RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 22/12/2023.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

TAUAN RIMOLDI TAVANTI

PHYSIOLOGICAL ROLES OF MAGNESIUM ON UREIDES METABOLISM OF SOYBEAN PLANTS CULTIVATED IN HIGH ALTITUDE CERRADO

Ilha Solteira
2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

TAUAN RIMOLDI TAVANTI
Agronomist Engineer

PHYSIOLOGICAL ROLES OF MAGNESIUM ON UREIDES METABOLISM OF SOYBEAN PLANTS CULTIVATED IN HIGH ALTITUDE CERRADO

Thesis presented to the Engineering College of Ilha Solteira – UNESP as part of the requirements to obtain the title of Doctor in Agronomy. Specialization: Production Systems

Prof. PhD. André Rodrigues dos Reis
Supervisor

Ilha Solteira
2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Tavanti, Tauan Rimoldi.
T231p Physiological roles of magnesium on ureides metabolism of soybean plants cultivated in high altitude cerrado / Tauan Rimoldi Tavanti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
212 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas De Produção, 2021

Orientador: André Rodrigues dos Reis
Inclui bibliografia

1. Magnésio. 2. Glycine max (L.) Merrill. 3. Fotossíntese. 4. Produção de fotoassimilados. 5. Fixação biológica de nitrogênio. 6. Metabolismo antioxidante.

João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Papel fisiológico do magnésio no metabolismo de ureídeos em soja cultivado em cerrado de alta altitude

AUTOR: TAUAN RIMOLDI TAVANTI
ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

André Rodrigues dos Reis

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Biossistemas / FEI /UNESP - Tupa

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. SALATIER BUZETTI (Participaçao Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Dr. FERNANDO SHINTATE GALINDO (Participaçao Virtual)
Centro de Energia Nuclear na Agricultura / Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. CID NAUDI SILVA CAMPOS (Participaçao Virtual)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS / Chapadão do Sul/MS

Ilha Solteira, 22 de dezembro de 2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Alguimar Tavanti e Sirlei Rimoldi Tavanti, que me conduziram e incentivaram minha educação formal e formação profissional. A vocês, minha homenagem, gratidão e amor.

Ao meu irmão Renan Francisco Rimoldi Tavanti, companheiro na vida, minha homenagem, gratidão e amor.

À minha namorada Franciele Bellaver Polachini, companheira e o amor da minha vida.

Aos meus avós, Ozeas e Aparecida Rimoldi, e Domingas Paschoalina Del Favere Tavanti, minha homenagem, gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, o meu agradecimento maior, por sempre ter me abençoado, guiado e amparado em todos os caminhos, decisões e desafios impostos. Por me conceder inúmeras oportunidades, dentre elas, a possibilidade em obter o título de Doutor em Agronomia.

À minha família, que conduziram e incentivaram minha educação formal e formação profissional. Pelo exemplo, amor e carinho, na qual tornaram minha caminhada e os objetivos de vida mais fáceis de serem alcançados.

Ao professor Dr. André Rodrigues dos Reis, pela sua orientação e ensinamentos, por todo suporte pessoal e financeiro, por me estimular à pesquisa e pela atenção, que foram fundamentais para a realização desta tese e, principalmente, pela amizade. Um grande amigo que vou levar para o resto da vida.

Aos professores Dr. Salatiér Buzetti, Dr. Rafael Montanari, Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Dr. Edson Lazarini, Dr. Marco Eustáquio de Sá, Dra Lucíola Santos Lannes, Dr. Bruno Ettore Pavan e Dr. Enes Furlani Júnior, pelo apoio e conhecimentos transmitidos.

À UNESP/FEIS – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), por todo suporte técnico-científico e oportunidade de estudo nessa fantástica Universidade. Ao coordenador do PPGA, professor Dr. Paulo Cezar Ceresini, e toda equipe de técnicos e secretários, em especial ao Fabio Morais, Marcelo Rinaldi, Selma de Moraes, Marcia Souza, Graciele Peres Viegas, Diego Feitosa e João Josué Barbosa.

Aos meus amigos da UNESP, Vinicius Silva, Andressa Melo, Fernando Galindo, Matheus Mateus, Maria Lanza, Ricardo Messias da Silva, Rafael Lawandovski, Maria Fauvel dentre outros.

