

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 25/08/2024

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until Aug. 25, 2024

GABRIEL OLIVEIRA NEVES

**APLICAÇÃO FOLIAR DE MAGNÉSIO E AMINOÁCIDOS EM MILHO DE
SEGUNDA SAFRA: UMA ESTRATÉGIA PARA APRIMORAR O METABOLISMO
FOTOSSINTÉTICO E ANTIOXIDANTE**

Botucatu

2023

GABRIEL OLIVEIRA NEVES

**APLICAÇÃO FOLIAR DE MAGNÉSIO E AMINOÁCIDOS EM MILHO DE
SEGUNDA SAFRA: UMA ESTRATÉGIA PARA APRIMORAR O METABOLISMO
FOTOSSINTÉTICO E ANTIOXIDANTE**

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

Orientador(a): Carlos Alexandre Costa
Crusciol

Botucatu

2023

N518a	Neves, Gabriel Oliveira Aplicação foliar de magnésio e aminoácidos em milho de segunda safra : uma estratégia para aprimorar o metabolismo fotossintético e antioxidante / Gabriel Oliveira Neves. -- Botucatu, 2023 56 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol 1. Manejo antiestresse. 2. Absorção foliar. 3. Zea Mays L.. 4. Efeito bioestimulante. 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: APLICAÇÃO FOLIAR DE MAGNÉSIO E AMINOÁCIDOS EM MILHO DE SEGUNDA SAFRA: UMA ESTRATÉGIA PARA APRIMORAR O METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO E ANTIOXIDANTE

AUTOR: GABRIEL OLIVEIRA NEVES

ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

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

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participação Virtual)
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Fitossanidade / FEIS UNESP Ilha Solteira

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

Botucatu, 25 de agosto de 2023

Aos meus pais, Andreza Oliveira
Neves e Sinval Rodrigues Neves,
por me apoiarem em toda a minha
vida.

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, saúde, pelos meus dons e talentos confiados.

Agradeço à minha família, por estar presente nos momentos de necessidade e de alegria, sempre me dando apoiando em todas as minhas decisões;

Agradeço ao professor Carlos Alexandre Costa Crusciol, por confiar no meu trabalho e ter me aceitado no seu grupo, pela sua paciência, compreensão e apoio sempre prestados;

Agradeço a todos os amigos que a Pós-graduação me proporcionou conhecer e viver momentos que jamais serão esquecidos, em especial: Sirlene, Tatiane, João Bossolani, Luiz Moretti, José Portugal, Israel, Mariley, Tarcísio, meus estagiários e aos demais que de alguma forma contribuíram durante o meu percurso acadêmico;

À minha namorada Emily que acima de tudo é uma grande amiga, sempre presente nos momentos difíceis com uma palavra de incentivo;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88887.627474/2021-00.

Por último, quero agradecer também à Universidade UNESP/FCA-Botucatu e todo o seu corpo docente que tive a sorte e o prazer inenarrável de conhecer e aprender com eles, pessoas abençoadas por seguirem uma profissão tão nobre.

“A ciência é uma aventura da mente humana em busca da verdade”

Planck, M. Where Science is Going? Ox Bow
Press, Wood-bridge, 1981, 220 p.

RESUMO

As aplicações foliares de produtos à base de fertilizantes e aminoácidos tem sido uma prática empregada a fim de maximizar o potencial produtivo das lavouras de alto padrão tecnológico. Estes produtos quando aplicados em estágios de desenvolvimento estratégicos conferem maior resiliência às plantas acometidas por estresses bióticos e abióticos. Entretanto, poucos trabalhos estudaram os aspectos do metabolismo fotossintético e antioxidante na cultura do milho quando da aplicação de magnésio (Mg) e aminoácidos (AA) foliar, em condições de campo. Deste modo, objetivou-se com este trabalho avaliar como as aplicações de AA's e de Mg foliar afetam o metabolismo fotossintético e antioxidante de plantas de milho de segunda safra. O experimento foi conduzido nas safras de outono/inverno de 2021 e 2022, respectivamente, na Fazenda experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista – Campus de Botucatu. Os tratamentos foram constituídos por quatro tratamentos de aplicação foliar: (I) Controle, (II) Magnésio [Mg^{2+} ($MgCl_2$)], (III) Aminoácidos (AA) e (IV) Mg^{2+} + AA. O delineamento experimento foi de blocos casualizados (DBC) com oito repetições. O Mg^{2+} foi aplicado na dose de 500 g ha^{-1} , e o AA foi aplicado na dose 1250 g ha^{-1} , ambos aplicados no estágio VT. Foram avaliados o status nutricional das plantas de milho, pigmentos fotossintéticos, atividade das enzimas Rubisco e Nitrato Redutase (NR), trocas gasosas (parâmetros fotossintéticos), enzimas antioxidantes, superóxido dismutase e catalase, componentes de produção e produtividade de grãos (PG) e concentração de proteínas nos grãos. Os dados foram submetidos à ANOVA e ao teste LSD ($p < 0,05$). Os resultados indicaram que quando Mg^{2+} + AA foram aplicados em conjunto, observou-se maior atividade fotossintética e antioxidante em relação aos demais tratamentos. Estes resultados refletiram na resposta da produtividade de grãos, no qual a aplicação isolada de Mg proporcionou um aumento médio de 353 kg ha^{-1} em relação ao controle. Quando o AA foi aplicado isoladamente, o incremento médio, em relação ao controle, foi de 655 kg ha^{-1} . Contudo, quando aplicados em conjunto (Mg^{2+} +AA), o incremento médio observado foi de 1.002 kg ha^{-1} . Além disso, a aplicação conjunta também refletiu no teor de proteínas totais nos grãos. Estes resultados indicam um efeito sinérgico entre estes produtos sobre o metabolismo fotossintético e antioxidante das plantas de milho, sendo assim, efetivos em aliviar os efeitos de estresse e proporcionar incrementos produtivos no milho de segunda safra.

