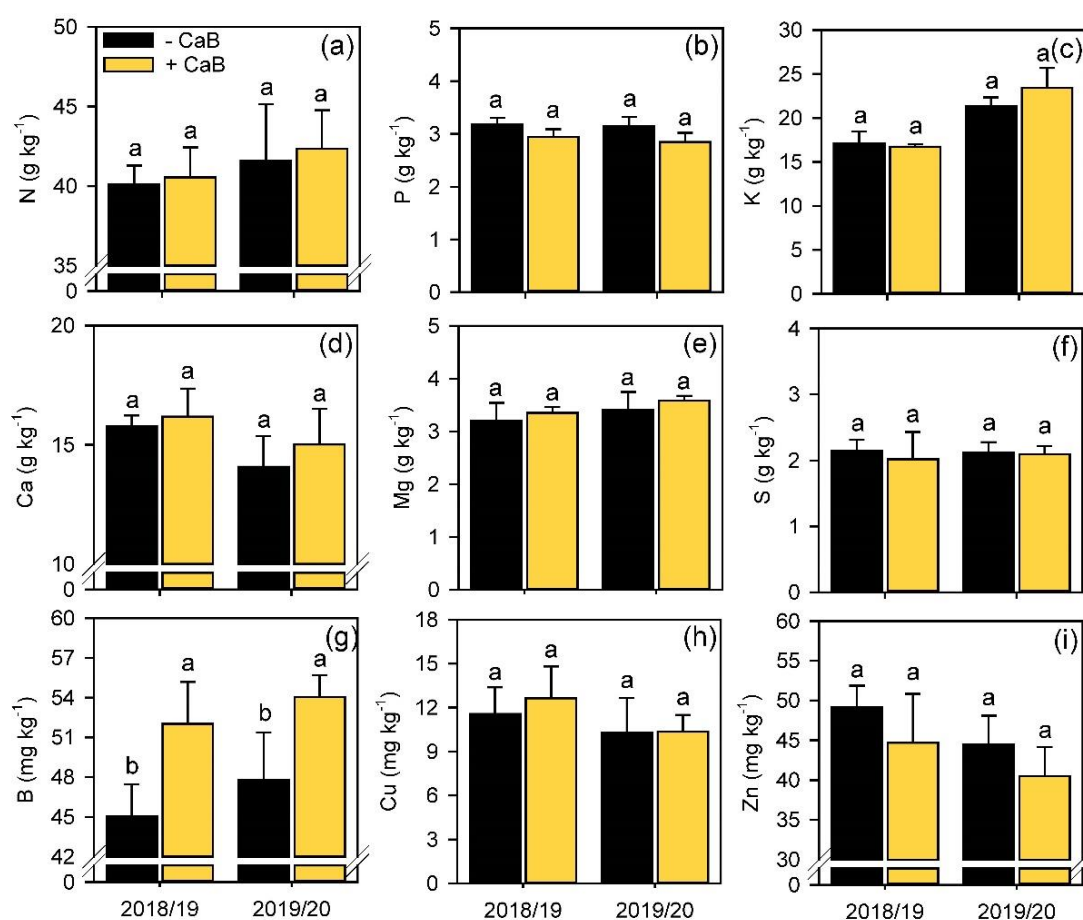
Figura 1 - Balanço hídrico em Botucatu (SP), durante as safras de soja 2018/2019 (a) e 2019/2020 (b)



4.2 Nutrição foliar, trocas gasosas e metabolismo do carbono

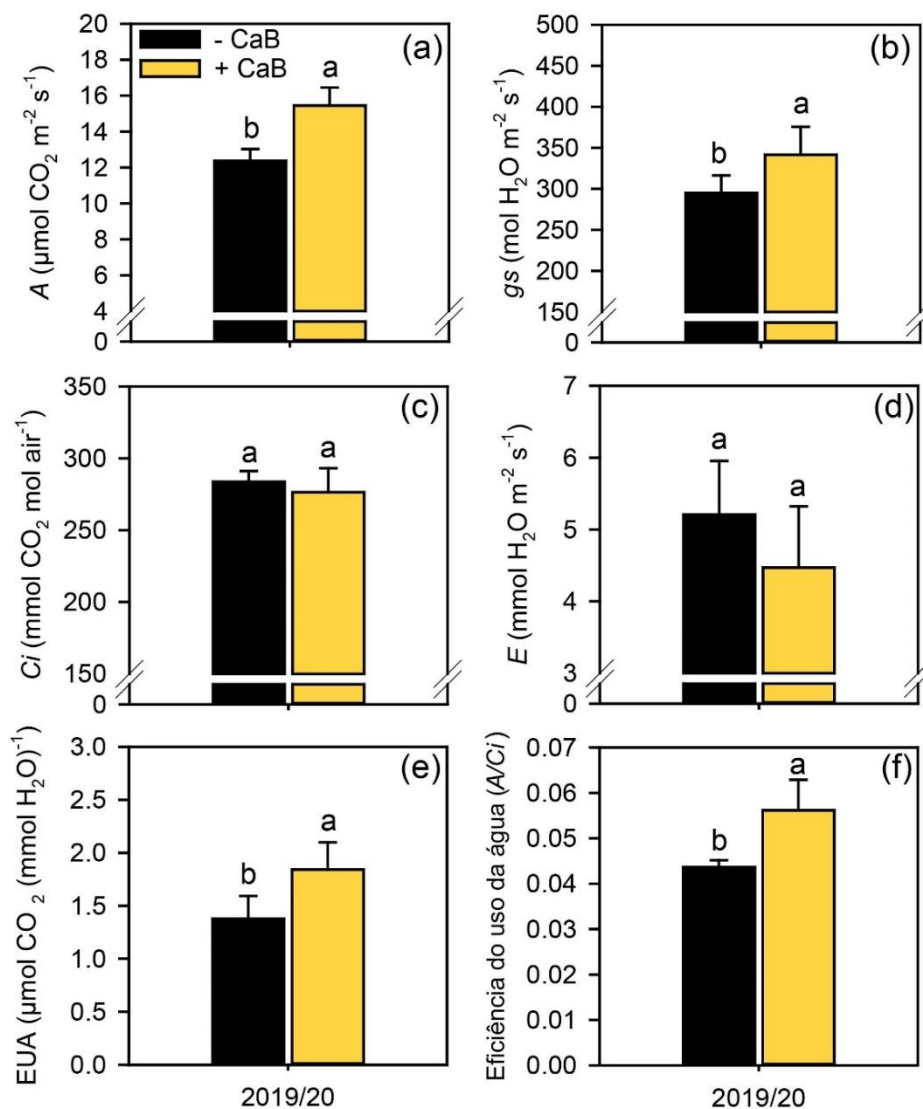
Com exceção da concentração foliar de B que aumentou 16% (Figura 2 g), os demais nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn e Mn) não foram influenciados pela aplicação foliar de Ca e B.