À Fundação Chapadão e toda equipe, pelo apoio na instalação e condução destes experimentos. Ao professor Dr Cid Naudi Silva Campos pelo apoio nas análises laboratoriais e revisão destes artigos.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo de doutorado.

A todos que de alguma forma contribuíram para esse acontecimento, obrigado!

“Que possamos transmitir a todos em nosso caminho,
a bondade de Deus que habita em nosso coração”

Alguimar Tavanti

ABSTRACT

Magnesium (Mg) is often overlooked in fertilization practices and agricultural research. However, its vital role is being increasingly recognized, considering its essentiality in several physiological processes in plants, such as photosynthesis, production and transport of photoassimilates, enzymatic antioxidant metabolism, nitrogen (N) metabolism and biological nitrogen fixation (BNF). The aim of this study was to provide an overview of how these processes are regulated by Mg. For this, chapter 1 of this study composes a systematic literature review, gathering information from 50 articles published in the last two decades about Mg. In chapters 2, 3 and 4, the objective was to evaluate the effect of doses (0 to 90 kg ha^{-1}) and sources of magnesium oxide (MgO) and magnesium sulfate ($MgSO_4$) on the photosynthetic process, production of photoassimilates, N and BNF metabolism in soybean varieties, since the role of Mg in BNF and ureide synthesis is still poorly understood. In chapter 1, the results of the literature demonstrate that the application of Mg increased photosynthetic pigments, liquid photosynthesis and production of photoassimilates. Higher sucrose concentrations in plant roots compared to shoots, together with increased activity of ATP-ases enzymes, indicate greater transport of photoassimilates by the phloem when Mg is applied. Mg increased the resistance of plants to abiotic stresses, reducing the need for expression of the antioxidant enzymes SOD, GPX, APX, CAT and POD, when compared to Mg deficient situations. Mg improved N and FBN metabolism, increasing the activity of nitrate reductase, nitrite reductase, glutamine synthase, GOGAT and nitrogenase enzymes. In chapter 2, the results showed that MgO increased the leaf Mg content of soybeans and did not change the levels of calcium (Ca) and potassium (K) in the leaf tissue, providing an increase in photosynthetic pigments and production of photoassimilates. There was an increase in the concentrations of nitrogen compounds and greater conversion of atmospheric N_2 into ureides in soybean plants. Regarding the results of chapter 3, the use of $MgSO_4$ increased the Mg content in soybean leaves, did not change the K content and reduced the Ca content. There was an increase in photosynthetic and photoassimilated pigments. Higher rates of photoassimilates provided greater conversion of atmospheric N_2 into ureides for NA 5909 RG RR (allantoin and allantoic acid) and P98Y30 (allantoic acid), indicating higher FBN. In chapter 4, MgO and $MgSO_4$ sources increased leaf Mg content and did not change leaf Ca content in most varieties. With the application of Mg, the photosynthetic and photoassimilated pigments were increased. With greater production of photoassimilates, there was greater activity of N metabolism, due to greater production of amino acids and greater conversion of atmospheric N_2 and synthesis of ureides in most varieties, resulting in greater grain yield. The MgO source promoted the greatest increases in the concentrations of photosynthetic pigments, photoassimilates, ureides and grain yield for most varieties. This thesis contains up-to-date and valuable information on the influence of Mg on important physiological processes in plants. Incorporating these findings in future work can contribute to the optimization of fertilization programs and management strategies through magnesium fertilization in plants.

Keywords: Mg. *Glycine max* (L.) Merrill. biological nitrogen fixation. antioxidant metabolism. genotipic variation.