Palavras-chave: manejo antiestresse; absorção foliar; *Zea mays* L.; efeito bioestimulante.

ABSTRACT

Foliar applications of fertilizer and amino acid-based products have been a practice used to maximize the productive potential of high-tech crops. These products, when applied at strategic stages of development, provide greater resilience to plants affected by biotic and abiotic stresses. However, few studies have studied aspects of photosynthetic and antioxidant metabolism in corn when applying magnesium (Mg) and amino acids (AA) foliar, under field conditions. Therefore, the objective of this work was to evaluate how applications of AA's and foliar Mg affect the photosynthetic and antioxidant metabolism of off-season maize plants. The experiment was conducted in the autumn/winter growing season of 2021 and 2022, respectively, at the Lageado experimental farm, belonging to the Faculty of Agricultural Sciences of the São Paulo State University – Botucatu Campus. The treatments consisted of four foliar application treatments: (I) Control, (II) Magnesium [Mg^{2+} (MgCl_2)], (III) Amino acids (AA) and (IV) Mg^{2+} + AA. The experimental design was randomized blocks (DBC) with eight replications. Mg^{2+} was applied at a dose of 500 g ha^{-1} , and AA was applied at a dose of 1250 g ha^{-1} , both applied at the VT stage. The nutritional status of maize plants, photosynthetic pigments, activity of Rubisco and Nitrate Reductase (NR) enzymes, gas exchange (photosynthetic parameters), antioxidant enzymes, superoxide dismutase and catalase, production components and grain productivity (PG) and protein concentration in grains. The data were submitted to ANOVA and the LSD test ($p < 0.05$). The results indicated that when Mg^{2+} + AA were applied combined, greater photosynthetic and antioxidant activity was observed in relation to the other treatments. These results were reflected in the response of grain yield, in which the isolated application of Mg provided an average increase of 353 kg ha^{-1} in relation to the control. When AA was applied alone, the average increase, in relation to the control, was 655 kg ha^{-1} . However, when applied together (Mg^{2+} +AA), the average increase observed was $1,002 \text{ kg ha}^{-1}$. Furthermore, the combined application also reflected the total protein content in the grains. These results indicate a synergistic effect between these products on the photosynthetic and antioxidant metabolism of maize plants, thus being effective in alleviating the effects of stress and providing productive increases in second-crop corn.

Keywords: anti-stress management; foliar absorption; *Zea mays* L.; stimulating effect.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Balanço hidroclimático referente às safras de milho de segunda safra nos anos de 2021 (a) e 2022 (b) no município de Botucatu-SP. ETP: evapotranspiração potencial, ETC: evapotranspiração da cultura.....32**
- Figura 2 – Teores foliares de macronutrientes em plantas de milho sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos (AA). N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e), e S (f).....33**
- Figura 3 – Teores foliares de micronutrientes em plantas de milho sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos (AA). Fe (a), Cu (b), Zn (c), Mn (d), B (e).....34**
- Figura 4 – Atividade da enzima nitrato redutase em folhas de plantas de milho sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos (AA).....35**
- Figura 5 – Clorofila a, Chl a (a); Clorofila b, Chl b (b); Clorofila a + b, Chl a+b (c); carotenóides (d) e índice SPAD (e) em folhas de plantas de milho sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos (AA).36**
- Figura 6 – Parâmetros fotossintéticos em folhas de milho: fotossíntese líquida, A (a); condutância estomática, gs (b); concentração de CO_2 na câmara subestomática, Ci (c); transpiração foliar, E (d); eficiência do uso da água, EUA (e); eficiência da carboxilação (f) sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e Aminoácidos (AA).....37**
- Figura 7 – Atividade da Rubisco em folhas de plantas de milho sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos (AA).39**
- Figura 8 – Concentração de Peróxido de hidrogênio, H_2O_2 (a), malondialdeído, MDA (b), superóxido dismutase, SOD (c) e catalase (d) em folhas de milho sob influência da aplicação de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos.40**
- Figura 9 – Altura de plantas (a) e Componentes de produção: número de fileiras por espiga (b) número de grãos por fileira (c), número de grãos por espiga (d) massa de cem grãos (M100G) (e) e produtividade de grãos**