Figura 2 – Teores foliares de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e), S (f), B (g), Cu (h) e Zn (i) na soja em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2018/2019 e 2019/2020



A aplicação foliar de Ca e B alterou os parâmetros de trocas gasosas avaliados na segunda safra de soja (2019/2020) (Figura 3), exceto para concentração interna de CO₂ (C_i) e a transpiração foliar (E) (Figura 3 c e d). A taxa de fotossíntese líquida (A) e a condutância estomática (g_s) aumentaram em 25% e 18%, respectivamente pela aplicação foliar de Ca e B (Figura 3 a e b). O aumento da A, resultou no aumento da eficiência no uso da água (EUA) e na eficiência de carboxilação (A/C_i) em 34% e 35%, respectivamente, em comparação as plantas não tratadas (Figura 3 e f).

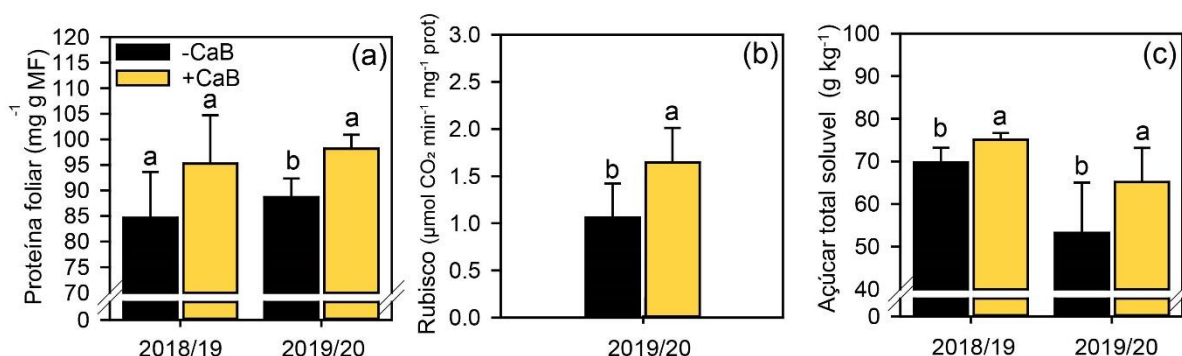
Figura 3 – Fotossíntese líquida (A) (a), condutância estomática (g_s) (b), concentração de CO_2 na câmara subestomática (C_i) (c), transpiração foliar (E) (d), eficiência do uso da água (EUA) (e) e a eficiência de carboxilação (A/C_i) (f) em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2019/2020



A concentração de proteína total na folha da segunda safra de soja também foi influenciada positivamente pela aplicação foliar de Ca e B, com incremento de 10,7% em relação ao controle (Figura 4 a). A atividade da Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/ oxigenase (Rubisco) aumentou em 54,5% quando fertilizadas com Ca e B foliar, quando comparada com as plantas não tratadas (Figura 4 b). Em função do aumento dos parâmetros fotossintéticos, os quais estão intimamente ligados ao aumento da atividade da enzima Rubisco, ocorreu aumento significativo na concentração de açúcar solúvel total nas folhas de soja (2018/2019 = 7,5%; 2019/

2020 = 22,4%), quando comparadas com o tratamento controle (Figura 4 c), porém, não pode-se afirmar que o aumento da concentração de açúcar na safra 2018/2019 pode ter sido em função do aumento nos parâmetros fotossintéticos.

