**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Absorção foliar de fontes insolúveis de manganês em soja
[*Glycine max* (L.) Merrill]**

Rafaela Alenbrant Migliavacca

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2018**

Rafaela Alenbrant Migliavacca
Engenheira Agrônoma

Absorção foliar de fontes insolúveis de manganês em soja
[*Glycine max* (L.) Merrill]

Orientador:
Prof. Dr. **RAFAEL OTTO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Migliavacca, Rafaela Alenbrant

Aplicação foliar de fontes insolúveis de manganês na soja [*Glycine max* (L.) Merrill] / Rafaela Alenbrant Migliavacca. - - Piracicaba, 2018.

116 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Micronutriente 2. Sulfato 3. Carbonato 4. Nanopartícula I. Título

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Marli Alenbrant Migliavacca e Euclides Migliavacca,
pelos exemplos de vida, amor e apoio incondicional.*

Ao meu noivo Alfredo Jr. pelo amor, parceria e confiança.

AGRADECIMENTOS

À Deus, fortaleza que me conforta e ilumina, auxílio sempre presente nos momentos de fraqueza, que me traz força e coragem para enfrentar os desafios.

Aos meus pais pelos valores e ensinamentos transmitidos durante os anos, indispensáveis para alcançar meus objetivos. Agradeço todo amor, carinho e suporte, nas diferentes etapas da minha vida e por compreenderem minha ausência física nesses últimos anos.

Ao meu noivo Alfredo Jr. e tudo que nosso relacionamento representa. Amor, confiança, respeito, atenção, paciência, empatia, resiliência e otimismo, foram sentimentos fundamentais que se destacaram nessa fase. Obrigada por auxiliar, apoiar e incentivar meus projetos independentemente da situação, e por acreditar em minha capacidade quando até eu mesma duvidei.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rafael Otto, pelo profissionalismo, conhecimento, motivação, paciência e confiança.

À escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, ao Departamento de Ciência do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela grande oportunidade de estudo.

Ao Professor Dr. Ismail Çakmak pela orientação durante o período de estágio pesquisa e toda sua equipe, em especial a Yasemin Ceylan Şen, Atilla Yazici, Raheela Rehman, Yusuf Tutuş e Sinem Tutuş.

À Sabanci University por me receber como pesquisadora visitante e tornar possível a condução e análises dos experimentos.

Ao Professor Dr. Godofredo Cesar Vitti, por me ensinar que a vida é momento.

Ao Professor Dr. Hudson Wallace Pereira de Carvalho e ao Dr. Eduardo Almeida, pelo auxílio nas análises realizadas no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN); ao Professor Dr. José Laércio Favarin pelo uso do laboratório Multiusuário em Produção Vegetal que possibilitou o preparo das amostras; ao Professor Dr. Gil Miguel de Sousa Câmara por prontamente responder meus questionamentos e ao Professor Dr. André Reis pelos ensinamentos em análises enzimáticas.

Ao laboratório Nacional de Biociências (LnBio) pela realização das análises do DLS, e a UFSCar pela realização da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Ao grupo AGROELDORADO Agricultura e Pecuária LTDA, aos colaboradores Leandro Carneiro e Ernersto Go Koike e demais envolvidos na condução dos experimentos.

À Silvia Helena Carvalho, por acrescentar seu conhecimento ao meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos estagiários Pedro Coutinho, Giovane Moreno, Mariane Natera, Mariane Moro, Marden Moraes, João Cassanji e Gabrieli Camargo, pelo respeito e comprometimento nas atividades desenvolvidas.

Aos Membros do GAPE, Ana Melo, André Urano, Bianca Machado, Breno Nyssen, Bruno Loman, Gabriel Marques, Gabriel R. Anastácio Silva, Geovânia Rezende, Heitor L. Zerbini, Italo Kaye P. de Faria, Izabela Cardoso, João C. Ferreira Júnior, José L. V. Vieira, Julia Saviato, Kauê T. Nardi, Lucas M. Altarugio, Marcos Loman, Matheus A. Castanheira, Matheus G. Nirschl, Matheus P. Fernandes, Nathalia Sartore, Paula V. Carneiro, Pedro A. Antonelli Neto, Pedro Bernardes, Vinicius Marangone e Vitor Botter. Em especial aos coordenadores e membros da equipe grãos por todo auxílio na condução dos experimentos em Uberlândia.

Aos meus colegas e amigos da pós-graduação: Lílían Angélica Moreira, Thales Meinel Schmiedt Sattolo, Saulo A. Q. de Castro, Camilo E. Bohorquez, Sarah Tenelli, Acácio Mira, Edson Mota, Cintia Lopes, Aijânio Gomes B. Silva, Marta Arruda, Ellen Anicésio, Julio Fornazier, Ana Paula Teles, Marcos Rodrigues, Mayara Martins, Janine Mesquita Gonçalves, Ana Luisa Vasconcellos, Rafaela Zanetti Dias, Marcos H. F. Gomes, Joyce Ribeiro, Tatiana Nishida, Nádia Duran, Geovani T. Costa Júnior, Eduardo dos Santos, Naiara Simarro Fagundes, Walquíria Fernanda e Mayara Rodrigues; pelos ensinamentos, auxílios e principalmente pelo companheirismo. Agradeço também a todos os demais amigos que conquistei durante esse período na ESALQ e na Sabanci University.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A quem de alguma forma colaborou com realização desse trabalho e com meu crescimento pessoal e profissional, muito obrigada!

EPÍGRAFE

“Without data, you're just another person with an opinion.”

W. Edwards Deming

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
REFERÊNCIAS	14
2. PRODUTIVIDADE DA SOJA EM RESPOSTA A APLICAÇÃO FOLIAR DE DOSES E FONTES DE MANGANÊS	17
RESUMO	17
ABSTRACT	17
2.1. Introdução.....	18
2.2. Material e Métodos.....	20
2.3. Resultados.....	29
2.4. Discussão	42
2.5. Conclusões.....	45
REFERÊNCIAS	46
3. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NA ABSORÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS PELA SOJA.....	51
RESUMO	51
ABSTRACT	51
3.1. Introdução.....	52
3.2. Material e Métodos.....	55
3.3. Resultados.....	60
3.4. Discussão	67
3.1. Conclusões.....	70
REFERÊNCIAS	70
4. ABSORÇÃO E METABOLISMO DE FONTES INSOLÚVEIS DE MANGANÊS PELA SOJA.....	75
RESUMO	75
ABSTRACT	76
4.1. Introdução.....	76
4.2. Material e Métodos.....	79
4.3. Resultados.....	85
4.4. Discussão	100

4.5. Conclusões	103
REFERÊNCIAS	104
ANEXOS	108
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115

RESUMO

Absorção foliar de fontes insolúveis de manganês em soja [*Glycine max* (L.) Merrill]

Pulverizações foliares são amplamente utilizadas para evitar ou reverter sintomas de deficiência de manganês (Mn). A demanda por fertilizantes com maior eficiência de utilização dos nutrientes introduziu novas tecnologias às fontes utilizadas, com destaque para os nanomateriais. Fontes insolúveis em água (suspensão concentrada) são comercializadas sob o argumento de liberação gradual, com efeito prolongado de fornecimento do nutriente à planta. Contudo, o aproveitamento pelas plantas é em grande parte ainda desconhecido. Perante essa problemática, o objetivo dessa pesquisa foi comprovar a eficiência da aplicação foliar de fontes insolúveis para o fornecimento de Mn em plantas de soja; avaliando seu efeito na absorção, transporte e redistribuição do Mn, nos componentes de produção, produtividade e metabolismo da soja, comparado a uma fonte solúvel de Mn. Dois experimentos foram conduzidos em campo nas safras 2015/2016 e 2016/2017 e outros dois em casa de vegetação utilizando solos de diferentes texturas. Os tratamentos foram compostos pelas fontes de Mn (Carbonato e Sulfato); quatro doses (150, 250, 350 e 450 g ha⁻¹) e um controle (sem Mn), aplicados via foliar no estágio V4. Outros dois experimentos foram desenvolvidos em câmara de crescimento sob condições controladas em solução nutritiva. Os tratamentos foram compostos por duas fontes insolúveis (MnCO₃-nano, 80-100 nm e MnCO₃-suspensão concentrada) e uma fonte solúvel (MnSO₄), comparados a um controle positivo (Mn-Adequado) e a um controle negativo (Mn-Baixo). No primeiro experimento, o primeiro trifólio totalmente expandido foi imerso nos tratamentos por 10 segundos duas vezes por dia, durante 4 dias. No segundo experimento, as aplicações foliares foram realizadas no estágio V5 pulverizando os tratamentos em toda a parte aérea. Nos experimentos em campo as fontes de Mn e as doses não proporcionaram incrementos de produtividade, apesar do teor de Mn nos trifólios ser maior nas plantas que receberam aplicação de MnSO₄ em comparação ao MnCO₃. Em casa de vegetação a textura do solo não influenciou a resposta da soja à aplicação foliar de Mn. As plantas que receberam aplicação de MnSO₄ apresentaram maiores teores nos trifólios. Em câmara de crescimento, as folhas de soja foram capazes de absorver e transportar o Mn proveniente das fontes MnSO₄, MnCO₃-nano e MnCO₃-SC. O MnSO₄ foi absorvido e transportado em maiores quantidades pelas plantas de soja, sua aplicação atenuou os sintomas visuais de deficiência de Mn, promoveu aumento na concentração de clorofila e carboidratos solúveis e reduziu a atividade da enzima guaiacol peroxidase, amenizando os efeitos do estresse oxidativo ocasionado pela deficiência de Mn nas plantas de soja. Os resultados indicam que fontes insolúveis de Mn tem baixa capacidade de absorção foliar e transporte, não alterando o metabolismo da soja quando comparado a fonte solúvel.

Palavras-chave: Micronutriente; MnCO₃; MnSO₄; Nanopartículas

ABSTRACT

Foliar absorption of insoluble sources of manganese in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]

Foliar application is widely used to prevent or reverse symptoms of manganese (Mn) deficiency. Demand for fertilizers with greater use efficiency of nutrients introduced new technologies to used sources, with emphasis on nanomaterials. Water-insoluble sources (concentrated suspension) are marketed under the argument of gradual release, with prolonged effect of supplying the nutrient to the plant. However, the use by plants is largely remains unknown. Faced with this problem, the objective was to prove the efficiency of foliar application of insoluble sources for Mn supply in soybean plants; evaluating the effect on the absorption, transport and redistribution of Mn on soybean production components, yield and metabolism, compared to a soluble source of Mn. Two field experiments were conducted during 2015/2016 and 2016/2017 crop seasons and others two experiments in greenhouse using soils of different textures. The treatments were composed of the sources of Mn (Carbonate and Sulfate); four rates (150, 250, 350 and 450 g ha⁻¹) and one control (without Mn), applied in the V4 stage. Two other experiments were carried out in a growth chamber under controlled conditions in nutrient solution. The treatments were composed for two insoluble sources (MnCO₃-nano, 80-100 nm and MnCO₃-concentrated suspension) and a soluble source (MnSO₄), compared to a positive control (Mn-Adequate) and a negative control. In the first experiment, the first fully expanded trifoliate leaflet was immersed in the treatments for 10 seconds twice a day for 4 days. In the second experiment, the foliar applications were carried out in the V5 stage, spraying the treatments in all shoot part. In the field experiments the Mn sources and the rates did not provide yield increases, although Mn content in trifoliate leaflets was higher in the plants that received MnSO₄ application comparing to MnCO₃. In greenhouse the soil texture did influence the soybean response to Mn foliar application. Plants that received MnSO₄ application had higher trifoliate leaflets levels of Mn. In a growth chamber, soybean leaves were able to absorb and transport Mn present in MnSO₄, MnCO₃-nano and MnCO₃-SC. MnSO₄ was better absorbed and transported by soybean plants, its application attenuated the visual symptoms of Mn deficiency, increased chlorophyll concentration, soluble carbohydrates and reduced the guaiacol peroxidase activity, dropping the effects of oxidative stress caused by Mn deficiency in soybean plants. The results indicate that insoluble sources of Mn have low foliar absorption and transport capacity, not altering the soybean metabolism when compared to soluble source.

Keywords: Micronutrient; MnCO₃; MnSO₄; Nanoparticles

1. INTRODUÇÃO

Sintomas de deficiência de Mn são comuns em lavouras de soja do cerrado brasileiro e podem estar relacionados a diversos fatores, como elevação do pH pela aplicação de doses elevadas de corretivos, ausência de incorporação do calcário, ou aplicação do herbicida glyphosate na soja RR® causando a imobilização de cátions bivalentes como Fe e Mn (HUBER, 2006; ZOBIOLE et al., 2010; FAGERIA, 2001). Esses sintomas podem ainda estar associados ao aumento de microrganismos que atuam na oxidação do Mn (KREMER; MEANS, 2009, DUKE et. al., 2012) pelo fato da disponibilidade de Mn às plantas estar relacionada ao estabelecimento da simbiose entre as plantas e os microrganismos do solo que atuam na oxidação e redução do Mn. A liberação de exsudados radiculares como fitase e ácidos orgânicos aumenta a disponibilidade de Mn na rizosfera por degradação enzimática de complexos de fitatos de Mn ou pela dissolução de fosfatos ou carbonatos inorgânicos de Mn (SCHMIDT; JENSEN; HUSTED, 2016).

Sintomas de deficiência de Mn podem ser observados em plantas cultivadas em solos de pH elevado; solos arenosos, solos de alta porosidade, solos tropicais; solos altamente lixiviados ou ricos em matéria orgânica (MOREIRA et al., 2003; FAGERIA, 2001). As condições desses solos favorecerem a oxidação do Mn²⁺ em formas não disponíveis como os óxidos de Mn. A disponibilidade do Mn no solo para absorção pelas plantas é influenciada por parâmetros do solo como potencial redox, teor de água e atividade microbiana (SCHMIDT; JENSEN; HUSTED, 2016).

Teores de Mn entre 10 e 20 mg kg⁻¹ nas folhas causam o aparecimento de sintomas de deficiência na cultura da soja. Os sintomas de deficiência de Mn nas folhas são caracterizados por uma clorose internerval nas folhas novas, em virtude da redução na síntese de clorofila e baixa remobilização desse nutriente. As plantas com sintomas de deficiência de Mn apresentam diminuição na massa seca, no porte e no acúmulo de carboidratos (EMBRAPA, 2004; OLIVEIRA JUNIOR; MALAVOLTA; CABRAL, 2000; MARSCHNER, 2012).

Em condições adequadas de suprimento de Mn, a concentração nos tecidos vegetais é em torno de 50 mg kg⁻¹ (EPSTEIM; BLOOM, 2006). As folhas acumulam altas concentrações no decorrer do ciclo, uma pequena fração do nutriente é remobilizada das folhas velhas para as folhas em crescimento, entretanto os teores variam entre as partes da

planta durante o período vegetativo (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). As necessidades de Mn variam de acordo com a cultura; plantas de soja extraem cerca de 130 g de Mn para cada tonelada de grãos produzidos (EMBRAPA, 2008).

Pulverizações foliares são amplamente utilizadas para evitar ou corrigir sintomas de deficiência de Mn, podendo ser eficazes para reverter a deficiência do micronutriente. No entanto, após a aplicação foliar, os teores de Mn podem estar baixos nas folhas, devido à pequena taxa de remobilização para outras partes da planta, pela sua baixa mobilidade no floema (MARSCHNER, 2012). O maior interesse na pulverização foliar é aumentar a taxa de fotossíntese nas folhas e estimular a absorção de nutrientes pela raiz da planta, além de fornecer micronutrientes em solos que apresentam baixos teores; corrigir deficiências em situações em que há impossibilidade de aplicação de fertilizantes via solo; aumentar o aproveitamento de fertilizantes; aumentar a velocidade de crescimento das plantas e corrigir rapidamente o balanço nutricional (MARSCHNER, 2012; MOCELLIN, 2004).

Os efeitos da aplicação foliar de Mn na soja são divergentes, principalmente para ganhos em produtividade. Oliveira Junior et al. (2000), Correa e Durigan (2009) e Basso et al. (2011) não obtiveram incrementos de produtividade com a aplicação foliar de Mn. Por outro lado, Mann et al. (2001) observou resposta da soja à aplicação foliar de Mn, com ganhos de produtividade que superaram os obtidos com aplicações via solo.

Muitos fatores influenciam na eficiência da absorção foliar de Mn, entre eles estão a fonte e a dose de Mn, a frequência e o tempo das aplicações além das condições ambientais durante a aplicação. A resposta das culturas à aplicação foliar de Mn também varia entre espécies, uma vez que as necessidades são diferentes para cada cultura (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). A eficiência agrônômica das fontes de Mn depende das características intrínsecas dos fertilizantes, sendo que mesmo após a aplicação, sinais de deficiência podem ser observados, de forma que nem todo o Mn presente no fertilizante é disponibilizado às plantas (LOPES, 1999).

Normalmente são utilizadas fontes solúveis de Mn para adubação foliar, que são obtidas a partir da reação dos minérios contendo Mn com ácido sulfúrico, clorídrico ou nítrico, que transformam formas indisponíveis do nutriente em formas assimiláveis pelas plantas (LOPES, 1999). A utilização de fontes solúveis de Mn é devida principalmente à capacidade das folhas em absorver partículas pequenas do nutriente (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Outro fator, talvez o mais importante, refere-se à Legislação Brasileira de Fertilizantes, que historicamente regulamentou pelo uso de fontes

solúveis em água para adubação foliar. A desvantagem de fontes solúveis é o custo relativamente elevado para sua obtenção e, principalmente, as concentrações relativamente baixas do nutriente devido à presença dos íons acompanhantes na molécula.

Com o avanço da nanotecnologia, fontes insolúveis de Mn estão sendo difundidas no mercado de fertilizantes, entretanto pouco se sabe sobre a capacidade da planta absorver e metabolizar o nutriente proveniente de fontes insolúveis em água. Também é desconhecida a diferença de absorção de fontes insolúveis de Mn quando comparadas a uma fonte solúvel como o MnSO_4 . Fontes insolúveis de micronutrientes são obtidas a partir da moagem ultrafina, por diferentes métodos, de partículas de óxidos ou carbonatos, com grande investimento de tecnologia, até chegar em escala nanométrica, para que, dessa forma, aumente a absorção do nutriente pelas plantas (SERVIN et al., 2015).

A utilização de formulações de micronutrientes à base de nanopartículas pode oferecer um novo mecanismo altamente eficaz para a o aumento dos rendimentos das culturas, através da promoção baseada em nutrição mais direcionada e estratégica (SERVIN et al., 2015). Os nanofertilizantes podem estar relacionados a um sistema de liberação inteligente dos nutrientes em função da sua alta área de superfície, capacidade de sorção e cinética de liberação controlada em locais específicos que minimiza as perdas de nutrientes e aumenta a absorção pelas células vegetais (DEY; DAS; MAWLONG, 2018).

A baixa solubilidade dos nanofertilizantes poderia permitir uma dosagem mais elevada quando comparado às fontes solúveis em função dos danos que os sais ocasionam as folhas, quando aplicados em altas concentrações. Entretanto, aplicação de dosagens mais moderadas, como aquelas recomendadas para as fontes solúveis, poderiam limitar o fornecimento a longo prazo dos nutrientes provenientes das fontes não solúveis (LI et al., 2016).

A hipótese deste trabalho é de que ocorre absorção, transporte e redistribuição de Mn em soja a partir da aplicação foliar de fonte insolúvel do nutriente, com efeitos nutricionais, metabólicos e produtivos semelhantes àqueles proporcionado pela aplicação de fonte solúvel de Mn.

Os objetivos dessa pesquisa foram:

i) comprovar a eficiência de absorção, transporte e redistribuição de Mn proveniente de fonte insolúvel aplicado via foliar em soja;

ii) avaliar parâmetros nutricionais, metabólicos e produtivos da soja submetida à aplicação foliar de fonte solúvel e insolúvel de Mn.

Referências

- BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; LAMEGO, F. P.; GIROTTO, E. Aplicação foliar de manganês em soja transgênica tolerante ao glyphosate. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 10, p. 1726-1731, 2011.
- CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. Glyphosate e adubação foliar com manganês na cultura da soja transgênica. **Planta daninha**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 721-727, 2009.
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. Cap. XIII, p. 327-354. **In:** FERNANDES, M.S. (Ed.). *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa – MG Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.
- DEY, J. K.; DAS, S.; MAWLONG, L. G. Nanotechnology and its Importance in Micronutrient Fertilization. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 2306-2325, 2018.
- DUKE, S. O., LYDON, J., KOSKINEN, W. C., MOORMAN, T. B., CHANEY, R. L., & HAMMERSCHMIDT, R. Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere microbiota, and plant disease in glyphosate-resistant crops. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 42, p. 10375-10397, 2012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologia de produção de soja Paraná**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2004. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosojapr/fertilidade.htm>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil - 2009 e 2010**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2008. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br>
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.
- FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of plant nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015. 150 p.

- HUBER, D.M. Strategies to ameliorate glyphosate immobilization of manganese and its impact on the rhizosphere and disease. In: GLYPHOSATE POTASSIUM SYMPOSIUM, 2006, Columbus. **Proceedings...** DeWitt: Ohio State University, 2006. p. 51-63.
- KREMER, R. J.; MEANS, N. E. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 153-161, 2009.
- LI, P., DU, Y., HUANG, L., MITTER, N., XU, Z. P. Nanotechnology promotes the R&D of new-generation micronutrient foliar fertilizers. **RSC Advances**, v. 6, n. 73, p. 69465-69478, 2016.
- LOPES, A. S. **Micronutrientes: filosofias de aplicação e eficiência agrônômica**. São Paulo
- MANN, E. N.; REZENDE, P. D.; CARVALHO, J. D.; CORRÊA, J. B. D. Efeito da adubação com manganês, via solo e foliar em diferentes épocas na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 2, p. 264-273, 2001.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MOCELLIN, R. S. P. **Princípios da adubação foliar**. Coletânea de dados e revisão bibliográfica. Canoas/RS: Omega Fertilizantes, 83p, 2004.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R. T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 95-101, 2003.
- OLIVEIRA JUNIOR, J. A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do triângulo mineiro. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v. 35, n. 8, p. 1629-1636, 2000.
- REISENAUER, H. M. Determination of plant-available soil manganese. In: **Manganese in soils and plants**. Springer, Dordrecht, 1988. p. 87-98.
- SCHMIDT, S. B.; JENSEN, P. E.; HUSTED, S. Manganese deficiency in plants: the impact on photosystem II. **Trends in plant science**, v. 21, n. 7, p. 622-632, 2016.
- SERVIN, A.; ELMER, W.; MUKHERJEE, A.; DE LA TORRE-ROCHE, R.; HAMDI, H.; WHITE, J. C.; BINDRABAN, P., DIMKPA, C. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 17, n. 2, p. 1-21, 2015.

ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; HUBER, D.M.; CONSTANTIN, J.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JR, A. Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant and Soil**, The Hague, v. 328, p. 57-69, 2010.

2. PRODUTIVIDADE DA SOJA EM RESPOSTA A APLICAÇÃO FOLIAR DE DOSES E FONTES DE MANGANÊS

RESUMO

Sintomas de deficiência de manganês (Mn) são recorrentes nas lavouras brasileiras e a aplicação foliar de Mn é a forma mais utilizada para reverter os sintomas. Recentemente, a nanotecnologia vem tomando destaque na agricultura. Na área da nutrição de plantas, fertilizantes a base de carbonatos, moídos em escala nanométrica, são comercializados na forma de suspensão concentrada, que apresentam maior concentração de Mn comparado a fontes solúveis de Mn. Entretanto, existem dúvidas a respeito da capacidade das folhas absorverem essas partículas. O objetivo do estudo foi avaliar a absorção, o transporte e a redistribuição do Mn de fonte insolúvel (MnCO_3) ou solúvel (MnSO_4) pela cultura da soja e seus efeitos nos componentes da produtividade. Dois experimentos foram conduzidos em campo nas safras 2015/2016 e 2016/2017 em esquema fatorial $2 \times 4 + 1$ com delineamento experimental em blocos casualizados, e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por duas fontes de Mn (Carbonato e Sulfato); quatro doses (150, 250, 350 e 450 g ha⁻¹) e um tratamento controle (sem aplicação de Mn) aplicados via foliar no estágio fenológico V4. Foram avaliados os componentes de produção, peso de 1000 grãos e rendimento. Para avaliar absorção e o transporte de Mn, foram avaliados os teores de Mn no trifólio que recebeu a pulverização foliar (3º trifólio), e o teor de Mn no primeiro trifólio expandido após aplicação (4º trifólio) e nas folhas diagnósticas em R1/R2. A redistribuição foi avaliada através do teor de Mn nas folhas, hastes, vagens e grãos em R7.3. As fontes e doses de Mn não proporcionaram incrementos de produtividade, altura, diâmetro, massa seca e componentes de produção. O teor de Mn nos trifólios foi maior nas plantas que receberam aplicação de MnSO_4 em comparação ao MnCO_3 . Na safra 2015/2016, na dose de 350 g ha⁻¹ a aplicação de MnSO_4 aumentou o teor de Mn nas hastes e nos grãos de soja, demonstrando redistribuição do Mn aplicado por meio de fonte solúvel. Os resultados demonstram que há absorção, transporte e redistribuição de Mn aplicado na forma de MnSO_4 , porém sem efeito significativo na produtividade da soja.