(f) de milho sob influência da aplicação de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos..... 41

Figura 10 – Concentração de Albumina (a), Glutelina (b), Globulina (c), Prolamina (d), e proteína total (e) em grãos de milho sob influência da aplicação de Magnésio (Mg^{2+}) e aminoácidos. 42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Cultivo de milho de segunda safra no Brasil	21
2.2	Absorção e aplicação foliar	21
2.3	Dinâmica do magnésio no solo e na planta.....	23
2.4	Absorção e metabolismo de aminoácidos nas plantas.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	Caracterização da área experimental	26
3.2	Cultivo do milho.....	27
3.3	Delineamento experimental e tratamentos	27
3.4	Análises fisiológicas	28
3.5	Componentes de produção e produtividade	30
3.6	Teor de proteínas nos grãos.....	31
3.7	Análise estatística.....	31
4	RESULTADOS	32
4.1	Balanço hidroclimático.....	32
4.2	Status nutricional foliar e atividade da Nitrato redutase	32
4.3	Índice Spad e pigmentos fotossintéticos	35
4.4	Trocas gasosas.....	37
4.5	Atividade da Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco)	38
4.6	Atividade enzimática: enzimas antioxidantes	39
4.7	Componentes de produção e produtividade de grãos	40
4.8	Proteínas nos grãos	41
5	DISCUSSÃO.....	43
6	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ANEXO 1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA	55

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de milho (*Zea mays* L.) e isso se deve, dentre outros fatores, à implementação de uma segunda safra (milho-safrinha), após a colheita da soja de verão. O cultivo do milho de segunda safra ultrapassou em área e produção o cultivo do milho verão, e corresponde a 77% da produção nacional de milho (Nóia Júnior; Sentelhas, 2019; CONAB, 2023). No entanto, condições ambientais como seca e ondas de calor reduzem a produção, levando a perdas econômicas. Em razão das mudanças climáticas, os efeitos negativos do estresse abiótico na agricultura são intensificados, representando um desafio global para a produção de alimentos (Hura et al., 2022; Kumari et al., 2022).

A aplicação foliar de nutrientes tem sido uma eficiente estratégia para reduzir o estresse abiótico e aumentar o potencial produtivo em culturas agrícolas, (KUMARI et al., 2022; RODRIGUES et al., 2021). Em plantas bem nutridas, a adubação foliar pode assumir papel estimulante, fornecendo nutrientes às plantas em estágios críticos de desenvolvimento, aumentando a nutrição, atividade fotossintética, a produtividade de grãos e reduzindo o estresse oxidativo (GALERIANI et al., 2022; MORETTI et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022; RODRIGUES et al., 2021; ROSOLEM, 2002). Em estudo anterior, foi demonstrado que a aplicação foliar de magnésio (Mg^{2+}) em plantas bem nutridas foi eficiente em melhorar a atividade fotossintética, o metabolismo antioxidante e a produtividade de plantas de soja e milho (Rodrigues et al., 2021), devido ao papel do Mg^{2+} na síntese de clorofila, transporte e utilização de fotoassimilados, ativação de enzimas e síntese de proteínas (Ishfaq et al., 2022b).

Nos últimos anos, outros bioestimulantes ganharam espaço no manejo das culturas agrícolas, à exemplo da aplicação de aminoácidos (AA) que tem sido objeto de estudos devido ao seu papel como agente redutor de estresse, fonte orgânica de nitrogênio e precursor hormonal (Kadotani et al., 2016; Batista-Silva et al., 2019; Deller, 2020). As plantas podem sintetizar AA, mas isso requer uma grande quantidade de energia. Assim, a aplicação de AA prontos para absorção pode aumentar o ritmo de desenvolvimento ou reconstrução das plantas, especialmente em momentos críticos do seu ciclo de vida, ao permitir que estas economizem energia

(Popko et al., 2018). Apesar disso, a aplicação exógena de AA é uma tecnologia relativamente nova e muitos aspectos sobre a fisiologia das plantas cultivadas é pouco compreendido, principalmente em condições de campo.

