

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 18/07/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO,
METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E
RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO**

Nandhara Angélica Carvalho Mendes

Engenheira de Biosistemas

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO,
METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E
RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEEIRO**

Discente: Nandhara Angélica Carvalho Mendes

Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal).

2023

Mendes, Nandhara Angélica Carvalho

M538c

Combinação K:Mg na atividade da rubisco, metabolismo fotossintético, antioxidante e relações com a produtividade do cafeeiro / Nandhara Angélica Carvalho Mendes. -- Jaboticabal, 2023

32 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: André Rodrigues dos Reis

1. Fisiologia vegetal. 2. Antagonismo mineral. 3. Cafeeiro. 4. Sustentabilidade. 5. Fotossíntese. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COMBINAÇÃO K:MG NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO

AUTORA: NANDHARA ANGÉLICA CARVALHO MENDES

ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Biosistemas / FEI UNESP Tupa

Pós-doutorando PEDRO HENRIQUE GORNI (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Profa. Dra. ADRIANA LIMA MORO (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) - Presidente Prudente/SP

Jaboticabal, 18 de julho de 2023

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

NANDHARA ANGÉLICA CARVALHO MENDES – Nasceu em 08 de abril de 1998 em Araçatuba, SP, Brasil. Filha de Selma Regina de Oliveira Carvalho Mendes e Jorge Mendes. Mestranda no PPG em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela Universidade Estadual Paulista (FCAV-UNESP). Especialista em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) (2023). Engenheira de Biosistemas pela “Faculdade de Ciências e Engenharia” da Universidade Estadual Paulista (FCE-UNESP) (2020). Foi pesquisadora visitante da Lancaster University – UK. Mendes possui experiência em Biofortificação Agronômica especificamente em Micronutrientes essenciais para a Saúde Humana e Segurança Alimentar, atuando principalmente com Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas. Desenvolveu projetos de pesquisa na área de Química Ambiental (2016-2018) no Laboratório de Química da Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã (UNESP), Brasil. Foi Bolsista de Iniciação Científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), desenvolvendo projetos na área de Fisiologia Vegetal e Nutrição de Plantas (2018-2020). Participou do III Simpósio de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura onde recebeu o Prêmio de melhor Trabalho da sessão de Nutrição Vegetal (2020) pela Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu (UNESP), Brasil. Foi estagiária no Laboratório de Genética de Plantas (2020), do Departamento de Genética da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto (FMRP-USP), Brasil. Integrante do grupo de estudos de Fisiologia Agrícola (GEFA). Avaliadora de projetos do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul (IFMS), Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha amada mãe, Selma, e ao meu querido pai, Jorge. Suas constantes palavras de incentivo, amor e apoio incondicional foram a base sólida que me sustentou durante toda minha jornada. Sua presença e encorajamento foram a motivação que me impulsionou a perseverar em meio aos desafios.

Aos meus amigos, sou imensamente grata por estarem sempre ao meu lado. Em especial, gostaria de expressar minha gratidão ao Cleverson Rodrigues e ao Vinicius Martins Silva. Sua amizade, apoio e encorajamento constantes foram essenciais para superar momentos difíceis e para me manter motivado durante todo o percurso.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis, meu profundo agradecimento por sua orientação, conhecimento e expertise. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico. Sou grata por ter tido a oportunidade de aprender com vocês e por sua dedicação em compartilhar seu conhecimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pelo financiamento concedido para este projeto de pesquisa (Processo: 2020/16177-0), juntamente com a bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) (Processo: 2022/03685-3), concedida no quarto semestre do mestrado, para a Lancaster University – UK.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade oferecida.

Por fim, agradeço a todos os servidores, professores, colegas e instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste projeto. Seja por meio de discussões, colaborações, insights valiosos ou qualquer outra forma de apoio, cada contribuição foi significativa e valorizada.