Figura 4 – Proteína foliar (a) e concentração de açúcar total (c) na safra 2018/2019 e 2019/2020 e atividade da enzima Rubisco (b) na safra 2019/2020 em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B)

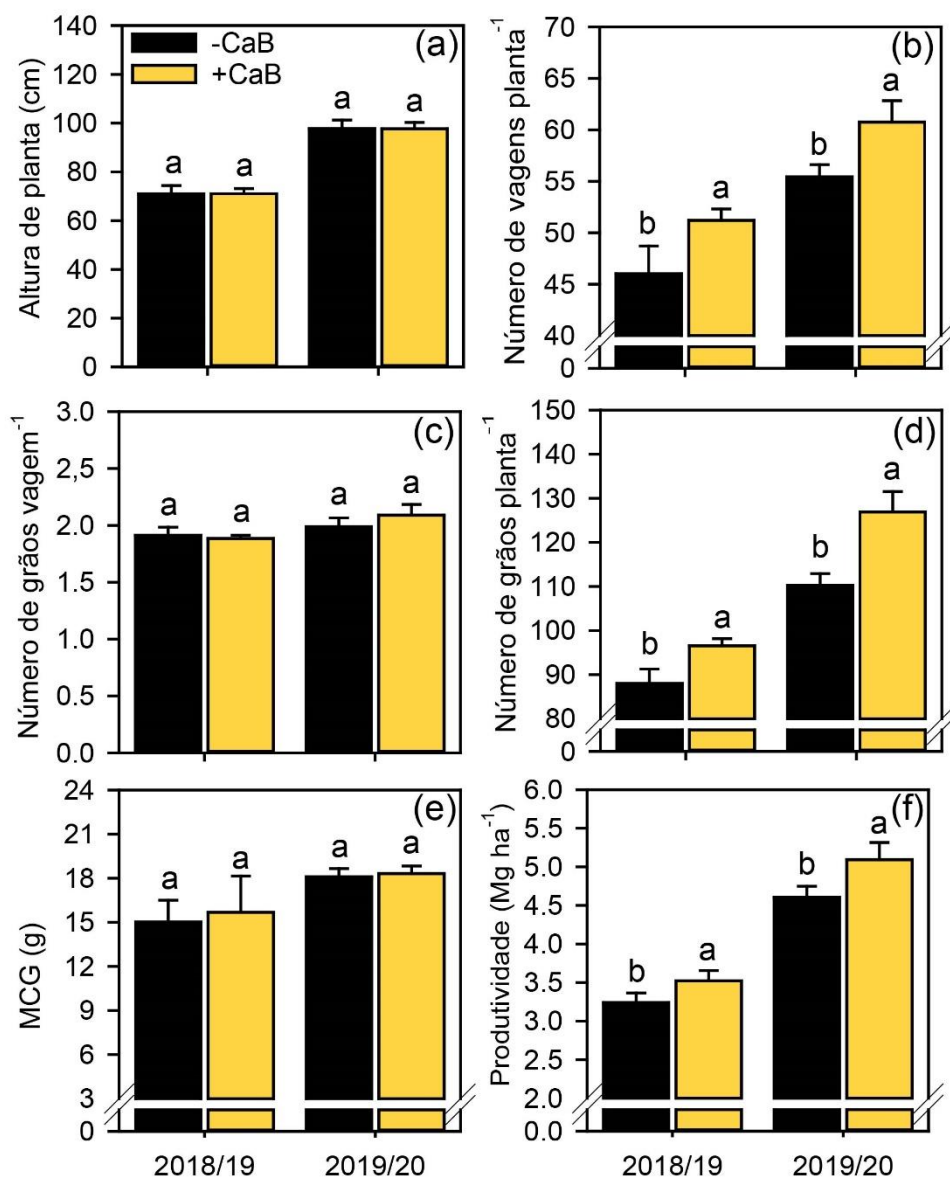


4.3 Componentes de produção e produtividade

A aplicação de Ca e B foliar alterou significativamente o número de vagens e grãos por planta, bem como a produtividade de soja, mas não influenciou a altura de plantas, o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos (Figura 5). A adubação foliar de Ca e B aumentou significativamente o número de vagens por planta (2018/2019 = 11%; 2019/2020 = 8,6%) (Figura 5 b), bem como aumentou o número de grãos por planta (2018/2019 = 9,7%; 2019/2020 = 15%) (Figura 5 d), mas não alterou o número de grãos por vagem (Figura 5 e) ($p \leq 0,1$).

Em função dos benefícios da adubação foliar de Ca e B sobre os componentes de produção, especificamente no aumento do número de vagens por planta, incrementos significativos (2018/2019 = 8,8%; 2019/2020 = 10,6%) ocorreram para a produtividade de grãos (Figura 5 f) ($p \leq 0,1$). Na safra 2018/2019, as produtividades variaram entre 3,23 e 3,52 Mg ha⁻¹ para o tratamento controle e aplicação de Ca e B, respectivamente. Na safra 2019/2020, o tratamento controle atingiu uma produtividade de 4,60 Mg ha⁻¹, enquanto que o tratamento com a aplicação de Ca e B obteve 5,09 Mg ha⁻¹, com um incremento de 10,6%. Em média, esses resultados indicam um aumento na produtividade da soja em 281 e 493 kg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 5 – Componentes de produção: Altura de planta (a), número de vagens por planta (b), número de grãos por vagem (c) e número de grãos por planta (d) e produtividade (f) em função da aplicação foliar de cálcio (Ca) e boro (B) na safra 2018/2019 e 2019/2020



5 DISCUSSÃO

5.1 Estado nutricional da cultura

Nossos resultados demonstram aumento da concentração de B foliar, indicando que a aplicação localizada de B nas folhas foi eficaz para aumentar o teor foliar, melhorando o status nutricional da planta. As concentrações adequadas no tecido de B para o desenvolvimento das dicotiledôneas podem variar de 20-70 mg kg⁻¹ (PRINCI et al., 2016; OIKONOMOU et al., 2019). A faixa de suficiência de B para a cultura da soja está entre 21-55 mg kg⁻¹ (van RAIJ et al., 1997), esses resultados indicam que a cultura da soja encontra-se dentro da faixa de suficiência.