Quando utilizados dois ou mais componentes com efeito bioestimulante é comum observar um efeito sinérgico entre estes, o que resulta em uma potencialização do crescimento e desenvolvimento das plantas (Zamljen et al., 2023). Neste estudo, a hipótese levantada é de que a aplicação foliar combinada de Mg^{2+} e AA potencializa os efeitos positivos sobre a atividade fotossintética e atividade do metabolismo antioxidante em plantas de milho de segunda safra. Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação conjunta de Mg^{2+} e AA via foliar sobre o metabolismo do fotossintético, antioxidante e produtivo em milho de segunda safra.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam que a aplicação de Mg^{2+} e AA é eficiente em melhorar o status nutricional, o metabolismo fotossintético e antioxidante de plantas de milho cultivados em segunda safra, em condições de déficit hídrico. Além disso, a aplicação combinada de Mg^{2+} e AA foi mais eficiente do que a aplicação isolada destes produtos por atuarem complementarmente em diversos processos metabólicos. Mesmo sob períodos de déficit hídrico, a suplementação de Mg^{2+} e AA pode manter a fertilização das espigas culminando em maior número de grãos e consequente aumento de produtividade de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALEXIEVA, V. et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth; stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337–1344, 2001.
- ALHASAWI, A. et al. Glycine metabolism and anti-oxidative defence mechanisms in *Pseudomonas fluorescens*. **Microbiological Research**, v. 171, p. 26–31, fev. 2015.
- ALLEN, D. K. et al. Isotope labelling of Rubisco subunits provides *in vivo* information on subcellular biosynthesis and exchange of amino acids between compartments. **Plant, Cell & Environment**, v. 35, n. 7, p. 1232–1244, 24 jul. 2012.
- ALTARUGIO, L. M. et al. Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1185–1191, dez. 2017.
- AZARAKHSH, M. R.; ASRAR, Z.; MANSOURI, H. Effects of seed and vegetative stage cysteine treatments on oxidative stress response molecules and enzymes in *Ocimum basilicum* L. under cobalt stress. **Journal of soil science and plant nutrition**, n. ahead, p. 0–0, 2015.
- AZEVEDO, R. A. et al. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280–292, 1 out. 1998.
- BATISTA-SILVA, W. et al. The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 5, p. 1630–1644, 7 maio 2019.
- BOSSOLANI, J. W. et al. Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, p. 126308, ago. 2021.
- 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, n. 1–2, p. 248–254, maio 1976.
- BUCHER, M.; KOSSMANN, J. Molecular Physiology of the Mineral Nutrition of the Potato. Em: **Potato Biology and Biotechnology**. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 311–329.
- CHATTERJEE, A.; KUNDU, S. Revisiting the chlorophyll biosynthesis pathway using genome scale metabolic model of *Oryza sativa japonica*. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 14975, 7 out. 2015.
- CHAUDHRY, A. H. et al. Current Understandings on Magnesium Deficiency and Future Outlooks for Sustainable Agriculture. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 4, p. 1819, 12 fev. 2021.
- CHEN, P. et al. Genetic Basis of Variation in Rice Seed Storage Protein (Albumin, Globulin, Prolamin, and Glutelin) Content Revealed by Genome-Wide Association Analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 9 maio 2018.
- COELHO, C.; ROMÃO, M. J. Structural and mechanistic insights on nitrate reductases. **Protein Science**, v. 24, n. 12, p. 1901–1911, 22 dez. 2015.
- CONAB. **Boletim da Safra de Grãos: 10º Levantamento - Safra 2022/23**.
- CRUZ DE CARVALHO, M. H. Drought stress and reactive oxygen species. **Plant Signaling & Behavior**, v. 3, n. 3, p. 156–165, 28 mar. 2008.
- DANIEL, J. L. P. et al. Production and utilization of silages in tropical areas with focus on Brazil. **Grass and Forage Science**, v. 74, n. 2, p. 188–200, 11 jun. 2019.

DEGL'INNOCENTI, E.; GUIDI, L.; SOLDATINI, G. F. Effect of chronic O₃ fumigation on the activity of some Calvin cycle enzymes in two poplar clones. **Photosynthetica**, v. 40, n. 1, p. 121–126, 2002.

DELLERO, Y. Manipulating Amino Acid Metabolism to Improve Crop Nitrogen Use Efficiency for a Sustainable Agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 30 nov. 2020.

DINKELOO, K.; BOYD, S.; PILOT, G. Update on amino acid transporter functions and on possible amino acid sensing mechanisms in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, v. 74, p. 105–113, fev. 2018.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília/DF: Embrapa Solos, 2018.

FERNÁNDEZ, V.; EICHERT, T. Uptake of Hydrophilic Solutes Through Plant Leaves: Current State of Knowledge and Perspectives of Foliar Fertilization. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 1–2, p. 36–68, 19 mar. 2009.