Meus sinceros agradecimentos

COMBINAÇÃO K:Mg NA ATIVIDADE DA RUBISCO, METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO, ANTIOXIDANTE E RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO

RESUMO

O café é a segunda bebida mais consumida em todo o mundo, ficando atrás apenas da água, e sua demanda está constantemente aumentando no mercado. No entanto, para suprir essa exigência, as técnicas de cultivo precisam superar as adversidades que afetam o desenvolvimento das plantas, sendo o café (*Coffea arabica*) particularmente afetado pela deficiência de magnésio. A carência de magnésio nas plantas de café pode ser resultado de atividades antropogênicas, como o fornecimento inadequado de fertilizantes potássicos, o que leva a um antagonismo na absorção de magnésio que prejudica a produtividade. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes combinações de doses de potássio e magnésio em diversos aspectos, incluindo produtividade, concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, metabolismo antioxidante, a translocação de açúcares e o metabolismo nitrogenado. O experimento foi conduzido em campo. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, com tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4 x 4, consistindo em 4 doses de potássio (0, 150, 300 e 450 kg ha⁻¹ de K₂O) e 4 doses de magnésio (0, 25, 50 e 150 kg ha⁻¹ de MgO), em dois anos. Neste estudo, foram avaliados os seguintes parâmetros: produtividade, concentração de pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, concentração de malonaldeído e peróxido de hidrogênio, atividade da superóxido dismutase, ascorbato peroxidase e catalase, concentração de açúcar total em folhas e grãos, concentração de nitrato, amônia e de aminoácidos. A aplicação de 150 kg ha⁻¹ de K₂O e 25 kg ha⁻¹ de MgO resultou em aumento da produtividade, concentração dos pigmentos fotossintéticos, atividade da enzima rubisco, metabolismo antioxidante e translocação de açúcares, em ambos os anos. Este estudo apresenta novos insights fundamentais sobre o efeito de K e Mg na produtividade e no metabolismo fotossintético e antioxidante do cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, antagonismo mineral, sustentabilidade, metabolismo fotossintético, estresse.

K:Mg COMBINATION IN RUBISCO ACTIVITY, PHOTOSYNTHETIC METABOLISM, ANTIOXIDANT, AND THEIR RELATIONSHIP WITH COFFEE PLANT PRODUCTIVITY

ABSTRACT

Coffee is the second most consumed beverage worldwide, second only to water, and its demand is steadily increasing in the market. However, to meet this demand, cultivation techniques must overcome the adversities that affect plant development, with coffee (*Coffea arabica*) being particularly affected by magnesium deficiency. The lack of magnesium in coffee plants may result from anthropogenic activities, such as inadequate supply of potassium fertilizers, leading to an antagonism in magnesium absorption that impairs yield. This study aimed to assess the effects of different combinations of potassium and magnesium doses on various aspects, including yield, concentration of photosynthetic pigments, rubisco enzyme activity, antioxidant metabolism, sugar translocation, and nitrogen metabolism. The experiment was conducted in the field. The experimental design was randomized complete blocks, with treatments arranged in a 4 x 4 factorial scheme, consisting of 4 potassium doses (0, 150, 300, and 450 kg ha⁻¹ of K₂O) and 4 magnesium doses (0, 25, 50, and 150 kg ha⁻¹ of MgO), over two years. The following parameters were evaluated in the study: yield, concentration of photosynthetic pigments, rubisco activity, malondialdehyde and hydrogen peroxide concentration, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and catalase activity, total sugar concentration in leaves and grains, nitrate, ammonia, and amino acids concentration. The application of 150 kg ha⁻¹ of K₂O and 25 kg ha⁻¹ of MgO resulted in increased productivity, concentration of photosynthetic pigments, rubisco enzyme activity, antioxidant metabolism, and sugar translocation in both years. This study provides fundamental new insights into the effect of K and Mg on coffee yield and photosynthetic metabolism.

Keywords: *Coffea arabica*, mineral antagonism, sustainability, photosynthetic metabolism, stress.

1. INTRODUÇÃO

A combinação adequada de doses de potássio (K) (Torabian et al., 2021) e magnésio (Mg) (Tian et al., 2021) é um aspecto crítico da nutrição mineral de plantas e desempenham um papel fundamental no crescimento, desenvolvimento e produção vegetal.