Palavras-chave: Carbonato; Sulfato; Teores de Mn

ABSTRACT

Symptoms of manganese (Mn) deficiency are recurrent in Brazilian crops and foliar application of Mn is used to revert that symptoms. Recently, nanotechnology has been prominent in agriculture. In the area of plant nutrition, carbonate fertilizers, milled at a nanoscale, are marketed in the form of

concentrated suspension, which has higher concentration of Mn compared to soluble sources of Mn. However, there are uncertainties about the ability of the leaves absorb these particles. The objective was to evaluate soybean absorption, transport and redistribution of Mn using insoluble source (MnCO_3) or soluble (MnSO_4) and its effects on yield components. Two field experiments were carried out during 2015/2016 and 2016/2017 crops seasons in a $2 \times 4 + 1$ factorial scheme with a randomized complete block design, and four replications. Treatments were composed of two sources of Mn (Carbonate and Sulfate); four rates (150, 250, 350 and 450 g ha^{-1}) and a control treatment (without application of Mn) applied via foliar at V4 phenological stage. The yield components, weight of 1000 grains and yield were evaluated. In order to evaluate the absorption and transport of Mn, Mn levels were evaluated in the trifoliolate leaflet that received foliar spraying (3rd trifoliolate leaflet), and the Mn levels in the first expanded trifoliolate leaflet after application (4th trifoliolate leaflet) and in the leaves in R1/R2. The redistribution was evaluated by the Mn content in leaves, stems, pods and grains in R7.3. The sources and rates of Mn did not provide increases in yield, height, diameter, dry mass and yield components. The Mn levels in the trifoliolate leaflets were higher in the plants that received MnSO_4 application in comparison to the MnCO_3 . In the 2015/2016 harvest, the rate of 350 g ha^{-1} the application of MnSO_4 increased the Mn levels in the stems and soybean grains, demonstrating redistribution of Mn after a soluble source application. The results demonstrate that there is absorption, transport and redistribution of Mn applied in the form of MnSO_4 , but without significant effect on soybean yield.

Keywords: Carbonate; Sulfate; Mn levels

2.1. Introdução

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] ocupa posição de destaque no Brasil, é considerada a cultura mais importante em produção de grãos e em exportação. De acordo com o levantamento da safra brasileira de grãos, a estimativa para a safra 2018/19 é alcançar uma produção entre 117 e 119,4 milhões de toneladas. Na safra 2016/17 a área plantada de soja foi de 33,9 milhões de hectares, aumentando para 35,14 milhões de hectares em 2017/18. A expectativa para a próxima safra é um aumento entre 0,8 a 2,8 % da área plantada em comparação a safra anterior (CONAB, 2018).

Uma das regiões brasileiras que mais expandiram em área de produção nas últimas safras está localizada no bioma cerrado, onde predominam solos ácidos com baixos teores de nutrientes. A correção dos solos com a utilização de altas doses de calcário ou sua má incorporação, contribuem para o aparecimento de sintomas de deficiência de micronutrientes na soja. Dentre os micronutrientes requeridos pelas culturas, o manganês (Mn) é o elemento cujo sintoma de deficiência tem sido observado com maior frequência nas lavouras de soja do

cerrado brasileiro. Algumas características do solo favorecem o surgimento de deficiência de Mn nas plantas cultivadas a campo, principalmente em solos tropicais, com baixo teor de Mn no material de origem, solos altamente lixiviados, e que apresentam valores altos de pH devido à aplicação de calcário (MOREIRA et al., 2003; FAGERIA, 2001).

Outro fator que está relacionado aos sintomas de deficiência de Mn na soja é aplicação do glyphosate em cultivares resistentes ao produto (RR®), que representam 95 % da área semeada no Brasil nas últimas safras (CÉLERES, 2018). Após aplicação do herbicida, as plantas apresentam um efeito visual negativo do glyphosate sobre parâmetros fotossintéticos e teores de clorofila, demonstrando o sintoma conhecido como “yellow flashing” (REDDY; ZABLOTOWICZ, 2003). O tempo de duração desse efeito é dependente da capacidade das plantas se recuperarem através da absorção dos nutrientes que são imobilizados pelo glyphosate nos tecidos vegetais. Quando não são feitas aplicações foliares essa absorção é dependente exclusivamente das raízes (CAKMAK et al., 2009), e está relacionada ao teor do Mn no solo.

Uma das hipóteses que explicam a menor concentração de Mn nos tecidos da planta, após a aplicação de glyphosate, é que o amarelecimento de folhas jovens da cultura pode estar relacionado à imobilização de cátions bivalentes como Fe e Mn (HUBER, 2006; ZOBIOLE et al., 2010). Entretanto, não foram encontradas evidências negativas na absorção, acúmulo e distribuição do Mn pela soja RR® após aplicação de glyphosate (ROSOLEM et al., 2010; ANDRADE; ROSOLEM, 2011). Outros trabalhos relacionam a aplicação de glyphosate com o aumento de microrganismos que atuam na oxidação do Mn no solo, o que reduz a população dos microrganismos redutores de Mn, afetando a disponibilidade do nutriente para as plantas (KREMER; MEANS, 2009; DUKE et. al., 2012).

Para reverter os sintomas de deficiência de Mn, as aplicações foliares são amplamente utilizadas, podendo ser eficazes para superar a deficiência deste micronutriente. Uma das principais vantagens da aplicação foliar é que a absorção de nutrientes ocorre diretamente na folha, o que ajuda a evitar reações de indisponibilização do nutriente quando aplicado via solo. Além disso, as menores quantidades requeridas de micronutrientes permitem que baixas doses aplicadas via folha sejam suficientes para nutrir a planta, além de poder fornecer micronutrientes em solos que apresentam baixos teores e corrigir rapidamente o balanço nutricional da planta (MOCELLIN, 2004; LI et al., 2016).

A resposta das culturas a aplicação foliar de Mn varia de acordo com a fonte do nutriente, e a demanda da cultura, uma vez que há variabilidade entre espécies (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Diversas fontes podem ser utilizadas para o fornecimento de Mn entre elas estão Mn-EDTA, Mn-cloreto, Mn-sulfato, Mn-lignosulfonato, Mn-nitrato, Mn-acetato, Mn-formiato, além de solução de fosfito de Mn, óxidos, oxissulfatos e óxidos silicatados. Os micronutrientes também podem ser encontrados misturados com fertilizantes NPK granulados. A eficiência agronômica das fontes de Mn depende das características intrínsecas dos fertilizantes (CASTRO, 2009; PINTO, 2012).

Recentemente, há um grande interesse da indústria em utilizar nanotecnologia para melhorar processos produtivos e os ganhos associados com esta nova linha de produtos (MCTIC, 2018). Com a introdução da nanotecnologia na agricultura, fontes insolúveis de Mn começaram a ser difundidas no mercado de fertilizantes, entretanto há poucas informações sobre a capacidade da planta em absorver e utilizar nutrientes de fontes insolúveis em seus processos metabólicos (MONREAL et al., 2016), e quais são as diferenças de absorção quando esses produtos são comparados a uma fonte solúvel. Para a utilização dessa técnica, as partículas de óxidos ou carbonatos são finamente moídas utilizando diferentes métodos, com grande investimento em tecnologia, até chegar em escala nanométrica, para que, dessa forma, aumentem a absorção do nutriente pelas plantas (SERVIN et al., 2015).

Considerando que produtos insolúveis em água estão disponíveis comercialmente para uso na agricultura e que existem dúvidas sobre a efetividade da absorção foliar destes produtos, novos estudos devem ser realizados para elucidar esses aspectos. Nesse sentido, objetivou-se comprovar a eficiência de uma fonte insolúvel de Mn (carbonato de Mn) comparado a uma fonte solúvel de Mn (sulfato de Mn), nos processos de absorção, transporte e redistribuição pela planta de soja, assim como em componentes produtivos em experimento de campo conduzido em duas safras agrícolas.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Caracterização do MnCO_3

A ISO/TC 229 considera como nanotecnologia, materiais em nanoescala que usualmente apresentam um tamanho abaixo de 100 nanômetros (nm), mas não exclusivamente, podendo apresentar outras dimensões. Como fonte insolúvel de manganês foi

utilizado um fertilizante comercializado como fertilizante na forma de suspensão concentrada (SC), que apresenta 500 g de Mn por litro na forma de carbonato de manganês (MnCO_3), 3,8 % de N, polímeros e dispersantes e densidade de $1,827 \text{ g dm}^{-3}$.

Para medir o tamanho das partículas do produto, a técnica de espalhamento de luz dinâmico (DLS) foi aplicada utilizando o equipamento Zetasizer (Nano ZS, Malvern Instruments, UK), calibrado para operar com água como dispersante; viscosidade de 0,8872 cP; constante de dispersão elétrica de 78,5; índice de refração de 1,33 e tempo de análise de 12 segundos. O potencial zeta, que avalia a estabilidade das partículas, foi determinado por eletrocinética, utilizando o mesmo equipamento Zetasizer, nas mesmas condições de operação. O formato das partículas foi visualizado através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio da FEI Company, modelo Magellan 400 L, tipo FEG, operando com tensões aceleradoras do feixe de elétrons entre 2 e 5 kV.

2.2.2. Áreas experimentais e instalação dos experimentos

O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, nas safras 2015/2016 e 2016/2017 em áreas com baixos teores de Mn ($\text{Mn} < 1,2 \text{ mg dm}^{-3}$) (RAIJ; CANTARELLA, 1996), a fim de diminuir as interferências do Mn proveniente do solo. As áreas experimentais estão localizadas nas fazendas do grupo AGROELDORADO Agricultura e Pecuária LTDA no município de Uberlândia-MG.

O primeiro experimento foi instalado na safra 2015/2016 na fazenda Beija-flor III, nas coordenadas geográficas $19^\circ 13' 35''$ de latitude sul, $47^\circ 58' 36''$ de longitude oeste e aos 986 m de altitude, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2018). O segundo experimento foi instalado na safra 2016/2017 na fazenda Beija-flor II, posicionado à $19^\circ 12' 07''$ de latitude sul, $47^\circ 59' 24''$ de longitude oeste e a uma altitude de 966 m, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2018) (Figura 1). Para fins de caracterização do solo, foram coletadas amostras compostas até 1,0 m, em intervalos de 0,2 m e submetido à análise química e física para fins de classificação de solo seguindo a metodologia da EMBRAPA (SILVA, 2009) (Tabela 1).

Figura 1. Localização das áreas experimentais, Uberlândia – MG.

O Clima da região é classificado por Köppen-Geiger como Cwa (PEEL et al., 2007), subtropical ou tropical de altitude, que apresenta verões quentes e chuvosos e invernos secos de temperaturas amenas. As precipitações e as temperaturas médias durante os meses de outubro a março foram coletadas nas duas áreas experimentais em cada safra, apresentando um acúmulo de 1700 mm na safra 2015/2016 e 1400 mm na safra 2016/2017, com temperaturas médias entre 24 e 27 °C (Figura 2).

Tabela 1. Análise químico-física para fins de classificação dos solos das áreas experimentais nas safras 2015/2016 e 2016/2017

Prof	pH	pH	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	M.O	Areia	Silte	Argila
m	H ₂ O	KCl	mg kg ⁻¹				mmolc kg ⁻¹					-- % --			g kg ⁻¹		
Experimento 1 - Safra 2015/2016																	
0-0,2	5,9	5,1	<1,9	1,8	15,2	6,8	0,7	0,48	44	23,9	67,9	35	2	38	125	41	834
0,2-0,4	5,5	4,9	<1,9	0,8	8,2	3,5	<0,4	<0,02	44	12,8	56,8	22	0	29	104	69	827
0,4-0,6	5,6	5,0	<1,9	0,7	4,4	0,8	<0,4	<0,02	40	6,1	46,1	13	0	24	71	71	858
0,6-0,8	5,9	5,3	<1,9	0,5	5,8	1,9	<0,4	<0,02	32	8,3	40,3	21	0	21	128	20	852
0,8-1,0	5,6	5,4	<1,9	0,4	4,2	2,1	<0,4	<0,02	25	6,8	31,8	21	0	21	123	37	840
Experimento 2 – Safra 2016/2017																	
0-0,2	5,7	5,2	<1,9	1,6	12,1	6,8	<0,4	<0,02	40	20,7	60,7	34	0	35	180	18	802
0,2-0,4	5,7	5,3	<1,9	1,9	12,3	7,4	<0,4	<0,02	44	21,9	65,9	33	0	31	193	43	764
0,4-0,6	5,6	5,5	<1,9	1,4	6,7	3,3	<0,4	0,48	35	11,6	46,6	25	4	25	174	44	782
0,6-0,8	5,8	5,2	<1,9	<0,2	7,1	2,4	<0,4	<0,02	32	10,4	42,4	25	0	22	221	46	733
0,8-1,0	5,9	5,4	<1,9	<0,2	6,8	3,2	<0,4	<0,02	29	10,9	39,8	27	0	20	191	13	796

pH em H₂O e em cloreto de potássio (KCl) mol L⁻¹; fósforo (P) extraído por Melich⁻¹ e determinado por colorimetria; potássio (K) extraído por Mehlich⁻¹ e determinado em espectrofotômetro de emissão atômica; cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extraídos com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica; sódio (Na) extraído com Mehlich⁻¹ e determinado por fotômetro de chama; acidez potencial (H+Al) extraídos com acetato de cálcio e determinados por titulometria; alumínio (Al) extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado por titulometria; SB: Soma de bases trocáveis; CTC: Capacidade de troca de cátions a pH 7; V: Saturação da CTC por bases do solo; m: Saturação por Alumínio; M.O: Matéria orgânica determinada por titulometria; Areia, Silte e Argila determinados por densímetro pelo método de Bouyoucos.

Figura 2. Precipitação e temperatura média mensal entre os meses de outubro a março na fazenda Beija-flor III durante a safra 2015/2016 (A) e na fazenda Beija-flor II durante a safra 2016/2017 (B), Uberlândia – MG.

A amostragem do solo para fins de avaliação da fertilidade foi realizada por bloco, a partir da coleta de cinco pontos, resultando em uma amostra composta de cada bloco, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, garantindo baixos teores de Mn em toda a área experimental (Tabela 2). A análise para fins de fertilidade do solo foi realizada segundo Raij et al. (2001).

A adubação de base da cultura da soja seguiu padrões manejo adotado pela fazenda. Na safra 2015/2016, foram aplicados à lanço e em pré-plantio 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅; 75 kg ha⁻¹ de K₂O e 0,5 kg ha⁻¹ de B através do fornecimento de MAP (FertiGran P 10 - 48-00 + 0,2% B) e KCl (MasterGran 00 - 00-58 + 0,2% B). Na safra 2016/2017, foram aplicados 12,5 kg ha⁻¹ de N; 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅; 90 kg ha⁻¹ de K₂O e 0,56 kg ha⁻¹ de B através do fornecimento de MAP (FertiGran P 10 - 48-00 + 0,2% B) e KCl (MasterGran 00 - 00-58 + 0,2% B) em taxas variáveis à lanço e em pré-plantio.

A cultivar de soja Pioneer 98Y30 RR® foi semeada em 20 de novembro de 2015 utilizando-se 9 sementes por metro, com o objetivo de atingir um stand final de 180 mil plantas ha⁻¹. No segundo ano de experimento, utilizou-se a cultivar Brasmax Flecha 6266 RSF IPRO®, semeada no dia 18 de outubro de 2016, utilizando 14 sementes por metro, objetivando-se uma população final de 280 mil plantas ha⁻¹. Cada unidade experimental foi constituída por 10 linhas de soja espaçadas em 0,50 m e 15 m de comprimento, totalizando uma área de 75 m². A população final de plantas foi de 157 e 238 mil plantas ha⁻¹ nas safras 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente, por meio de avaliação realizada na época da colheita nas duas áreas experimentais.

Tabela 2. Caracterização das propriedades físico-químicas dos solos das áreas experimentais nas safras 2015/2016 e 2016/2017

Bloco	Prof m	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Ca mg dm ⁻³	Mg mg dm ⁻³	Al mmol _c dm ⁻³	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB mmol _c dm ⁻³	CTC mmol _c dm ⁻³	V %	M %	M.O g dm ⁻³	B mg dm ⁻³	Cu mg dm ⁻³	Fe mg dm ⁻³	Zn mg dm ⁻³	Mn mg dm ⁻³	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹
Experimento 1 - Safra 2015/2016																						
1	0-0,2	5,8	17	16	2,2	40	12	<1	16	54,2	70,2	77	0	32	0,68	0,5	20	0,7	<0,5	206	105	689
1	0,2-0,4	5,3	9	87	1,8	12	4	<1	22	17,8	39,8	45	0	23	0,54	0,4	21	0,3	<0,5	161	50	789
2	0-0,2	5,4	22	30	1,9	23	9	<1	22	33,9	55,9	61	0	29	0,63	0,7	31	0,8	<0,5	184	76	740
2	0,2-0,4	5,1	8	115	1,5	8	3	<1	28	12,5	40,5	31	0	22	0,57	0,6	21	0,5	<0,5	161	46	793
3	0-0,2	5,6	34	25	2,2	33	14	<1	20	49,2	69,2	71	0	33	0,64	1,2	26	2,2	<0,5	192	119	688
3	0,2-0,4	5,1	9	98	1,4	10	4	<1	25	15,4	40,4	38	0	24	0,55	0,7	21	0,8	<0,5	165	43	793
4	0-0,2	5,2	15	45	1,5	23	9	<1	25	33,5	58,5	57	0	30	0,56	0,5	28	0,5	<0,5	202	61	737
4	0,2-0,4	4,8	12	251	1,5	12	6	<1	31	19,5	50,5	39	0	24	0,47	0,5	22	0,5	<0,5	173	45	782
Experimento 2 - Safra 2016/2017																						
1	0-0,2	5,0	47	25	2,8	35	11	<1	38	48,8	86,8	56	0	34	0,63	1,4	40	2,3	1,1	216	45	739
1	0,2-0,4	5,1	12	114	1,4	11	6	<1	31	18,4	49,4	37	0	23	0,48	0,9	28	0,9	0,8	181	29	790
2	0-0,2	5,3	35	17	2,3	35	14	<1	28	51,3	79,3	65	0	35	0,62	1,4	39	3,0	1,2	215	70	715
2	0,2-0,4	5,1	8	110	1,3	19	7	<1	31	27,3	58,3	47	0	24	0,43	0,9	24	0,8	0,5	180	54	766
3	0-0,2	5,2	27	6	2,2	28	11	<1	25	41,2	66,2	62	0	26	0,59	0,9	34	1,8	0,9	214	73	712
3	0,2-0,4	5,2	22	46	1,4	22	6	<1	25	29,4	54,4	54	0	23	0,55	0,8	27	0,5	0,5	183	28	789
4	0-0,2	5,2	42	30	2,9	41	10	<1	28	53,9	81,9	66	0	32	0,59	1,1	35	2,3	1,0	214	76	710
4	0,2-0,4	5,0	7	106	1,8	13	4	<1	31	18,8	49,8	38	0	21	0,41	0,8	27	0,5	0,4	181	55	764

Fósforo (P) quantificado por colorimetria, extraído por resina trocadora de íons; pH em CaCl₂; potássio (K) em espectrofotômetro de emissão atômica, extraído por resina trocadora de íons; Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) determinados em espectrofotômetro de absorção atômica, extraído por resina trocadora de íons; alumínio trocável (Al) por colorimetria, extraído com cloreto de potássio; acidez potencial (H+Al) pelo método SMP; enxofre (S-SO₄) por turbidimetria com fosfato de cálcio; Boro (B) extração com água quente e determinação por colorimetria; cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) extração com DTPA e determinação por espectrofotometria de absorção atômica; SB: soma de bases trocáveis; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação da CTC por bases; m: saturação por alumínio. Areia, silte e argila determinados por densímetro.

O manejo de pragas e doenças das áreas experimentais foi o mesmo adotado pela fazenda. Em relação ao controle de plantas daninhas, nas duas safras agrícolas, em pré-semeadura foi feita a dessecação das áreas. Antes da aplicação dos tratamentos (estádio fenológico V4 da soja) foi feita aplicação de glifosato (Roundup WG, 1,5 kg ha⁻¹), junto a aplicação de fungicidas e inseticidas recomendados para a cultura em área total, utilizando volume de calda de aplicação de 150 L ha⁻¹ pulverizados com sistema auto propelido.

2.2.3. Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

O delineamento experimental utilizado nos dois experimentos foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, no qual os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2x4 + 1. Os tratamentos utilizados foram 2 fontes de Mn (solúvel e insolúvel), quatro doses de Mn (150, 250, 350 e 450 g ha⁻¹) e um tratamento controle (sem aplicação de Mn). As doses foram definidas com base na recomendação oficial de Mn para a cultura da soja via aplicação foliar que é de 350 g ha⁻¹ (EMBRAPA, 2004). O sulfato de manganês monohidratado (MnSO₄.H₂O), composto por 30,9 % Mn e 18% S (peso: peso) foi o produto comercial utilizado como fonte solúvel. Como fonte insolúvel foi utilizado o carbonato de manganês (MnCO₃), comercializado como fertilizante na forma de suspensão concentrada (SC), que contém 500 g L⁻¹ de Mn, 3,8 % de N, polímeros e dispersantes com densidade de 1,827 g dm⁻³ (nome comercial YaraVita® Mantrac^{TM}Pro, da empresa Yara®).

A aplicação dos tratamentos foi realizada no estágio fenológico V4, com três trifólios completamente expandidos, utilizando um pulverizador costal pressurizado à CO₂ com pressão constante de 2,0 Kgf cm⁻², equipado com ponta do tipo jato plano leque, série Teejet tipo XR 110.02, calibrado para um volume de calda de 250 L ha⁻¹, posicionado a barra de pulverização a uma altura média de 0,5 m do dossel da cultura.

As condições ambientais no momento da aplicação na safra 2015/2016 foram: 60 % de umidade relativa (UR), 10 km h⁻¹ de velocidade do vento (vv) e temperatura (T) de 28 °C (15/12/2015). Na safra 2016/2017 as condições climáticas registradas na aplicação eram de UR = 65 %; vv = 5 km h⁻¹ e T = 27 °C (11/10/16). Não foram registradas chuvas nas áreas experimentais durante o período de 24 horas após a aplicação dos tratamentos.

2.2.4. Avaliações

No estágio fenológico V5 (aproximadamente 5 dias após a aplicação foliar), foram coletados os trifólios que receberam a aplicação (3° trifólio) e também os que não receberam a aplicação (4° trifólio), ou seja, que expandiram após a pulverização foliar. Foram coletados trifólios de 10 diferentes plantas nas duas linhas centrais de cada parcela (Figura 3). Os trifólios foram então lavados com HCl (3%), seguido de lavagem com água de torneira e água deionizada de acordo com as recomendações para experimentos com adubação foliar (BRASIL, 2013). Neste estudo, foi considerado que a absorção ocorre no trifólio que recebeu a aplicação (3° trifólio) e confirmada quando houve transporte do nutriente do 3° para o 4° trifólio, por meio da quantificação do aumento na concentração de Mn no 4° trifólio, comparados ao teor de Mn das plantas do tratamento controle.

No estágio R1/R2 foi feita avaliação do teor de Mn nas folhas diagnósticas da soja, coletando o terceiro ou quarto trifólio totalmente expandido com pecíolo, considerando do ápice para a base da planta, em 10 diferentes plantas nas duas linhas centrais de cada parcela. As folhas foram lavadas como descrito anteriormente, para posterior determinação do teor de Mn. Aumento na concentração de Mn nas folhas coletadas neste estágio fenológico será considerado redistribuição do Mn na planta, quando comparado ao teor de Mn das folhas das plantas do tratamento controle.

Figura 3. Ilustração das fases fenológicas da soja no momento da aplicação foliar dos tratamentos (V4) e na coleta dos trifólios (V5) para análise do teor de Mn.

Para quantificar a biomassa da parte aérea, dez plantas foram coletadas nas duas linhas centrais de cada parcela no estádio R7.3 após a maturidade fisiológica (FEHR et al., 1971), antes da perda total de folhas em decorrência da senescência das plantas. Nestas plantas foram feitas as análises biométricas da soja, sendo avaliados os parâmetros: altura da planta, altura de inserção da 1ª vagem, diâmetro do colmo, nº de nós da haste principal, nº de hastes, nº de vagens e nº de grãos.

As plantas foram separadas em folhas, haste, vagens e grãos e secas por 72 horas a 65 °C para quantificar a biomassa seca, e determinar o teor de Mn nos diferentes compartimentos. O aumento no teor de Mn nestes compartimentos da planta foi identificado como redistribuição do Mn na soja, quando comparado ao teor de Mn nos mesmos compartimentos das plantas do tratamento controle. O rendimento de grãos foi obtido através da colheita mecânica da área central das unidades experimentais no estádio R8, aos 134 dias após a emergência (DAE) na safra 2015/2016 e aos 117 DAE na safra 2016/2017, considerando área útil de 40 m², estimando o peso de 1000 grãos e a produtividade em kg ha⁻¹ com umidade corrigida a 13%.