No entanto, não obteve efeito da suplementação foliar sobre o teor de Ca nas folhas de soja (Figura 2 d), as concentrações obtidas adequaram-se dentre as faixas de suficiência (4,0-20 g kg⁻¹) (van RAIJ et al., 1997). Isso pode ser atribuído por o Ca ser um macronutriente e, nesse caso, necessita de altas doses para elevar o teor foliar.

Os incrementos nos teores de B nas folhas de soja pode ser atribuído a eficácia de absorção do nutriente, pois como o B é absorvido na forma neutra (H₃BO₃), essa forma permite a sua alta permeabilidade às camadas lipídicas (BROWN et al., 2002; TAKANA; FUJIWARA, 2008). Quanto aos teores foliares de Ca, a ausência de efeito significativo em suas concentrações foliares pode estar relacionado a baixa capacidade de redistribuição deste nutriente pela planta, uma vez que este processo é restrito somente as vias apoplásticas (CALONEGO et al., 2010; FIOREZE et al., 2018).

5.2 Trocas gasosas, metabolismo do carbono e proteína foliar

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que as plantas tratadas com Ca e B apresentaram maior valor de gs, bem como maior valor de taxa A e consequentemente maior WUE. Quando as plantas absorvem dióxido de carbono (CO₂), inevitavelmente perdem água pelos estômatos. O tempo de abertura dos estômatos está relacionado ao WUE (TAYLOR et al., 2020).

A taxa A e E são controladas por gs e influenciam-se mutuamente (ZHANG et al., 2020). O aumento da gs promove maior capacidade de assimilar CO₂ e,

consequentemente aumenta a A e a transpiração (MATTHEWS et al., 2020; ZHANG et al., 2020), no entanto, plantas com g_s mais elevados podem regular essa perda de água por meio da E , exercendo um controle rápido da abertura estomática, minimizando a perda de água enquanto assimila CO_2 . Essa melhoria foi acompanhada pelo aumento da WUE , pois esse aumento está associado pela melhora da fotossíntese líquida e a transpiração (A/E) (LAWSON; BLATT, 2014; VIALET-CHABRAND et al., 2017; MATTHEWS et al., 2020). Assim, g_s pode ser entendido como um mecanismo fisiológico que as plantas possuem para controlar a taxa de E .

O aumento da g_s contribuiu para o aumento da A , pois quando maior o g_s , maior será a assimilação do CO_2 e, consequentemente menores são os valores de C_i , apontando eficiência do processo de carboxilação (A/C_i) (EL-SHINTINAWY, 2000; KASTORI et al., 2008; HAN et al., 2009; LAWSON; BLATT, 2014). O aumento da eficiência de carboxilação pode estar relacionado à atividade da enzima Rubisco, que é responsável pela incorporação do carbono da atmosfera ao ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), o primeiro composto estável (açúcar) do Ciclo de Calvin (PARRY et al., 2003; PARRY et al., 2013; DALASTRA et al., 2014; SCHOCK, 2015).

Esta cascata de benefícios verificada na atividade fotossintética e na atividade da enzima Rubisco, promoveu um aumento nos teores de proteínas e açúcares solúveis totais nas folhas. O aumento da proteína pode indicar um aumento no conteúdo da enzima Rubisco, pois ocupa cerca de 50% da proteína solúvel total nas folhas (KRISHNAN; NATARAJAN, 2009; PARRY et al., 2013). Assim, com o aumento da proteína e da enzima Rubisco, pode indicar uma melhora no sistema fotossintético e na produção de açúcar. O aumento na produção de açúcar pode ter sido um efeito positivo devido à melhora na fotossíntese, no entanto, o alto aumento na concentração de açúcar muitas vezes não implica um efeito positivo, pois as plantas regulam a fotossíntese por meio de um mecanismo de sinalização de açúcar. Além disso, a assimilação de CO_2 também é regulada pelo acúmulo de amido, ou seja, o acúmulo de açúcares nas folhas e a baixa eficiência do transporte de elétrons, o que leva à inibição da fotossíntese e causa um efeito de feedback (KASTORI et al., 2008; PINHO et al., 2011). Este mecanismo pode atrasar a fotossíntese se o acúmulo de açúcar for muito alto, o que não foi o caso neste trabalho.

A soja apresenta um alto índice de queda de flores, fator que afeta muito o potencial de rendimento da cultura (NONOKAWA et al., 2012). Entre os fatores que

mais influenciam a abscisão dos órgãos reprodutivos está o fornecimento adequado de carboidratos às flores e frutos durante o desenvolvimento inicial (OHTO et al., 2001), pois a fixação das flores varia de acordo com sua posição no racemo da planta, com flores mais próximas do racemo mais probabilidade de se desenvolver do que flores em posições distais. Isso se deve à menor vascularização do xilema e floema na região distal (MONDAL et al., 2011). Consequentemente, o aumento da produção de açúcar no período que antecede a diferenciação floral e a formação de vagens tem um efeito direto na redução do aborto das estruturas reprodutivas (LIU et al., 2004).

5.3 Componentes de produção e produtividade

As plantas tratadas com Ca e B foliar aumentaram a eficiência do processo de assimilação de carbono e na produção de açúcar. Desta forma, a aplicação foliar de Ca e B pode ter intensificado os processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese, repercutindo a produção de grãos. Diante disso, as plantas demonstraram alto potencial para investir em maior quantidade de vagens por planta e, consequentemente em um maior número de grãos por planta (Figura 5 b e d).