RESUMO

O magnésio (Mg) é frequentemente esquecido nas práticas de fertilização e pesquisas agrícolas. No entanto, seu papel vital está sendo cada vez mais reconhecido, considerando sua essencialidade em diversos processos fisiológicos nas plantas, como fotossíntese, produção e transporte de fotoassimilados, metabolismo antioxidante enzimático, metabolismo de nitrogênio (N) e fixação biológica de nitrogênio (FBN). O objetivo deste estudo foi fornecer uma visão geral de como esses processos são regulados pelo Mg. Para isso, o capítulo 1 deste estudo compõe uma revisão sistemática da literatura, reunindo informações de 50 artigos publicados nas últimas duas décadas sobre o Mg. Nos capítulos 2, 3 e 4, objetivou-se avaliar o efeito de doses (0 a 90 kg ha^{-1}) e fontes de óxido de magnésio (MgO) e sulfato de magnésio ($MgSO_4$) sobre o processo fotossintético, produção de fotoassimilados, metabolismo de N e FBN em variedades de soja, uma vez que o papel do Mg na FBN e síntese de ureídeos ainda é pouco conhecido. No capítulo 1, os resultados da literatura demonstram que a aplicação de Mg aumentou os pigmentos fotossintéticos, a fotossíntese líquida e a produção de fotoassimilados. As maiores concentrações de sacarose nas raízes das plantas em comparação com a parte aérea, juntamente com o aumento da atividade das enzimas ATP-ases, indicam maior transporte de fotoassimilados pelo floema quando o Mg é aplicado. O Mg aumentou a resistência das plantas a estresses abióticos, reduzindo a necessidade de expressão das enzimas antioxidantes SOD, GPX, APX, CAT e POD, quando comparado a situações de deficiência de Mg. O Mg melhorou o metabolismo do N e do FBN, aumentando a atividade das enzimas nitrato redutase, nitrito redutase, glutamina sintase, GOGAT e nitrogenase. No capítulo 2, os resultados mostraram que o MgO aumentou o teor foliar de Mg da soja e não alterou os teores de cálcio (Ca) e potássio (K) no tecido foliar, proporcionando aumento dos pigmentos fotossintéticos e produção de fotoassimilados. Houve aumento nas concentrações de compostos nitrogenados e maior conversão de N_2 atmosférico em ureídeos nas plantas de soja. Em relação aos resultados do capítulo 3, o uso de $MgSO_4$ aumentou o teor de Mg nas folhas de soja, não alterou o teor de K e reduziu o teor de Ca. Houve aumento de pigmentos fotossintéticos e fotoassimilados. Maiores taxas de fotoassimilados proporcionaram maior conversão de N_2 atmosférico em ureídeos para NA 5909 RG RR (alantoína e ácido alantóico) e P98Y30 (ácido alantóico), indicando maior FBN. No capítulo 4, as fontes de MgO e $MgSO_4$ aumentaram o teor de Mg foliar e não alteraram o teor de Ca foliar na maioria das variedades. Com a aplicação do Mg, os pigmentos fotossintéticos e fotoassimilados foram aumentados. Com maior produção de fotoassimilados, houve maior atividade do metabolismo de N, devido à maior produção de aminoácidos e maior conversão de N_2 atmosférico e síntese de ureídeos na maioria das variedades, resultando em maior rendimento de grãos. A fonte de MgO promoveu os maiores aumentos nas concentrações de pigmentos fotossintéticos, fotoassimilados, ureídeos e rendimento de grãos para a maioria das variedades. Esta tese contém informações atualizadas e valiosas sobre a influência do Mg em importantes processos fisiológicos em plantas. A incorporação desses achados em trabalhos futuros pode contribuir para a otimização dos programas de adubação e estratégias de manejo por meio da adubação com magnésio nas plantas.

Palavras-chave: Mg. *Glycine max* (L.) Merrill; fixação biológica de nitrogênio; metabolismo antioxidante; variação genotípica.

Graphycal abstract: The application of Mg increases the concentrations of Mg in plant tissues, promoting higher concentrations of photosynthetic pigments and liquid photosynthesis. This effect contributes to greater production and transport of photoassimilates in plants, positively influencing the activity of important enzymes belonging to the metabolism of N and FBN, with ureides as the final product. At the same time, the highest concentrations of intracellular Mg can alleviate the inhibitory action of different abiotic stressors in plants, reducing the production of ROS and, consequently, the activity of enzymatic antioxidant enzymes, when compared to situations deficient in Mg.