2.2.5. Determinação do teor de Mn

O material vegetal coletado foi moído em moinho tipo Wiley e posteriormente passado por peneira de aço inoxidável de malha 100 mesh (150 µm). Cada amostra foi analisada em triplicata usando um equipamento EDXRF, sob as condições de operação: colimador – 3 mm, em atmosfera de ar (sem vácuo), corrente de 155µA e tempo de irradiação de 200 s. Uma quantidade de 100 mg por amostra foi transferida para uma cubeta XRF de janela de 6,3 mm (nº 3577 - Spex Ind. Inc., EUA) vedada com filme de polipropileno de 5 µm de espessura (nº 3520 - Spex Ind. Inc., EUA) e suavemente pressionada com uma haste de vidro.

Para a curva de calibração, foram adicionados padrões conhecidos em uma amostra do tratamento controle, processada como descrito anteriormente. Foram adicionados 0; 40; 80; 120; 160 e 200 µL L⁻¹ de uma solução de concentração padrão de Mn 1000 µL L⁻¹ em um grama de amostra, homogeneizados e secos, passando as amostras dos pontos da curva através de uma peneira de 100 mesh (150 µm), obtendo seis pontos da curva dando origem a equação $y = 0,0194x + 0,09635$ de $R^2 = 0,987$. O coeficiente angular da equação obtida através da

curva de calibração foi utilizado para converter os valores de intensidade do equipamento em $\text{cps } \mu\text{A}^{-1}$ para a concentração de Mn nos tecidos vegetais em mg kg^{-1} .

Para verificar a porcentagem de recuperação do método, foram utilizadas duas amostras certificadas padrão NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia). O padrão de amostras de folhas de maçã (1515) que apresenta $54,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn e o padrão de amostras de folhas de pêssgo (1547) com $97,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn. A recuperação calculada para a amostra certificada de folhas de maçã foi de 98,16% e, para a amostra certificada de folhas de pêssgo, foi de 92,03%, demonstrando a eficácia do método em virtude da recuperação, de forma que os teores obtidos pela curva de calibração foram muito próximos aos teores das amostras certificadas.

2.2.6. Análise estatística

Os resultados foram analisados com auxílio do software estatístico R® (R CORE TEAM, 2017). A normalidade dos dados da análise de variância (ANOVA) verificada mediante teste Shapiro-Wilk. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de F ao nível de 5% de significância ($P < 0,05$), e quando significativo, os resultados foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), utilizando a análise de regressão para verificar o efeito das doses.

2.3. Resultados

2.3.1. Caracterização do MnCO_3

A análise DLS mostrou que as partículas apresentaram distribuição de tamanho média de 340,6 nm, variando entre 228,3 e 452,9 nm. Os valores de potencial Zeta para a suspensão em água foram de $-24,0 \pm 4,0 \text{ mV}$. Para valores do potencial Zeta superiores a 30 mV (ou inferiores a -30 mV), as partículas apresentam maior tendência a se repelir, o que proporciona estabilidade ao material. Dessa forma, o valor indicado pelo potencial zeta representa baixa tendência de aglomeração das partículas no produto. O formato e o tamanho das partículas podem ser observados nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 4).

Figura 4. Caracterização do $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ através das imagens obtidas pelo uso da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.3.2. Biometria e componentes da produção

A massa seca das plantas de soja coletadas em R7.3 não variou em função da aplicação das fontes de manganês, independente da dose. Na safra 2015/2016, o tratamento controle apresentou média de 24,94 gramas, considerando a massa seca das folhas das 10 plantas de soja coletas por parcela, enquanto que a média do fatorial foi de 25,96 gramas. Em relação a massa seca das hastes, a média do controle foi de 118,39 g, enquanto que a média do fatorial foi de 123,73 g (Tabela 3).

Os grãos e as vagens foram analisados separadamente. A média da massa seca das vagens no fatorial foi de 44,24 g não diferindo estatisticamente do controle, com uma média de 44,86 g. O mesmo comportamento foi observado na massa seca dos grãos, os valores das médias do fatorial e do controle foram similares entre si, e correspondem a 232,73 e 227,77 g respectivamente.

Na safra 2016/2017 a média da massa seca das folhas do fatorial foi de 75,21 g semelhante ao tratamento controle, que apresentou média de 75,75 g (Tabela 4). A massa seca das hastes também não variou em função da aplicação das fontes e doses de Mn. A média do fatorial foi de 77,03 g enquanto que o tratamento controle apresentou média de 76,22 g. Os valores da massa seca das vagens e dos grãos foram de 44,24 e 128,78 g na média do fatorial enquanto que o tratamento controle apresentou 44,86 e 128,38 g respectivamente.

As diferenças entre os valores nas duas safras ocorrem em virtude da utilização de cultivares distintas. Na safra 2015/2016 foi utilizada a cultivar de soja Pioneer 98Y30 RR® e

na safra 2016/2017 a cultivar Brasmax Flecha 6266 RSF IPRO® que possuem hábito de crescimento indeterminado e apresentam características produtivas distintas.

Nos parâmetros altura das plantas, diâmetro das hastes e altura de inserção da primeira vagem, não houve resposta significativa em relação a aplicação das fontes MnSO_4 e MnCO_3 independente das doses utilizadas para aplicação foliar no estágio V4 da cultura da soja, nas duas safras agrícolas (Tabela 5). A média da altura das plantas do controle na safra 2015/2016 foi de 80,27 cm e a média do fatorial foi de 81,46 cm. O diâmetro das hastes obteve valores médios de 8,33 mm no fatorial e 8,08 mm no tratamento controle. A inserção da primeira vagem estava localizada na média de 17,98 cm no tratamento controle e aos 18,81 cm de média no fatorial. Ou seja, as doses e fontes de Mn não promoveram alterações significativas nos parâmetros produtivos da soja nas duas safras.

Tabela 3. Massa seca (MS) da soja em diferentes compartimentos. Valores correspondem as 10 plantas de soja coletas por parcela no estágio fenológico R7.3 e separadas em folhas, hastes, vagens e grãos na safra 2015/2016 em Uberlândia-MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- MS das folhas (g) -----			----- MS das hastes (g) -----			----- MS das Vagens (g) -----			-----MS dos grãos (g) -----		
150	27,65	22,65	25,15	132,78	135,28	134,03	79,97	78,93	79,45	246,95	260,79	253,87
250	26,14	26,04	26,09	105,24	113,46	109,35	69,59	71,83	70,71	207,93	217,27	212,59
350	30,31	25,83	28,07	133,30	125,99	129,64	77,11	80,87	78,99	240,22	248,63	244,42
450	26,09	22,99	24,54	112,76	131,03	121,89	67,32	72,86	70,09	205,07	235,02	220,04
Média	27,54	24,37	25,96	121,02	126,44	123,73	73,49	76,12	74,81	225,04	240,43	232,73
Controle			24,94			118,39			72,12			227,77
<i>P Fonte</i>		0,15 ns			0,53 ns			0,50 ns			0,36 ns	
<i>P Dose</i>		0,67 ns			0,22 ns			0,19 ns			0,26 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,85 ns			0,76 ns			0,94 ns			0,96 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,75 ns			0,68 ns			0,65 ns			0,84 ns	
CV %		7,74			2,0			1,9			2,1	

ns: não significativo.

Tabela 4. Massa seca (MS) da soja em diferentes compartimentos. Valores correspondem as 10 plantas de soja coletas por parcela no estágio fenológico R7.3 e separadas em folhas, hastes, vagens e grãos na safra 2016/2017 em Uberlândia-MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- MS das folhas (g) -----			----- MS das hastes (g) -----			----- MS das Vagens (g) -----			-----MS dos grãos (g) -----		
150	75,79	74,12	74,95	77,07	73,38	75,22	46,06	42,99	44,52	134,75	123,19	128,97
250	70,44	80,34	75,39	72,41	81,81	77,11	40,45	45,99	43,22	120,71	131,51	126,11
350	72,44	75,56	74,00	75,29	77,18	76,23	43,42	44,15	43,78	126,87	129,73	128,30
450	75,06	78,01	76,53	76,45	82,73	79,59	44,64	46,24	45,44	127,09	136,45	131,77
Média	73,43	77,00	75,21	75,30	78,77	77,03	43,64	44,84	44,24	127,35	130,21	128,78
Controle			75,75			76,22			44,86			128,38
<i>P Fonte</i>		0,19 ns			0,15 ns			0,42 ns			0,43 ns	
<i>P Dose</i>		0,92 ns			0,60 ns			0,73 ns			0,73 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,06 ns			0,25 ns			0,25 ns			0,13 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,89 ns			0,81 ns			0,78 ns			0,94 ns	
CV %		3,25			2,6			5,1			1,35	

ns: não significativo.

Nos resultados obtidos na safra 2016/2017, a altura das plantas apresentou valores entre 85 e 89 cm, ficando a média do fatorial em 87,72 cm, não apresentando diferenças entre a média de 86,86 cm do controle. Os valores médios do diâmetro das hastes foram de 6 cm em todos os tratamentos. A altura de inserção da primeira vagem apresentou valores médios de 13 cm no fatorial e no tratamento controle (Tabela 6).

O número de hastes, número de nós na haste principal, número de vagens e número de grãos por planta não foram influenciados pela aplicação foliar das fontes de Mn. As plantas coletadas na safra 2015/2016 apresentaram média de 8 hastes por planta no fatorial e no tratamento controle. O número de nós na haste principal foi de 21,5 nós, não sendo alterado pelos tratamentos. O número médio de vagens por planta no fatorial foi de 76,9 enquanto que no tratamento controle foi de 73,42 vagens, não diferindo estatisticamente. O número médio de grãos por planta foi de 167,6 no tratamento controle e 176,3 na média do fatorial, embora a média do fatorial tenha obtido valores maiores que o controle, esta diferença não foi significativa (Tabela 7).

O número de hastes da cultivar Brasmax Flecha 6266 RSF IPRO® utilizada na safra 2016/2017 foi de 4 hastes por planta, enquanto que o número de nós na haste principal apresentou uma média de 14 nós, independente dos tratamentos. As médias do número de vagens por planta variaram entre 30,6 e 35,2 com média de 33,11 no fatorial e 34,73 no tratamento controle. O número de grãos por planta não foi afetado pela aplicação dos tratamentos. A média do fatorial foi de 84,21 grãos enquanto que a média do controle foi de 85,98 grãos (Tabela 8). Novamente é possível observar as diferenças nos componentes de produção avaliados entre as cultivares utilizadas nas diferentes safras agrícolas. Entretanto, independente do potencial produtivo, as cultivares não responderam a aplicação foliar das fontes de Mn no estágio V4.

Tabela 5. Altura das plantas (cm), diâmetro das hastes (mm), altura de inserção da primeira vagem (cm) e massa seca total (g) das plantas de soja coletadas no estádio R7.3 na safra 2015/2016 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Altura das plantas (cm) ----			--- Diâmetro das hastes (mm) ---			-- Altura da primeira vagem (cm) --			----- MS total (g) -----		
150	82,10	80,36	81,23	8,38	8,33	8,33	19,16	18,20	18,67	487,35	497,64	492,49
250	75,56	77,57	76,56	7,35	7,99	7,99	17,19	17,63	17,41	408,90	428,60	418,75
350	82,76	80,80	81,77	8,26	8,29	8,29	21,94	18,12	20,02	480,93	481,31	481,12
450	83,78	88,82	86,29	7,53	8,51	8,51	19,62	18,64	19,12	411,23	461,90	436,56
Média	81,05	81,88	81,46	7,88	8,28	8,33	19,47	18,14	18,81	447,10	467,36	457,23
Controle			80,27			8,08			17,98			443,21
<i>P Fonte</i>		0,74 ns			0,16 ns			0,13 ns			0,49 ns	
<i>P Dose</i>		0,08 ns			0,32 ns			0,21 ns			0,25 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,72 ns			0,52 ns			0,37 ns			0,93 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,75 ns			0,99 ns			0,52 ns			0,75 ns	
CV %		3,1			24,7			11,9			1,4	

ns: não significativo.

Tabela 6. Altura das plantas (cm), diâmetro das hastes (mm), altura de inserção da primeira vagem (cm) e massa seca total (g) das plantas de soja coletadas no estádio R7.3 na safra 2016/2017 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- Altura das plantas (cm) -----			--- Diâmetro das hastes (mm) ---			--- Altura da primeira vagem ---			----- MS total (g) -----		
150	85,19	87,11	86,15	6,24	6,29	6,26	13,37	13,19	13,27	333,67	313,68	323,67
250	87,76	88,21	87,98	6,29	6,47	6,38	13,07	13,06	13,06	304,00	339,65	321,82
350	86,85	88,90	87,87	6,27	6,27	6,27	12,68	12,54	12,61	318,01	326,62	322,31
450	88,09	89,68	88,88	6,58	6,57	6,57	13,84	13,00	13,41	323,24	343,43	333,33
Média	86,97	88,47	87,72	6,34	6,40	6,37	13,24	12,94	13,09	319,73	330,84	325,28
Controle			86,86			6,27			13,02			325,20
<i>P Fonte</i>		0,39 ns			0,68 ns			0,62 ns			0,24 ns	
<i>P Dose</i>		0,72 ns			0,34 ns			0,78 ns			0,79 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,98 ns			0,95 ns			0,95 ns			0,21 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,73 ns			0,58 ns			0,94 ns			0,99 ns	
CV %		2,8			35,1			18,7			1,8	

ns: não significativo.

Tabela 7. Componentes biométricos das plantas de soja coletadas no estágio R7.3 na safra 2015/2016 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- Número de hastes -----			----- Número de nós -----			----- Número de vagens -----			----- Número de grãos -----		
150	9,40	9,12	9,26	21,90	21,12	21,51	86,13	79,76	82,94	197,1	202,9	200,0
250	8,60	8,62	8,61	21,60	21,25	21,42	70,62	71,25	70,93	158,6	171,3	164,9
350	9,00	9,27	9,13	21,30	21,55	21,42	82,23	79,05	80,64	180,2	177,1	178,6
450	9,10	8,85	8,97	21,47	22,12	21,79	69,84	76,65	73,24	162,2	161,5	161,8
Média	9,02	8,96	8,99	21,56	21,51	21,54	77,20	76,67	76,94	174,5	178,2	176,3
Controle			8,27			21,52			73,42			167,6
<i>P Fonte</i>		0,86 ns			0,87 ns			0,89 ns			0,75 ns	
<i>P Dose</i>		0,50 ns			0,84 ns			0,13 ns			0,11 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,91 ns			0,47 ns			0,68 ns			0,96 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,14 ns			0,97 ns			0,56 ns			0,61 ns	
CV %		25,1			11,37			2,26			1,0	

ns: não significativo.

Tabela 8. Componentes biométricos das plantas de soja coletadas no estágio R7.3 na safra 2016/2017 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- Número de hastes -----			----- Número de nós -----			----- Número de vagens -----			----- Número de grãos -----		
150	4,45	4,03	4,24	14,63	14,68	14,65	35,25	32,20	33,72	89,73	80,70	85,21
250	4,08	4,41	4,24	14,28	14,74	14,51	30,63	31,70	31,16	76,95	86,79	81,87
350	4,40	4,23	4,31	14,68	14,73	14,70	34,33	33,75	34,04	83,85	81,15	82,50
450	4,20	4,37	4,28	14,68	14,90	14,79	32,63	34,44	33,53	83,28	92,06	87,67
Média	4,28	4,25	4,26	14,56	14,76	14,66	33,20	33,02	33,11	83,45	85,17	84,31
Controle			4,53			14,80			34,73			85,98
<i>P Fonte</i>		0,90 ns			0,25 ns			0,85 ns			0,54 ns	
<i>P Dose</i>		0,99 ns			0,70 ns			0,18 ns			0,46 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,06 ns			0,80 ns			0,34 ns			0,07 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,40 ns			0,59 ns			0,29 ns			0,69 ns	
CV %		6,1			15,2			6,7			2,9	

ns: não significativo.

2.3.3. Absorção e transporte de Mn - Teor de Mn no terceiro e quarto trifólio

Os teores de Mn no terceiro e quarto trifólios das plantas de soja aumentaram após a aplicação das fontes de Mn. Na safra 2015/2016 a média no tratamento controle foi de 16,16 mg kg⁻¹, enquanto que a média da aplicação de MnCO₃ foi de 35,98 mg kg⁻¹, não apresentando diferenças entre as doses (Tabela 9). O MnSO₄ se comportou de forma linear em função das doses de Mn, se ajustando a equação $y = 0,2759x + 17,68$ ($R^2 = 0,96$). Os teores de Mn nas folhas que receberam a aplicação da fonte solúvel MnSO₄ foram estatisticamente superiores aos teores das folhas que receberam a aplicação da fonte insolúvel MnCO₃ (Figura 5A).

O quarto trifólio da soja expandiu após a aplicação dos tratamentos. Ou seja, qualquer aumento no teor de Mn representaria transporte do Mn absorvido pelas folhas que receberam a pulverização até as folhas que não receberam a pulverização (quarto trifólio). Na safra 2015/2016 o tratamento controle apresentou média de 14,53 mg kg⁻¹, enquanto os teores de Mn nas folhas aumentaram de forma linear após a aplicação de MnSO₄ de acordo com a equação $y = 0,009x + 13,58$ ($R^2 = 0,99$). A aplicação de MnCO₃ também respondeu de forma linear em função da dose de Mn, com ajuste da equação $y = 0,028x + 11,77$ ($R^2 = 0,94$), entretanto com teores menores aos obtidos pela fonte MnSO₄ (Figura 5B).

Figura 5. Teor de Mn (mg kg⁻¹) nos trifólios que receberam (3^o trifólio, A) ou não (4^o trifólio, B) pulverização foliar de doses de Mn das fontes MnSO₄ e MnCO₃ na safra 2015/2016 em Uberlândia – MG.

Na safra 2016/2017, o teor de Mn do tratamento controle no terceiro trifólio foi de 24,45 mg kg⁻¹ (Tabela 10). Os teores das folhas que receberam aplicação do MnSO₄ aumentaram em função da dose de Mn, com ajuste da equação de segundo grau $y = -0,003x^2$

+ 0,264x + 1,41 ($R^2 = 0,89$). O teor de Mn no terceiro trifólio das plantas que receberam a aplicação de MnCO_3 se comportou de forma linear com ajuste da equação $y = 0,066x + 21,82$ ($R^2 = 0,95$) (Figura 6A). Os teores de Mn do quarto trifólio na safra 2016/2017 responderam as doses e foram superiores ao tratamento controle, entretanto não houve diferença para as fontes de Mn (Figura 6B).

Figura 6. Teor de Mn (mg kg^{-1}) nos trifólios que receberam (3^o trifólio, A) ou não (4^o trifólio, B) pulverização foliar de doses de Mn das fontes MnSO_4 e MnCO_3 na safra 2016/2017 em Uberlândia – MG.

Tabela 9. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (3°) e quarto (4°) trifólio coletado no estágio fenológico V5 e teor de Mn nas folhas diagnósticas coletadas no estágio R1/R2 na safra 2015/2016 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	MnSO ₄		MnCO ₃		Média
	-- Teor de Mn no 3º trifólio (mg kg ⁻¹) --					-- Teor de Mn no 4º trifólio (mg kg ⁻¹) --					- Teor de Mn na folha diagnóstica (mg kg ⁻¹) -				
150	61,81	cA	26,36	aB	44,08	28,75	dA	15,56	bB	22,15	26,83		28,18		27,50
250	80,02	cA	36,69	aB	58,35	38,66	cA	20,06	abB	29,36	23,87		25,40		24,63
350	119,3	bA	35,59	aB	77,43	47,36	bA	20,82	abB	34,09	27,71		24,97		26,34
450	140,7	aA	45,31	aB	93,00	59,04	aA	24,78	aB	41,91	26,34		27,86		27,10
Média	100,45		35,98		68,29	43,45		20,30		31,89	26,18		26,60		26,39
Controle					16,16					14,53					29,38
<i>P Fonte</i>			<0,001*						<0,001*						0,69 ns
<i>P Dose</i>			<0,001*						<0,001*						0,25 ns
<i>P Fonte* Dose</i>			<0,001*						<0,001*						0,41 ns
<i>P Controle* Fatorial</i>			<0,001*						<0,001*						0,07 ns
CV %			4,24						5,78						9,16

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Tabela 10. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (3°) e quarto (4°) trifólio coletado no estágio fenológico V5 e teor de Mn nas folhas diagnósticas coletadas no estágio R1/R2 na safra 2016/2017 em Uberlândia –MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	MnSO ₄		MnCO ₃		Média
	-- Teor de Mn no 3ºtrifólio (mg kg ⁻¹) --					-- Teor de Mn no 4ºtrifólio (mg kg ⁻¹) --					- Teor de Mn na folha diagnóstica (mg kg ⁻¹) -				
150	33,99	cA	31,67	cA	32,83	29,36		29,63		29,49	b	32,72		27,02	29,87
250	42,10	bcA	39,88	bcA	40,99	31,72		32,23		31,97	ab	31,34		34,26	32,80
350	52,86	aA	42,46	bB	47,66	34,87		30,79		32,83	ab	33,86		30,45	32,15
450	46,56	abA	52,94	aA	49,75	36,72		36,04		36,38	a	33,49		31,81	32,65
Média	43,87		41,73		42,80	a	33,16	A	32,17	A	32,66	a	32,85	30,88	31,86
Controle					24,45	b				27,10	b				31,12
<i>P Fonte</i>			0,22 ns						0,42 ns						0,13 ns
<i>P Dose</i>			<0,01*						<0,01*						0,35 ns
<i>P Fonte* Dose</i>			0,01*						0,54 ns						0,13 ns
<i>P Controle* Fatorial</i>			<0,01*						0,01*						0,69 ns
CV %			4,3						6,24						5,5

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem pelo teste de Tukey (5%).

2.3.1. Redistribuição do Mn absorvido pelas folhas – Teor de Mn nos diferentes compartimentos da planta

A folha diagnóstica da soja apresentou teores de Mn entre 23 e 29 mg kg⁻¹ na safra 2015/2016, com a média do fatorial igual a 26,39 mg kg⁻¹ e 29,38 mg kg⁻¹ no controle, não diferenciando-se estatisticamente. O mesmo comportamento foi observado na safra 2016/2017, o tratamento controle apresentou média de 31,12 mg kg⁻¹ de Mn na folha diagnóstica, enquanto a média do fatorial foi de 31,86 mg kg⁻¹ (Tabelas 9 e 10).

O teor de Mn nas folhas de soja coletadas em R7.3 obteve média de 22,51 mg kg⁻¹ no fatorial durante a safra 201/2016 não se diferenciando da média de 19,01 do controle (Tabela 11). Na safra 2016/2017 os teores foram de 27,83 mg kg⁻¹ para o fatorial e 26,57 mg kg⁻¹ para o tratamento controle. O teor de Mn nas folhas no final do ciclo da cultura não foi alterado pela aplicação foliar de Mn independente da fonte ou da dose (Tabela 12).

Na safra 2015/2016 o teor de Mn nas hastes de soja foi maior na dose de 350 g ha⁻¹ na aplicação de MnSO₄, com média de 32,84 mg kg⁻¹ comparada com a média de 19,25 mg kg⁻¹ da aplicação de MnCO₃ na mesma dose. Já na safra 2016/2017 não houve diferença significativa entre os tratamentos, a média do fatorial foi de 13,65 mg kg⁻¹ enquanto que a média do controle foi de 14,45 mg kg⁻¹.

A média de 15,82 mg kg⁻¹ no teor de Mn nas vagens de Mn do tratamento controle não diferiu da média de 17,02 mg kg⁻¹ do fatorial na safra 2015/2016. O mesmo comportamento foi observado na safra 2016/2017 onde as médias apresentaram valores de 16,61 e 16,88 mg kg⁻¹, respectivamente para o tratamento controle e para a média do fatorial.

Assim como nas hastes, a aplicação de 350 g ha⁻¹ de MnSO₄ aumentou o teor de Mn nos grãos de soja na safra 2015/2016 atingindo teor de 29,29 mg kg⁻¹. Enquanto que na mesma dose, o teor de Mn nos grãos em função da aplicação de MnCO₃ foi de 26,12 mg kg⁻¹. No entanto, o teor de Mn nos grãos avaliados na safra 2016/2017 não foi alterado após a aplicação foliar de Mn, independente da fonte. A média do fatorial foi de 27,69 mg kg⁻¹ comparada à média de 27,80 mg kg⁻¹ do controle. Em síntese, a redistribuição do Mn para os diferentes compartimentos da soja apresentou respostas distintas nas safras agrícolas avaliadas.