A exigência nutricional da soja torna-se mais intensa com o início da fase reprodutiva, especialmente o Ca e o B são requeridos durante a formação e o desenvolvimento dos frutos, além de melhorar a fecundação das flores e a formação de grãos (VARANDA et al., 2018). Em resumo, os efeitos benéficos da aplicação foliar de Ca e B no início do período reprodutivo da soja aumentou o metabolismo do carbono e o número de estruturas reprodutivas na soja, culminando diretamente no aumento de produtividade de grãos de soja (Figura 5 f).

6 CONCLUSÕES

O estudo evidenciou que a suplementação foliar de Ca e B promoveu efeito positivo na atividade fotossintética e da produção de açúcar nas folhas da soja, levando ao aumento da produção de vagens e do rendimento de grãos. Esses efeitos também refletem a importância do Ca e B durante a fase reprodutiva das lavouras. A fertilização foliar com Ca e B no início da fase reprodutiva da soja é uma ferramenta viável para aumentar o metabolismo do carbono e garantir a formação e fixação de vagens, levando diretamente a um maior rendimento de grãos da soja.

No entanto, os efeitos de ambos os elementos não foram totalmente elucidados, dificultando a atribuição de benefícios a um nutriente específico. O boro não atua apenas na formação e desenvolvimento dos órgãos reprodutivos das plantas, mas também desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas, além de afetar o transporte e o metabolismo dos produtos fotossintéticos. Por outro lado, o cálcio é essencial para várias vias do metabolismo vegetal, podendo atuar em resposta ao estresse ambiental, na regulação das reações fotossintéticas e na fase reprodutiva.

Portanto, a suplementação contribui para a eficiência fisiológica da planta, resultando em plantas metabolicamente mais eficientes e produtivas, caracterizando-se por uma prática viável a ser adotada pelos agricultores.

REFERÊNCIAS

- AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; van RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Leguminosas e oleaginosas**. In: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p.189-191.
- BANG, T. C.; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P. SCHJOERRING, J. K. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist Foundation**, v.229, p.2246-2469, 2020.
- BEATO, V. M.; REXACH, J.; NAVARRO-GOCHIOCA, M. T.; CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; MALDONADO, J. M.; GONZÁLEZ-FONTES, A. A tobacco asparagine synthetase gene responds to carbon and nitrogen status and its root expression is affected under boron stress. **Plant Science**, v. 178, n.3, p.289-298, 2010.
- BEVILAQUA, G. A. P.; SILVA FILHO, P. M.; POSSENTI, J. C. Aplicação foliar de cálcio e boro e componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja. **Ciência Rural**, v.32, n.1, p. 31-34, 2002.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v.72, p.248-254, 1976.
- BRAND, J. J.; BECKER, D. W. Evidence for direct roles of calcium in photosynthesis. **Journal of Bioenergetics and Biomembranes**, v.16, n.4, p.239-249, 1983.
- BROWN, P. H.; HU, H. Phloem mobility of boron is species dependent: Evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species. **Annals of Botany**, v.77, p.497-505, 1996.
- BROWN, P. H.; SHELP, B. J. Boron mobility in plants. **Plant and Soil**, v.193, p.85-101, 1997.
- BROWN, P. H.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M. A.; BASSIL, E. S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DANNEL, F.; RÖMHELD, V. Boron in plant biology. **Plant Biol**, v.4, n.2, p. 205-223, 2002.
- CALONEGO, J. C.; OCANI, K.; OCANI, M.; SANTOS, C. H. Adubação boratada foliar na cultura da soja. **Colloquium Agrariae**, v.6, n.2, p.20-26, 2010.
- CALONEGO, J. C.; PALMA, H. N.; FOLONI, J. S. S. Adubação nitrogenada foliar com sulfato de amônio e ureia na cultura do milho. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.1, n.1, p.34-44, 2012.
- CAMACHI-CRISTÓBAL, J. J.; REXACH, J.; GONZÁLEZ-FONTES, A. Boron in plants: Deficiency and toxicity. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.50, n.10, p.1247-1255, 2008.

CERVILLA, L. M.; BLASCO, B.; RÍOS, J. J.; ROMERO, L.; RUIZ, J. M. Oxidative stress and antioxidants in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants subjected to boron toxicity. **Annals of Botany**, v.100, p.747-756, 2007.

CHORMOVA, D.; MESSENGER, D. J.; FRY, S. C. Boron bridging of rhamnogalacturonan-II, monitored by gel electrophoresis, occurs during polysaccharide synthesis and secretion but not post-secretion. **The Plant Journal**, v.77, n.44, p.534-546, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Produção e balanço de oferta e demanda de grão**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acessado em: 21 maio 2021.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M.; ZANETTI, W. A. L. Aplicação prática da escala fenológica na cultura da soja. In: CONGRESSO ONLINE PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE DO MILHO E SOJA, 2., 2019, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: COMSOJA, 2019. p.1-4.

DALASTRA, G. M.; ECHER, M. M.; GUIMARÃES, V. F.; HACHMANN, T. L.; INAGAKI, A. M. Trocas gasosas e produtividade de três cultivares de meloeiro conduzidas com e dois frutos por planta. **Bragantia**, Campinas, v.73, n.4, p.365-371, 2014.

DOMINGOS, C. S.; BESEN, M. R.; ESPER NETO, M.; COSTA, E. J. O.; SCAPIM, C. A.; INOUE, T. T.; BASTISTA, M. A.; BRACCINI, A. L. Can calcium and boron leaf application increase soybean yield and seed quality?. **Acta Agriculturae Scandinavica**, p.171-181, 2021.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v.28, p.350-356, 1956.