FERNÁNDEZ V, S. T. B. P. **Foliar fertilization: scientific principles and field practices**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2013.

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

FORSUM, O. et al. Capacities and constraints of amino acid utilization in *Arabidopsis*. **New Phytologist**, v. 179, n. 4, p. 1058–1069, 6 set. 2008.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. **Milho: do plantio à colheita**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide DismutasesI. Occurrence in Higher Plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1 fev. 1977.

GILL, S. S. et al. Superoxide dismutase—mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 14, p. 10375–10394, 30 jul. 2015.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909–930, dez. 2010.

GOSS, J. A. Amino Acid Synthesis and Metabolism. Em: **Physiology of Plants and their Cells**. [s.l.] Elsevier, 1973. p. 183–204.

GROTTO, D. et al. Avaliação da estabilidade do marcador plasmático do estresse oxidativo: malondialdeído. **Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 275–279, 2008.

GUIMARAES, P. E. O. ;; PACHECO, C. A. P. O milho com alto valor nutricional. Em: GUIMARÃES, P. E. O. (Ed.). **WORKSHOP SOBRE QUALIDADE DO MILHO**. [s.l.] EMBRAPA-CPAO. Documentos, 23, 1998. p. 22–32.

GUO, N. et al. Function, transport, and regulation of amino acids: What is missing in rice? **The Crop Journal**, v. 9, n. 3, p. 530–542, jun. 2021.

HAGEMAN, R. H.; REED, A. J. [24] Nitrate reductase from higher plants. **Photosynthesis and Nitrogen Fixation - Part C**, v. 69, n. 1, p. 270–280, 1980.

HAGHIGHI, M.; BARZEGAR SADEGHABAD, A.; ABOLGHASEMI, R. Effect of exogenous amino acids application on the biochemical, antioxidant, and nutritional value of some leafy cabbage cultivars. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 17720, 21 out. 2022.

HE, H. et al. Changes of plant biomass partitioning, tissue nutrients and carbohydrates status in magnesium-deficient banana seedlings and remedy potential by foliar application of magnesium. **Scientia Horticulturae**, v. 268, p. 109377, jun. 2020.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189–198, 1 abr. 1968.

HEINEMANN, B.; HILDEBRANDT, T. M. The role of amino acid metabolism in signaling and metabolic adaptation to stress-induced energy deficiency in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 13, p. 4634–4645, 22 jun. 2021.

HU, L. et al. Exogenous Glycine Betaine Ameliorates the Adverse Effect of Salt Stress on Perennial Ryegrass. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 137, n. 1, p. 38–46, jan. 2012.

HURA, T.; HURA, K.; OSTROWSKA, A. Drought-Stress Induced Physiological and Molecular Changes in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 4698, 24 abr. 2022.

HUTCHINSON, H. B.; MILLER, N. H. J. The Direct Assimilation of Inorganic and Organic Forms of Nitrogen by Higher Plants. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 3, p. 282–302, 27 jan. 1912.

ISHFAQ, M. et al. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 25 abr. 2022a.

ISHFAQ, M. et al. Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 200, p. 104909, ago. 2022b.

JEPPSEN, R. Advantages of metal amino acid chelates in foliar absorption. Em: **Proc. Albion" s Int. I Conf. on Plant Nutrition**. [s.l: s.n.]. p. 16–28.

JONES, D. Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 2, p. 209–219, fev. 2002.

KADOTANI, N. et al. Exogenous proteinogenic amino acids induce systemic resistance in rice. **BMC Plant Biology**, v. 16, n. 1, p. 60, 3 dez. 2016.

KANJANA, D. Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 20, p. 3035–3049, 13 dez. 2020.

KARLEY, A. J.; WHITE, P. J. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 291–298, jun. 2009.

KAVOOSI, G. et al. Analysis of nitrate reductase mRNA expression and nitrate reductase activity in response to nitrogen supply. **Molecular biology research communications**, v. 3, n. 2, p. 75–84, jun. 2014.

KIBRIA, M. G.; BARTON, L.; RENGEL, Z. Foliar application of magnesium mitigates soil acidity stress in wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 2, p. 378–389, 29 abr. 2021.

KIRK, P. L. Kjeldahl Method for Total Nitrogen. **Analytical Chemistry**, v. 22, n. 2, p. 354–358, 1950.

KUMARI, V. V. et al. Plant Nutrition: An Effective Way to Alleviate Abiotic Stress in Agricultural Crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 15, p. 8519, 31 jul. 2022.