Tabela 11. Teor de Mn nas folhas, hastes, vagens e grãos de soja (mg kg⁻¹) coletados no estágio fenológico R7.3 na safra 2015/2016 em Uberlândia-MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média				
	--- Mn nas folhas (mg kg ⁻¹) ---			----- Mn nas hastes (mg kg ⁻¹) -----			--- Mn nas vagens (mg kg ⁻¹) ---			---- Mn nos grãos (mg kg ⁻¹) ----						
150	23,27	19,47	21,37	22,54	bA	20,12	bA	22,3	16,54	16,42	16,48	27,03	A	26,37	A	26,7
250	20,71	16,76	18,73	23,43	bA	21,17	abA	22,3	16,64	17,55	17,09	27,31	A	27,08	A	27,1
350	29,27	22,51	25,89	32,84	aA	19,25	bB	26,0	18,63	15,67	17,15	29,29	A	26,12	B	27,7
450	22,39	25,74	24,06	22,15	bA	26,32	aA	24,2	16,02	18,68	17,35	26,20	A	28,54	A	27,3
Média	23,91	21,12	22,51	25,24		22,22		23,47	16,95	17,08	17,02	27,45		27,02		27,2
Controle			19,01					19,5			15,82					25,7
<i>P Fonte</i>		0,15 ns				0,02*				0,91 ns				0,46 ns		
<i>P Dose</i>		0,07 ns				0,07 ns				0,96 ns				0,67 ns		
<i>P Fonte* Dose</i>		0,31 ns				<0,01*				0,42 ns				0,02*		
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,23 ns				0,01*				0,51 ns				0,09 ns		
CV %		6,39				10,6				13,24				9,05		

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Tabela 12. Teor de Mn nas folhas, hastes, vagens e grãos de soja (mg kg⁻¹) coletados no estágio fenológico R7.3 na safra 2016/2017 em Uberlândia-MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	--- Mn nas folhas (mg kg ⁻¹) ---			----- Mn nas hastes (mg kg ⁻¹) -----			--- Mn nas vagens (mg kg ⁻¹) ---			---- Mn nos grãos (mg kg ⁻¹) ----		
150	26,80	29,91	28,35	15,15	14,72	14,93	16,39	16,52	16,45	26,95	28,88	27,91
250	26,87	28,78	27,82	14,51	12,89	13,70	17,81	17,68	17,74	28,06	27,46	27,76
350	26,66	27,06	26,86	12,98	11,68	12,33	15,41	16,68	16,04	28,50	28,04	28,27
450	28,51	28,12	28,31	13,97	13,32	13,64	18,75	15,86	17,30	26,73	26,91	26,82
Média	27,23	28,46	27,83	14,15	13,15	13,65	17,09	16,68	16,88	27,56	27,82	27,69
Controle			26,57			14,45			16,61			27,80
<i>P Fonte</i>		0,34 ns				0,23 ns			0,63 ns			0,77 ns
<i>P Dose</i>		0,84 ns				0,20 ns			0,46 ns			0,71 ns
<i>P Fonte* Dose</i>		0,78 ns				0,95 ns			0,36 ns			0,76 ns
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,52 ns				0,52 ns			0,82 ns			0,93 ns
CV %		6,25				14,6			14,5			9,5

ns: não significativo.

2.3.2. Produtividade da soja

A aplicação foliar das fontes MnSO_4 e MnCO_3 no estágio V4 da soja não alterou a produtividade nas safras agrícolas avaliadas, independente das doses de Mn (Tabelas 13 e 14). Em ambas safras, a produtividade variou de 4.200 a 4.600 kg ha^{-1} , demonstrando o elevado potencial produtivo das áreas avaliadas.

O peso de 1000 grãos foi de 133,13 g no tratamento controle da safra 2015/2016 e a média do fatorial de 128,90 g. A média da produtividade no fatorial foi de 4317,38 kg ha^{-1} variando entre 4208,84 e 4431,58 kg ha^{-1} , não diferindo da média do controle que foi de 4407,68 kg ha^{-1} (Tabela 13). Esses valores representam produtividade de média de 72,0 e 73,5 sacas ha^{-1} , respectivamente.

Na safra 2016/2017 o peso de 1000 grãos apresentou valor médio de 209,59 g no tratamento controle e 212,89 g na média do fatorial, não diferindo entre si. A produtividade no fatorial variou entre 4402,81 e 4646,03 kg ha^{-1} , com valor médio de 4533,14 kg ha^{-1} . A média de produtividade no tratamento controle foi de 4603,67 kg ha^{-1} o que equivale a 76,7 sacas ha^{-1} (Tabela 14).

Tabela 13. Peso de 1000 grãos (g) e produtividade (kg ha^{-1}) obtidos na colheita da soja na safra 2015/2016 em Uberlândia - MG

Doses (g ha^{-1})	MnSO_4	MnCO_3	Média	MnSO_4	MnCO_3	Média
	---- Peso de 1000 grãos (g) ----			---- Produtividade (kg ha^{-1}) ----		
150	128,48	131,55	130,01	4312,97	4364,07	4338,52
250	131,35	125,98	128,66	4233,20	4208,84	4221,02
350	131,00	127,33	129,16	4360,68	4308,70	4334,69
450	127,30	128,23	127,76	4431,58	4319,04	4375,31
Média	129,53	128,27	128,90	4334,60	4300,16	4317,38
Controle			133,13			4407,68
<i>P Fonte</i>		0,42 ns			0,70 ns	
<i>P Dose</i>		0,77 ns			0,64 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,21 ns			0,93 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,08 ns			0,50 ns	
CV %		1,34			2,55	

ns: não significativo.

Tabela 14. Peso de 1000 grãos (g) e produtividade (kg ha⁻¹) obtidos na colheita da soja na safra 2016/2017 em Uberlândia - MG

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Peso de 1000 grãos (g) ----			---- Produtividade (kg ha ⁻¹) ----		
150	211,69	210,62	211,15	4646,03	4561,91	4603,97
250	211,18	219,37	215,27	4521,30	4565,68	4543,49
350	210,76	209,33	210,04	4469,40	4402,81	4436,10
450	213,42	216,80	215,11	4590,32	4507,68	4549,00
Média	211,76	214,03	212,89	4556,76	4509,51	4533,14
Controle			209,59			4603,67
<i>P Fonte</i>		0,30 ns			0,45 ns	
<i>P Dose</i>		0,23 ns			0,58 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,37 ns			0,94 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,31 ns			0,59 ns	
CV %		1,8			1,5	

ns: não significativo.

2.4. Discussão

Os parâmetros biométricos, componentes de produção e produtividade da soja não variaram em função da aplicação foliar de Mn no estágio V4 da cultura. A produtividade da soja nas safras agrícolas 2015/2016 e 2016/2017 apresentou médias maiores que 4200 kg ha⁻¹, superiores à produtividade média brasileira na última safra, que foi em torno dos 3390 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). O baixo teor de Mn no solo não foi limitante para o bom desempenho das cultivares avaliadas assim como as condições climáticas propiciaram um ambiente de produção adequado para o desenvolvimento da cultura e expressão do potencial produtivo das cultivares (Figura 2).

Nos trabalhos encontrados na literatura, os resultados de resposta da soja a aplicação foliar de Mn são divergentes. Oliveira Junior et al. (2000) não relataram diferenças em produção de grãos e matéria seca após aplicação de Mn via foliar, ao contrário do observado por Mann et al. (2001) que após aplicação de 450 e 600 g ha⁻¹ em diferentes estádios fenológicos da soja apresentaram os maiores resultados de produtividade, superando as aplicações via solo. O trabalho de Loecker et al. (2010) também apresentou aumento da produtividade da soja RR® após a aplicação foliar de Mn.

Em soja RR®, Correa e Durigan (2009) não encontraram resposta a aplicação de foliar de 126 g ha⁻¹ de Mn (fonte quelatizada), associado ao herbicida glyphosate, aplicados em V3 e V5, para as variáveis altura de plantas, matéria seca, massa de 100 grãos e produtividade. Resultados semelhantes foram obtidos em estudo realizado por Basso et al. (2011), no qual a aplicação do Mn (fonte solúvel) isolado ou em mistura do glyphosate, não

representou diferenças em produtividade, altura de plantas e altura de inserção das vagens, embora o teor foliar de Mn tenha aumentado significativamente.

A aplicação foliar de sulfato de Mn (quelatizado com EDTA) na dose de 332 g ha^{-1} nos estádios V4, V8 e R2, não alterou a massa de 100 grãos e a produtividade da soja, independente do estágio fenológico que recebeu a aplicação (STEFANELLO et al., 2011). Utilizando o mesmo produto, nas doses de 0,350; 0,700 e $1,050 \text{ kg ha}^{-1}$ aplicadas em V8 na soja, Fenner et al. (2012) obtiveram resultados que não foram significativos para as variáveis massa seca, altura de plantas, altura de inserção da primeira vagem, número de vagens, peso de 1000 grãos e produtividade, em comparação ao tratamento controle. A aplicação foliar de MnSO_4 promoveu incrementos na produtividade da soja em apenas um dos experimentos avaliados por Alt et al. (2018); nos demais experimentos não foi observado aumento da produtividade em decorrência da aplicação foliar de MnSO_4 .

Os autores justificam esses resultados em virtude do alto teor de Mn nos solos cultivados com soja na maioria dos solos brasileiros. Quando avaliados solos com teores alto e médio de Mn, a aplicação foliar de 350 g ha^{-1} das fontes cloreto, sulfato, carbonato, citrato e EDTA em V4 na soja não afetou a massa seca das hastes e vagens assim como não obteve efeito sobre a produtividade dos grãos de soja (SILVA, 2017). Portanto, a reserva de Mn do solo pode ser uma das razões para ausência de resposta significativa da soja em termos de produtividade nos estudos realizados no Brasil.

Por outro lado, no presente estudo os experimentos foram conduzidos em solos com baixo teor de Mn e, mesmo nessa situação, a aplicação foliar de Mn não alterou a produtividade e os componentes de produção da cultura da soja. De fato, mesmo nos solos avaliados no presente estudo, os teores de Mn nas folhas diagnósticas, que variaram de 24 a 29 mg kg^{-1} no experimento 1 e de 27 a 24 mg kg^{-1} no experimento 2, estiveram muito próximos da faixa de suficiência de 28 a 75 mg kg^{-1} definida por Kurihara (2008). Isso indica que solos com teor baixo de Mn ($< 1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ como preconizado por RAIJ; CANTARELLA, 1996) podem suprir quantidade suficiente de Mn para o desenvolvimento da soja, mesmo em lavouras de alto rendimento.

As diferenças entre as fontes e doses de Mn foram observadas nos teores de Mn dos 3º e 4º trifólios e nos teores das hastes e grãos. O teor de Mn nos trifólios avaliados aumentou em função da utilização das fontes de Mn em relação ao tratamento controle. Dessa forma é possível afirmar que o Mn proveniente da aplicação foliar das fontes MnSO_4 e MnCO_3 foi

absorvido e transportado pelas folhas da soja. Apesar de apresentar baixa mobilidade, sendo classificado como pouco móvel no floema (EPSTEIN, BLOOM, 2005), foi possível observar o aumento dos teores de Mn no 4º trifólio, que se desenvolveu após a aplicação dos fertilizantes.

Na safra 2015/2016 o teor de Mn no 3º trifólio das plantas que receberam aplicação de MnSO_4 apresentou valores até três vezes maiores do que os tratamentos que receberam MnCO_3 . Na dose 450 g ha^{-1} os teores de Mn para a fonte MnSO_4 foram de 140 mg kg^{-1} enquanto que na aplicação de MnCO_3 o teor obtido foi de $45,31 \text{ mg kg}^{-1}$. Esse comportamento se mantém, porém de forma mais atenuada, para os teores de Mn no 4º trifólio, o que demonstra transporte maior de Mn quando utilizada fonte solúvel de Mn em comparação à fonte insolúvel em água.

Silva (2017) também obteve teores maiores nos trifólios que foram tratados com MnSO_4 em comparação com aqueles que receberam a aplicação de MnCO_3 , em condições de casa de vegetação, entretanto essa diferença não permaneceu nos trifólios novos, desenvolvidos após a aplicação dos fertilizantes. Apesar do aumento nos teores de Mn após pulverização foliar, não foi observado efeito positivo na produtividade da soja em nenhum dos experimentos, como também já observado em outros estudos (STEFANELLO et al., 2011; BASSO et al., 2011).

A redistribuição do Mn para os demais compartimentos ocorreu na safra 2015/2016. A aplicação foliar de 350 g ha^{-1} de MnSO_4 resultou em teor de Mn de $32,84 \text{ mg kg}^{-1}$ nas hastes e $29,29 \text{ mg kg}^{-1}$ nos grãos, superiores aos teores da fonte MnCO_3 na mesma dose, que foram de $19,25 \text{ mg kg}^{-1}$ e $26,12 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente.

O aumento do teor de Mn nos grãos de soja pode representar um incremento na qualidade fisiológica das sementes produzidas pelas plantas que foram tratadas com MnSO_4 . Carvalho et al. (2014) obtiveram aumento na qualidade fisiológica das sementes de soja que receberam aplicação de Mn em R1 e R3 utilizando fonte solúvel em água. A germinação, a condutividade elétrica e o índice de velocidade de emergência das sementes de soja também aumentaram em função da aplicação foliar de Mn quelatizado, nos estádios V4, V8 e V10 (MANN et al., 2002).

Os teores de Mn nos diferentes compartimentos da soja, obtidos entre as safras 2015/2016 e 2016/2017, podem ser atribuídos ao uso de cultivares distintas entre as safras. A presença de variação na absorção de Mn por diferentes cultivares, provavelmente ocorre em

função das diferenças genótípicas quanto à absorção, transporte ou distribuição do Mn na planta (LAVRES JÚNIOR et al., 2008).

Este estudo evidenciou absorção e transporte de Mn aplicado nas formas de MnSO_4 e MnCO_3 na cultura da soja. Observou-se aumento no teor de Mn nas folhas que receberam aplicação foliar, assim como nas folhas que emergiram logo após a pulverização foliar. Entretanto, a efetividade da absorção e transporte para a fonte solúvel foi superior quando comparado à fonte insolúvel. A pulverização foliar realizada em V4 apresentou efeito efêmero nos teores de Mn nos demais compartimentos da planta, uma vez que não se observou aumento nos teores de Mn nas folhas diagnósticas coletadas no estágio fenológico R1/R2, nem tampouco houve efeito positivo da aplicação foliar na produtividade da soja em nenhum dos experimentos avaliados. Entretanto, a pulverização foliar com MnSO_4 proporcionou redistribuição de Mn nos tecidos da planta, o que não foi observado para a fonte MnCO_3 . Considerando o efeito de curta duração na nutrição da soja, a aplicação parcelada de Mn em solos com teores extremamente baixos de Mn são situações onde se espera obter ganhos de produtividade com a prática da pulverização foliar com Mn.

2.5. Conclusões

Houve absorção e transporte de Mn a partir da pulverização foliar de fonte solúvel (MnSO_4) e insolúvel (MnCO_3) de Mn no estágio fenológico V4. Entretanto, para uma mesma dose de Mn, o incremento no teor de Mn foi superior com o uso da fonte solúvel em relação à fonte insolúvel.

O efeito da pulverização foliar com Mn na nutrição da soja foi de curta duração. Apesar do aumento de teor observado nos trifólios que receberam a pulverização ou emergiram logo após a pulverização, não houve aumento no teor foliar no estágio fenológico R1/R2, nem tampouco nas folhas e vagens no momento da colheita. Entretanto, foi possível observar redistribuição do Mn aplicado na forma de MnSO_4 , através do aumento no teor de Mn nas hastes e nos grãos comparado ao MnCO_3 .

A pulverização foliar com Mn em estádios fenológicos iniciais permite aumentar o teor de Mn nos tecidos logo após a pulverização. Entretanto, não foram obtidos ganhos de produtividade a partir da aplicação foliar de Mn, mesmo em lavouras com elevado rendimento

e solo com teor baixo de Mn. Estudos futuros devem avaliar a aplicação parcelada de Mn como forma de obter efeitos positivos na produtividade da soja.

Referências

- ALT, D.; NG, S. J.; GRUSENMEYER, J.; LINDSEY, L. E. Seed Yield and Quality of Transgenic High-Oleic and Conventional Soybean as Influenced by Foliar Manganese Application. **Crop Science**, 2018.
- ANDRADE, G. J. M.; ROSOLEM, C. A. Absorção de manganês em soja RR sob efeito do glifosate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 961-968, 2011.
- BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; LAMEGO, F. P.; GIROTTO, E. Aplicação foliar de manganês em soja transgênica tolerante ao glyphosate. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 10, p. 1726-1731, 2011.
- BRASIL. Instrução normativa n. 53, de 23 de Outubro de 2013. Dispõe sobre os critérios de definição, classificação, análises laboratoriais de fertilizantes. **Diário Oficial**. Brasília, 24 out. 2013. Capítulo VII, p. 33-37.
- CAKMAK, I., YAZICI, A.; TUTUS, Y.; OZTURK, L. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 114-119, 2009.
- CARVALHO, E. R.; OLIVEIRA, J. A. ; CALDEIRA, C. M. Qualidade fisiológica de sementes de soja convencional e transgênica RR produzidas sob aplicação foliar de manganês. **Bragantia**, v. 73, n. 3, 2014.
- CASTRO, P. R. C. **Princípios da adubação foliar**. Jaboticabal: Funep, 2009. 42 p.
- CÉLERES. 20 anos da adoção da biotecnologia agrícola no Brasil: lições aprendidas e novos desafios. 53 p. Disponível em: <http://www.celeres.com.br/20-anos-da-adocao-da-biotecnologia-agricola-no-brasil-lico-es-aprendidas-e-novos-desafios/>. Acesso em: 22 de outubro de 2018.
- CONAB. Companhia Nacional de abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos Primeiro levantamento**, Outubro 2018. V6 Safra 2018/2019. Brasília: Conab, 2018. 129 p.
- CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. Glyphosate e adubação foliar com manganês na cultura da soja transgênica. **Planta daninha**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 721-727, 2009.
- DUKE, S. O., LYDON, J., KOSKINEN, W. C., MOORMAN, T. B., CHANEY, R. L., & HAMMERSCHMIDT, R. Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere

- microbiota, and plant disease in glyphosate-resistant crops. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 42, p. 10375-10397, 2012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2004. 42p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 5ª edição 2018. 356p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologia de produção de soja Paraná**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2004. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosojapR/fertilidade.html>.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.
- FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of plant nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.
- FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E.; GURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development description for soybean, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, v.11, n.6, p.929-931, 1971.
- FENNER, A.; FENNER, W.; OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C; DALLACORT, R.; BATISTTI, M.; PICCININ, G. G. Aplicação foliar de manganês em soja geneticamente modificada submetida a doses de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 3, p. 322-331, 2012.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015. 150 p.
- HUBER, D.M. Strategies to ameliorate glyphosate immobilization of manganese and its impact on the rhizosphere and disease. In: GLYPHOSATE POTASSIUM SYMPOSIUM, 2006, Columbus. **Proceedings...** DeWitt: Ohio State University, 2006. p. 51-63.
- KREMER, R. J.; MEANS, N. E. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 153-161, 2009.
- KURIHARA, C. H.; STAUT, L. A.; MAEDA, S. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e soja, definidas pelo uso do método DRIS de diagnose do estado nutricional. In: **Embrapa Florestas-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE

- PLANTAS, 2008, Londrina. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental: anais. Londrina: Embrapa Soja: IAPAR: Universidade Estadual de Londrina, 2008.
- LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 173-181, 2008.
- LI, P., DU, Y., HUANG, L., MITTER, N., XU, Z. P. Nanotechnology promotes the R&D of new-generation micronutrient foliar fertilizers. **RSC Advances**, v. 6, n. 73, p. 69465-69478, 2016.
- LOECKER, J. L.; NELSON, N. O.; GORDON, W. B.; MADDUX, L. D.; JANSSEN, K. A.; SCHAPAUGH, W. T. Manganese response in conventional and glyphosate resistant soybean. **Agronomy journal**, v. 102, n. 2, p. 606-611, 2010.
- MANN, E. N.; REZENDE, P. D.; CARVALHO, J. D.; CORRÊA, J. B. D. Efeito da adubação com manganês, via solo e foliar em diferentes épocas na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 2, p. 264-273, 2001.
- MANN, E. N.; RESENDE, P. M.; MANN, R. S.; CARVALHO, J. G.; VON PINHO, E. V. D. R. Efeito da aplicação de manganês no rendimento e na qualidade de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1757-1764, 2002.
- MINISTÉRIO DA CIENCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Nanotecnologia aplicada ao agronegócio**. E-book., 2018. 48 p. Acessado em 20 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/backend/galeria/arquivos/2018/04/16/NanotecnologiaNoAgronegocio.PDF>.
- MOCELLIN, R. S. P. **Princípios da adubação foliar**. Coletânea de dados e revisão bibliográfica. Canoas/RS: Omega Fertilizantes, 83p, 2004.
- MONREAL, C. M.; DEROSA, M.; MALLUBHOTLA, S. C.; BINDRABAN, P. S.; DIMKPA, C. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. **Biology and fertility of soils**, v. 52, n. 3, p. 423-437, 2016.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R. T. Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 95-101, 2003.

- OLIVEIRA JUNIOR, J. A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do triângulo mineiro. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v. 35, n. 8, p. 1629-1636, 2000.
- PEEL, Murray C.; FINLAYSON, Brian L.; MCMAHON, Thomas A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences discussions**, v. 4, n. 2, p. 439-473, 2007.
- PINTO, A. S. **Adubação com manganês em soja – efeitos no solo e na planta**. 2012. 58 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração: Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2012.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: instituto Agrônomo, 1996. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, APTA e IAC, 2001, 284 p.
- R CORE TEAM (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- REDDY, K.N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean nodules. **Weed Science**, Champaign, v. 51, p. 496-502, 2003.
- ROSOLEM, C. A.; ANDRADE, G. J. M. D.; LISBOA, I. P.; ZOCA, S. M. Manganese uptake and redistribution in soybean as affected by glyphosate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1915-1922, 2010.
- SERVIN, A.; ELMER, W.; MUKHERJEE, A.; DE LA TORRE-ROCHE, R.; HAMDI, H.; WHITE, J. C.; BINDRABAN, P.; DIMKPA, C. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 17, n. 2, p. 1-21, 2015.
- SILVA, A. G. B.; **Absorção e distribuição de Mn de fertilizantes foliares aplicados sem e com glifosato em soja Intacta RR2 PRO® e efeito na produtividade de grãos**. 2017. 90 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2^a ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.
- STEFANELLO, F. F.; MARCHETTI, M. E.; SILVA, E. F.; STEFANELLO, J.; DORETO, R. B.S.; NOVELINO, J. O. Efeito de glyphosate e manganês na nutrição e produtividade da soja transgênica. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, 2011.
- ZOBIOLE, L.H.S.; OLIVEIRA JR, R.S.; HUBER, D.M.; CONSTANTIN, J.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F.A.; OLIVEIRA JR, A. Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant and Soil**, The Hague, v. 328, p. 57-69, 2010.

3. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NA ABSORÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS PELA SOJA

RESUMO

Sintomas de deficiência de manganês (Mn) são recorrentes nas lavouras brasileiras de soja, sendo a pulverização foliar normalmente empregada para reverter os sintomas. Com a introdução da nanotecnologia, fertilizantes a base de óxidos e carbonatos estão se inserindo no mercado na forma de suspensão concentrada, apresentando maior concentração de Mn em comparação às fontes solúveis. Estudos prévios indicam que a pulverização foliar com Mn pode aumentar o teor de nutriente nas folhas, porém são raros os relatos de ganhos de produtividade. Foi testada a hipótese de que solos arenosos tem maior potencial de resposta à pulverização foliar com Mn do que solos argilosos em virtude da baixa reserva de nutriente. Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi compreender a resposta da soja cultivada em solos de textura arenosa e argilosa à aplicação foliar de fonte insolúvel (MnCO_3) ou solúvel (MnSO_4). Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, um em solo de textura arenosa e outro em solo de textura argilosa, em esquema fatorial $2 \times 4 + 2$ com delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram compostos por duas fontes de Mn (MnSO_4 e MnCO_3); quatro doses (150, 250, 350 e 450 g ha⁻¹ Mn) e dois tratamentos adicionais, um controle (sem aplicação de Mn) e um tratamento com somente os aditivos presentes na fonte insolúvel. As aplicações foram realizadas via foliar no estágio fenológico V4. No estágio fenológico V5 foram avaliados os teores de Mn no 3° e 4° trifólios totalmente expandidos e no estágio fenológico V7 foram avaliados os teores de Mn no 5° e 6° trifólios totalmente expandidos. A quantificação da massa seca, altura de planta, diâmetro da haste e teor de Mn nas folhas e nas hastes foram avaliados em R1. As plantas que receberam aplicação de MnSO_4 apresentaram teores de Mn superiores nos trifólios em comparação aos teores das plantas tratadas com MnCO_3 . Entretanto, independente da fonte a aplicação foliar de Mn não influenciou na produção de massa seca, altura e diâmetro das plantas em solo de textura arenosa ou argilosa. A textura do solo não influenciou a resposta da soja à aplicação foliar de Mn.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill; Solo arenoso; Solo argiloso

ABSTRACT

Symptoms of manganese (Mn) deficiency are recurrent in Brazilian soybean fields. To mitigate these symptoms, leaf sprays are widely recommended, using different sources of Mn. With the introduction of nanotechnology, fertilizers based on oxides and carbonates are available in the form of concentrated

suspension, which present higher concentration of Mn and lower unit cost in comparison to the soluble sources. In this context, the objective was to understand the response of soybean cultivated in sandy and clay soils to foliar application of the insoluble Mn source (MnCO_3) compared to the efficiency of a soluble Mn source (MnSO_4). Two experiments in sandy and clay soils were conducted in a greenhouse of Department of Soil Science (ESALQ/USP), in a $2 \times 4 + 2$ factorial scheme in a randomized complete block design, with three replications. The treatments were composed of two sources of Mn (MnSO_4 e MnCO_3); four rates (150, 250, 350 and 450 g ha^{-1}) and two additional treatments, one control (without application of Mn) and one treatment with only the additives present in the insoluble source. The applications were performed via foliar on V4 phenological stage. In V5 phenological stage, the Mn levels were evaluated in the 3rd and 4th fully expanded trifoliate leaflets, and in V7 phenological stage the Mn contents were evaluated in the 5th and 6th fully expanded trifoliate leaflets. Quantification of the dry mass, plant height, stem diameter and Mn levels in leaves and stems were performed in R1 phenological stage. Foliar application of Mn did not influence the dry mass, height and diameter of soybean grown in soils of sandy and clay texture. Soil texture did not influence the response of soybean to the foliar application of Mn. Plants that received MnSO_4 application had higher Mn levels in the trifoliate leaflets compared to the plants treated with MnCO_3 . However, regardless of the source, the foliar application of Mn did not influence the dry mass production, height and diameter of the plants in soil of sandy or clay texture. Soil texture did not influence the soybean response to Mn foliar application.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill; Sandy soil; Clay soil

3.1. Introdução

A produção agrícola depende, dentre outros fatores, da disponibilidade dos nutrientes de forma equilibrada no solo. Nos últimos anos, a utilização de micronutrientes na adubação de grandes culturas vem ganhando destaque na agricultura, isso ocorre principalmente em virtude do aumento da produtividade e consequentemente maior requerimento de nutrientes. Os teores de micronutrientes presentes no solo podem ser naturalmente insuficientes para manter a demanda das plantas, o que promove drástica redução na atividade fisiológica vegetal, impactando diretamente na produtividade das culturas (WHITE; BROWN, 2010; BELL; DELL, 2008).