DURBAK, A. R.; PHILLIPS, K. A.; PIKE, S.; O'NEILL, M. A.; MARES, J.; GALLAVOTTI, A.; MALCOMBER, S. T.; GASSMANN, W.; MCSTEEN, P. Transport of boron by the *tassel-less1* aquaporin is critical for vegetative and reproductive development in maize. **The Plant Cell**, v.26, n.7, p.2978-2995, 2014.

EL-SHINTINAWY, F. Structural and functional damage caused by boron deficiency in sunflower leaves. **Photosynthetica**, v.36, p.565-573, 2000.

FAGAN, E. B.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; SOARES, L. H.; DOURADO NETO, D. **Fisiologia vegetal: Metabolismo e nutrição mineral**. São Paulo: Editora Andrei, 2015. 212p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; **Iowa State University Cooperative Extension Service, Special Report 80**. Iowa State University of Science and Technology: Ames, 1977.

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. H.; From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science**, v.4, p.1-5, 2013.

FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015.

FIOREZE, S. L.; RODRIGUES, J. D.; CARNEIRO, J. P.; SILVA, A. A.; LIMA, M. B. Fisiologia e produção da soja tratada com cinetina e cálcio sob déficit hídrico e sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.1, p.1432-1439, 2013.

FIOREZE, S. L.; CARNEIRO, J. P. C.; PINTO, D. D.; RODRIGUES, J. D. Foliar application of calcium and kinetin on soybean at reproductive stage. **Journal of Plant Nutrition**, v.40, p.2602-2610, 2017.

FIOREZE, S. L.; TOCHETTO, C.; COELHO, A. E.; MELO, H. F. Effects of calcium supply on soybean plants. **Comunicata Scientiae**, v.9, n.2, p.219-225, 2018.

GOMES, I. S.; BENETT, C. G. S.; SILVA JUNIOR, R. L.; XAVIER, R. C.; BENETT, K. S. S.; SILVA, A. R.; CONEGLIAN, A. Boron fertilization at different phenological stages of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n.8, p.1026-1032, 2017.

HAN, S.; TANG, N.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; LI, Y.; CHEN, L. S. CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. **Plant Science**, v.176, p.143-153, 2009.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contexto mundial brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 70p.

IWAI, H.; HOKURA, A.; OISHI, M.; CHIDA, H.; ISHII, T.; SAKAI, S.; SATOH, S. The gene responsible for borate cross-linking of pectin Rhamnogalacturonan-II is required for plant reproductive tissue development and fertilization. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.103, n.44, p. 16592-16597, 2006.

JARVIST, A. J.; MANSFIELD, T. A.; DAVIES, W. J. Stomatal behavior, photosynthesis and transpiration under rising CO₂. **Plant, Cell & Environment**, v.22, p.639-648, 2002.

KAMESHWAR, A. K. S.; QIN, W. Structural and functional properties of pectin and lignin-carbohydrate complexes de-esterases: A review. **Bioresources and Bioprocessing**, v.5, n.43, p.1-16, 2018.

KAPPES, C.; GOLO, A. L.; CARVALHO, M. A. C. Doses e épocas de aplicação foliar de boro nas características agronômicas e na qualidade de sementes de soja. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.9, n.3, p.291-297, 2008.

KASTORI, R.; PLESNICAR, M.; SAKAC, P. E. Z. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and soluble carbohydrates in sunflower leaves as affected by boron deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v.18, n.9, p.1751-1763, 2008.

KNIGHT, H.; TREWAVAS, A. J.; KNIGHT, M. R. Calcium signaling in *Arabidopsis thaliana* responding to drought and salinity. **Plant Jour**, v.12, n.5, p.1067-1078, 1997.

KOCH, K. Carbohydrate-modulated gene expression in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v.47, p.509-540, 1996.

KOPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

KOSHIBA, T.; KOBAYASHU, M.; MATOH, T. Boron deficiency: How does the defect in cell wall damage the cells?. **Plant Signaling & Behavior**, p. 557-558, 2009.

KOSHIBA, T.; KOBAYASHU, M.; ISHIHARA, A.; MATOH, T. Boron nutrition of cultured tobacco By - 2 cells. VI. Calcium is involved in early responses to boron deprivation. **Plant & Cell Physiology**, v. 51, n.2, p.323-327, 2010.

KRISHNAN, H. B.; NATARAJAN, S. S. A rapid method for depletion of rubisco from soybean (*Glycine max*) leaf for proteomic analysis of lower abundance proteins. **Phytochemistry**, v.70, p.1958-1964, 2009.

LAWSON, T.; BLATT, M. R. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. **Plant Physiology**, v.164, p.1556-1570, 2014.

LEONARD, A.; HOLLOWAY, B.; GUI, M.; RUPE, M.; YU, G.; BEATTY, M.; ZASTROW-HAYES, G.; MEELEY, R.; LLACA, V.; BUTLER, K.; STEFANI, T.; JAQUETH, J.; LI, B. *Tassel-less1* Encodes a boron channel protein required for inflorescence development in maize. **Plant & Cell Physiology**, v.55, n.6, p.1044-1054, 2014.

LEVENE, H. **Robust tests for equality of variances**. In: Contributions to probability and statistics: Essays in Honor of Ingram. OLKIN, L.; GHURYE, S. G.; HOEFFDING, W.; MADOW, W. G.; MANN, H. B. Palo Alto: Stanford University Press, 1960. p. 278-292.