- LEVENE, H. Robust tests for equality of variances,. Em: OLKIN, I. et al. (Eds.). **Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling**. 1. ed. Stanford University Press: [s.n.]. p. 278–292.
- LI, H. et al. Molecular and functional characterization of the magnesium transporter gene ZmMGT12 in maize. **Gene**, v. 665, p. 167–173, jul. 2018.
- LI, H. et al. Metabolomic and transcriptomic analyses reveal that sucrose synthase regulates maize pollen viability under heat and drought stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 246, p. 114191, nov. 2022.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, n. C, p. 350–382, 1 jan. 1987.
- LING, Q.; HUANG, W.; JARVIS, P. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in Arabidopsis thaliana. **Photosynthesis Research**, v. 107, n. 2, p. 209–214, 28 fev. 2011.
- LU, J. et al. Expression of a constitutively active nitrate reductase variant in tobacco reduces tobacco-specific nitrosamine accumulation in cured leaves and cigarette smoke. **Plant Biotechnology Journal**, v. 14, n. 7, p. 1500–1510, jul. 2016.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997.
- MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Amsterdam, Netherlands: Academic press, 2011.
- MIRI NARGESI, M.; SEDAGHATHOOR, S.; HASHEMABADI, D. Effect of foliar application of amino acid, humic acid and fulvic acid on the oil content and quality of olive. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 5, p. 3473–3481, maio 2022.
- MORETTI, L. G. et al. Thermomagnesium as a fertilizer for soybean: carbohydrate metabolism, silicon–magnesium fertilizer, and grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2108–2122, 27 ago. 2021.
- NICCHIO, B. et al. Efeito da aplicação Foliar de Si, P e K no desenvolvimento, produção e qualidade de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. e8021, 26 mar. 2021.
- NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. **Agricultural Systems**, v. 173, p. 254–267, jul. 2019.
- NOMAN, A. et al. Foliar application of ascorbate enhances the physiological and biochemical attributes of maize (*Zea mays* L.) cultivars under drought stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 61, n. 12, p. 1659–1672, 2 dez. 2015.
- NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OLIVEIRA, S. L. et al. Molybdenum Foliar Fertilization Improves Photosynthetic Metabolism and Grain Yields of Field-Grown Soybean and Maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1633, 25 maio 2022.
- PENG, B. et al. OsAAP6 functions as an important regulator of grain protein content and nutritional quality in rice. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 4847, 11 set. 2014.
- PERCHLIK, M.; TEGEDER, M. Leaf Amino Acid Supply Affects Photosynthetic and Plant Nitrogen Use Efficiency under Nitrogen Stress. **Plant Physiology**, v. 178, n. 1, p. 174–188, set. 2018.

POPKO, M. et al. Effect of the New Plant Growth Biostimulants Based on Amino Acids on Yield and Grain Quality of Winter Wheat. **Molecules**, v. 23, n. 2, p. 470, 21 fev. 2018.

PORTIS, A. R.; PARRY, M. A. J. Discoveries in Rubisco (Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase): a historical perspective. **Photosynthesis Research**, v. 94, n. 1, p. 121–143, 31 out. 2007.

QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Correção da acidez do solo. Em: VAN RAIJ, B. et al. (Eds.). **Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 14–19.

REID, C. D. et al. Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of Rubisco in ozone-treated plants. **Physiologia Plantarum**, v. 101, n. 2, p. 398–404, 1997.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops** Special report (Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/doi.aspx?doi=10.4236/ojml.2022.122014>>.

RODRIGUES, V. A. et al. Magnesium Foliar Supplementation Increases Grain Yield of Soybean and Maize by Improving Photosynthetic Carbon Metabolism and Antioxidant Metabolism. **Plants** **2021**, Vol. 10, Page 797, v. 10, n. 4, p. 797, 19 abr. 2021.

ROLIM, G., SENTELHAS, P., BARBIERE, V. Planilhas no ambiente excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Rev. Bras. Agrometeorol**, v. 6, n. 1, p. 133–137, 1998.

ROSOLEM, C. A. **RECOMENDAÇÃO E APLICAÇÃO DE NUTRIENTES VIA FOLIAR**. LAVRAS/UFPA/FAEP, , 2002.

SAUHEITL, L.; GLASER, B.; WEIGELT, A. Uptake of intact amino acids by plants depends on soil amino acid concentrations. **Environmental and Experimental Botany**, v. 66, n. 2, p. 145–152, maio 2009.

SEKHON, B. S. Chelates for micronutrient nutrition among crops. **Resonance**, v. 8, n. 7, p. 46–53, jul. 2003.

SHAFIQ, S. et al. Influence of Glycine Betaine (Natural and Synthetic) on Growth, Metabolism and Yield Production of Drought-Stressed Maize (Zea mays L.) Plants. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 2540, 22 nov. 2021.