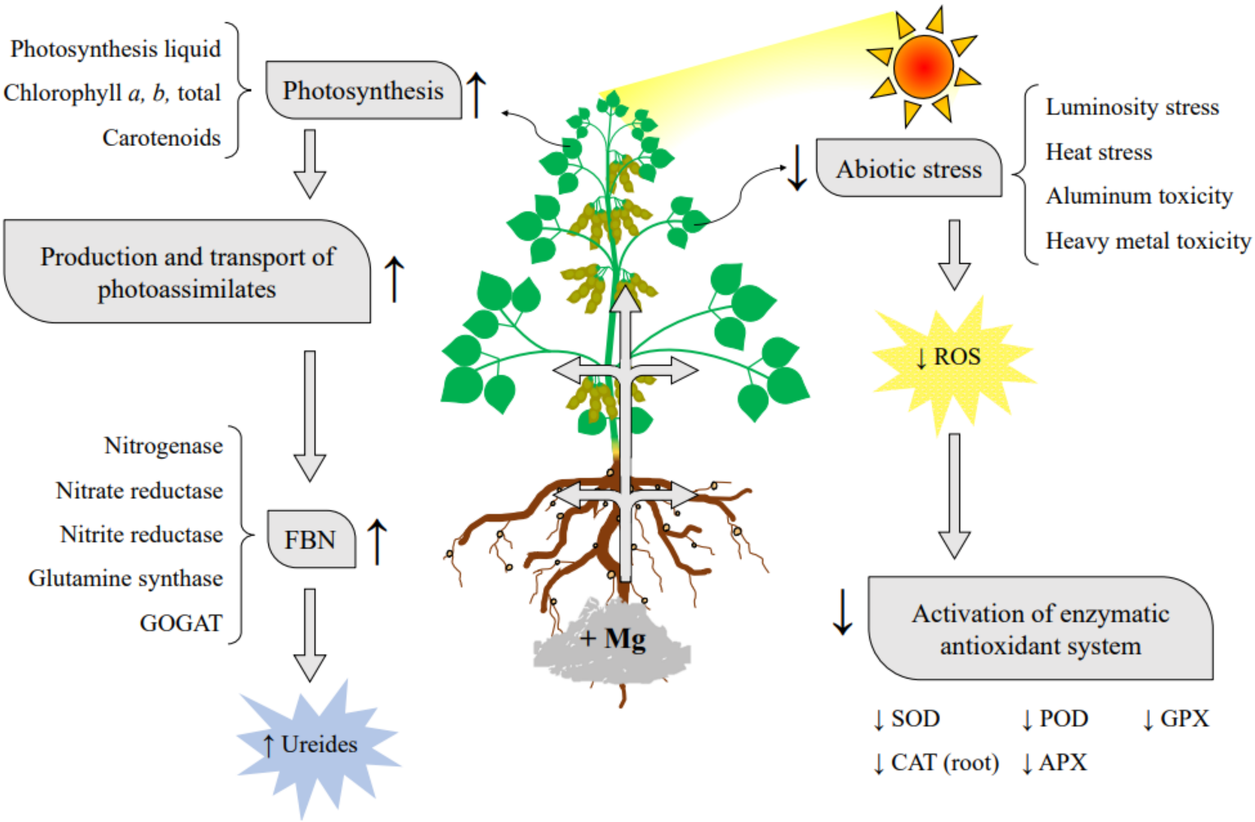

FIGURE LIST

Chapter 1

Chapter 2

Chapter 3

Chapter 4

TABLES LIST

Chapter 1

Chapter 4

SUMARY

consistent with innovative techniques aiming to increase soybean yield in field conditions.

4.7. CONCLUSION

The MgO and $MgSO_4$ application increased Mg concentration in soybean leaves without impairing leaf Ca concentration in most varieties evaluated.

The application of Mg improved photoassimilates (sucrose and total sugar) production in most varieties evaluated, indicating an enhancement in the photosynthetic process due to increased concentration of pigments. Under higher levels of photoassimilates, higher N_2 conversion occurred and higher ureides synthesis, indicating improvement in BNF efficiency.

Amino acids concentration increased under Mg application in most varieties, indicating higher N metabolism activity.

Between both Mg sources, MgO provided the highest increases to pigments (total chlorophyll, pheophytin b, and total pheophytin), total sugars, sucrose, and ureides in most soybean plants. While $MgSO_4$ application provided higher increases in chlorophyll b, pheophytin a, carotenoids, and amino acids.

This study provides valuable information about the Mg effect on BNF metabolism in soybean varieties. The presented results are important tools to further studies aiming to increase soybean grain yield and BNF by supplying Mg to the plants.

REFERENCES

BARAL, B.; TEIXEIRA DA SILVA, J. A.; GUPTA, V. N. Xylem-mediated channeling of nitrogen in broad bean (*Vicia faba*). **Environmental and Experimental Biology**, Latvia, v. 12, n. 4, p. 187–197, 2014.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. "Métodos de análise química de plantas," Boletim Técnico 78, **Instituto Agronômico**, Campinas, Brazil, 1983.