LIANG, W.; WAG, M.; AI, X. The role of calcium in regulating photosynthesis and related physiological indexes of cucumber seedlings under low light intensity and suboptimal temperature stress. **Scientia Horticulturae**, v.123, p.34-38, 2009.

LIU, F.; JENSEN, C. R.; ANDERSON, M. N. Pod set related to photosynthetic rate and endogenous ABA in soybeans subjected to different water regimes and exogenous ABA and BA at early reproductive stages. **Annals of Botany**, London, v.94, p.405-411, 2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S. A. **Evaluation of nutritional status of plants: Principles and applications**. 2.ed. Potafós: Piracicaba. 1997.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. Ed. London: Academic Press, 1995.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plantas**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.

MATTHEWS, J. S. A.; VIALET-CHABRAND, S.; LAWSON, T. Role of blue and red light in stomatal dynamic behavior. **Journal of Experimental Botany**, v.71, p.2253-2269, 2020.

MILFONT, M. O.; ROCHA, E. E. M.; LIMA, A. O. N.; FREITAS, B. M. Higher soybean production using honeybee and wild pollinators a sustainable alternative to pesticides and autopollination. **Environmental Chemistry Letters**, v.11, p.335-341, 2013.

MONDAL, M. M. A.; FAKIR, M. S. A.; PRODHAN, A. K. M. A.; ISMAIL, M. R.; ASHRAFUZZAMAN, M. Deflowering effect on vasculature and yield attributes in raceme of mungbean [*Vigna radiate* (L). Wilczek]. **Australian Journal of Crop Science**, Collingwood, v.5, p.1339-1344, 2011.

MUSSKOPF, C.; BIER, V. A. Efeito da aplicação de fertilizante mineral cálcio e boro via foliar na cultura da soja (*Glycine max*). **Cultivando o Saber**, Cascavel, v.3, n.4, p.83-91, 2010.

NONOKAWA, K.; NAKAJIMA, T.; NAKAMURA, T.; KOKUBUN, M. Effect of synthetic cytokinin application on pod setting of individual florets within raceme in soybean. **Plant Production Science**, v.15, n.2, p.79-81, 2012.

OHTO, M.; ONAI, K.; FURUKAWA, Y.; AOKI, E.; ARAKI, T.; NAKAMURA, K. Effects of sugar on vegetative development and floral transition in arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 127, p.252-261, 2001.

OIKONOMOU, A.; LADIKOU, E. V.; CHATZIPEROU, G.; MARGARITOPOULOU, T.; LANDI, M.; SOTIROPOULOS, T.; ARANITI, F.; PAPADAKIS, I. E. Boron excesso imbalances root/shoot allometry, photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters and sugar metabolism in apple plants. **Agronomy**, v.9, n.11, p.1-17, 2019.

OLIVEIRA NETO, A. A. **A produtividade da soja: Análise e perspectivas**. Brasília: Conab, 2016. 35p.

PARRY, M. A. J.; ANDRALOJC, P. J.; MITCHELL, R. A. C.; MADGWICK, P. J.; CHAVES, A. J. Manipulação de Rubisco: Quantidade, atividade, função e regulação. **Journal of Experimental Botany**, v.54, p. 1321-1333, 2003.

PAPADAKIS, I. E.; TSIANTAS, P. I.; TSANIKLIDIS, G.; LANDI, M.; PSYCHOYOU, M.; FASSEAS, C. Changes in sugar metabolism associated to stem bark thickening partially assist Young tissues of *Eriobotrya japonica* seedlings under boron stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 231, p.337-345, 2018.

PARRY, M. A. J.; ANDRALOJC, P. J.; SCALES, J. C.; SALVUCCI, M. E.; CARMO-SILVA, A. E.; ALONSO, H.; WHITNEY, S. M. Rubisco activity and regulation as targets for crop improvement. **Journal of Experimental Botany**, v.64, p.717-730, 2013.

PEGO, J. V.; KORTSTEE, A. J.; HUIJSER, C.; SMEEKENS, S. C. Photosynthesis, sugars and the regulation of gene expression. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p.407-416, 2000.

PEREIRA, E. G.; SARAIVA, A. G.; DIAS, A. C.; FERREIRA, N. S.; LIMA, B. R.; FERNANDES, E. C.; BUCHER, C.A.; FERNANDES, M. S. O metabolismo do nitrogênio em plantas de arroz é severamente afetado pela deficiência de cálcio e magnésio. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.3, p.15353-15361, 2020.

PINHO, L. G. R.; CAMPOSTRINI, E.; MONNERAT, P. H.; TORRES NETTO, A.; PIRES, A. A.; MARCIANO, C. R.; SOARES, Y. J. B. Boron deficiency affects gas Exchange and photochemical efficiency (JPI teste parameters) in green dwarf coconut. **Journal of Plant Nutrition**, v.33, n.3, p.439-451, 2011.

PRINCI, M. P.; LUPINI, A.; ARANITI, F.; LONGO, C.; MAUCERI, A.; SUNSERI, F.; ABENAVOLI, M. R. Boron toxicity and tolerance in Plants: Recent Advances and Future Perspectives. IN: AHMAD, P. **Plant metal Interaction**. 2016. 115-147p.

QUAGGIO, J.A.; van RAIJ, B. **Correção da acidez do solo**. In: Recomendações de adubações e calagem para o Estado de São Paulo. In: van Raij, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 14-19.

REID, C. D.; TISSUE, D. T.; FISCUS, E. L.; STRAIN, B. R. Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of rubisco in ozone-treated plants. **Physiologia Plantarum**, v.101, p.398-404, 1997.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a Corn Plant Develops**; Iowa State University Cooperative Extension Service: Ames, IA, USA, 1993.

