

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 01/06/2025

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until June 01, 2025

LEILA BERNART VILELA

**SUPLEMENTAÇÃO VIA FOLIAR DE NUTRIENTES AUMENTA A EFICIÊNCIA
FISIOLÓGICA E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO DE SEGUNDA
SAFRA**

Botucatu

2023

LEILA BERNART VILELA

**SUPLEMENTAÇÃO VIA FOLIAR DE NUTRIENTES AUMENTA A EFICIÊNCIA
FISIOLÓGICA E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO DE SEGUNDA
SAFRA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol

Coorientadora: Letusa Momesso Marques

Botucatu

2023

V699s

Vilela, Leila Bernart

Suplementação via foliar de nutrientes aumenta a eficiência fisiológica e a produtividade de grãos do milho de segunda safra / Leila Bernart Vilela. -- Botucatu, 2023

74 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol

Coorientadora: Letusa Momesso Marques

1. adubação foliar. 2. macronutrientes. 3. micronutrientes. 4. fisiologia. 5. estresse oxidativo. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SUPLEMENTAÇÃO VIA FOLIAR DE NUTRIENTES AUMENTA A EFICIÊNCIA FISIOLÓGICA E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA

AUTORA: LEILA BERNART

ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

COORIENTADORA: LETUSA MOMESSO MARQUES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participação Virtual)
Producao Vegetal / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Prof.ª Dr.ª CACILDA MÁRCIA DUARTE RIOS FARIA (Participação Virtual)
Agronomia / Universidade Estadual do Centro Oeste

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participação Virtual)
Producao Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Dr. LUIZ GUSTAVO MORETTI DE SOUZA (Participação Virtual)
Botucatu/SP / .

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)
Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / FEIS / UNESP - Ilha Solteira

Botucatu, 01 de junho de 2023

*Aos meus amados avós,
In memoriam de Laurindo e Mercedes,
Joaquim e Ermelinda
dedico*

AGRADECIMENTOS

À Deus por manter minha fé e meu propósito durante toda a minha jornada da vida, sou grata.

Aos meus amados pais Reinaldo e Juscely, que alimentaram meu amor pela agricultura desde a minha infância, mostrando que a luta diária para produzir alimento é muito maior do que se possa imaginar. Obrigada pelo amor e apoio em tudo.

A minha querida irmã, que sempre me deu forças, mesmo quando eu nem acreditava em mim, obrigada por ser meu anjo da guarda e minha pessoa preferida no mundo.

Ao meu esposo Rafael, pelos incontáveis abraços cheios de amor, quando eu mais precisava, você é meu porto seguro e minha melhor escolha de vida.

Ao Prof. Dr. Crusciol, pela orientação, ensinamentos, paciência, sem dúvidas você é meu maior exemplo de ser humano, seu caráter é inigualável.

À minha co-orientadora Letusa Momesso Marques, quem eu admiro muito, obrigada por toda ajuda durante este processo.

Ao meu grande amigo professor Alessandro Jefferson Sato, pelos conselhos.

A todos os professores e funcionários da FCA.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

“Mire na lua. Mesmo que você erre, você vai acertar as estrelas.”

(tradução própria)

BROWN, Les. **Les Brown Enterprises**, c2023.
Disponível em: <https://lesbrown.com/book-les>.
Acesso em: 9 ago 2023.