SHANTHI, G.; PREMALATHA, M.; ANANTHARAMAN, N. Effects of l-amino acids as organic nitrogen source on the growth rate, biochemical composition and polyphenol content of *Spirulina platensis*. **Algal Research**, v. 35, p. 471–478, nov. 2018.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 20 jun. 1965.

SHEN, S. et al. Intervening in sibling competition for assimilates by controlled pollination prevents seed abortion under postpollination drought in maize. **Plant, Cell & Environment**, v. 43, n. 4, p. 903–919, 24 abr. 2020.

SILVA, G. F. DA. **Armazenamento e disponibilidade de água no solo para as plantas em sistemas de manejo de longa duração**. Tese de Doutorado—Botucatu: Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2019.

SILVA, V. M. et al. Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 201, p. 110777, set. 2020.

STEPHENIE, S. et al. An insight on superoxide dismutase (SOD) from plants for mammalian health enhancement. **Journal of Functional Foods**, v. 68, p. 103917, maio 2020.

SVENNERSTAM, H. et al. Comprehensive Screening of Arabidopsis Mutants Suggests the Lysine Histidine Transporter 1 to Be Involved in Plant Uptake of Amino Acids. **Plant Physiology**, v. 143, n. 4, p. 1853–1860, 6 abr. 2007.

TADROS, M. J.; TURK, O. M. A. The morphological, physiological and biochemical responses of sweet corn to foliar application of amino acids biostimulants sprayed at three growth stages. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. (03) 2019, p. 412–417, 20 mar. 2019.

TEIXEIRA, W. F. et al. Foliar and Seed Application of Amino Acids Affects the Antioxidant Metabolism of the Soybean Crop. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 21 mar. 2017.

TEIXEIRA, W. F. et al. Seed and Foliar Application of Amino Acids Improve Variables of Nitrogen Metabolism and Productivity in Soybean Crop. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 28 mar. 2018.

TRÄNKNER, M. et al. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1–2, p. 409–423, 17 set. 2016.

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->>.

VAN RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1998.

VAN RAIJ, B. VAN et al. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001.

VINALL, K. et al. Amino acids are a nitrogen source for sugarcane. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 6, p. 503, 2012.

WAN, C. et al. Effects of nitrogen fertilizer on protein synthesis, accumulation, and physicochemical properties in common buckwheat. **The Crop Journal**, v. 11, n. 3, p. 941–950, jun. 2023.

WANG, D. et al. Effects of foliar application of amino acid liquid fertilizers, with or without *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9, on cowpea yield and leaf microbiota. **PLOS ONE**, v. 14, n. 9, p. e0222048, 4 set. 2019.

WEIH, M. et al. Evidence for magnesium–phosphorus synergism and co-limitation of grain yield in wheat agriculture. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 9012, 27 abr. 2021.

WELLBURN, A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307–313, set. 1994.

YANG, G. et al. Amino Acid Transporters in Plant Cells: A Brief Review. **Plants**, v. 9, n. 8, p. 967, 30 jul. 2020.

ZAMLJEN, T. et al. Biostimulative effect of amino acids on the enzymatic and metabolic response of two *Capsicum annuum* L. cultivars grown under salt stress. **Scientia Horticulturae**, v. 309, p. 111713, fev. 2023.

ZHANG, Q. et al. Magnesium promotes tea plant growth via enhanced glutamine synthetase-mediated nitrogen assimilation. **Plant Physiology**, 4 mar. 2023.

ANEXO 1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela 1. Macro e micronutrientes, pigmentos fotossintéticos, trocas gasosas de plantas de milho de segunda safra sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e Aminoácidos (AA) em duas safras de cultivo, 2021 e 2020. Botucatu, SP, Brasil.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
<i>Ano</i>											
2021	29,8 b	3,1 a	23,4 a	4,4 a	4,0 a	1,6	156,6 a	8,6 a	20,4	39,9	10,7 a
2022	35,0 a	2,7 b	19,5 b	3,2 b	2,6 b	1,5	105,0 b	6,2 b	19,5	39,1	9,4 b
Probabilidade de F											
Ano (A)	<0,0001	0,0194	0,0072	<0,0001	<0,0001	0,2671	<0,0001	<0,0001	0,3507	0,5096	0,0334
Tratamentos (T)	0,006	0,0013	0,3494	0,4325	<0,0001	0,6164	0,8966	0,1962	0,245	0,4291	0,1853
A x T	0,4709	0,8518	0,9439	0,9668	0,0576	0,9978	0,966	0,4208	0,853	0,8241	0,7046
CV (%)	8,88	16,43	17,15	11,71	7,8	15,75	13,87	12,24	13,08	8,41	16,39
Tratamentos	Chl a	Chl b	Chl a+b	Carot	SPAD	A	gs	Ci	E	EUA	A/Ci
<i>Ano</i>											
2021	1288,7 b	362,4	1651,1 b	329,8	30,2	21,4	198,2 b	250,8	5,2 b	4,2	0,0869
2022	1352,2 a	365,3	1717,4 a	338,9	30,8	22,1	137,2 a	250,8	5,5 a	4,1	0,0895
Probabilidade de F											
Ano (A)	0,0377	0,6183	0,0319	0,1596	0,243	0,1326	<0,0001	0,9935	0,0334	0,4041	0,2785
Tratamentos (T)	0,0001	<0,0001	0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0589	<0,0001	<0,0001
A x T	0,4804	0,0019	0,7987	0,0108	0,077	0,279	0,8078	0,5322	0,5676	0,9952	0,5582
CV (%)	6,14	4,32	4,89	5,47		5,6	9,5	5,9817	6,6	8,02	7,38