BHAT, J. Y.; THIEULIN-PARDO, G.; HARTL, F. U.; HAYER-HARTL, M. RuBisCO Activases: AAA+ chaperones adapted to enzyme repair. **Frontiers in Molecular Biosciences**, London, v. 4, n. 20, p. 1-10, 2017. Doi: doi.org/10.3389/fmolb.2017.00020.

CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 133, n. 4, p. 692–704, 2008. Doi: doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: A forgotten element in crop production. **Better Crops With Plant Food,** Canada, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.

CATALDO, D. A.; MAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 6, n. 1, p. 71-80, 1975. Doi: doi.org/10.1080/00103627509366547.

CHEN, J.; LI, Y.; WEN, S.; ROSANOFF, A.; YANG, G.; SUN, X. Magnesium fertilizer-induced increase of symbiotic microorganisms improves forage growth and quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 65, n. 16, p. 3253-3258, 2017. Doi: doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05764.

CHEN, Z. C.; MA, J. F. Magnesium transporters and their role in Al tolerance in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 368, n. 1-2, p. 51-56, 2013. Doi: doi.org/10.1007/s11104-012-1433-y.

CHEN, Z. C.; PENG, W. T.; LI, J.; LIAO, H. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, London, v. 74, p. 142-152, 2018. Doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.005.

CHEN, Z. C.; YAMAJI, N.; MOTOYAMA, R.; NAGAMURA, Y.; MA, J. F. Up-regulation of a magnesium transporter gene OsMGT1 is required for conferring aluminum tolerance in rice. **Plant Physiology**, Rockville, v. 159, n. 4, p. 1624-1633, 2012. Doi: doi.org/10.1104/pp.112.19977.

CHIASSON, D. M.; LOUGHLIN, P. C.; MAZURKIEWICZ, D.; MOHAMMADIDEHCHESHMEH, M.; FEDOROVA, E. E.; OKAMOTO, M.; MCLEAN, E.; GLASS, A. D. M.; SMITH, S. E.; BISSELING, T.; TYERMAN, S. D.; DAY, D.; KAISER, B. N. Soybean SAT1 (Symbiotic Ammonium Transporter 1) encodes a bHLH transcription factor involved in nodule growth and NH_4^+ transport. **Proceedings of the**

National Academy of Sciences, Washington, v. 111, n. 13, p. 4814-4819, 2014. Doi: 10.1073/pnas.1312801111.

CHRIST, B.; HÖRTENSTEINER, S. Mechanism and significance of chlorophyll breakdown. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 33, n. 1, p. 4-20, 2014. Doi: doi.org/10.1007/s00344-013-9392-y.

DIAS, K. G. L.; GUIMARÃES, P. T. G.; NETO, A. E. F.; SILVEIRA, H. R. O.; LACERDA, J. J. J. Effect of Magnesium on Gas Exchange and Photosynthetic Efficiency of Coffee Plants Grown under Different Light Levels. **Agriculture**, Basel, v. 7, n. 10, p. 85, 2017. Doi:10.3390/agriculture7100085.

DING, Y.; LUO, W.; XU, G. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. **Annals of Applied Biology**, Malden, v. 149, n. 2, p. 111-123, 2006. Doi: doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00080.x.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry,** Washington. v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956. Doi: 10.1021 / ac60111a017.

DUNN, M. F. Key roles of microsymbiont amino acid metabolism in rhizobia-legume interactions. **Critical Reviews in Microbiology**. London, v. 41, n. 4, p. 411-451, 2014. Doi: doi.org/10.3109/1040841X.2013.856854.

FISCHER, E. S.; LOHAUS, G.; HEINEKE, D.; HELDT, H. W. Magnesium deficiency results in accumulation of carbohydrates and amino acids in source and sink leaves of spinach. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 102, n. 1, p. 16-20, 1998. Doi:10.1034/j.1399-3054.1998.1020103.x.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Available from FAOSTAT. **Statistics database-agriculture**, Rome, Italy. 2017. Available in: http://www.fao.org/faostat/en/#home. Access in: 12 Jan. 2020.

GERENDÁS, J.; FÜHRS, H. The significance of magnesium for crop quality. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 368, p. 101–128, 2013. Doi: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1555-2.