Solos tropicais podem apresentar deficiências de micronutrientes no sistema solo-planta e as razões estão relacionadas a diversos fatores. Solos que são constituídos por partículas mais finas como a argila e que possuem teor de matéria orgânica mais alto

geralmente pode fornecer reserva maior de micronutrientes, enquanto solos de textura arenosa apresentam menores reservas, que tendem a se esgotar rapidamente (TUNDUP; AKBAR, 2014).

O uso de cultivares de alto potencial produtivo aumenta a exportação dos nutrientes, diminuindo os teores de micronutrientes nos solos, em virtude da demanda de fertilizantes pelas culturas em quantidades maiores que as fornecidas atualmente nos sistemas agrícolas (MOREIRA et al., 2018; TUNDUP; AKBAR, 2014). Em contrapartida, o uso em excesso de fertilizantes e a correção do solo (calagem) também afetam a absorção dos micronutrientes ocasionado pelo desequilíbrio iônico promovido na solução, relacionado ao aumento do pH e a presença dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2002).

A disponibilidade de micronutrientes para as plantas é dependente principalmente das faixas de pH encontradas em cada ambiente, com o aumento do pH ocorre a redução da disponibilidade dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn (MALAVOLTA, 2006). Além disso, o uso de calcário nos solos facilita a oxidação do Mn^{2+} , podendo ocorrer precipitação do elemento ou a formação de óxido de Mn, tornando-se indisponível para as plantas (HEINTICHS et al., 2008).

A disponibilidade do Mn no solo é controlada pelas condições que existem no sistema solo-planta e está relacionada a fatores como mineralogia do solo, textura, porosidade, pH, condições de oxirredução, teores de matéria orgânica, equilíbrio com outros cátions, excesso de água e baixa aeração e a presença de microrganismos do solo (MALAVOLTA, 2006; MENGEL; KIRKBY, 2001; REISENAUER, 1988). Dessa forma, solos tropicais; solos altamente lixiviados; ricos em matéria orgânica ou, os que apresentam valores altos de pH, são mais propícios ao surgimento de deficiência de Mn nas plantas cultivadas a campo (FAGERIA, 2002).

No solo, o Mn é proveniente dos óxidos, carbonatos, silicatos e sulfetos, sendo as formas mais comuns os óxidos e sulfetos de Mn que podem estar presentes em associação com o ferro. O Mn possui cinco estados de oxidação: II, III, IV, VI e VII, e por ser capaz de passar de uma forma para outra, apresenta um comportamento complexo no solo (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). As formas Mn(III) e Mn(IV) são encontradas principalmente na forma de óxidos de Mn. Alguns compostos fenólicos e ácidos orgânicos dos exsudados das raízes das plantas apresentam capacidade redutora, podendo reagir com os óxidos de Mn do solo e reduzi-los para a forma absorvível pelas plantas, o Mn^{2+} (POSTA; MARSCHNER;

RÖMHELD, 1994; JAUREGUI; REISENAUER, 1982). Condições alagadas favorecem o processo de redução e aumentam a disponibilidade de Mn no solo, que pode ser derivada de uma redução química ou biológica do Mn^{4+} para o Mn^{2+} (SALEH et al., 2013).

O movimento do Mn no solo determina a magnitude das suas perdas no perfil. As variações nas propriedades do solo desempenham um papel importante na distribuição do Mn nos compartimentos do solo. Partículas de silte e argila possuem maior afinidade de adsorção de Mn em suas áreas de superfície de retenção de nutrientes, dessa forma a lixiviação do Mn é maior em solos de textura arenosa (NARENDER; MALIK; SHIVAKUMAR, 2017). O manejo das culturas em sistema de plantio direto também influencia na disponibilidade dos nutrientes, por ser caracterizado pelo aumento da matéria orgânica do solo, o que promove a adsorção de cátions como o Mn (VENDRAME et al., 2007).

Uma das estratégias mais utilizadas para suprir as deficiências de Mn na soja é a aplicação foliar desse micronutriente, mitigando os efeitos provocados pela deficiência e corrigindo o balanço nutricional da cultura. A resposta da soja a aplicação foliar de Mn varia de acordo com a fonte utilizada e as necessidades são diferentes para cada cultura (SILVA, 2017; FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

Os sulfatos solúveis são as fontes preferidas para aplicação foliar, em função do seu baixo custo e facilidade no preparo. Com a introdução da nanotecnologia, fertilizantes a base de óxidos e carbonatos estão se inserindo no mercado, entre eles o carbonato é a fonte insolúvel de Mn mais comum. Os fertilizantes solúveis em alta concentração podem ocasionar fitotoxicidade as plantas, dessa forma são utilizadas baixas concentrações aplicadas via foliar o que aumenta o número de aplicações e o custo operacional. Em contrapartida, em virtude da sua baixa solubilidade os carbonatos podem ser utilizados em doses maiores em única aplicação, mantendo as atividades fisiológicas das plantas em um estado fracamente ativado (LI et al., 2016).

A hipótese deste estudo é que a soja cultivada em solo arenoso tem maior potencial de resposta à adubação foliar com Mn do que quando cultivada em solo argiloso, com maior reserva do nutriente. Além disso, também testamos a hipótese de que a resposta da soja à pulverização foliar é maior para fonte solúvel de Mn comparado à fonte insolúvel. O objetivo de estudo foi verificar a eficiência da aplicação foliar da fonte carbonato de Mn ($MnCO_3$) comparada a fonte sulfato de Mn ($MnSO_4$), em soja cultivada em solos de textura arenosa e argilosa, avaliando o efeito das fontes de Mn na absorção, transporte e redistribuição de Mn nos diferentes compartimentos da planta.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Instalação dos experimentos

Previamente, foi feita uma busca por solos com texturas diferentes que apresentassem teores de Mn menores que $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ extraído por DTPA, classificados como solos com baixo teor de Mn (RAIJ; CANTARELLA, 1996). O solo de textura argilosa foi coletado da camada 0-20 cm de uma área no município de Uberlândia – MG ($19^{\circ}14'39'' \text{ S}$, $47^{\circ}58'35'' \text{ O}$), pertencente ao grupo AGROELDORADO Agricultura e Pecuária LTDA, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2018). Em uma área localizada no município de São Pedro – SP ($22^{\circ}34'58'' \text{ S}$, $47^{\circ}53'34'' \text{ O}$), foi coletado o solo de textura arenosa, classificado como Neossolo quartzarênico órtico típico (EMBRAPA, 2018).

Após coletados, os solos foram secos ao ar e peneirados manualmente em peneira de malha 4 mm o que corresponde a 5 mesh. Amostras dos solos foram submetidas as análises físico-químicas (Tabela 1). A partir dos resultados obtidos a correção da acidez do solo foi calculada pelo método de saturação de bases, com o objetivo de elevar a saturação à 60%, valor recomendado para a cultura da soja. Foram utilizados os carbonatos de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3), em proporção adequada para estabelecer uma relação de Ca:Mg de aproximadamente 3:1 em cada solo. Os solos foram pesados (5 kg) em sacos plásticos transparentes, os carbonatos foram aplicados na terra contida nos sacos plásticos e homogeneizados manualmente; os sacos plásticos foram então colocados em vasos plásticos de 5 dm^3 . Os solos foram incubados durante 30 dias a um nível de umidade equivalente a 60% da capacidade máxima de retenção de água, determinada de acordo com a metodologia proposta por Mackean (1971).

O fornecimento dos nutrientes foi feito antes da semeadura. As quantidades utilizadas seguiram a recomendação de Malavolta (1980) e Novais et. al. (1991) para experimentos em vaso com terra, fornecendo os macronutrientes nas proporções de 200 mg dm^{-3} de P; na forma de superfosfato triplo moído e incorporado ao solo, 150 mg dm^{-3} de K e 30 mg dm^{-3} de N, na forma de cloreto de potássio e ureia, diluídos e aplicados por bloco ao solo.

Para os micronutrientes, foram fornecidos 4 mg dm^{-3} de Zn; $1,3 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu (ambos na forma de sulfatos); $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de B, através do uso de ácido bórico; $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$

de Co e Mo, fornecidos pelo uso de cloreto de cobalto e ácido molíbdico e; 2 mg dm⁻³ de Fe, complexado na forma EDTA. As mesmas quantidades foram aplicadas 30 dias após a emergência. A análise dos solos foi feita antes e depois da calagem e adubação do solo, seguindo a metodologia descrita em Raij et al. (2001).

Utilizando os solos coletados, dois experimentos foram conduzidos simultaneamente entre os meses de abril à julho de 2016 na casa de vegetação do departamento de Ciência do Solo (ESALQ/USP), equipada com controle de temperatura e fotoperíodo, programados para 30°C de temperatura máxima e 14 horas de exposição a luz, durante o período de condução da cultura, evitando o florescimento precoce da soja.

A cultivar Monsoy 6210 RR® foi previamente inoculada com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*. Foram semeadas 10 sementes por vaso, a uma profundidade aproximada de 15 mm. Após o surgimento das plantas foi feito o desbaste, mantendo 4 plantas por vaso. A umidade da terra nos vasos foi mantida por volta de 60 % da capacidade máxima de retenção de água, controlada diariamente com o auxílio de uma balança eletrônica, utilizando água deionizada.

Tabela 1. Caracterização das propriedades físico-químicas dos antes e após aplicação de calcário e fertilizantes

Solo	pH	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	M.O	B	Cu	Fe	Zn	Mn	Areia	Silte	Argila
	CaCl ₂	mg dm ⁻³											g dm ⁻³								
Antes da correção do solo																					
Argiloso	5,1	2	20	0,8	5	2	<1	22	6,8	28,8	24	0	7	0,22	0,4	11	0,2	0,3	150	52	798
Arenoso	4,7	4	19	<0,2	3	<1	2	13	3,2	16,2	20	4	4	0,09	<0,4	6	0,4	0,6	887	26	87
Após a correção do solo																					
Argiloso	5,3	80	41	6,9	11	4	<1	18	48,8	39,9	55	0	16	2	5,5	11	18,3	0,6	150	52	798
Arenoso	5,5	280	25	2,9	9	2	<1	9	21,9	22,9	61	0	4	0,6	5,1	14	16,1	1,1	887	26	87

Fósforo (P) quantificado por colorimetria, extraído por resina trocadora de íons; pH em CaCl₂; potássio (K) em espectrofotômetro de emissão atômica, extraído por resina trocadora de íons; Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) determinados em espectrofotômetro de absorção atômica, extraído por resina trocadora de íons; alumínio trocável (Al) por colorimetria, extraído com cloreto de potássio; acidez potencial (H+Al) pelo método SMP; enxofre (S-SO₄) por turbidimetria com fosfato de cálcio; Boro (B) extração com água quente e determinação por colorimetria; cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) extração com DTPA e determinação por espectrofotometria de absorção atômica; SB: soma de bases trocáveis; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação da CTC por bases; m: saturação por alumínio. Areia, silte e argila determinados por densímetro.

3.2.2. Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

Os experimentos foram instalados em blocos ao acaso com três repetições, arranjos em esquema fatorial $2 \times 4 + 2$, com 2 fontes de Mn (solúvel e insolúvel), quatro doses de Mn (150, 250, 350 e 450 g ha⁻¹) e dois tratamentos adicionais, um controle e um tratamento com somente os aditivos presentes na fonte insolúvel. As doses foram definidas com base na recomendação oficial de Mn de 350 g ha⁻¹ para a cultura da soja via aplicação foliar (EMBRAPA, 2004). O produto comercial utilizado como fonte solúvel foi o sulfato de manganês monohidratado (MnSO₄.H₂O) comercializado com 309 g de Mn por quilo e 18 % de enxofre. O carbonato de manganês (MnCO₃), comercializado como fertilizante na forma de suspensão concentrada (nome comercial YaraVita® Mantrac^{TM}Pro, da empresa Yara®), foi utilizado como fonte insolúvel de Mn e contém 500 g de Mn por litro, 3,8 % de N, polímeros e dispersantes, e densidade de 1,827 g dm⁻³.

Para avaliar um possível efeito positivo dos demais compostos presentes na fonte insolúvel, foi adicionado um tratamento que recebeu somente os aditivos do produto comercial a base de MnCO₃. Este produto (aditivos, sem a presença de MnCO₃) foi fornecido pela empresa que produz o produto comercial.

As fontes de Mn foram aplicadas no estágio fenológico V4 e a dose de Mn foi calculada de acordo com o número de plantas por vaso (4 plantas), considerando população de 250 mil plantas hectare⁻¹, utilizando um volume de aplicação de 20 mL por vaso. As aplicações foliares foram realizadas com auxílio de um pulverizador costal de CO₂ a pressão constante de 2,0 Kgf cm⁻². Os vasos foram cobertos com lona plástica para que os produtos não atingissem o solo, evitando assim a absorção radicular das fontes aplicadas via foliar.

3.2.3. Avaliações

Após a aplicação dos tratamentos, no estágio fenológico V5 em uma planta de cada vaso foram coletados os trifólios que receberam a aplicação (3° trifólio) e o primeiro totalmente expandido após a aplicação dos tratamentos (4° trifólio). Em outra planta, no estágio fenológico V7, foram coletados o segundo (5° trifólio) e terceiro (6° trifólio) trifólio expandidos (Figura 1). Para determinar o teor de Mn, as folhas foram lavadas com HCl (3%),

seguido de lavagem com água de torneira e água deionizada, como preconiza a legislação brasileira para experimentos com adubos foliares (BRASIL, 2013).

Figura 1. Ilustração das fases fenológicas da soja no momento da coleta dos trifólios para análise do teor de Mn.

A quantificação da biomassa seca em R1, foi feita nas demais plantas (2 plantas), separadas em folhas e haste, lavadas de acordo com o mesmo procedimento descrito para os trifólios. Neste estágio também foram feitas as medições de altura de planta e diâmetro da haste. A altura das plantas corresponde à medida entre o nível do solo até o último nó desenvolvido. O diâmetro da haste foi aferido com o uso de paquímetro digital a 1 cm do nível do solo no vaso. O material coletado foi seco por 72 horas à 65 °C, pesado para quantificar a biomassa seca, moído em moinho tipo Wiley e posteriormente passado por peneira de aço inoxidável de malha 100 mesh (150 µm).

Para determinar o teor de Mn nos tecidos vegetais cada amostra foi analisada em triplicata usando um equipamento EDXRF, sob as condições de operação: colimador – 3 mm, em atmosfera de ar (sem vácuo), corrente de 155µA e tempo de irradiação de 200 s, utilizando a mesma metodologia descrita no item 2.2.5.

3.2.4. Análise Estatística

O software estatístico R® (R CORE TEAM, 2017) foi utilizado para avaliar a normalidade dos dados pela análise de variância (ANOVA) verificada mediante teste Shapiro - Wilk. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de F ao nível de 5%

de significância ($P < 0,05$), e quando significativo, os resultados foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

3.3. Resultados

3.3.1. Absorção e redistribuição de Mn

O teor de Mn no terceiro trifólio das plantas de soja aumentou em função da fonte e dose de Mn. Nos dois solos, os teores de Mn no tratamento controle e no tratamento que recebeu a aplicação dos aditivos não apresentam diferenças estatísticas, em todos os trifólios avaliados.

No solo arenoso o teor de Mn no 3º trifólio do tratamento controle foi de 65,12 mg kg⁻¹, e de 66,75 mg kg⁻¹ no tratamento que recebeu a aplicação de aditivos. O solo argiloso apresentou teores de Mn menores, com média de 43,86 mg kg⁻¹ no controle e 39,11 mg kg⁻¹ no tratamento dos aditivos (Tabelas 2 e 3).

Na dose de 250 g ha⁻¹ o teor de Mn aplicado com MnSO₄ foi de 87,07 mg kg⁻¹, superior ao teor de 60,5 mg kg⁻¹ obtido na aplicação de MnCO₃. Nas demais doses as fontes não apresentaram diferenças estatísticas significativas. O maior teor de Mn dentro da fonte MnSO₄ foi de 105,62 mg kg⁻¹ na dose de 450 g ha⁻¹ (Figura 2A).

Tabela 2. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (3º) e quarto (4º) trifólio coletados no estádio fenológico V5, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média				
	---- Mn no 3º trifólio (mg kg ⁻¹) ----			---- Mn no 4º trifólio (mg kg ⁻¹) ----						
150	66,17	bA	72,88	bA	69,53	62,23	64,35	63,29	ab	
250	87,07	abA	60,50	bB	73,79	55,67	50,49	53,08	b	
350	93,77	aA	99,20	aA	96,49	68,66	73,00	70,83	ab	
450	105,62	aA	95,95	aA	100,79	89,01	64,47	76,74	a	
Média	88,16		82,13		85,15	a	68,89	63,08	65,99	a
Controle					65,12	b			55,63	a
Aditivos					66,75	b			56,11	a
<i>P Fonte</i>			0,12	ns				0,27	ns	
<i>P Dose</i>			0,01*					0,02*		
<i>P Fonte* Dose</i>			0,01*					0,22	ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>			0,001*					0,19	ns	
<i>P Aditivos*Fatorial</i>			0,03*					0,21	ns	
<i>P Controle*Aditivos</i>			0,85	ns				0,90	ns	
CV %			2,48					3,14		

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras minúsculas comparam as médias na mesma coluna e letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Figura 2. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (A) e quarto (B) trifólio coletados no estágio fenológico V5, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as médias entre as doses e letras maiúsculas comparam as fontes de Mn dentro cada dose. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

No solo argiloso, os teores de Mn das plantas que receberam aplicação de MnSO₄ foram maiores nas doses 150, 250 e 350 g ha⁻¹ e iguais na dose 450 g ha⁻¹ em comparação a fonte MnCO₃. O destaque é para a dose de 250 g ha⁻¹ com teor de 128,62 mg kg⁻¹ na fonte sulfato em comparação à média de 39,57 mg kg⁻¹ do carbonato (Figura 3A).

No 4º trifólio a média do fatorial não diferiu do tratamento controle, nos dois solos utilizados. Entretanto houve resposta dentro do fatorial para a dose utilizada no solo de textura arenosa. No solo de textura argilosa o teor de Mn no 4º trifólio apresentou diferenças para fonte e dose dentro dos tratamentos do fatorial (Tabelas 3 e 4).

Figura 3. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (A) e quarto (B) trifólio coletados no estágio fenológico V5, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. Letras minúsculas comparam as médias entre as doses e letras maiúsculas comparam as fontes de Mn dentro cada dose. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

No solo arenoso, as fontes aplicadas não apresentaram diferenças estatísticas para os teores de Mn no 4º trifólio. Considerando as doses, os menores teores foram obtidos na dose de 250 g ha⁻¹, as médias nas demais doses não foram diferentes (Figura 2B). Na mesma dose, no solo argiloso, o teor de Mn foi de 91,97 mg kg⁻¹ nos trifólios das plantas que receberam a aplicação de MnSO₄ superior ao teor de 31,41 mg kg⁻¹ daquelas que receberam a aplicação da fonte MnCO₃. Na fonte MnCO₃ não houve resposta para as diferentes doses utilizadas (Figura 3B).

Tabela 3. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no terceiro (3º) e quarto (4º) trifólio coletados no estádio fenológico V5, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	MnSO ₄		MnCO ₃		Média	
	Mn no 3º trifólio (mg kg ⁻¹) ----						---- Mn no 4º trifólio (mg kg ⁻¹) ----				
150	68,52	bA	53,11	abB	60,82	46,32	bA	46,06	aA	46,19	
250	128,62	aA	39,57	bB	84,10	91,97	aA	31,41	aB	61,69	
350	80,13	bA	54,19	abB	67,16	50,15	bA	45,36	aA	47,76	
450	71,41	bA	65,01	aA	68,21	52,35	bA	44,85	aA	48,60	
Média	87,17		52,97		70,07	a	60,20	41,92		51,06	a
Controle					43,86	b				43,09	a
Aditivos					39,11	b				44,83	a
<i>P Fonte</i>			0,01*					0,01*			
<i>P Dose</i>			0,001*					0,01*			
<i>P Fonte* Dose</i>			0,01*					0,01*			
<i>P Controle* Fatorial</i>			0,001*					0,12 ns			
<i>P Aditivos*Fatorial</i>			0,001*					0,22 ns			
<i>P Controle*Aditivos</i>			0,14 ns					0,87 ns			
CV %			3,19					3,48			

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras minúsculas comparam as médias na mesma coluna e letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Nos trifólios mais novos o aumento do teor de Mn, em função da aplicação foliar das diferentes fontes e doses no estádio V4, foi menos expressivo. No solo arenoso, o teor de Mn no 5º trifólio apresentou diferença significativa entre as fontes na dose de 450 g ha⁻¹. O MnSO₄ apresentou teor de 81,44 mg kg⁻¹, superior ao teor de 48,81 mg kg⁻¹ obtidos na aplicação de MnCO₃ (Tabela 4). No solo argiloso, o teor de Mn no 5º trifólio apresentou uma média no fatorial de 54,04 mg kg⁻¹ superior ao teor no controle e no tratamento com os aditivos, que foram de 36,13 e 40,79 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabela 5). Os teores de Mn avaliados no 6º trifólio das plantas de soja não foram afetados pela aplicação de Mn das diferentes doses e fontes. Nos dois solos, as médias dos teores de Mn no tratamento controle foram iguais as médias do fatorial e do tratamento que recebeu a aplicação dos aditivos.

Tabela 4. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no quinto (5º) e sexto (6º) trifólio coletados no estágio fenológico V7, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Mn no 5º trifólio (mg kg ⁻¹) ----			---- Mn no 6º trifólio (mg kg ⁻¹) ----		
150	62,54	A	71,97	A	67,26	54,89
250	46,64	A	64,69	A	55,66	40,58
350	61,94	A	66,36	A	64,15	54,38
450	81,44	A	48,81	B	65,13	66,33
Média	63,14		65,46		54,05	51,36
Controle			61,36			51,04
Aditivos			59,30			49,28
<i>P Fonte</i>		0,97 ns			0,55 ns	
<i>P Dose</i>		0,51 ns			0,26 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,03 *			0,07 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,84 ns			0,80 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,67 ns			0,08 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,79 ns			0,80 ns	
CV %		3,23			2,74	

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras minúsculas comparam as médias na mesma coluna e letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Tabela 5. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), no quinto (5º) e sexto (6º) trifólio coletados no estágio fenológico V7, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Mn no 5º trifólio (mg kg ⁻¹) ----			---- Mn no 6º trifólio (mg kg ⁻¹) ----		
150	54,45	52,91	53,68	49,32	37,02	43,17
250	51,43	56,81	54,12	42,51	42,30	42,41
350	50,54	50,47	50,51	45,60	42,01	43,81
450	63,10	52,59	57,85	45,50	41,96	43,73
Média	54,88	53,20	54,04	a	45,73	40,82
Controle			36,13	b		39,29
Aditivos			40,79	b		41,00
<i>P Fonte</i>		0,66 ns			0,06 ns	
<i>P Dose</i>		0,60 ns			0,97 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,51 ns			0,37 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,01 *			0,26 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,03 *			0,54 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,23 ns			0,59 ns	
CV %		5,27			5,22	

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras minúsculas comparam as médias na mesma coluna e letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

3.3.2. Teor de Mn nas folhas e hastes

O teor de Mn nas folhas das plantas tratadas com MnSO₄ foi maior do que o teor nas folhas que receberam a aplicação de MnCO₃, entretanto a média do fatorial não diferiu do teor de Mn nas folhas das plantas controle. Assim como nos trifólios, o teor de Mn nas folhas e hastes da soja no tratamento controle não diferiu do teor de Mn no tratamento que recebeu a aplicação dos aditivos da fonte insolúvel MnCO₃.