O K é conhecido por sua importância no equilíbrio osmótico das células das plantas, na regulação da abertura e fechamento dos estômatos, na ativação de enzimas envolvidas na fotossíntese e síntese de proteínas, no transporte de açúcares e de nutrientes, e na influência das resistências das plantas a doenças e estresses abióticos (Tränkner et al., 2018; Tavakol et al., 2022). O K também desempenha um papel fundamental na síntese e acúmulo de amido, a qual é essencial para o crescimento e desenvolvimento de órgãos de armazenamento, como raízes, tubérculos e frutos.

Devido à escassez de pesquisas relacionadas ao papel fisiológico e nutricional do Mg nas plantas, esse nutriente é considerado “esquecido” dentro da nutrição de plantas, no entanto, seu papel vital está cada vez mais reconhecido (Cakmak e Yazici, 2010; Peng et al., 2018). Vários estudos abordaram os efeitos da deficiência de Mg na biossíntese da clorofila (Tränkner et al., 2016; Li et al., 2017), fotossíntese (Yuguan et al., 2009; Li et al., 2017), alocação de carboidratos (Verbruggen e Hermans, 2013; Yang et al., 2017), sistema enzimático antioxidante (Silva et al., 2017; Cai et al., 2019) e enzimas do metabolismo de nitrogênio (N) (Yin et al., 2009; Li et al., 2017).

O Mg tem funções essenciais na planta, pois faz parte da molécula de clorofila e atua na fixação do dióxido de carbono (CO₂) durante o processo da fotossíntese (Farhat et al., 2016), além de desempenhar funções cruciais nos processos fisiológicos e bioquímicos do metabolismo de carboidratos (Yang et al., 2017), na desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Cakmak e Kirkby, 2008; Yang et al., 2013) e no metabolismo de N (Yang et al., 2017).

No entanto, a deficiência de Mg induz a geração de EROs como radical superóxido (O₂⁻), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), radical hidroxila (OH[.]) e oxigênio singlete (¹O₂). Plantas com deficiências em Mg apresentam menor concentração de carotenoides e clorofilas, portanto, tornam-se mais sensíveis à radiação solar. A quantidade de luz que chega nas folhas com baixa concentração de pigmentos fotossintetizantes gera uma excitação elevada da clorofila α , resultando na formação de EROs na célula vegetal. Altas concentrações de EROs têm a capacidade de oxidar ou destruir a camada lipídica da membrana celular, ocasionando o desequilíbrio de pH celular e a oxidação de pigmentos como as clorofilas, o que causa clorose internerval (Guo et al., 2016; Farhat et al., 2016).

Taxas elevadas de aplicação de fertilizantes potássicos em áreas agricultáveis é um fator que pode afetar a disponibilidade de Mg no solo, isso por que, existem fortes interações quanto à absorção entre K e Mg (Cai et al., 2012; Jezek et al., 2015), uma vez que, estes elementos minerais competem pela absorção nas raízes, e isso pode ser atribuído a diferentes sistemas de transporte, responsável pela captação destes nutrientes, e mesmo que os transportadores putativos de Mg sejam inespecíficos, os transportadores de K são bastante específicos, lhes garantindo vantagem na absorção tanto em altas como em baixas concentrações no solo, o que pode provocar a deficiência de Mg (Senbayram et al., 2015).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, de acordo com a Organização Internacional do Café (OIC), desfrutando de uma posição de destaque no mercado global. Além disso, o país é o segundo maior consumidor de café, ficando atrás apenas dos Estados Unidos.

A área agrícola dedicada ao cultivo de café no Brasil é vasta, abrangendo aproximadamente 2,2 milhões de hectares, resultando em cerca de 32,7 milhões de sacas, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022).

Essa produção em larga escala apresenta desafios para os produtores de café, que precisam lidar com diversos fatores que podem afetar o desenvolvimento saudável da planta e, consequentemente, o rendimento das colheitas. Fatores bióticos e abióticos, que vão desde deficiências nutricionais até influências ambientais, representam desafios significativos para os produtores de café. Diante dessa realidade, é essencial que os produtores de café busquem estratégias eficazes para mitigar efeitos adversos e garantir níveis elevados de rendimento.