GOUT, E.; RÉBEILLÉ, F.; DOUCE, R.; BLIGNY, R. Interplay of Mg2+, ADP, and ATP in the cytosol and mitochondria: unravelling the role of Mg^{2}+ in cell respiration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 111, n. 43, p. E4560-E4567, 2014. Doi: 10.1073 / pnas.1406251111.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil,** Dordrecht v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013. Doi: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y.

GRZEBISZ, W. Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 368, p. 23–39, 2013. Doi: https://doi.org/10.1007/s11104-012-1574-z.

HERMANS, C.; JOHNSON, G. N.; STRASSER, R. J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, Switzerland, v. 220, n. 2, p. 344-355, 2004. Doi: doi.org/10.1007/s00425-004-1340-4.

IGAMBERDIEV, A. U.; KLECZKOWSKI, L. A. Optimization of ATP synthase function in mitochondria and chloroplasts via the adenylate kinase equilibrium. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 6, n. 10, p. 1-8, 2015. Doi:10.3389/fpls.2015.00010.

JAHNEN-DECHENT, W.; KETTELER, M. Magnesium basics. **Clinical Kidney Journal,** Oxford, v. 5, p. 3-14, 2012.

KAWAMURA, Y.; RAO, M. **Magnesium sulfate: chemical and technical assessment.** Compendium of Food Additive Specifications, Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, p. 25–27, 2007. Disponível em: http://www.fao.org/docrep/010/a1447e/a1447e00.htm (accessed 12 Mar 2020).

KING, C. A.; PURCELL, L. C. Inhibition of N_2 fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. **Plant Physiology**, Rockville, v. 137, n. 4, p. 1389-1396, 2005. Doi: doi.org/10.1104/pp.104.056317.

KINUGASA, T.; SATO, T.; OIKAWA, S.; HIROSE, T. Demand and supply of N in seed production of soybean (*Glycine max*) at different N fertilization levels after flowering. **Journal of Plant Research**, Tokyo, v. 125, n. 2, p. 275-281, 2012. Doi:10.1007/s10265-011-0439-5.

KOBAYASHI, N. I.; IWATA, N.; SAITO, T.; SUZUKI, H.; IWATA, R.; TANOI, K.; NAKANISHI, T. M. Application of ^{28}M g for characterization of Mg uptake in rice seedling under different pH conditions. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Dordrecht, v. 296, n. 1, p. 531-534, 2013. Doi: 10.1007/s10967-012-2010-9.

KOPITTKE, P. M.; KINRAIDE, T. B.; WANG, P.; BLAMEY, F. P. C.; REICHMAN, S. M.; MENZIES, N. W. Alleviation of Cu and Pb rhizotoxicities in cowpea (*Vigna unguiculata*) as related to ion activities at root-cell plasma membrane surface. **Environmental Science & Technology**, Tehran, v. 45, n. 11, p. 4966-4973, 2011. Doi: doi.org/10.1021/es1041404.

KRIEGER-LISZKAY, A. Singlet oxygen production in photosynthesis. **Journal of Experimental Botany,** Oxford, v. 56, p. 337–346, 2005. Doi: https://doi.org/10.1093/jxb/erh237.

KRYVORUCHKO, I. S.; SINHAROY, S.; TORRES-JEREZ, I.; SOSSO, D.; PISLARIU, C. I.; GUAN, D.; MURRAY, J.; BENEDITO, V. A.; FROMMER, W. B.; UDVARDI, M. K. MtSWEET11, a nodule-specific sucrose transporter of Medicago truncatula. **Plant Physiology**, Rockville, v. 171, n. 1, p. 554-565, 2016. Doi: doi.org/10.1104/pp.15.01910.

KUSAMA, Y.; INOUE, S.; JIMBO, H.; TAKAICHI, S.; SONOIKE, K.; HIHARA, Y.; NISHIYAMA, Y. Zeaxanthin and Echinenone Protect the Repair of Photosystem II from Inhibition by Singlet Oxygen in Synechocystis sp. PCC 6803, **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 56, n. 5, p. 906-916, 2015. Doi: doi.org/10.1093/pcp/pcv018.

LAMBERTO, I.; PERCUDANI, R.; GATTI, R.; FOLLI, C.; PETRUCCO, S. Conserved alternative splicing of Arabidopsis transthyretin-like determines protein localization and S-allantoin synthesis in peroxisomes. **The Plant Cell**, Rockville, v. 22, n. 5, p. 1564-1574, 2010. Doi: https://doi.org/10.1105/tpc.109.070102.