No solo arenoso, a aplicação de 450 g ha⁻¹ de MnSO₄ atingiu um teor de 76,16 mg kg⁻¹ nas folhas, enquanto o teor de Mn nas folhas das plantas que receberam a aplicação de MnCO₃ foi de 40,77 mg kg⁻¹. Já no solo argiloso a diferença foi apenas entre as fontes e não entre as doses, com resposta a aplicação do MnSO₄ em comparação ao MnCO₃, apresentando valores médios 61,75 e 55,42 mg kg⁻¹, respectivamente. Apesar dessas diferenças, a média do fatorial não se diferenciou da média do tratamento controle (Tabelas 6 e 7).

O teor de Mn nas hastes das plantas não foi influenciado pela aplicação foliar de MnSO₄ e MnCO₃ nas doses utilizadas. Nos dois solos os valores dos teores médios de Mn do fatorial foram iguais aos teores de Mn nas hastes das plantas do tratamento controle.

Tabela 6. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), nas folhas e hastes coletadas no estágio fenológico R1, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Mn nas folhas (mg kg ⁻¹) ----			---- Mn nas hastes (mg kg ⁻¹) ----		
150	55,50 abA	39,29 aB	47,40	25,44	26,81	26,13
250	38,61 bA	40,40 aA	39,51	25,84	21,06	23,45
350	51,06 bA	44,54 aA	47,80	28,61	26,21	27,41
450	76,16 aA	40,77 aB	58,47	24,26	22,40	23,33
Média	55,33	41,25	48,29	26,04	24,12	25,08
Controle			40,66			21,52
Aditivos			43,21			27,09
<i>P Fonte</i>		0,50 ns			0,51 ns	
<i>P Dose</i>		0,01*			0,69 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,02			0,90 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,19 ns			0,42 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,37 ns			0,64 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,55 ns			0,28 ns	
CV %		5,58			9,74	

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras minúsculas comparam as médias na mesma coluna e letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

Tabela 7. Teor de Mn nas folhas de soja (mg kg⁻¹), nas folhas e hastes coletadas no estágio fenológico R1, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	---- Mn nas folhas (mg kg ⁻¹) ----			---- Mn nas hastes (mg kg ⁻¹) ----		
150	66,52	51,14	58,83	36,77	33,65	35,21
250	57,01	51,56	54,29	31,19	33,11	32,15
350	60,92	54,40	57,66	31,41	36,69	34,05
450	62,54	64,56	63,55	39,53	34,97	37,25
Média	61,75 A	55,42 B	58,58	34,73	34,61	34,67
Controle			60,78			34,19
Aditivos			54,34			31,07
<i>P Fonte</i>		0,01*			0,94 ns	
<i>P Dose</i>		0,07 ns			0,21 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,08 ns			0,16 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,51 ns			0,84 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,18 ns			0,26 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,11 ns			0,64 ns	
CV %		2,98			5,12	

ns: não significativo. * Significativo pelo teste F (5%). Letras maiúsculas comparam as médias na mesma linha. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey (5%).

3.3.3. Massa seca, altura e diâmetro das plantas

As massas secas das hastes e folhas da soja não foram afetadas pela aplicação foliar de Mn independente da fonte ou dose utilizada nos dois solos avaliados. A média do tratamento controle não apresentou diferença estatística quando comparada à média do tratamento dos aditivos da fonte de MnCO_3 , nos solos de textura arenosa e argilosa.

No solo de textura arenosa a massa seca (MS) das hastes apresentou média de $15,79 \text{ g vaso}^{-1}$ no fatorial. A média do tratamento controle foi de $16,34 \text{ g vaso}^{-1}$ e $14,11 \text{ g vaso}^{-1}$ no tratamento com os aditivos. Os valores de massa seca das folhas foram de $21,93 \text{ g vaso}^{-1}$ de média do fatorial, $21,01 \text{ g vaso}^{-1}$ no controle e $18,73 \text{ g vaso}^{-1}$ no tratamento com somente os aditivos (Tabela 8).

No solo de textura argilosa a média da MS das hastes foi de $16,41 \text{ g vaso}^{-1}$ no fatorial, $16,32 \text{ g vaso}^{-1}$ no controle e $16,10 \text{ g vaso}^{-1}$ no tratamento com aditivos, valores muito próximos entre si. Para a MS das folhas os valores médios foram de $22,49 \text{ g vaso}^{-1}$ no fatorial, $22,0 \text{ g vaso}^{-1}$ no tratamento controle e $21,36 \text{ g vaso}^{-1}$ na aplicação dos aditivos (Tabela 9).

Com base nos resultados, a textura do solo não influenciou na resposta da soja em acréscimo de massa seca em função da aplicação foliar de Mn no estágio V4 da cultura, independente da fonte ou dose utilizada.

Tabela 8. Massa seca (MS) das hastes e das folhas (g vaso^{-1}) de soja coletadas no estágio R1, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha^{-1})	MnSO_4	MnCO_3	Média	MnSO_4	MnCO_3	Média
	----- MS das hastes (g vaso^{-1}) -----			----- MS das folhas (g vaso^{-1}) -----		
150	14,14	15,99	15,07	19,39	21,72	20,56
250	16,02	15,93	15,98	22,32	22,73	22,53
350	16,89	15,96	16,43	23,77	22,05	22,91
450	15,77	15,65	15,71	22,50	20,95	21,73
Média	15,71	15,88	15,79	22,00	21,86	21,93
Controle			16,34			21,01
Aditivos			14,11			18,73
<i>P Fonte</i>		0,63 ns			0,86 ns	
<i>P Dose</i>		0,11 ns			0,18 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,10 ns			0,24 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,34 ns			0,43 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,06 ns			0,07 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,06 ns			0,39 ns	
CV %		11,11			10,46	

ns: não significativo.

Tabela 9. Massa seca (MS) das hastes e das folhas (g vaso⁻¹) de soja coletadas no estágio R1, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- MS das hastes (g vaso ⁻¹) -----			----- MS das folhas (g vaso ⁻¹) -----		
150	15,84	14,00	14,92	21,67	18,49	20,08
250	17,09	18,15	17,62	23,39	25,60	24,50
350	17,76	16,43	17,10	24,35	21,65	23,00
450	15,69	16,28	15,99	21,77	22,99	22,38
Média	16,60	16,22	16,41	22,80	22,18	22,49
Controle			16,32			22,00
Aditivos			16,10			21,36
<i>P Fonte</i>		0,73 ns			0,74 ns	
<i>P Dose</i>		0,34 ns			0,42 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,74 ns			0,65 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,95 ns			0,86 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,85 ns			0,68 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,85 ns			0,70 ns	
CV %		14,95			8,97	

ns: não significativo.

A altura e o diâmetro das hastes das plantas de soja, cultivadas em solos de textura diferentes, não variaram em função da aplicação foliar das fontes solúvel e insolúvel de Mn. A altura da soja cultivada no solo arenoso apresentou uma média de 83,42 cm, variando de 82,37 a 91,83 cm, não diferindo dos tratamentos controle e aditivos, que obtiveram as médias de 83,42 e 85,87 cm. O diâmetro das hastes apresentou um valor médio de 4,96 mm no fatorial. A média do controle foi de 4,97 mm e o 4,87 mm na média dos aditivos (Tabela 10).

Tabela 10. Altura (cm) e diâmetro (mm) das plantas de soja coletadas no estágio R1, conduzidas em solo de textura arenosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- Altura (cm) -----			----- Diâmetro (mm) -----		
150	82,37	84,17	83,27	4,67	4,93	4,80
250	84,83	91,83	88,33	4,94	4,89	4,91
350	91,38	87,25	89,32	5,26	5,25	5,25
450	86,25	86,05	86,15	4,84	4,94	4,90
Média	86,21	87,33	86,77	4,92	5,00	4,96
Controle			83,42			4,97
Aditivos			85,87			4,87
<i>P Fonte</i>		0,59 ns			0,65 ns	
<i>P Dose</i>		0,21 ns			0,24 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,32 ns			0,90 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,29 ns			0,99 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,78 ns			0,69 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,35 ns			0,55 ns	
CV %		2,32			45,03	

ns: não significativo.

As plantas cultivadas em solo argiloso apresentaram altura média de 72,68 cm no fatorial, muito próxima dos 71,47 cm de altura que as plantas controle atingiram e dos 72,08 cm de altura no tratamento com aditivos, sendo considerados estatisticamente iguais. O diâmetro variou entre 5,19 e 6,20 mm no fatorial, de média 5,76 mm. No controle as plantas apresentaram um diâmetro de 6,27 mm e no tratamento com a aplicação dos aditivos o diâmetro foi de 5,82 mm (Tabela 11).

Tabela 11. Altura (cm) e diâmetro (mm) das plantas de soja coletadas no estágio R1, conduzidas em solo de textura argilosa em casa de vegetação. ESALQ, Piracicaba, SP

Doses (g ha ⁻¹)	MnSO ₄	MnCO ₃	Média	MnSO ₄	MnCO ₃	Média
	----- Altura (cm) -----			----- Diâmetro (mm) -----		
150	73,58	67,67	70,63	5,84	5,19	5,52
250	72,08	79,17	75,63	5,61	6,20	5,91
350	74,00	76,75	75,38	6,05	5,60	5,83
450	66,88	71,33	69,11	5,69	5,89	5,79
Média	71,64	73,73	72,68	5,80	5,72	5,76
Controle			71,47			6,27
Aditivos			72,08			5,82
<i>P Fonte</i>		0,46 ns			0,79 ns	
<i>P Dose</i>		0,28 ns			0,81 ns	
<i>P Fonte* Dose</i>		0,41 ns			0,46 ns	
<i>P Controle* Fatorial</i>		0,77 ns			0,27 ns	
<i>P Aditivos* Fatorial</i>		0,88 ns			0,88 ns	
<i>P Controle* Aditivos</i>		0,93 ns			0,32 s	
CV %		3,38			45,45	

ns: não significativo.

3.4. Discussão

O uso isolado de aditivos, que são polímeros e dispersantes, não diferiu dos resultados do tratamento controle nas variáveis avaliadas, sendo utilizados apenas para melhorar o espalhamento e a aderência do nutriente mineral sobre a superfície da folha (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

A produção de massa seca de folhas e hastes das plantas de soja não foi influenciada pela aplicação foliar das fontes MnSO₄ e MnCO₃ independente da dose. A textura dos solos não influenciou na produção de MS das folhas e hastes, as diferenças entre os solos ficaram em torno de 1 g vaso⁻¹. A aplicação foliar de Mn utilizando as fontes MnSO₄ e MnCO₃ também não alterou a altura e diâmetro das plantas, assim como a textura do solo não influenciou nessa resposta das plantas de soja a aplicação foliar de Mn no estágio V4 da cultura, independente da fonte ou dose utilizada. As diferenças de altura, diâmetro e massa

seca entre as plantas cultivadas nos diferentes solos ocorrem em virtude das diferenças entre suas propriedades físico-químicas (SANTOS et al., 2008).

O fornecimento de Mn via foliar nas plantas de soja não alterou a massa seca das plantas e conseqüentemente não foram observadas diferenças na produtividade da soja (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2000), mesmos resultados foram observados na aplicação de Mn associada ao herbicida glyphosate, não apresentando diferenças entre a massa seca das plantas (CORREA; DURIGAN, 2009). Ganhos de produtividade foram observados após aplicação foliar de Mn o que também influenciou nas características agrônômicas da soja (LOECKER et al., 2010; MANN et al., 2001), entretanto não foram avaliadas as diferenças de massa seca das plantas.

Em relação à altura de plantas, a aplicação foliar de Mn proveniente de uma fonte solúvel com ou sem glyphosate também não influenciou na altura das plantas, altura de inserção de vagens e também não houveram ganhos em produtividade (BASSO et al., 2011). Resultados semelhantes aos obtidos por Fenner et al. (2012), após testar diferentes doses de Mn aplicadas no estágio V8 de desenvolvimento da soja, não observou diferenças entre a altura de plantas e altura de inserção da primeira vagem, massa seca, peso de 1000 grãos e produtividade, em virtude da comparação do tratamento controle, sem aplicação.

O teor de Mn no 3º trifólio, que corresponde ao último trifólio totalmente expandido das plantas de soja em estágio V4, foi influenciado significativamente pelas fontes e doses de Mn em aplicação foliar. Por ser o trifólio que recebeu os tratamentos, o aumento do teor de Mn pode estar relacionado a absorção do nutriente pelas plantas ou a deposição dos produtos no limbo foliar. O uso de MnSO_4 apresentou teores maiores em comparação a fonte MnCO_3 , as diferenças entre as fontes de Mn foram maiores no solo de textura argilosa. No 4º trifólio os teores de Mn foram superiores nas plantas que receberam aplicação de MnSO_4 comparado aos teores das plantas aplicadas com MnCO_3 . A distinção entre as fontes foi observada no solo de textura argilosa. No solo arenoso a maior dose aplicada de MnSO_4 450 g ha⁻¹ apresentou os maiores teores de Mn nos 3º e 4º trifólios enquanto que no solo argiloso a dose de 250 g ha⁻¹ atingiu os maiores teores após aplicação de MnSO_4 .

Resultados do uso de fontes solúveis para pulverização foliar de Mn na cultura da soja apresentam aumento no teor de Mn nas folhas após a aplicação, entretanto esse aumento do teor de Mn nas folhas não promoveu incrementos de produtividade (STEFANELLO et al., 2011; BASSO et al., 2011). Ganhos em produtividade e aumento do teor de Mn após aplicação foliar nos estádios V4, V8 e V10 de desenvolvimento da soja apresentaram

correlação positiva no trabalho conduzido por Mann et al. (2001), mostrando que a aplicação em estádios fenológicos mais avançados e em situações aonde o Mn é limitante a aplicação foliar pode auxiliar no aumento da produtividade.

O transporte do Mn apresentou diferenças entre as fontes no solo de textura arenosa, pela avaliação do teor de Mn no 5º trifólio. O Mn proveniente do MnSO_4 foi transportado em maiores quantidades para a parte nova das plantas em comparação ao MnCO_3 . As doses utilizadas não foram suficientes para alterar o teor de Mn no 6º trifólio das plantas de soja. Em condições de casa de vegetação, nos trabalhos desenvolvidos por Silva (2017) os trifólios que foram tratados com MnSO_4 apresentaram teores de Mn maiores que aqueles que receberam a aplicação de MnCO_3 , entretanto essa diferença também não permaneceu nos trifólios novos, desenvolvidos após a aplicação dos fertilizantes. Isso ocorre em virtude da translocação limitada do Mn pelo floema (MARSCHNER, 2012; MALAVOLTA, 2006).

O teor de Mn nas folhas das plantas tratadas com MnSO_4 foi maior do que o teor nas folhas que receberam a aplicação de MnCO_3 , nas diferentes texturas de solo avaliadas. No solo de textura arenosa, o Mn atingiu teores mais elevados nas folhas de soja tratadas com MnSO_4 em comparação aos teores encontrados no solo de textura argilosa, apresentando maiores diferenças na comparação com a fonte MnCO_3 , principalmente na dose de 450 g ha^{-1} . Comportamento esperado em função do aumento do teor de Mn nos trifólios avaliados. Este aumento do teor de Mn nas folhas foi observado em diferentes trabalhos que receberam aplicação foliar de Mn (SILVA, 2017; STEFANELLO et al., 2011; BASSO et al., 2011, MANN et al., 2001). Esse efeito pode estar relacionado a dose de Mn aplicada, Correa e Durigan (2009) observaram que a aplicação de uma fonte solúvel de Mn em doses até 126 g ha^{-1} nos estádios V3 e V5 não alterou os teores de Mn das folhas de soja.

Nas hastes, a aplicação foliar de Mn não alterou os teores de Mn, independente da fonte ou dose utilizadas. Nos dois solos os valores dos teores médios de Mn do fatorial foram iguais aos teores de Mn nas hastes das plantas do tratamento controle. Esse resultado pode ser atribuído a baixa mobilidade do Mn no floema e a fatores genéticos da cultivar utilizada por causa das diferenças genótípicas relacionadas a distribuição do Mn na planta (MARSCHNER, 2012; LAVRES JÚNIOR et al., 2008).

3.1. Conclusões

Os teores de Mn nos trifólios da soja aumentaram com a aplicação foliar de MnSO_4 e MnCO_3 independente da textura do solo. A textura do solo não influenciou a resposta da soja a aplicação foliar de Mn. As plantas que receberam aplicação de MnSO_4 apresentaram teores de Mn superiores nos trifólios em comparação aos teores das plantas tratadas com MnCO_3 .

Houve aumento no teor de Mn dos trifólios que expandiram após a pulverização foliar, indicando que há absorção e redistribuição de Mn a partir da aplicação foliar no estágio fenológico V4 tanto no solo arenoso quanto no solo argiloso. Entretanto, a aplicação foliar das fontes MnSO_4 e MnCO_3 no estágio fenológico V4 da soja em doses até 450 g ha^{-1} não influenciou a produção de massa seca, altura e diâmetro das plantas cultivadas em solos de textura arenosa e argilosa.

Referências

- BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; LAMEGO, F. P.; GIROTTO, E. Aplicação foliar de manganês em soja transgênica tolerante ao glyphosate. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 10, p. 1726-1731, 2011.
- BRASIL. Instrução normativa n. 53, de 23 de Outubro de 2013. Dispõe sobre os critérios de definição, classificação, análises laboratoriais de fertilizantes. **Diário Oficial**. Brasília, 24 out. 2013. Capítulo VII, p. 33-37.
- BELL, R. W.; DELL, B. **Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production**. International Fertilizer Industry Association (IFA), 2008.
- CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. Glyphosate e adubação foliar com manganês na cultura da soja transgênica. **Planta daninha**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 721-727, 2009.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, L. H. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S., ed. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p 328-352.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2004. 42p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 5ª edição 2018. 356p.

- FAGERIA, N. K. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1765-1772, 2002.
- FENNER, A.; FENNER, W.; OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C.; DALLACORT, R.; BATISTTI, M.; PICCININ, G. G. Aplicação foliar de manganês em soja geneticamente modificada submetida a doses de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 3, p. 322-331, 2012.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015. 150 p.
- HEINRICHS, R.; MALAVOLTA, E.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M.; CABRAL, C. P.; RUSCHEL, J. Calagem e extratores químicos de manganês e zinco em Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico cultivados com soja. **Científica**, v. 34, n. 1, p. 66-74, 2008.
- JAUREGUI, M. A.; REISENAUER, H. M. Dissolution of Oxides of Manganese and Iron by Root Exudate Components 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 2, p. 314-317, 1982.
- LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 173-181, 2008.
- LI, P., DU, Y., HUANG, L., MITTER, N., XU, Z. P. Nanotechnology promotes the R&D of new-generation micronutrient foliar fertilizers. **RSC Advances**, v. 6, n. 73, p. 69465-69478, 2016.
- LOECKER, J. L.; NELSON, N. O.; GORDON, W. B.; MADDUX, L. D.; JANSSEN, K. A.; SCHAPAUGH, W. T. Manganese response in conventional and glyphosate resistant soybean. **Agronomy journal**, v. 102, n. 2, p. 606-611, 2010.
- MACKEAN, D. G. **experimental work in biology: 3 soil**. London, John Murray, 1971. 30 p.
- NARENDER; MALIK, R. S.; SHIVAKUMAR, L. Kinetic release behavior of DTPA-extractable manganese in soils of different cropping systems and total manganese content associated with soil texture. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 87, n. 5, p. 603-606, 2017.

- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.
- MANN, E. N.; REZENDE, P. D.; CARVALHO, J. D.; CORRÊA, J. B. D. Efeito da adubação com manganês, via solo e foliar em diferentes épocas na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 2, p. 264-273, 2001.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. 2004. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.
- MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; AQUINO, G. S. Iron and manganese effect on soil chemical properties, yield components, and nutritional status of soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.49, n. 15, p. 1844-1854, 2018.
- NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J.; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J.D.; LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA; SEA, 1991. p. 189-253.
- OLIVEIRA JUNIOR, J. A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do triângulo mineiro. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v. 35, n. 8, p. 1629-1636, 2000.
- POSTA, K.; MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V. Manganese reduction in the rhizosphere of mycorrhizal and nonmycorrhizal maize. **Mycorrhiza**, v. 5, n. 2, p. 119-124, 1994.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: instituto Agrônômico, 1996. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, APTA e IAC, 2001, 284 p.
- R CORE TEAM (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- REISENAUER, H. M. Determination of plant-available soil manganese. In: **Manganese in soils and plants**. Springer, Dordrecht, 1988. p. 87-98.
- SALEH, J.; NAJAFI, N.; OUSTAN, S.; ALIASGHARZAD, N.; GHASSEMI-GOLEZANI, K. Changes in extractable Si, Fe, and Mn as affected by silicon, salinity, and waterlogging

- in a sandy loam soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 10, p. 1588-1598, 2013.
- SANTOS, F. C. D.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. N.; FOLONI, J. M.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. D.; KER, J. C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, 2008.
- SILVA, A. G. B.; **Absorção e distribuição de Mn de fertilizantes foliares aplicados sem e com glifosato em soja Intacta RR2 PRO® e efeito na produtividade de grãos**. 2017. 90 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- STEFANELLO, F. F.; MARCHETTI, M. E.; SILVA, E. F.; STEFANELLO, J.; DORETO, R. B.S.; NOVELINO, J. O. Efeito de glyphosate e manganês na nutrição e produtividade da soja transgênica. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, 2011.
- TUNDUP, P.; AKBAR, A. Distribution of micronutrient cations (Zn, Cu, Mn, Fe) and their relationship with soil properties of saffron growing soils of district Kishtwar in J&K. **Asian Journal of Soil Science**, v. 9, n. 1, p. 59-62, 2014.
- VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Availability of copper, iron, manganese and zinc in soils under pastures in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007.
- WHITE, P.J.; BROWN, P.H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of botany**, Oxford, v. 105, n. 7, p. 1073–1080, 2010.

4. ABSORÇÃO E METABOLISMO DE FONTES INSOLÚVEIS DE MANGANÊS PELA SOJA

RESUMO

Historicamente, fontes solúveis de nutrientes são utilizadas para pulverização foliar, entretanto fontes insolúveis também estão sendo empregadas na atualidade, mesmo com desconhecimento sobre seus mecanismos de absorção. O objetivo foi verificar a eficiência da aplicação foliar de fontes insolúveis de carbonato de manganês (MnCO_3) comparado à fonte solúvel sulfato de Mn (MnSO_4). Dois experimentos foram desenvolvidos em câmara de crescimento em solução nutritiva. Os tratamentos foram compostos por duas fontes insolúveis de MnCO_3 (MnCO_3 -nano, 80-100 nm e MnCO_3 -SC, suspensão concentrada) e uma fonte solúvel na forma de MnSO_4 , comparados a um controle positivo (Mn-Adequado) e um controle negativo (Mn-Baixo). No primeiro experimento, o primeiro trifólio totalmente expandido foi imerso nos tratamentos por 10 segundos duas vezes por dia, durante 4 dias. No segundo experimento, as aplicações foliares foram realizadas no estádio V5 pulverizando os tratamentos em toda a parte aérea das plantas. Foram avaliados a massa seca, os teores e o conteúdo de Mn nos trifólios aplicados; trifólios totalmente expandidos após a aplicação (EAP); parte aérea recém-desenvolvida (RD) e; raízes (Primeiro experimento) e os teores e o conteúdo de Mn na parte aérea nova (PAN), parte aérea velha (PAV) e; raízes (segundo experimento). No segundo experimento também foram avaliados índice SPAD; clorofila total; atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e guaiacol peroxidase (GPOX) e o conteúdo de carboidratos solúveis. A massa seca da parte aérea e das raízes não foram alteradas pela imersão do trifólio nos tratamentos (Primeiro experimento). Entretanto, no segundo experimento a pulverização foliar de MnSO_4 aumentou a massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja comparado aos tratamentos Mn-baixo, MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, representando recuperação do crescimento da soja após ocorrência da deficiência de Mn. O teor e o conteúdo de Mn variaram de acordo com o compartimento analisado e em função da imersão ou pulverização foliar com as fontes de Mn. As folhas de soja foram capazes de absorver e transportar o Mn das fontes MnSO_4 , MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC. O MnSO_4 foi absorvido e transportado em maiores quantidades pelas plantas de soja, sua aplicação atenuou os sintomas visuais de deficiência de Mn. No segundo experimento a aplicação foliar de MnSO_4 promoveu aumento na concentração de clorofila e carboidratos solúveis e reduziu a atividade da enzima guaiacol peroxidase. O metabolismo da soja não foi influenciado pela aplicação foliar de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, demonstrando limitada eficácia de fontes insolúveis de Mn aplicadas via foliar no metabolismo e nutrição das plantas de soja.