RESUMO

O milho é considerado uma das culturas de maior importância em área cultivada no Brasil. Para satisfazer a demanda de alimentos, com o aumento populacional é preciso um aumento de cerca de 60% na produção global de alimentos, sem aumentar a área destinada ao cultivo, para que isso ocorra, as adoções de novas tecnologias são necessárias para o aumento de produtividade. Com isso a utilização da tecnologia de adubação foliar, minimizando os efeitos deletérios na planta, com temperaturas elevadas, estresse hídrico e radiação solar, com ação estimulante na planta é uma ferramenta necessária na agricultura moderna e sustentável. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos fisiológicos com a presença da aplicação foliar de macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio e os micronutrientes boro, manganês e zinco e ausência da aplicação na cultura do milho em dois anos agrícolas, dividindo-se em dois capítulos. O primeiro capítulo foi realizado um estudo com nitrogênio, fósforo e potássio foliar em milho na safra 2019 e 2020. O segundo capítulo refere-se ao estudo com boro, manganês e zinco na mesma cultura e anos agrícolas do estudo 1. Os experimentos foram realizados em campo na Fazenda Experimental Lageado pertencente a Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. As aplicações ocorreram nos estádios fisiológicos V8. As avaliações realizadas no primeiro experimento foram o status nutricional das folhas de milho, enzimas fotossintéticas [enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase)], taxa fotossintética líquida, A; condutância estomática, gs; concentração subestomática de CO₂, Ci; transpiração foliar, E; eficiência no uso da água, WUE; e eficiência de carboxilação, A/Ci de plantas de milho, concentração de proteínas totais e concentração de açúcares solúveis totais, prolificidade, número de grãos por espiga, peso cem grãos e rendimento de grãos. No segundo experimento seguiu as mesmas avaliações, porém inseriu a avaliação de enzimas antioxidantes (peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), superóxido dismutase (SOS), catalase (CAT)). O NPK foliar proporcionou aumento da fotossíntese líquida, condutância estomática, eficiência do uso da água e carboxilação. A aplicação de B, Mn e Zn foliar contribuiu para aumentar as enzimas antioxidativas, reduzir o estresse oxidativo e melhorar o uso da energia acumulada da fotossíntese. Os resultados obtidos nesta pesquisa representam uma boa estratégia para diminuir o estresse causado por fatores abióticos e aumentar a produtividade das culturas.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; NPK; adubação foliar; fotossíntese; estresse oxidativo.

ABSTRACT

Maize is considered one of the most important crops in cultivated area in Brazil. To satisfy the demand for food, with the population increase, it is necessary an increase of about 60% in the global production of food, without increasing the area destined to the cultivation, for that to happen the adoption of new technologies are necessary for the increase of productivity. Thus, the use of foliar fertilization technology, minimizing the deleterious effects on the plant, with high temperatures, water stress and solar radiation, with a stimulating action on the plant, is a necessary tool in modern and sustainable agriculture. Thus, the objective of this work was to evaluate the physiological effects with the presence of foliar application of the macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium and the micronutrients boron, manganese and zinc and the absence of application in the corn crop in two agricultural years, divided into two chapters. The first chapter was a study with nitrogen, phosphorus and potassium leaf in corn in the 2019 and 2020 harvest. The second chapter refers to the study with boron, manganese and zinc in the same crop and agricultural years of study 1. The experiments were carried out in the field at the Experimental Farm Lageado belonging to the Faculty of Agronomic Sciences of the Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". The applications occurred in physiological stages V8. The evaluations carried out in the first experiment were the nutritional status of corn leaves, photosynthetic enzymes (Rubisco and PEPcase), net photosynthetic rate, A; stomatal conductance, g_s ; substomatal concentration of CO_2 , C_i ; leaf transpiration, E; water use efficiency, WUE; and carboxylation efficiency, A/C_i of maize plants, total protein concentration and total soluble sugar concentration, prolificacy, number of grains per ear, grain weight and grain yield. In the second experiment, the same evaluations were followed. The second experiment followed the same estimates, but included the evaluation of antioxidant enzymes (hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOS), catalase (CAT)). Leaf NPK increased net photosynthesis, stomatal conductance, water use efficiency and carboxylation. The application of foliar B, Mn and Zn contributed to increase antioxidative enzymes, reduce oxidative stress and improve the use of accumulated energy from photosynthesis. The results obtained in this research represent a good strategy to reduce the stress caused by abiotic factors and increase crop productivity.

Keywords: *Zea mays L.*; NPK; foliar fertilization; photosynthesis; oxidative stress.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	17
	CAPÍTULO 1 - A ADUBAÇÃO FOLIAR COM NPK MELHORA O METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO NA ENTRESSAFRA.....	20
1.1	INTRODUÇÃO.....	20
1.2	MATERIAL E METODOS.....	23
1.3	RESULTADOS	27
1.4	DISCUSSÃO	34
1.5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37
	CAPÍTULO 2 - ADUBAÇÃO FOLIAR COM BMNZN MELHORA O METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E A PRODUTIVIDADE DO MILHO SAFRINHA.....	40
2.1	INTRODUÇÃO.....	40
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	47
2.4	RESULTADOS	47
2.5	DISCUSSÃO	54
2.6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS.....	73

INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays* L.) está entre as culturas de maior importância no cenário nacional e mundial, e suas formas de consumo vão desde a alimentação humana e animal até sua utilização como biodiesel (MACIEL; TUNES, 2021). Na última década, a área plantada da cultura aumentou 161% e a produção 242,1% no Brasil, sendo considerado o terceiro maior produtor mundial de milho com um total de 106 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO [CONAB], 2023). Esse aumento importante na produção de milho, não se deve ao fato isolado do aumento de área, mas da introdução de tecnologias, possibilitando maiores incrementos na produtividade em diferentes épocas de cultivo. Em virtude ao seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, sua relevância socioeconômica é indispensável mundialmente (FANCELLI; DOURADO NETO, 2008).