LE BOT, J.; GOSS, M. J.; CARVALHO, M. J. G. P. R.; VAN BEUSICHEM, M. L.; KIRKBY, E. A. The significance of the magnesium to manganese ratio in plant tissues for growth and alleviation of manganese toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wheat (*Triticum aestivum*) plants. *In*: BEUSICHEM, M. L. van. (ed.). **Plant nutrition—physiology and applications**. Dordrecht: Springer, 1990. p. 223-228. Doi: doi.org/10.1007/978-94-009-0585-6_38.

LI, C. P.; QI, Y. P.; ZHANG, J.; YANG, L. T.; WANG, D. H.; YE, X.; LAI, N. W.; TAN, L. L.; LIN, D.; CHEN, L. S. 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**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1564-1581, 2017. Doi:10.1093/treephys/tpx067.

LICHTENTHALER, H. K. Chorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzimology**, San Diego, v. 148, p. 350-382, 1987. Doi: doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

LOGANATHAN, P.; HANLY, J. A.; CURRIE, L. D. Effect of serpentine rock and its acidulated products as magnesium fertilisers for pasture, compared with magnesium oxide and Epsom salts, on a Pumice Soil. 2. Dissolution and estimated leaching loss of fertiliser magnesium. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, wellington, v. 48, n. 4, p. 461-471, 2005. Doi: 10.1080/00288233.2005. 9513680.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVIERA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas.** Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.

MARTÍNEZ-ANDÚJAR, C.; GHANEM, E. M.; ALBACETE, A.; PÉREZ-ALFOCEA, F. Response to nitrate/ammonium nutrition of tomato (Solanum lycopersicum L.) plants overexpressing a prokaryotic NH4+-dependent asparagine synthetase. **Journal of Plant Physiology**, Netherlands, v. 170, n. 7, p. 676-687, 2013. Doi: doi.org/10.1016/j.jplph.2012.12.011.

MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; DANIEL-VEDELE, F.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 7, p. 1141-1157, 2010. Doi: 10.1093/aob/mcq028.

MCCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 297-304, 1967.

MELNIKOV, S.; MAILLIOT, J.; SHIN, B. S.; RIGGER, L.; YUSUPOVA, G.; MICURA, R.; DEVER, T. E.; YUSUPOV, M. Crystal structure of hypusine-containing translation factor eIF5A bound to a rotated eukaryotic ribosome. **Journal of Molecular Biology**, London, v. 428, n. 18, p. 3570-3576, 2016. Doi: doi.org/10.1016/j.jmb.2016.05.011.

NICKELSEN, J.; RENGSTL, B. Photosystem II assembly: from cyanobacteria to plants. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 64, p. 609-635, 2013. Doi: doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120124.

NIU, Y.; CHAI, R.; LIU, L.; JIN, G.; LIU, M.; TANG, C.; ZHANG, Y. Magnesium availability regulates the development of root hairs in A rabidopsis thaliana (L.) H eynh. **Plant, Cell & Environment**, Malden, v. 37, n. 12, p. 2795-2813, 2014. Doi: doi.org/10.1111/pce.12362.

O'ROURKE, J. A.; INIGUEZ, L. P.; FU, F.; BUCCIARELLI, B.; MILLER, S. S.; JACKSON, S. A.; MCCLEAN, P. E.; LI, J.; ZHAO, P. X.; VANCE, C. P.; HERNANDEZ, G. An RNA-Seq based gene expression atlas of the common bean. **BMC Genomics**, London, v. 15, n. 1, p. 866, 2014. Doi: doi.org/10.1186/1471-2164-15-866.

PENG, W. T.; ZHANG, L. D.; ZHOU, Z.; FU, C.; CHEN, Z. C.; LIAO, H. Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 163, n. 3, p. 372-385, 2018. Doi: 10.1111/ppl.12730.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R foundation for statistical computing, 2019. Available in: http://www.R-project.org/. Access in: 12 Jan. 2020.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, D. N.; OLIVER, I. M.; CONTRERAS, M. A.; RUIZ-SAINZ, J. E. Soybean interactions with soil microbes, agronomical and molecular aspects. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 31, n. 1, p. 173-190, 2011. Doi: doi.org/10.1051/agro/2010023.