Palavras-chave: Carboidratos; Clorofila; SOD; GPOX

ABSTRACT

Historically, soluble sources of nutrients are used for foliar application. However, insoluble sources are also being used despite the lack of information about the mechanisms of absorption and metabolism of these sources. The objective was to evaluate the efficiency of the foliar application of insoluble sources of manganese (Mn) - (MnCO_3) compared to the soluble source Mn (MnSO_4). Two experiments were carried out in a growth chamber in nutrient solution. The treatments were composed of two insoluble sources of MnCO_3 (MnCO_3 -nano, 80-100 nm and MnCO_3 -SC, concentrated suspension) and a soluble source in form of MnSO_4 , compared to a positive control (Mn-adequate) and a negative control (Mn-low). In the first experiment, the first fully expanded trifoliate leaflet was immersed in the treatments for 10 seconds twice a day for 4 days. In the second experiment, the foliar applications were carried out in the V5 phenological stage, spraying the treatments in all shoot part of the plants. The dry mass, levels and contents of Mn were evaluated in the trifoliate leaflet that receive the application; trifoliate leaflets fully expanded after application; new developed shoot part and; roots (1st experiment) and the levels and contents of Mn in the new shoot part, old shoot parts and; roots (2nd experiment). In the 2nd experiment, were also evaluated the SPAD index; total chlorophyll; enzyme activity superoxide dismutase (SOD) and guaiacol peroxidase (GPOX) and soluble carbohydrate content. The dry mass of the aerial parts and the roots were not altered by the immersion of the trifoliate in the treatments (1st experiment). However, in the 2nd experiment, the MnSO_4 foliar application increased the dry mass of the shoots and roots of soybean plants compared with the treatments Mn-low, MnCO_3 - nano and MnCO_3 -SC, representing recovery of the soybean growth after the occurrence of deficiency of Mn. The levels and content of Mn in soybean varied according to the compartment analyzed and depending on the immersion or foliar spraying with the Mn sources. The soybean leaves were able to absorb and transport the Mn of the MnSO_4 , MnCO_3 -nano and MnCO_3 -SC sources. MnSO_4 was more absorbed and transported by soybean plants, what attenuated the visual symptoms of Mn deficiency. In the second experiment, the foliar application of MnSO_4 promoted an increase in the of chlorophyll and soluble carbohydrates concentrations and reduced the activity of the enzyme guaiacol peroxidase. Soybean metabolism was not influenced by the foliar application of MnCO_3 -nano and MnCO_3 -SC, demonstrating limited efficacy of insoluble sources of Mn applied via foliar in the metabolism and nutrition of soybean plants.

Keywords: Carbohydrates; Chlorophyll; SOD; GPOX

4.1. Introdução

Um dos principais papéis do manganês (Mn) nas plantas é sua participação na hidrólise da água. O Mn é um dos componentes do cluster Mn_4Ca do fotossistema II, que

acumula quatro cargas positivas, o que promove a oxidação de duas moléculas de água (MILLALEO et al., 2010; SCHMIDT; JENSEN; HUSTED, 2016; YANO; YACHANDRA, 2014). O Mn também está envolvido na síntese de ATP, em reações que envolvem a carboxilase da Rubisco, biossíntese de clorofila, ácidos graxos, lipídios, proteínas, aminoácidos aromáticos, lignina e flavonoides (MILLALEO et al., 2010). Atua como cofator na atividade de aproximadamente 35 enzimas nas plantas como a Mn-superóxido dismutase (MnSOD), Mn-Catalase, Piruvato carboxilase e fosfoenolpiruvato carboxilase (MILLALEO et al., 2010, MARSCHNER, 2012; BURNELL, 1988). Em condições de deficiência, a produção de massa seca, a fotossíntese, o conteúdo de clorofila e o conteúdo de carboidratos reduzem rapidamente (SHENKER et al., 2004; MARSCHNER, 2012; JHANJI; SADANA; SHUKLA, 2017).

A aplicação foliar é recomendada para suprir as deficiências dos nutrientes que estão envolvidos com a clorofila e/ou processos fotossintéticos como Mn, Mg e Fe, evitando os problemas em relação a dinâmica desses nutrientes no solo e a necessidade do transporte a longa distância das raízes até a parte aérea, pois acredita-se que os nutrientes devem ser aplicados nas partes das plantas onde eles apresentam uma maior relevância fisiológica (BINDRABAN et al., 2015). Entretanto, diversos fatores influenciam a eficiência da aplicação foliar de Mn. A resposta das culturas a aplicação foliar de Mn varia de acordo com a fonte e a dose de Mn utilizada, a frequência e o tempo das aplicações além das condições ambientais durante a aplicação. As necessidades são diferentes para cultura, podendo variar entre as cultivares, provavelmente por causa das diferenças genotípicas quanto à absorção, transporte ou distribuição do Mn na planta (LAVRES JÚNIOR et al., 2008; FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

A absorção das nanopartículas é específica da planta e pode resultar em efeitos negativos, positivos ou apresentar nenhum efeito nas plantas. O fornecimento de nutrientes na forma de nanopartículas para as plantas pode afetar o crescimento, a fisiologia e o desenvolvimento das plantas, mas depende das propriedades físico-químicas das nanopartículas como tamanho, estrutura cristalina, carga superficial, composição, concentração e modo de aplicação, o que influencia na sua capacidade de translocação e acúmulo nas plantas (PACHECO; BUZEA, 2018; ACHARI; KOWSHIK, 2018).

A absorção, a redistribuição e o acúmulo das nanopartículas provenientes dos fertilizantes dependem das espécie, idade e ambiente de desenvolvimento das plantas.

Acredita-se que os nanofertilizantes são capazes de liberar os nutrientes em resposta a fatores ambientais ou as demandas biológicas, entretanto a absorção, a translocação e o aproveitamento pelas plantas são em grande parte ainda desconhecidos (DEY; DAS; MAWLONG, 2018).

Em estudos realizados com amendoim (*Arachis hypogaea*), Prasad et al. (2012) expuseram as sementes a uma concentração de 1000 mg L^{-1} de ZnO (nanoparticulado), observando aumento na germinação, clorofila e crescimento do caule e da raiz, em relação aos resultados obtidos nas plantas expostas a ZnSO_4 . Em relação a aplicação foliar de ZnO, a produção de vagens de amendoim apresentou aumento de 29,5% comparado à aplicação foliar de ZnSO_4 . Nas plântulas de grão de bico (*Cicer arietinum* L var. HC-1) a aplicação foliar de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ZnO aumentou a biomassa em relação a aplicação de ZnSO_4 . Entretanto, a aplicação de 10 mg L^{-1} ZnO afetou negativamente a biomassa radicular (BURMAN et al., 2013), possivelmente devido à toxidez causada na planta.

Plântulas de feijão moyashi (*Vigna radiata*) apresentaram melhores resultados na aplicação de nanopartículas de Mn (Mn-NPs) em comparação ao MnSO_4 . A aplicação de Mn-NPs apresentou incrementos no crescimento, comprimento da raiz e parte aérea, número de radículas e biomassa além de aumentar a fotossíntese (PRADHAN et al., 2013). Em cevada (*Hordeum vulgare* L.) nanopartículas de MnFe_2O_4 foram absorvidas pelas raízes das plântulas e translocadas para a parte aérea. Também foram observados aumento na germinação crescimento e massa seca das plântulas, comparados ao controle (TOMBULOGLU et al., 2018). Os efeitos da aplicação foliar de nanopartículas de Mn, Mo e Ni ainda não foram investigados (ACHARI; KOWSHIK, 2018). Para suprir as deficiências as fontes MnSO_4 e os quelatos de Mn são as fontes de Mn mais utilizadas em formulações de fertilizantes utilizados na aplicação foliar (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

Para compreender a absorção foliar e o metabolismo do Mn proveniente de fontes solúveis e insolúveis. O objetivo foi verificar a eficiência da aplicação foliar de duas fontes insolúveis de carbonato de manganês (MnCO_3), com diferentes tamanhos de partículas, e de uma fonte solúvel sulfato de Mn (MnSO_4), avaliando o potencial destas fontes em reverter os sintomas de deficiência de Mn; a participação no metabolismo das plantas e; os efeitos da aplicação foliar na absorção, transporte e redistribuição de Mn nos diferentes compartimentos da planta. A hipótese foi que a absorção e metabolismo de fontes solúveis são mais eficazes do que fontes insolúveis de Mn.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Instalação dos experimentos

Dois experimentos foram desenvolvidos na Universidade Sabanci, localizada em Istambul-Turquia, durante os meses de fevereiro a julho de 2018. Plantas de soja foram conduzidas em câmara de crescimento sob condições climáticas controladas de luz, em regime de 16 horas de claro e 8 horas de escuro, a uma densidade de fluxo fotossintético de $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; temperatura entre 18 e 22 °C e 60 a 70% de umidade relativa.

As sementes de soja da cultivar Nova (May Company®-Turquia) foram germinadas em perlita umedecida com água na presença de CaSO_4 durante 7 dias, até as plântulas atingirem um tamanho adequado para o transplante. Após selecionadas, 10 plântulas foram transferidas para vasos plásticos pretos de 2,7 L, contendo solução nutritiva aerada e renovada a cada 3-4 dias, na seguinte composição: 2 mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0,2 mM de KH_2PO_4 ; 0,7 mM de K_2SO_4 ; 0,10 mM de KCl; 0,5 mM de MgSO_4 ; 1 μM de ZnSO_4 ; 0,2 μM de CuSO_4 ; 10 μM de H_3BO_3 ; 0,14 μM de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$; 50 μM de Fe-EDTA e 10 μM de FeSO_4 . As plantas foram conduzidas em baixo fornecimento de Mn equivalente a 0,1 μM de MnSO_4 , exceto o controle positivo (Mn-adequado), que recebeu 1 μM de MnSO_4 . Para a aclimação na solução, as plântulas receberam 1/3 da concentração dos macronutrientes durante os primeiros dias de instalação do experimento, e concentração padrão de micronutrientes. O desbaste das plantas foi realizado 4 dias após o transplante, mantendo 4 plantas por vaso.

4.2.2. Aplicação dos tratamentos

Para compreender a absorção foliar e o transporte do Mn proveniente de fontes solúveis e insolúveis, os experimentos foram arranjados em delineamentos inteiramente casualizados. Os tratamentos foram compostos por duas fontes insolúveis de carbonato de manganês (MnCO_3) e uma fonte solúvel na forma de sulfato ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Merck), comparadas com os controles (positivo e negativo).

O controle positivo (Mn-Adequado) corresponde ao tratamento em que as plantas de soja foram cultivadas com o suprimento adequado de Mn na solução nutritiva (1 μM de MnSO_4). Já as plantas do controle negativo (Mn-Baixo) foram cultivadas com baixo suprimento de Mn (0,1 μM de MnSO_4).

Para compor uma das fontes insolúveis, o MnCO_3 na forma de pó e tamanho de partícula entre 80-100 nm (MnCO_3 -nano) foi adquirido da empresa Nanoshel Intelligent Materials®, de peso molecular $114,95 \text{ g mol}^{-1}$ e pureza de 99,99 %. A segunda fonte insolúvel de MnCO_3 é comercializada como fertilizante na forma de suspensão concentrada (MnCO_3 -SC), contém 500 g L^{-1} de Mn, 3,8 % de N, polímeros e dispersantes, e densidade de $1,827 \text{ g dm}^{-3}$ (nome comercial YaraVita® Mantrac™Pro, da empresa Yara®).

As soluções para aplicação foliar foram preparadas com água ultrapura. As suspensões dos tratamentos MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC foram sonificadas por 45 min em banho ultrassônico operando a 120 W e 35 kHz (Bandelin Sonorex™ Super, RK 100, Sigma-Aldrich) com água e gelo para evitar o aquecimento da suspensão. Antes de cada aplicação, as suspensões foram sonificadas novamente por 15 min em água com gelo, para diminuir os problemas de aglomeração das partículas.

No primeiro experimento, a aplicação foliar dos tratamentos foi realizada no estádio fenológico V2 da soja. O primeiro trifólio totalmente expandido foi imerso nos tratamentos por 10 segundos duas vezes por dia (início da manhã e no final da tarde) durante 4 dias, com o auxílio de um becker de 250 mL. A quantidade de Mn utilizada por fonte foi calculada com base na solução de 0,05 % de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, que corresponde a $0,163 \text{ g L}^{-1}$ de Mn, considerando o teor de Mn de cada fonte (Figura 1).

No segundo experimento, as plantas de soja foram conduzidas até o aparecimento de sintomas visíveis de deficiência de Mn nas folhas, cerca de 3 semanas após a instalação do experimento (V4-V5). As aplicações foliares de Mn foram então realizadas no estádio V5, pulverizando os tratamentos em toda a parte aérea com intervalos de dois dias entre as duas aplicações, utilizando um volume de aplicação de 25 mL por vaso. As soluções e as suspensões foram preparadas para uma concentração de 0,15 % de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, ajustadas para aplicar a mesma quantidade de $0,488 \text{ g L}^{-1}$ de Mn nas fontes de MnCO_3 nano e MnCO_3 -SC.

Figura 1. Ilustração da aplicação foliar dos tratamentos por imersão do primeiro trifólio (Primeiro experimento) em V2 e por pulverização foliar (Segundo experimento) em V5 na soja.

Durante a aplicação dos tratamentos dos dois experimentos, as superfícies dos vasos foram cobertas adequadamente usando papéis toalha para evitar qualquer contaminação da solução nutritiva pelas aplicações foliares de Mn.

4.2.3. Caracterização do tamanho das partículas nas suspensões de MnCO_3

Para medir o tamanho das partículas, as suspensões de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC foram sonificadas novamente por 15 min em banho ultrassônico operando a 120 W e 35 kHz (Bandelin Sonorex^{TM} Super, RK 100, Sigma-Aldrich) antes da leitura no equipamento Zetasizer (Nano ZS, Malvern Instruments, UK), que utiliza a técnica de espalhamento de luz dinâmico (DLS). O equipamento foi calibrado para operar com água como dispersante; viscosidade de 0,8872 cP; constante de dispersão elétrica de 78,5; índice de refração de 1,33 e tempo de análise de 12 segundos. As análises foram efetuadas no Laboratório de Análises e Caracterização de Materiais (MCL, FENS-Sabanci University).

4.2.4. Avaliações

No primeiro experimento, foram realizadas duas colheitas. A primeira colheita foi realizada no estágio V4 da soja, 4 dias após a última imersão, em 5 repetições. No estágio V5 foi feita a segunda colheita, 8 dias após a última imersão, em 4 repetições. As plantas foram separadas nos diferentes compartimentos: Trifólios que receberam a aplicação; Trifólios

totalmente expandidos após a aplicação (EAP); Parte aérea recém-desenvolvida (RD); Parte aérea restante e; Raízes.

A colheita do segundo experimento ocorreu 10 dias após a última aplicação, no estágio fenológico V8, em 4 repetições. As plantas foram separadas em: Parte aérea nova (PAN), desenvolvida após a aplicação dos tratamentos; Parte aérea velha (PAV), que recebeu aplicação foliar e; Raízes. Todas as amostras coletadas foram lavadas com água deionizada, secas por 72 horas à 65 °C e pesadas para quantificação da biomassa seca por compartimento e posteriormente moídas para análise nutricional.

Amostras frescas da parte aérea nova do segundo experimento foram coletadas para a determinação do teor de clorofila, concentração de proteínas e atividade das enzimas antioxidativas. As amostras foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas em freezer -80° C até o momento das análises.

4.2.5. Análise dos nutrientes

Os micronutrientes Mn, Zn, Cu, Fe, B e Mo e os macronutrientes P, K, Ca, Mg e S foram determinados através da técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES; Vista-Pro Axial; Varian Pty Ltd, Mulgrave, Austrália). Para a análise, 0,3 gramas de material finamente moído foram digeridos em microondas (MarsExpress; CEM Corp., Matthews, NC, USA) com 2 mL de H₂O₂ 30 % e 5 mL de HNO₃ 65%. Depois do processo de digestão, o volume de cada amostra foi completado até 20 mL com água ultrapura. Os resultados foram verificados usando materiais de referência padrão do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST, Gaithersburg, MD, USA). O conteúdo foi obtido através da multiplicação da concentração de cada nutriente pela massa seca de cada compartimento.

4.2.6. Índice SPAD e clorofila total

O teor relativo de clorofila nas folhas foi estimado por meio de leituras utilizando o medidor de clorofila minolta (SPAD-502, Soil Analysis Development), no primeiro e no segundo trifólio totalmente expandido após a aplicação dos tratamentos no segundo experimento.

O conteúdo total de clorofila foi avaliado de acordo com a metodologia descrita por Witham et. al. (1971). A extração foi feita em tubos falcon de 50 mL, utilizando 20 mL de acetona 80 % e 0,5 g das amostras armazenadas em freezer -80 °C, centrifugadas a 5000 rpm durante 5 min. O sobrenadante foi coletado e o volume completado com acetona 80 % para 50 mL. As leituras foram feitas nos comprimentos de onda de 645 e 663 nm para realização do cálculo do conteúdo total de clorofila na parte aérea nova das plantas, utilizando a acetona 80 % como branco. Os resultados foram expressos em mg g⁻¹ de massa fresca.

4.2.7. Concentração de proteínas e atividade das enzimas antioxidativas

A extração do material foi realizada utilizando 0,5 g das amostras das folhas armazenadas em freezer -80 °C, maceradas em nitrogênio líquido e homogeneizadas em 5 mL do tampão fosfato de potássio 50 mM. O extrator foi preparado através da mistura de 50 mM de KH₂PO₄ e 50 mM de K₂HPO₄ ajustando o pH a 7,6. Para a homogeneização do extrator, foram adicionados 0,1 mM de EDTA Triplex-III. Após a extração, as amostras foram centrifugadas a 15.000 rpm e 4 °C por 30 min, o sobrenadante foi coletado e utilizado nas determinações da concentração de proteínas e atividade enzimática das enzimas superóxido dismutase (SOD) e guaiacol peroxidase (GPOX).

A concentração de proteínas nas folhas foi determinada através da metodologia descrita por Bradford (1976), na qual 20 µL do extrato são homogeneizados em 1 mL do reagente de Bradford. Para a determinação, utilizou-se a curva padrão de soro de albumina bovina (BSA) em concentrações entre 0,1 e 1 mg mL⁻¹. As leituras em espectrofotômetro foram feitas a 595 nm.

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi quantificada utilizando a metodologia de Giannopolis e Ries (1977), com modificações. O método é baseado na redução fotoquímica do NBT (Nitro Blue Tetrazolium) pela SOD. Para a reação foram utilizados 500 µL de Na₂CO₃ a 50 mM; 500 µL de L-metionina 12 mM; 500 µL de NBT 75 µM; 500 µL de riboflavina 2 µM e 50 µL do extrato enzimático. O volume foi completado a 5 mL com uso do tampão de fosfato de potássio (pH 7,6) contendo 0,1 mM de Na-EDTA. O início da reação ocorre com a adição da riboflavina, os tubos foram então colocados sob as luzes da câmara de crescimento durante 8 min. As leituras foram realizadas em

espectrofotômetro a 560 nm e expressas em U de SOD mg^{-1} proteína. Uma unidade de SOD é definida como a atividade da SOD que resulta na inibição de 50 % da redução do NBT.

A atividade da enzima guaiacol peroxidase (GPOX) foi determinada através da metodologia descrita por Matsuno e Uritani (1972). Para a análise, foram utilizados 50 μL do extrato de cada amostra, adicionadas à 750 μL de tampão fosfato-citrato à pH 5,0 e 50 μL de guaiacol 0,5 %; adicionando 50 μL de H_2O_2 a 3 % após a adição da amostra. Os tubos foram deixados em banho maria a 30 °C durante 15 min, seguido de banho de gelo. A reação é paralisada com a adição de 25 μL de metabisulfito de sódio a 2%. Para a composição do branco, foi utilizado 50 μL do extrator no lugar da amostra. A absorbância foi obtida pela leitura das amostras em espectrofotômetro no comprimento de onda de 450 nm. A atividade é expressa em $\text{mol}^{-1}\text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}$ de proteína, calculada baseando-se no coeficiente de extinção da enzima.

4.2.8. Análise de carboidratos solúveis

A análise de carboidratos solúveis foi realizada de acordo com o método descrito por Yemm e Wills (1954) com ligeiras modificações. Para a calibração do espectrofotômetro e o preparo das soluções padrões, utilizou-se D-glucose. O reagente antrona foi preparado utilizando 0,6 g de antrona em 100 mL de etanol 20% e 300 mL de H_2SO_4 98 %. Os carboidratos solúveis foram extraídos em 10 mL de etanol 80 % utilizando 0,1 g das amostras secas e moídas de folhas da parte nova das plantas, centrifugadas a 4500 rpm por 20 min, coletando o sobrenadante. Para as análises foram utilizados 250 μL das amostras extraídas, adicionando-se 4 mL de antrona a mistura foi incubada em banho maria à 90 °C por 10 min. Após resfriadas, as amostras foram lidas em espectrofotômetro a 620 nm e o resultado expresso em mg g^{-1} de material vegetal seco.

4.2.9. Análise Estatística

O software estatístico R® (R CORE TEAM, 2017) foi utilizado para avaliar a normalidade dos dados pela análise de variância (ANOVA) verificada mediante teste Shapiro - Wilk. Quando necessário, realizou-se a transformação dos dados pelo teste de Box-Cox. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de F ao nível de 5% de

significância ($P < 0,05$), e quando significativo, os resultados foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

4.3. Resultados

4.3.1. Tamanho das partículas nas suspensões de MnCO_3

A suspensão MnCO_3 -nano apresenta tamanho médio de partículas de 104,8 nm variando entre 60,6 e 151,7 nm, enquanto que o MnCO_3 -SC apresenta distribuição de tamanho médio de partícula de 373,37 nm, variando entre 232,3 e 517,8 nm.

4.3.2. Massa seca da parte aérea e raízes

A massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja não foram alteradas pela imersão das folhas das plantas conduzidas em baixo suprimento de Mn em soluções de MnSO_4 , MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, tanto na primeira quanto na segunda avaliação (Figura 2 e 3).

Diferenças de massa seca da parte aérea e das raízes foram observadas entre os tratamentos conduzidos em baixo suprimento de Mn em comparação ao tratamento conduzido em condições adequadas de Mn na solução nutritiva, que apresentou os melhores resultados. Essas diferenças ocorreram em consequência dos sintomas de deficiência de Mn, limitando o crescimento das plantas cultivadas em baixo suprimento desse micronutriente (Figura 2).

No segundo experimento, a pulverização foliar de MnSO_4 aumentou a massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja comparado aos tratamentos Mn-baixo, MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, representando recuperação do crescimento após ocorrência da deficiência de Mn. Por outro lado, os tratamentos que receberam pulverização foliar com MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC resultaram em massa seca semelhante às plantas cultivadas em condições de baixo suprimento de Mn e que não receberam aplicação foliar de Mn. A aplicação foliar de MnSO_4 corrigiu os sintomas de deficiência das plantas de soja, entretanto a dose utilizada não foi capaz de atingir a mesma biomassa das plantas que se desenvolveram em condições adequadas de Mn (Figura 3).

Figura 2. Massa seca (g planta⁻¹) da parte aérea (A) e das raízes (B) das plantas de soja no estágio V4 (Primeira colheita), 4 dias após a última imersão das folhas e massa seca (g planta⁻¹) da parte aérea (C) e das raízes (D) das plantas de soja no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão das folhas (Primeiro experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Figura 3. Massa seca (g planta⁻¹) da parte aérea (A) e das raízes (B) das plantas de soja no estágio V8, 10 dias após a última aplicação foliar dos tratamentos (Segundo experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os sintomas visuais de deficiência de Mn foram atenuados após a aplicação de MnSO₄. O tratamento do primeiro trifólio desenvolvido através da imersão em solução de

MnSO₄ corrigiu os sintomas visuais de deficiência dos próximos trifólios desenvolvidos (Segundo e terceiro trifólio), assim como influenciou no tamanho do limbo foliar, embora essa diferença não tenha influenciado no aumento da massa seca da parte aérea (Figuras 4 e 5).

As plantas que tiveram o primeiro trifólio tratado com as fontes de MnCO₃ não apresentaram redução nos sintomas visuais de deficiência de Mn, assim como o tamanho do limbo foliar não foi alterado, apresentando coloração e tamanho similar aos trifólios das plantas conduzidas em baixo teor de Mn na solução.

Figura 4. Segundo trifólio das plantas de soja no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão foliar. Mn-Adequado (A); Mn-Baixo (B); MnSO₄ (C); MnCO₃-nano (D) e MnCO₃-SC (E) (Primeiro experimento).

Figura 5. Terceiro trifólio das plantas de soja no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão foliar. Mn-Adequado (A); Mn-Baixo (B); MnSO₄ (C); MnCO₃-nano (D) e MnCO₃-SC (E) (Primeiro experimento).