Nos últimos anos, tem sido relatada a deficiência visual de Mg em cafeeiros nas várias regiões produtoras, com prejuízo da produção, em razão da granação deficiente e pela formação de grãos chochos. Clorose entre as nervuras no limbo das folhas mais velhas é o sintoma apresentado pela deficiência desse nutriente. Com o passar do tempo a coloração amarela se torna parda ou marrom, seguindo da queda das folhas.

Em virtude da real demanda de Mg pelas plantas, e das relações antagônicas na absorção destes macronutrientes, evidencia-se a necessidade de estudos aprofundados sobre o assunto. Portanto, a hipótese desse estudo foi que recomendações das doses ideais de K:Mg evita a clorose, aumenta a eficiência fotossintética para a produção de açúcares e aumenta a produtividade dos cafeeiros.

Deste modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar a combinação de doses de K e Mg na atividade fotossintética, rubisco, metabolismo antioxidante e reflexos na produtividade do cafeeiro arábica cv. Mundo Novo numa lavoura com 8 anos de idade.

6. CONCLUSÃO

A aplicação de Mg em diferentes dosagens resultou em um aumento no rendimento das plantas de café. A interação entre K e Mg levou a um aumento na concentração de pigmentos fotossintéticos, na atividade da enzima rubisco, melhoria do sistema antioxidante e na otimização da translocação de açúcares da fonte (folhas) para o dreno (grãos). A combinação de 150 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de MgO trouxe benefícios não apenas para a fisiologia e bioquímica das plantas de café, mas também resultou na redução da necessidade de altas doses de K.

REFERÊNCIAS

- Adhikari B, Dhungana SK, Kim ID, Shin, DH (2020). Effect of foliar application of potassium fertilizers on soybean plants under salinity stress. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 19:261–269.
- Agathokleous E, Feng Z, Peñuelas J (2020). Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? **Science of The Total Environment**, 726: 138637.
- Agathokleous E (2021). The rise and fall of photosynthesis: hormetic dose response in plants. **Journal of Forestry Research**. 32:889–898.
- Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, 24:1337-1344.
- Azevedo RA, Alas RM, Smith RJ, Lea PL (1998). 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**, 104:280–292.

Bhat JY, Thieulin-Pardo G, Hartl FU, Hayer-Hartl M (2017). Rubisco activases: AAA+ chaperones adapted to enzyme repair. **Frontiers in Molecular Biosciences**, 4:1-10.

Benites VM, Carvalho MCS, Resende AV, Polidoro JC, Bernardi ACC, Oliveira FA (2010). O potássio, o cálcio e o magnésio na agricultura brasileira. In: Prochnow LI, Casarin V, Stipp SR, (Org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2:133-204.

Bielecki RL, Turner NA (1966). Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, 17:278-293.

Borrelli RC, Visconti A, Mennella C, Anese M, Fogliano V (2002). Chemical characterization and antioxidant properties of coffee melanoidins. **Journal of agricultural and food chemistry**, 50:6527-6533.

Buol SW (2009). Soils and agriculture in central-west and north Brazil. **Scientia Agricola**. 66, 697:707.

Cai J, Chen L, Qu H, Lian J, Liu W, Hu Y, Xu, G (2012). Alteration of nutrient allocation and transporter genes expression in rice under N, P, K, and Mg deficiencies. **Acta Physiologiae Plantarum**. 34:939–946.

Cai YT, Zhang H, Qi YP, Ye X, Huang ZR, Guo JX, Chen LS, Yang LT (2019). Responses of reactive oxygen species and methylglyoxal metabolisms to magnesium-deficiency differ greatly among the roots, upper and lower leaves of *Citrus sinensis*. **BMC plant biology**, 19:1-20.

Cakmak I, Hengeler C, Marschner H (1994). Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Experimental Botany**. 45:1251–1257.

Cakmak I, Kirkby EA (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, 133:692–704.

Cakmak I, Yazici AM (2010). Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. **Better Crop**. 94:23–25.