SENBAYRAM, M.; GRANSEE, A.; WAHLE, V.; THIEL, H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum. **Crop and Pasture Science**, Victoria, v. 66, n. 12, p. 1219-1229. Doi: https://doi.org/10.1071/CP15104

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHIMODA, Y.; ITO, H.; TANAKA, A. Arabidopsis STAY-GREEN, Mendel's green cotyledon gene, encodes magnesium-dechelatase. **The Plant Cell**, Rockville, v. 28, n. 9, p. 2147-2160, 2016. Doi: doi/10.1105/tpc.16.00428.

SILVA, D. M.; SOUZA, K. R. D.; VILAS BOAS, L. V.; ALVES, Y. S.; ALVES, J. D. The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 224, p. 115-125, 2017. Doi: 10.1016 / j.scienta.2017.04.029.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa, 2004.

SUGIYAMA, A.; SAIDA, Y.; YOSHIMIZU, M.; TAKANASHI, K.; SOSSO, D.; FROMMER, W. B.; YAZAKI, K. Molecular characterization of LjSWEET3, a sugar transporter in nodules of Lotus japonicus. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 58, n. 2, p. 298-306, 2017. Doi: doi.org/10.1093/pcp/pcw190.

SUNIL, B.; TALLA, S. K.; ASWANI, V.; RAGHAVENDRA, A. S. Optimization of photosynthesis by multiple metabolic pathways involving interorganelle interactions: resource sharing and ROS maintenance as the bases. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 117, p. 61-71, 2013.

TANOI, K.; KOBAYASHI, N. I. Leaf senescence by magnesium deficiency. **Plants**, Basel, v.4, p.756-772, 2015. Doi: 10.3390/plants4040756.

UDVARDI, M.; POOLE, P. S. Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 64, p. 781-805, 2013. Doi: doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120235.

VAN HANDEL, E. Determination of fructose and fructose-yielding carbohydrates with cold anthrone. **Analytical Biochemistry**, Paris, v. 19, n. 1, p. 193-194, 1967. Doi: 10.1016 / 0003-2697 (67) 90152-2.

VAN RAIJ, B.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J.Á.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996. 285 p.

VAN RAIJ, B.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J.Á.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1997.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 368, n. 1-2, p. 87-99, 2013. Doi: doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0.

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analyses of glyoxylate derivatives. **Analytical Biochemistry**, Paris, v. 33, n. 1, p. 143-157, 1970. Doi: doi.org/10.1016/0003-2697(70)90448-3.

WERNER, K.; WITTE, C. P. The biochemistry of nitrogen mobilization: purine ring catabolism. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 16, n. 7, p. 381-387, 2011. Doi: doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.012.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine.

New Phytologist, Malden, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009. Doi: doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x.

YAMANAKA, T.; NAKAGAWA, Y.; MORI, K.; NAKANO, M.; IMAMURA, T.; KATAOKA, H.; KATAGIRI, T. MCA1 and MCA2 that mediate Ca2+ uptake have distinct and overlapping roles in Arabidopsis. **Plant Physiology**, Rockville, v. 152, p. 1284– 1296, 2010.

YANG, N.; JIANG, J.; XIE, H.; BAI, M.; XU, Q.; WANG, X.; YU, X.; CHEN, Z.; GUAN, Y. 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**, Lausanne, v. 8, p. 2091, 2017. Doi: 10.3389/fpls.2017.02091.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C.; RICKETTS, R. E. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, Cambridge, v. 80, n. 948, p. 209-214, 1955. Doi: 10.1039 / an9558000209.

YIN, S.; ZE, Y. G.; LIU, C.; LI, N.; ZHOU, M.; DUAN, Y. M.; HONG, F. S. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. **Biological Trace Element Research**, Totowa, v. 132, n. 1-3, p. 247-258, 2009. Doi: 10.1007/s12011-009-8392-z.

YUGUAN, Z.; MIN, Z.; LUYANG, L.; ZHE, J.; CHAO, L.; SITAO, Y.; YANMEI, D.; NA, L.; FASHUI, H. Effects of cerium on key enzymes of carbono assimilation of spinach under magnesium deficiency. **Biological Trace Element Research**, Totowa, v. 131, p. 154-164, 2009. Doi: 10.1007/s12011-009-8354-5.