O cultivo de milho, anteriormente realizado na safra de verão, tem crescido ano a ano no período de safrinha, após a colheita da soja ou de outras culturas como o feijão “das águas”. Esse sistema de plantio para o cultivo desta cultura, fora da época normal, é denominado de milho safrinha, período em que as condições climáticas são desfavoráveis e a atividade é arriscada do ponto de vista agrônomo. Por muitos anos, pouca tecnologia e investimentos em insumos eram utilizados e resumidos basicamente à semeadura e colheita, por se tratar de uma exploração de maior risco e incertezas de produtividade ao produtor (CRUZ; PEREIRA FILHO; DUARTE, 2021). O desenvolvimento de novas cultivares e conhecimento do milho safrinha possibilita incrementos e recordes em produtividade de grãos. Entretanto, por vezes, temperaturas extremas, ausência de precipitação em estádios críticos para desenvolvimento do milho e o atraso no cultivo da cultura antecessora promovem riscos no desenvolvimento da cultura e, assim, a necessidade de encontrar ferramentas para mitigar as limitações do desenvolvimento das plantas e da manutenção da produtividade em períodos desfavoráveis.

A produtividade do milho pode ser gerenciada por vários fatores, entre eles é destacada a exigência por nutrientes fornecida comumente via fertilizantes, em que a utilização destes com adequada e assertiva aplicações pode promover respostas positivas no metabolismo e produção da cultura (OHLAND et al., 2005). A aplicação de nutrientes via foliar é uma adubação alternativa com objetivo de suplementar a

adubação realizada via solo em semeadura e cobertura e estimular fisiologicamente as plantas para potencializar a produção. Esta adubação é, ainda, vantajosa por ser uma maneira de fornecer nutrientes de forma localizada no tecido alvo, no momento de maior demanda e utilização do nutriente pela cultura, possibilitando, até, um menor impacto ambiental, como é o caso do nitrogênio (N) (FERNÁNDEZ; EICHERT, 2009). A aplicação foliar, além de todos os fatores citados acima, tem efeito imediato nas plantas, com menor taxa de aplicação, diminuindo os riscos de toxicidade (SEKHON, 2003).

O uso desta técnica nas lavouras por algum tempo foi questionado, devido aos produtos serem caracterizados pela baixa qualidade e tecnologia e uso incorreto dos compostos nutricionais (ROSOLÉM, 2002). Entretanto, houve o surgimento de novas tecnologias nos produtos com fertilizantes foliares, bem como nos produtos adicionados à aplicação como os adjuvantes, tensoativos, umectantes, quelantes e outros, com o objetivo de melhorar a eficácia da adubação foliar (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Outra vantagem é a facilidade na aplicação dos fertilizantes via foliar, pois estes podem ser adicionadas ao tanque de pulverização com defensivos agrícolas desde que feita a mistura corretamente. Assim, absorção dos nutrientes pelas folhas ocorre facilmente pela cutícula, tricomas, estômatos e poros das folhas, e seu transporte ocorre via floema até os órgãos drenos para o metabolismo (MARSCHNER, 2012).

Com esses potenciais benefícios na utilização da adubação foliar, os macronutrientes são nutrientes essenciais a serem suplementados durante o desenvolvimento da cultura do milho. O N, por exemplo, sendo o nutriente mais exigido pela cultura e desempenhando papel no acúmulo de proteína e promoção da produtividade dos grãos, pode promover o aumento de componentes de produção e qualidade do grão do milho (PAVINATO et al., 2008). Além disso, está associado ao crescimento vegetativo, participa de mecanismos da fotossíntese e é componente das moléculas de clorofila, aminoácidos, DNA, citocromos e de todas as enzimas e coenzimas (FANCELLI; DOURADO NETO, 2008). O fósforo (P), depois do N, é o elemento mais limitante no crescimento das plantas, atuando na síntese de moléculas, como DNA, RNA, ATP e NADPH e de fosfolipídios; o elemento tem ação na respiração, metabolismo de carboidratos, fotossíntese, fixação de N_2 , e ativação de proteínas por meio de fosforilação (POIRER; BUCHER, 2002; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003). E, por último, o potássio (K) é considerado um cátion

monovalente presente nas plantas e sua importância para o desenvolvimento é na regulação do potencial osmótico das células, armazenamento de assimilados, funcionamento de várias enzimas que estão contidas na respiração e no processo fotossintético.