- Cataldo DA, Haroon M, Schrader LE, Youngs VL (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 6:71-80.
- Chen J, Li Y, Wen S, Rosanoff A, Yang G, Sun X (2017). Magnesium fertilizer-induced increase of symbiotic microorganisms improves forage growth and quality. **Journal of agricultural and food chemistry**, 65:3253-3258.
- Chen ZC, Peng WT, Li J, Liao H (2018). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. In **Seminars in cell & developmental biology**, 74:142-152.
- Conab. Companhia Nacional de Abastecimento (2022). Acompanhamento de safra brasileiro – café: quarto levantamento, dezembro 2022 – safra 2022. **Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento**.
- Cunha MLO, Oliveira LCA, Silva VM, Montanha GS, Reis AR (2022). Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.), **Plant Physiology and Biochemistry**, 190:231-239.
- Davì G, Falco A, Patrono C (2005). Lipid peroxidation in diabetes mellitus. **Antioxidants Redox Signal**. 7:256–268.
- Dechen AR, Carmello QAC, Monteiro FA, Nogueirol RC (2015). Role of magnesium in food production: An overview. **Crop Pasture Science**. 66:1213–1218.
- Dorenstouter H, Pieters GA, Findenegg GR (1985). Distribution of magnesium between chlorophyll and other photosynthetic functions in magnesium deficient “sun” and “shade” leaves of poplar. **Journal Plant Nutrition**. 8:1089–1101.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, 28:350–356.
- Epron D, Cabral OMR, Laclau JP, Dannoura M, Packer AP, Plain C, Battie-Laclau P, Moreira MZ, Trivelin PCO, Bouillet JP (2016). In situ ¹³CO₂ pulse labelling of field-grown eucalypt trees revealed the effects of potassium nutrition and throughfall exclusion on phloem transport of photosynthetic carbon. **Tree physiology**, 36:6-21.

- Erel R, Yermiyahu U, Ben-Gal A, Dag A, Shapira O, Schwartz A (2015). Modification of non-stomatal limitation and photoprotection due to K and Na nutrition of olive trees. **Journal of plant Physiology** , 177:1-10.
- Ertiftik H, Zengin M (2017). Response of maize for grain to potassium and magnesium fertilizers in soils with high lime contents. **Journal of Plant Nutrition**, 40:93–103.
- Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, Smaoui A, Abdelly C, Rabhi M (2016). Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta Physiologia Plantarum*, 38: 145.
- Favarin JL, Paula Neto A, Tezotto T, Martins PO, Teixeira PPC (2013). Correção do magnésio no solo é essencial ao cafeeiro, 12:76-78.
- Ferreira T, Schuler J, Guimarães R, Farah A (2019). Introduction to Coffee Plant and Genetics. In: FARAH, A. Coffee: production, quality and chemistry. **Royal Society of Chemistry**, 836:1-25.
- Ferrão AMA (2004). Arquitetura do café. **Campinas: Editora da UNICAMP**, 2:1-296.
- Fischer ES, Lohaus G, Heineke D, Heldt HW (1998). Magnesium deficiency results in accumulation of carbohydrates and amino acids in source and sink leaves of spinach. **Physiologia Plantarum**, 102:16-20.
- Giannopolitis CN, Ries SK (1977). Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59:309-314.
- Guimarães RJ, Borém FM, Shuler J, Farah A, Romero JCP (2019). Coffee growing and post-harvest processing. In: Coffee: production, quality and chemistry. **Ed. Royal Society of Chemistry**, 836.
- Gomes-Junior RA, Gratão PL, Gaziola SA, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2007). Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology**, Victoria, 34:449-456.
- Guo W, Nazim H, Liang Z, Yang D (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **Crop Journal**, 4:83–91.

- Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Møller IS, White P (2011). Functions of Macronutrients, Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. **Elsevier Ltd**, 3.
- Hermans C, Verbruggen N (2005). Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**. 56:2153–2161.
- Heynes WM (2014). CRC Handbook of chemistry and physics. Boca Raton, FL, **USA: CRC PRESS**, 95:1-2668
- Heath RL, Packer L (1968). PHOTOPEROXIDATION in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives in Biochemistry and Biophysics**, 125:189-198.
- Huber DM, Jones JB (2013). The role of magnesium in plant disease. **Plant Soil**, 368:73–85.
- Jezek M, Geilfus C, Bayer A, Mühling K (2015). Photosynthetic capacity, nutrient status, and growth of maize (*Zea mays* L.) upon MgSO₄ leaf-application. **Frontiers in Plant Science | Crop Science and Horticulture**, 5:1-10.
- Jin SH, Huang JQ, Li XQ, Zheng BS, Wu JS, Wang ZJ, Liu GH, Chen M (2011). Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**. 31:1142–1151.
- Kennedy OJ, Pirastu N, Poole R, Fallowfield JA, Hayes PC, Grzeszkowiak EJ, Taal MW, Wilson JF, Parkes J, Roderick PJ (2020). Coffee Consumption and Kidney Function: A Mendelian Randomization Study. **American Journal of Kidney Diseases**. 75:753–761.
- Li CP, Qi YP, Zhang J, Yang LT, Wang DH, Ye X, Chen LS (2017). Magnesium-deficiency-induced alterations of gas exchange, major metabolites and key enzymes differ among roots, and lower and upper leaves of *Citrus sinensis* seedlings. **Tree physiology**, 37:1564-1581.
- Lichtenthaler HK (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, 148:350-382.
- Lopes AS (1983). Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo. **Piracicaba, SP Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo**, 2:1-162.
- Malavolta E (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Editora Agronômica Ceres Ltda**, 1:1-638.

Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of botany**, 105:1141-1157.

Mccullough H (1967). The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, 17:297–304.

Melnikov S, Mailliot J, Shin BS, Rigger L, Yusupova G, Micura R, Dever TE, Yusupov M, (2016). Crystal structure of hypusine-containing translation factor eIF5A bound to a rotated eukaryotic ribosome. **Journal of molecular biology**, 428:3570-3576.

Mendes NAC, Cunha MLO, Bosse MA, Silva VM, Moro AL, Agathokleous E, Vicente EF, Reis AR (2023). Physiological and biochemical role of nickel in nodulation and biological nitrogen fixation in *Vigna unguiculata* L. Walp, **Plant Physiology and Biochemistry**, 201, 107869.

Metro D, Cernaro V, Santoro D, Papa M, Buemi M, Benvenga S, ManasserI L (2017). Beneficial effects of oral pure caffeine on oxidative stress. **Journal of Clinical & Translational Endocrinology**, 10:22–27.

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologia Plantarum**, 30:469-479.

Nardeli AJ, Lanza MGDB, Presumido Junior M, Santos MF, Reis AR (2016). Biofortificação agronômica de forrageiras com magnésio e benefícios para a saúde animal. **XXXVII Congresso Paranaense dos Estudantes de Zootecnia**.

Peng WT, Zhang LD, Zhou Z, Fu C, Chen ZC, Liao H (2018). Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. **Physiologia plantarum**, 163:372-385.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (1997). *Análise Química Para Avaliação da Fertilidade de Solos- Tropicais*. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

Reid CD, Tissue DT, Fiscus EL, Strain BR (1997). Comparison of spectrophotometric and radioisotopic methods for the assay of Rubisco in ozone- treated plants. **Physiologia Plantarum**, 101:398-404.

Reis AR, Favarin JL, Gratão PL, Capaldi FR, Azevedo RA (2015). Antioxidant metabolism in coffee (*Coffea arabica* L.) plants in response to nitrogen supply. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, 27:203-213.

Reis AR, El-Ramady H, Santos EF, Gratão PL, Schomburg L (2017). Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. In: Pilon-Smits, Winkel L, Lin ZQ. (eds) Selenium in plants. **Plant Ecophysiology**, 11:209-230.

Rodrigues VA, Crusciol CAC, Bossulani JW, Moretti LG, Portugal JR, Mundt TT, Oliveira SL, Garcia A, Calonego JC, Lollato RP (2021). Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. **Plants**. 10:1-797.