Em $g\ kg^{-1}$: Nitrogênio (N), fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S); em $mg\ kg^{-1}$: Ferro (Fe), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Boro (B); em $\mu g\ cm^{-2}$: Clorofila a (Chl a), Clorofila b (Chl b), Clorofila a+b (Chl a+b), Carotenóides (Carot.), índice SPAD (SPAD), Fotossíntese líquida (A, $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$), Condutância estomática (gs, $mmolH_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$), Concentração de CO_2 na câmara subestomática (Ci, $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$), Transpiração (E, $mmolH_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$), Eficiência do uso da água (EUA, $\mu molCO_2\ (mmol\ H_2O)^{-1}$), Eficiência da carboxilação (A/Ci). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferença estatística segundo teste F ($p<0,05$).

Tabela 2. Atividade enzimática, componentes de produção e produtividade e proteínas nos grãos de milho de segunda safra sob influência da aplicação foliar de Magnésio (Mg^{2+}) e Aminoácidos (AA) em duas safras de cultivo, 2021 e 2020. Botucatu, SP, Brasil.

Tratamentos	Rubisco	NR	H ₂ O ₂	MDA	SOD	CAT	Proli.	AP	NFE
Ano									
2021	5,51	31,61	11,41	16,15	26,29	38,98	0,99	189,7	15,9
2022	6,46	32,55	9,74	14,22	25,23	37,6	0,98	183,6	15,6

Probabilidade de F

Ano (A)	<0,0001	0,2054	<0,0001	0,0017	0,1965	0,1587	0,7679	0,1181	0,048
Tratamentos	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0027	0,5837	0,3139	0,3091
A x F	0,115	0,7548	0,2146	0,2746	0,818	0,9637	0,9924	0,9258	0,9073
CV (%)	5,19	6,34	9,35	9,98	8,7	6,96	4,18	5,75	2,41

Tratamentos	NGF	NGE	M100G	PG	Albumina	Glutelina	Globulina	Prolamina	PT
Ano									
2021	26,6	421,5 b	25,3 b	6693 b	3,473 a	8,891 b	2,177 a	0,587 a	15,13
2022	31,4	489,1 a	29,7 a	7675 a	2,937 b	9,798 a	1,854 b	0,474 b	15,06

Probabilidade de F

Ano (A)	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0005	<0,0001	0,7906
Tratamentos	0,0013	0,0011	0,4252	<0,0001	0,226	0,1633	0,2204	0,3299	0,0097
A x F	0,9087	0,8676	0,3128	0,9469	0,5743	0,9755	0,9634	0,9847	0,9653
CV (%)	5,33	6,068	3,97	3,82	6,36	5,55	11,09	7,48	3,91

Rubisco ($mmol\ CO_2\ min^{-1}\ mg^{-1}\ prot$), Nitrato Redutase ($mmol\ NO_2^{-}\ min^{-1}\ mg^{-1}\ prot$), Peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , $\mu mol\ g^{-1}\ MF$), malondialdeído (MDA, $mmol\ g^{-1}\ MF$), Superóxido dismutase (SOD, Unidade $mg^{-1}\ prot.$), Catalase (CAT, $mmol\ min^{-1}\ mg^{-1}\ prot$), Prolifidade (Prol. nº espigas planta⁻¹) Altura de planta (AP, cm), Número de fileiras por espiga (NFE), Número de grãos por fileira (NGF), Número de grãos por espiga (NGE), Massa de cem grãos (M100G, g), Produtividade de grãos (PG, $kg\ ha^{-1}$), Albumina ($mg\ g^{-1}\ MS$), Glutelina ($mg\ g^{-1}\ MS$), Globulina ($mg\ g^{-1}\ MS$), prolamina ($mg\ g^{-1}\ MS$), Proteína total ($mg\ g^{-1}\ MS$). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferença estatística segundo teste F ($p<0,05$).