Somados aos macronutrientes, os micronutrientes são elementos essenciais no crescimento das plantas e a deficiência de qualquer micronutriente pode provocar problemas no crescimento e desenvolvimento das mesmas, repercutindo na quantidade e qualidade da produção (FERNANDES; SOUZA; SANTOS, 2018). Micronutrientes destacados à cultura do milho são o boro (B), manganês (Mn) e o zinco (Zn), atuando nos processos metabólicos da produção hormonal, ativação enzimática, fotossíntese, síntese de carboidratos, formação de proteínas, síntese de ácidos orgânicos, fixação biológica de nutrientes, formação da parede celular, e alongação celular. Dessa maneira, esses elementos fornecidos na época de maior demanda têm efeito imediato, eficaz e de baixo custo para as plantas, sendo a adubação com nutrientes via foliar uma ferramenta para a melhoria no desenvolvimento da cultura e eficiência metabólica, bem como redução do estresse oxidativo causado pelas condições climáticas desfavoráveis ao cultivo do milho safrinha.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da aplicação foliar de macro (N, P e K) e micronutrientes (B, Mn e Zn) no desempenho produtivo e nas características agronômicas e fisiológicas da cultura do milho safrinha.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tanto a aplicação foliar de macronutrientes (NPK), quanto a de micronutrientes (BMnZn), podem melhorar os parâmetros fotossintéticos e a ativação do sistema antioxidante para a cultura do milho, melhorando a produtividade de grãos. A aplicação foliar permite que o nutriente será aproveitado em estádios do desenvolvimento em que há demanda pelos mesmos, possibilitando boas condições de absorção. Em regiões tropicais, onde a possibilidade de cultivo é variável, com condições de cultivo de safras nos períodos de outono e inverno, em que a precipitação e o estresse hídrico podem ser um fator adverso ao desenvolvimento da cultura. Neste contexto, plantas bem nutridas, como observado nos capítulos 1 e 2 desta tese, podem mitigar períodos de condições adversas, bem como promover o desenvolvimento e a produtividade de grãos das plantas.

Práticas que visam aumentar a produtividade de forma mais sustentável, como a aplicação foliar, podem garantir um maior suprimento na demanda de alimentos e no crescimento populacional. A aplicação foliar é uma tecnologia que visa o aumento da produtividade sem aumento de área cultivada, possibilitando ao agricultor novas ferramentas estratégicas. Assim, esta abordagem com a adubação foliar evidencia o potencial uso dessa tecnologia e o potencial para futuras pesquisas na dinâmica e mecanismos de absorção do adubo pelas folhas, suas características e sua utilização em prol da agricultura.

REFERÊNCIAS

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Série histórica das safras: Milho 2ª Safra**. Brasília: Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/910-Milho>. Acesso em: 23 abr. 2023.
- CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; DUARTE, A. P. Milho Safrinha. **Embrapa**, Brasília, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/pt/web/portal/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo/milho-safrinha>. Acesso em: 3 mar. 2023.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2008.
- FERNANDES, M.; SOUZA, S.; SANTOS, L. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2018.
- FERNÁNDEZ, V.; EICHERT, T. Absorção de solutos hidrofílicos pelas folhas das plantas: estado atual do conhecimento e perspectivas da fertilização foliar. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Londres, v. 28, n. 1-2, p. 36-68, 2009.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação foliar: fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015.
- MACIEL, L. M.; TUNES, L. V. A importância do controle de qualidade nas sementes de milho. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 49934-49938, 2021.
- MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- OHLAND, R. A. A.; SOUZA, L. C. F. de; HERNANI, L. C.; MARCHETTI, M. E.; GONÇALVES, M. C. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 538-544, 2005.
- Pavinato, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTO, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.
- POIRIER, Y.; BUCHER, M. Phosphate transport and homeostasis in Arabidopsis. *In*: Somerville, C. R.; Meyerowitz, E. M. (ed.). **The Arabidopsis Book**. Rockville, MD: American Society of Plant Biologists, 2022. p. 1-35.
- ROSOLEM, C. A. **Recomendação e aplicação de nutrientes via foliar**. Lavras: UFLA; Faepe, 2002.
- SEKHON, B. S. Chelates for micronutrient nutrition among crops. **Resonance**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 46-53, 2003.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytol**, [s. l.], v. 157, p. 423-447, 2003.