RODRIGUES, V. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; MORETTI, L. G.; PORTUGAL, J. R.; MUNDT, T. T.; OLIVEIRA, S. L.; GARCIA, A.; CALONEGO, J. C.; LOLLATO, R. P. Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. **Plant**, v.10, p.1-17, 2021.

ROLLAND, F.; MOORE, B.; SHEEN, J. Sugar sensing and signaling in plants. **Plant Cell**, v.14, p.185-205, 2002.

ROLIM, G.; SENTELHAS, P.; BARBIERE, V. Planilhas no ambiente excel para os calculos de balanço hídricos: Normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.133-137, 1998.

ROSOLEM, C. A. **Recomendação e aplicação de nutrientes via foliar**. Lavras: UFLA/ FAEPE, 2002.

SCHOCK, A. A. **Respostas fisiológicas em plantas jovens de *Jatropha curcas* L. submetidas à estrobilurinas e alagamento**. 2015. 67f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Pelotas/ Instituto de Biologia, Pelotas, 2015.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n.3, p.591-611, 1965.

SILVA, N. F.; CLEMENTE, G. S.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; CUNHA, F. N.; AZEVEDO, L. O. S. Use of foliar fertilizers for the specific physiological management of different soybean crop stages. **American Journal of Plant Sciences**, n.8, p. 810-834, 2017.

SOILCONTROL. **Medidor portátil de umidade tipo caneca**. 2021. Disponível em: <https://www.soilcontrol.com.br/produto/92906/medidor-portatil-de-umidade-tipo-caneca.aspx>. Acesso em: 23 maio 2021.

SPARKS. **O futuro da soja nacional**. Brasil: IEag/ abag, 2015?.

STANGOULIS, J.; TATE, M.; GRAHAM, R.; BUCKNALL, M.; PALMER, L.; BOUGHTON, B.; REID, R. The mechanism of boron mobility in wheat and canola phloem. **Plant Physiology**, v.153, p.876-881, 2010.

TANAKA, M.; FUJIWARA, T. Physiological roles and transport mechanisms of boron: Perspectives from plants. **European Journal of Physiology**, v.456, p.671-677, 2008.

TAYLOR, S. H.; ORR, D. J.; SILVA, E. C.; LONG, S. P. During photosynthetic induction, biochemical and stomatal limitations differ between *Brassica* crops. **Plant, Cell & Environment**, v.43, n.110, p.2623-2636, 2020.

THOR, K. Calcium: Nutrient and messenger. **Frontiers in Plant Science**, v.10, n.440, p.1-7, 2019.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance Climatology. Laboratory of climatology, New Jersey**, 1995.

UNICAMP. Center of meteorological and climatic research applied to agriculture. **Botucatu: Municipalities climate of São Paulo State**. Disponível em: <https://www.cpa.unicamp.br/outras>. Acesso em: 05 jun. 2021.

USDA. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed.; USDA—Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA, 2014.

van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. rev.atual. Campinas: Instituto Agrônômico/ Fundação IAC, 1997. 285p.

VARANDA, M. A. F.; MENEGON, M. Z.; NASCIMENTO, V. L.; CAPONE, A.; BARROS, H. B. Efeitos da aplicação foliar de boro na produtividade de soja na várzea irrigada. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.11, n.2, p.15-22, 2018.

VIALET-CHABRAND, S. R. M.; MATTHEWS, J. S. A.; MCAUSLAND, L.; BLATT, M. R.; GRIFFITHS, H.; LAWSON, T. Temporal dynamics of stomatal behavior: Modeling and implications for photosynthesis and water use. **Plant Physiology**, v.174, p.603-613, 2017.

WANG, N.; YANG, C.; PAN, Z.; LIU, Y.; PENG, S. Boron deficiency in woody plants: Various responses and tolerance mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p. 1-14, 2015.

WANG, Q.; YANG, S.; WAN, S.; LI, X. The significance of calcium in photosynthesis. **International Journal of Molecular Sciences**, v.20, n.6, p. 1-14, 2019.

WEAVER, M. L.; TIMM, H.; NAG, H.; BURKE, D. W.; SILBERNAGEL, M. J.; FORTER, K. Effects of soil moisture tension on pod retention and seed yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **HortiScience**, Alexandria, v.19, p.567-569, 1984.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plants. **Annals of Botany**, v.92, p.487-511, 2003.

WILKINGS, K. A.; MATTHUS, E.; SWARBRECK, S. M.; DAVIES, J. M. Calcium-Mediated abiotic stress signaling in roots. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1-17, 2016.

ZHANG, X.; MEI, X.; WANG, Y.; HUANG, G.; FENG, F.; LIU, X.; GUO, R.; GU, F.; HU, X.; YANG, Z.; ZHONG, X. LI, Y. Stomatal conductance bears no correlation with transpiration rate in wheat during their diurnal variation under high air humidity. **PeerJ**, v.8, p.1-16, 2020.

ZHENG, R. H.; SU, S.; XIAO, H.; TIAN, H. Q. Calcium: A critical factor in pollen germination and tube elongation. **International Journal of Molecular Sciences**, v.20, p.1-12, 2019.

ZOZ, T.; STEINER, F.; SEIDEL, E. P.; CASTAGNARA, D. D.; SOUZA, G. E. Foliar application of calcium and boron improves the spike fertility and yield of wheat. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.32, n.4, p.873-880, 2016.