Saadati S, Baninasab B, Mobli M, Gholami M (2021). Foliar application of potassium to improve the freezing tolerance of olive leaves by increasing some osmolyte compounds and antioxidant activity. **Scientia Horticulturae**, 276:109765.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida J A, Araujo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, **DF: Embrapa**, 5:1-355.

Senbayram M, Gransee A, Wahle V, Thiel H (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. **Crop Pasture Science**, 66:1219–1229.

Sengik ES (2003). Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas, 2003:22p.

Siddiqui MH, Alamri SA, Al-Khaishany MYY, Al-Qutami MA, Ali HM, Al-Whaibi MH, Al-Wahibi MS, Alharby HF (2018). Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium. **Saudi Journal Biological Science**, 25:1393–1401.

Silva DM, Souza KRD, Boas LVV, Alves YS, Alves JD (2017). The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. **Scientia Horticulturae**, 224:115-125.

Silva VM, Tavanti RFR, Gratão PG, Alcock TD, Reis AR (2020). Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 201:110777.

- Tanoi K, Kobayashi NI (2015). Leaf senescence by magnesium deficiency. **Plants** 4:756–772.
- Tavakol E, Jákli B, Cakmak I, Dittert K, Senbayram M (2022). Optimization of Potassium Supply under Osmotic Stress Mitigates Oxidative Damage in Barley. **Plants (Basel)**, 11, 55.
- Tian XY, He DD, Bai S, Zeng WZ, Wang Z, Wang M, Wu L, Chen, Z (2021). Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants. **Plant Soil**, 468:1–17.
- Torabian S, Salar F, Ruijun Q, Christos N, Vidyasagar S, Brian C, Dimitra AL (2021). "Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production—A Review", **Agronomy**, 3:543.
- Tränkner M, Jákli B, Tavakol E, Geilfus CM, Cakmak I, Dittert K, Senbayram M (2016). Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. **Plant Soil**, 406:409-423.
- Tränkner M, Tavakol E, Jákli B (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia plantarum**, 163:414-431.
- Van Dam RM, Hu FB (2005). Coffee Consumption A Systematic Review. **Journal of the American Medical Association**, 294:97–104.
- Verbruggen N, Hermans C (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and soil**, 368:87-99.
- Von Wettstein D (1991). Chlorophyll Biosynthesis. In: Herrmann, R. G., Larkins, B. A. (eds) *Plant Molecular Biology 2*. **NATO ASI Series**, 212:449-459.
- Xie K, Cakmak I, Wang S, Zhang F, Guo S (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal**, 9:249-256.
- Wlond T. (2007). Magnésio nos solos e nas plantas. **International Plant Nutrition Institute-Brazil**, Informações agronômicas, 117:19-21.
- Yang GH, Yang LT, Jiang HX, Li Y, Wang P, Chen LS (2012). Physiological impacts of magnesium-deficiency in Citrus seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates. **Trees**, 26:1237-1250.

Yang LT, Yang GH, You X, Zhou CP, Lu YB, Chen LS. (2013). Magnesium deficiency-induced changes in organic acid metabolism of *Citrus sinensis* roots and leaves. **Biologia Plantarum**, 57:481-486.

Yang N, Jiang J, Xie H, Bai M, Xu Q, Wang X, Guan Y (2017). Metabolomics reveals distinct carbon and nitrogen metabolic responses to magnesium deficiency in leaves and roots of soybean [*Glycine max* (Linn.) Merr.]. **Frontiers in Plant Science**, 8:2091.

Yemm EM, Cocking EC (1955). The Determination of Amino Acids with Ninhydrin. **Analyst**, 80:209-213.

Yin S, Ze Y, Liu C, Li N, Zhou M, Duan Y, Hong F (2009). Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. **Biological trace element research**, 132:247-258.

Yuguan Z, Min Z, Luyang L, Zhe J, Chao L, Sitao Y, Yanmei D, NA L, Fashui H (2009). Effects of cerium on key enzymes of carbon assimilation of spinach under magnesium deficiency. **Biological Trace Element Research**. 131:154–164.