O porte das plantas também foi visualmente influenciado pela aplicação de MnSO_4 , mas não pela aplicação de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC. Os sintomas de deficiência de Mn são mais visíveis nas folhas jovens, caracterizados pela clorose entre as nervuras, seguidas de lesões necróticas e podem ser observados nas plantas conduzidas em baixo suprimento de Mn e nas plantas que receberam a aplicação foliar de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC. O MnSO_4 aplicado via foliar na soja atenuou os sintomas de deficiência de Mn das plantas (Figura 6).

Figura 6. Plantas de soja submetidas a imersão foliar (A, primeiro experimento) ou pulverização foliar (B, segundo experimento) de solução de MnSO_4 ; MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC em comparação as plantas conduzidas sob teores de Mn-Adequado e Mn-Baixo na solução nutritiva. No primeiro experimento, as plantas de soja encontram-se no estágio V5, 8 dias após a última imersão foliar. No segundo experimento, as plantas de soja encontram-se no estágio V8, 10 dias após a última pulverização foliar.

4.3.3. Teor dos nutrientes

O teor de Mn nas plantas de soja variou de acordo com o compartimento analisado e em função da imersão ou pulverização foliar com as fontes de Mn. Na primeira colheita do

primeiro experimento (imersão foliar), 4 dias após a última imersão do primeiro trifólio, a fonte MnSO_4 aumentou os teores de Mn na parte aérea recém-desenvolvida da soja, única fonte que promoveu o transporte do Mn aplicado no primeiro trifólio totalmente expandido até as folhas mais novas da soja, coletadas em estágio V4 de desenvolvimento da cultura (Figura 7A).

Nos trifólios totalmente expandidos após a aplicação, o teor de Mn aumentou em resposta a aplicação das fontes de Mn, que não se diferenciam entre si. Esse aumento no teor de Mn caracteriza o transporte do Mn para as folhas da soja desenvolvidas acima da folha que recebeu a aplicação. Os teores obtidos pela aplicação de MnSO_4 foram maiores do que o das fontes MnCO_3 (Figura 7B).

O teor de Mn nos trifólios que receberam aplicação foi maior na fonte $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ seguido da fonte $\text{MnCO}_3\text{-nano}$, sendo maior que os teores de Mn nas folhas do tratamento Mn-adequado. A imersão das folhas no tratamento MnSO_4 aumentou o teor de Mn na folha em comparação ao tratamento Mn-Baixo, mas apresentou menores teores em comparação aos tratamentos $\text{MnCO}_3\text{-nano}$ e $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ (Figura 7C).

Figura 7. Teor de Mn (mg kg^{-1}) nos compartimentos das plantas de soja no estágio V4 (Primeira colheita), 4 dias após a última imersão foliar (Primeiro experimento). A - Parte aérea recém-desenvolvida (RD); B - Trifólios totalmente expandidos após a aplicação (EAP); C - Trifólios aplicados e D – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os teores de Mn nas raízes também foram influenciados pela aplicação foliar de Mn, independente da fonte de Mn. O teor de Mn aumentou comparado ao teor de Mn das raízes de soja conduzidas no tratamento Mn-baixo, mas muito distante ao teor obtido em plantas que cresceram no tratamento Mn-adequado (Figura 7D).

No estágio V5, nas plantas de soja colhidas 8 dias após a última imersão foliar, as diferenças entre as fontes permaneceram apenas no teor de Mn dos trifólios aplicados. As fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC apresentaram teores de Mn maiores que a fonte MnSO_4 (Figura 8C).

Nos demais compartimentos, a imersão do primeiro trifólio totalmente expandido não aumentou o teor de Mn dos trifólios totalmente expandidos após a aplicação, na parte aérea recém-desenvolvida e nas raízes das plantas (Figura 8A, 8B e 8D). Isso demonstra que a quantidade de Mn fornecida no primeiro experimento não foi suficiente para manter o aumento dos teores de Mn por muito tempo.

Figura 8. Teor de Mn (mg kg^{-1}) nos compartimentos das plantas de soja no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão foliar (Primeiro experimento). A - Parte aérea recém-desenvolvida (RD); B - Trifólios totalmente expandidos após a aplicação (EAP); C - Trifólios aplicados e D – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Os resultados do segundo experimento demonstram que o Mn proveniente do MnSO_4 aplicado via pulverização foliar é facilmente transportado para a parte aérea nova da soja (Figura 9A). A aplicação de MnSO_4 aumentou o teor de Mn na parte aérea nova das plantas da soja enquanto as fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC não influenciaram o teor de Mn da parte aérea nova coletadas no estágio V8, 10 dias após a última pulverização foliar.

Figura 9. Teor de Mn (mg kg⁻¹) nos compartimentos das plantas da soja no estágio V8, 10 dias após a última pulverização foliar (Segundo experimento). A - Parte aérea nova (PAN); B - Parte aérea velha (PAV) e C – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

O teor de Mn na parte aérea velha aumentou em função da aplicação foliar das fontes de Mn. A fonte $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ apresentou teores maiores que a fonte $\text{MnCO}_3\text{-nano}$ provavelmente em virtude da maior aderência do produto as folhas por causa dos aditivos presentes na suspensão concentrada (que não estavam presentes no tratamento $\text{MnCO}_3\text{-nano}$). As fontes MnSO_4 e $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ apresentaram teores estatisticamente iguais na parte aérea velha das plantas, teores até maiores que os encontrados em plantas cultivadas no tratamento Mn- adequado (Figura 9B).

Nas raízes os teores de Mn foram menores nas plantas que receberam pulverização foliar da fonte MnSO_4 , o que é reflexo de um efeito de concentração das plantas que receberam aplicação de MnCO_3 e das plantas do tratamento Mn-baixo, por apresentarem menor crescimento das raízes e consequentemente menor massa seca o que resulta em maior teor de Mn, comparado as plantas que receberam a aplicação de MnSO_4 . Isso ocorre pelo fato da deficiência de Mn reduzir o crescimento das raízes das plantas (Figura 9C).

A deficiência de Mn afeta diretamente na homeostase iônica das plantas de soja, afetando o teor dos nutrientes nos diferentes compartimentos analisados. A aplicação foliar de MnSO_4 foi capaz de influenciar os teores dos nutrientes afetados pela deficiência de Mn, ficando próximos aos teores obtidos nas plantas cultivadas em condições adequadas de suprimento de Mn. Esse efeito foi observado em proporções menores nas plantas que receberam aplicação foliar das fontes $\text{MnCO}_3\text{-nano}$ e $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ (Anexo A).

4.3.4. Conteúdo dos nutrientes

O conteúdo de Mn da soja aumentou na parte aérea das plantas submetidas a imersão foliar nos tratamentos MnSO_4 , $\text{MnCO}_3\text{-nano}$ e $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ quando avaliado no estágio fenológico V4, 4 dias após a última imersão foliar. Na parte aérea recém-desenvolvida, o conteúdo de Mn proveniente da aplicação de MnSO_4 apresentou os melhores resultados, entretanto não diferindo do conteúdo das plantas que receberam aplicação do $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ (Figura 10A). Nos trifólios expandidos após aplicação, o conteúdo de Mn foi maior nas plantas tratadas com MnSO_4 , entretanto não apresentou diferença estatística das fontes $\text{MnCO}_3\text{-nano}$ e $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ (Figura 10B).

Figura 10. Conteúdo de Mn ($\mu\text{g planta}^{-1}$) nos compartimentos das plantas de soja no estágio V4 (Primeira colheita), 4 dias após a última imersão foliar (Primeiro experimento). A - parte aérea recém-desenvolvida (RD); B - Trifólios totalmente expandidos após a aplicação (EAP); C - Trifólios aplicados e D – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Mesmo em pequena quantidade o Mn proveniente das fontes avaliadas pode ser transportado para os trifólios que emergiram posteriormente àqueles que receberam a imersão foliar. Nos trifólios que receberam a aplicação os maiores conteúdos de Mn foram observados nas folhas imersas em $\text{MnCO}_3\text{-SC}$ (Figura 10C). Os conteúdos de Mn que aumentaram nos compartimentos da soja que não receberam a aplicação foliar não foram superiores aos conteúdos das plantas de soja cultivadas em suprimento adequado de Mn na solução. Nas raízes, a aplicação foliar das diferentes fontes de Mn no primeiro trifólio da soja não alterou o seu conteúdo (Figura 10D).

As diferenças no conteúdo de Mn observadas no estágio V4 não foram observadas na colheita realizada no estágio V5, o que indica a necessidade de uma nova aplicação foliar para mitigar os sintomas de deficiência deste micronutriente nas plantas. Embora os trifólios aplicados ainda apresentem alto conteúdo de Mn, tudo indica que as plantas voltam a fazer o transporte do Mn em baixa disponibilidade em solução que é absorvido pelas raízes e direcionado para as partes jovens das plantas (Figura 11C). O conteúdo de Mn dos trifólios

totalmente expandidos após a aplicação e da parte aérea recém-desenvolvida não diferiu do conteúdo de Mn do tratamento Mn-baixo (Figura 11A e 11B). Nessa segunda colheita, o conteúdo de Mn nas raízes também não foi influenciado pela imersão foliar com fontes de Mn (Figura 11D).

O conteúdo de Mn das plantas que receberam aplicação dos tratamentos por pulverização foliar é maior do que o conteúdo das plantas que foram tratadas por imersão do primeiro trifólio, em consequência da utilização de uma dose superior à utilizada no primeiro experimento e também pelo fato das fontes de Mn atingirem uma área foliar muito maior que apenas um trifólio.

Figura 11. Conteúdo de Mn ($\mu\text{g planta}^{-1}$) nos compartimentos das plantas de soja no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão foliar (Primeiro experimento). A - parte aérea recém-desenvolvida (RD); B - Trifólios totalmente expandidos após a aplicação (EAP); C - Trifólios aplicados e D – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

A utilização da fonte MnSO_4 aumentou o conteúdo de Mn em todos os compartimentos da soja, parte aérea nova, parte aérea velha e nas raízes. O aumento do conteúdo de Mn após a aplicação das fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC ocorreu na parte aérea velha, que teve contato direto com as suspensões, mas foi inferior ao conteúdo de Mn das plantas que receberam o MnSO_4 via foliar (Figura 12B). O Mn proveniente da aplicação

de MnSO_4 foi transportado para a parte aérea nova e para as raízes das plantas de soja, reduzindo os efeitos de deficiência, mas não suficiente para atingir o mesmo conteúdo daquelas que foram conduzidas em um suprimento adequado de Mn (Figura 12A e 12C).

Figura 12. Conteúdo de Mn (µg planta⁻¹) nos compartimentos das plantas da soja no estágio V8, 10 dias após a última pulverização foliar (Segundo experimento). A - Parte aérea nova (PAN); B - Parte aérea velha (PAV) e C – raízes. As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

As diferenças na massa seca e nos teores dos nutrientes representam as variações do conteúdo dos demais nutrientes avaliados nos diferentes compartimentos. O cultivo de soja em condições de baixo suprimento de Mn altera o conteúdo dos macro e micronutrientes. Entretanto, é possível observar atenuação desses efeitos em razão da aplicação foliar de Mn. Em geral, nas plantas de soja que receberam aplicação foliar de MnSO_4 o conteúdo de macro

e micronutrientes foi similar ao conteúdo das plantas cultivadas no tratamento Mn-Adequado. Em menores proporções a aplicação foliar das fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC restabeleceu os conteúdos dos nutrientes para valores próximos aos observados no tratamento Mn-Adequado (Anexo B).

4.3.5. Índice SPAD e clorofila total

A concentração de clorofila atingiu os maiores valores nos tratamentos Mn-adequado e MnSO_4 em comparação aos tratamentos Mn-baixo, MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, tanto para a avaliação indireta pelo método SPAD (Figura 13) quando pelo método direto (Figura 14). O índice SPAD foi avaliado nos estádios fenológicos V6 e V7, após a expansão do primeiro e segundo trifólios após a pulverização foliar, respectivamente.

Figura 13. SPAD (índice SPAD) no primeiro trifólio (A) e no segundo trifólio (B) totalmente expandido após a aplicação dos tratamentos por pulverização foliar (Segundo experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Foram coletados os trifólios desenvolvidos na parte mais nova das plantas de soja para a avaliação da concentração de clorofila pelo método direto. A aplicação das fontes MnCO_3 - nano e MnCO_3 -SC não alteraram as concentrações de clorofila nas plantas de soja, de forma que o Mn proveniente dessas fontes não é suficiente para representar uma alteração da concentração de clorofila nas partes mais novas da soja. Resultados mais promissores foram obtidos com a aplicação foliar do MnSO_4 , que obteve um aumento maior que 50 % na concentração de clorofila das folhas comparado ao Mn-baixo, MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC

(Figura 13). Interessante observar que o aumento na clorofila total se expressou também na avaliação visual comparativa dos tratamentos (Figura 5B).

Figura 14. Conteúdo total de clorofila (mg g⁻¹ de massa fresca) determinado na parte aérea nova das plantas que receberam os tratamentos por pulverização foliar (Segundo experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

4.3.6. Superóxido dismutase (SOD) e guaiacol peroxidase (GPOX)

A atividade da enzima superóxido dismutase não foi alterada nas plantas cultivadas em baixo suprimento de Mn apresentando os mesmos resultados das plantas cultivadas em teores adequados de Mn na solução, dessa forma a aplicação foliar das diferentes fontes de Mn também não afetou a atividade enzimática da SOD (Figura 15A).

Plantas deficientes em Mn apresentaram maior atividade da enzima guaiacol peroxidase em comparação as plantas do tratamento Mn-adequado. O tratamento que recebeu pulverização foliar com MnSO₄ foi o único que conseguiu reduzir a atividade da GPOX a níveis similares aos das plantas do tratamento Mn-adequado. Esse resultado indica que o MnSO₄ aplicado por meio de pulverização foliar foi a única fonte capaz de melhorar o metabolismo da planta para fins de recuperação do estresse ocasionado pelo baixo fornecimento de Mn as plantas (Figura 15B).

Figura 15. Atividade enzimática das enzimas: A - superóxido dismutase (SOD, U de SOD mg⁻¹ proteína) e B - guaiacol peroxidase (GPOX, mol⁻¹ min⁻¹ mg⁻¹ de proteína), determinadas na parte aérea nova das plantas que receberam a pulverização foliar (Segundo experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

4.3.7. Carboidratos solúveis

A deficiência de Mn possui participação efetiva no conteúdo de carboidratos solúveis nas plantas de soja, reduzindo o conteúdo nas plantas conduzidas em condições de baixo Mn disponível. A aplicação foliar de MnSO₄ aumentou o conteúdo de carboidratos solúveis nas folhas novas, apresentando conteúdo de 31,7 mg g⁻¹, o dobro daquele observado nas plantas cultivadas em baixo suprimento de Mn que foi de 15,9 mg g⁻¹ e estatisticamente igual ao conteúdo das plantas cultivadas no tratamento Mn-adequado, que foi de 35,7 mg g⁻¹ (Figura 16).

As fontes MnCO₃-nano e MnCO₃-SC aplicadas via foliar na soja não foram capazes de alterar o conteúdo de carboidratos solúveis, permanecendo iguais ao das plantas cultivadas no tratamento Mn-baixo. Esse resultado demonstra que fontes insolúveis de Mn aplicadas via foliar não tem capacidade de ativar o metabolismo da soja no que diz respeito à produção de carboidratos solúveis.

Figura 16. Carboidratos solúveis (mg g⁻¹) determinado na parte aérea nova das plantas que receberam pulverização foliar (Segundo experimento). As barras indicam o erro padrão da média. Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

4.4. Discussão

Os sintomas visuais de deficiência de Mn foram atenuados após a aplicação de MnSO₄, entretanto nas plantas que receberam a aplicação das fontes MnCO₃-nano e MnCO₃-SC os sintomas de deficiência de Mn permaneceram, caracterizados pela clorose interveinal, amarelecimento das folhas novas e redução do limbo foliar (MARSCHNER, 2012).

A imersão das folhas de soja deficiente em Mn na solução com MnSO₄ foi capaz de corrigir os sintomas de deficiência de Mn, aumentando a massa seca da parte aérea e das raízes em comparação ao tratamento Mn-baixo. Entretanto, a dose de Mn fornecida foi insuficiente para atingir a mesma biomassa das plantas que se desenvolveram em condições adequadas de Mn. A pulverização foliar das fontes MnCO₃-nano e MnCO₃-SC não alterou a massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja.

No primeiro experimento, a imersão de folhas de soja deficientes em Mn em solução contendo MnSO₄, MnCO₃-nano e MnCO₃-SC aumentaram o teor de Mn nos trifólios que expandiram posteriormente. Isso caracteriza a absorção e o transporte do Mn das fontes MnSO₄, MnCO₃-nano e MnCO₃-SC para as folhas da soja desenvolvidas depois daquelas que receberam a aplicação. Essa absorção de nanopartículas pelas folhas das plantas já foi relatada para outros nutrientes como Fe e Zn (ACHARI; KOWSHIK, 2018).

Mesmo sendo classificado como de baixa mobilidade no floema (MARSCHNER, 2012), o Mn proveniente da aplicação de MnSO₄ foi transportado para a parte aérea nova da soja. No primeiro experimento a aplicação dessa fonte aumentou os teores de Mn na parte

aérea recém-desenvolvida, promovendo o transporte do Mn aplicado no primeiro trifólio totalmente expandido até as folhas mais novas da planta. No segundo experimento, a pulverização foliar com MnSO_4 também aumentou o teor de Mn na parte aérea nova da soja, o que não ocorreu com a utilização das fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC. A redistribuição de Mn da aplicação foliar utilizando fontes solúveis até as partes novas das plantas também foi relatada em feijão fava (*Vicia faba*) e milho (*Zea mays*) (EL-BAZ et al., 1990).

Na pulverização foliar, a utilização da fonte MnSO_4 aumentou o conteúdo de Mn em todos os compartimentos da soja, parte aérea nova, parte aérea velha e nas raízes. O aumento do conteúdo de Mn após a aplicação das fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC ocorreu na parte aérea velha, que teve contato direto com as suspensões, mas foi inferior ao conteúdo de Mn das plantas que receberam o MnSO_4 via foliar. Isso indica que as fontes insolúveis de Mn podem ser absorvidas pelas folhas, mas apresentam baixo transporte e redistribuição, o que sugere baixo metabolismo dessas fontes pela soja. O aumento no conteúdo de Mn das raízes pode estar relacionado a um benefício adicional da aplicação foliar, alcançado através da exploração do mecanismo de sinergismo. Há relatos que a disponibilidade de micronutrientes nos fertilizantes aplicados na parte aérea das plantas pode também estimular a eficiência de absorção dos fertilizantes aplicados via solo (OPRICA et al., 2014). Dessa forma o Mn pode ser proveniente da fertilização foliar ou da solução após um estímulo de absorção pelas raízes, mesmo em níveis baixos de Mn, promovido pelo aumento do teor foliar.

A deficiência de Mn influenciou o teor e o conteúdo dos demais nutrientes avaliados. Isso ocorre pelo fato da absorção dos nutrientes pelas plantas ser dirigida por múltiplos transportadores, dos quais a maioria transporta mais de um nutriente. Esse potencial de compartilhamento de mecanismos similares de absorção e transporte resulta em uma competição entre esses íons, o que leva ao antagonismo (BINDRABAN et al., 2015). Esse antagonismo não é verificado apenas na absorção dos nutrientes pelas raízes, mas também nas aplicações foliares que podem afetar a absorção de outros nutrientes, como observado com o Fe, que diminuiu a absorção foliar de Mn, Zn e Cu após a pulverização (GHASEMI-FASAEI; RONAGHI, 2008).

Concentrações excessivas de Mn nos tecidos vegetais podem alterar diferentes processos, como a atividade enzimática, absorção, translocação e utilização de outros elementos minerais como Ca, Mg, Fe e P, promovendo estresse oxidativo nas plantas (DUCIC; POLLE, 2005; LEI et al., 2007). A deficiência de Mn também promove uma

alteração entre os teores dos nutrientes ocasionada pela busca da homeostase pelas plantas, podendo ser observado o sinergismo entre os nutrientes, como já foi relatado entre P e Mn e entre K e Mn em plantas de cevada (MATULA, 1992).

Existem poucos transportadores identificados especificamente para o Mn nas plantas. Uma das teorias é que o Mn compartilha muitos transportadores com outros cátions divalentes como é o caso do Fe. A maioria dos transportadores envolvidos na translocação de Mn apresenta alta especificidade para vários outros cátions divalentes, incluindo Zn, Cu, Cd, Ca, Co e Ni (SOCHA; GUERINOT, 2014). Apesar dos avanços na identificação dos transportadores de Mn, muitos mecanismos moleculares que controlam a homeostase do Mn nas plantas ainda são desconhecidos. A identificação desses genes é importante para o desenvolvimento de plantas que se desenvolvam adequadamente em solos com baixos teores de Mn ou plantas que apresentem maior capacidade de armazenamento de Mn nos grãos (VATANSEVER; OZYIGIT; FILIZ, 2017; SOCHA; GUERINOT, 2014).

A aplicação de MnSO_4 aumentou a concentração de clorofila e o índice SPAD das plantas de soja, de forma que o Mn proveniente do MnSO_4 foi suficiente para representar aumento na concentração de clorofila nas partes mais novas da soja que apresentavam sintomas de deficiência de Mn. Entretanto, não foi observado aumento na concentração de clorofila para os tratamentos com MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, indicando pouca efetividade destas fontes em processos metabólicos da planta. Essa diferença na concentração de clorofila nas plantas deficientes ocorre pelo fato da estabilidade e integridade do fotossistema II ser vulnerável à deficiência de Mn o que torna as plantas que apresentam esses sintomas mais susceptíveis aos danos no fotossistema II ocasionados pelo estresse oxidativo (SCHMIDT; JENSEN; HUSTED, 2016).

O Mn atua como cofator da SOD e pertence ao grupo de enzimas classificados de acordo com o cofator metálico que são: Fe (FeSOD), Mn (MnSOD) e Cu+Zn (CuZnSOD). A MnSOD é encontrada principalmente na mitocôndria e nos peroxissomos (MILLALEO et al., 2010; MARSCHNER, 2012). A atividade total da SOD não foi alterada pela deficiência de Mn nas plantas, dessa forma a aplicação foliar das fontes de Mn também não afetou a atividade da enzima superóxido dismutase. Isso provavelmente ocorreu pelo fato de ter sido avaliado o teor total da SOD e não suas formas isoladas. Santos et al. (2017) observaram menor atividade da enzima SOD em plantas de soja conduzidas em baixos teores de Mn; em altas concentrações de Mn ($200 - 300 \mu\text{mol L}^{-1}$) as plantas apresentaram sintomas de toxicidade de Mn e aumentaram a atividade da SOD promovido pelo estresse oxidativo.

A maior atividade da enzima peroxidase ocorre em condições de maior estresse (GASPAR et al., 1985). Plantas que apresentaram sintomas de deficiência de Mn atingiram maiores valores de atividade da enzima guaiacol peroxidase em comparação as plantas conduzidas em níveis adequados desse micronutriente. O MnSO_4 aplicado via foliar reduziu a atividade da GPOX atenuando o estresse oxidativo sofrido pelas plantas deficientes em Mn, o que comprova a eficiência de absorção de Mn proveniente da fonte solúvel MnSO_4 . O mesmo comportamento foi observado por Leidi et al. (1986) avaliando diferentes variedades de soja, onde o aumento da atividade das peroxidases ocorreu em plantas que apresentaram diminuição do crescimento.

A deficiência de Mn apresenta danos severos na concentração de carboidratos não estruturais, que são os carboidratos envolvidos no metabolismo das plantas (MARSCHNER, 2012). As plantas de soja deficientes em Mn apresentaram redução no conteúdo de carboidratos solúveis. A aplicação de MnSO_4 aumentou o conteúdo de carboidratos solúveis nas partes novas das plantas de soja enquanto o conteúdo das plantas que receberam aplicação das fontes MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC não se alteraram, permanecendo iguais ao conteúdo de carboidratos solúveis das plantas que foram cultivadas sob condições de baixo suprimento de Mn. Em plantas de trigo a deficiência de Mn também diminuiu a produção de carboidratos (JHANJI; SADANA; SHUKLA, 2017). Esses resultados comprovam que a aplicação foliar de fontes insolúveis de Mn não favoreceram processos metabólicos importantes da planta, como a produção de carboidratos solúveis.

4.5. Conclusões

Plantas de soja cultivadas em solução nutritiva de baixa concentração de Mn reverteram sintomas de deficiência do nutriente quando submetidas à imersão da folha ou pulverização foliar com MnSO_4 . Entretanto, os sintomas de deficiência não foram revertidos com a utilização de fontes insolúveis de Mn (MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC).

A aplicação de MnSO_4 promoveu aumento na concentração de clorofila, aumento na concentração de carboidratos solúveis e redução na atividade da enzima guaiacol peroxidase, reduzindo o estresse oxidativo ocasionado pela deficiência de Mn. Apesar do aumento no teor de Mn nas partes da planta tratadas com fontes insolúveis de Mn, o metabolismo da soja não foi influenciado pela aplicação foliar de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, demonstrando limitada

eficácia de fontes insolúveis de Mn aplicadas via foliar no metabolismo e nutrição das plantas de soja.

Referências

- ACHARI, G. A.; KOWSHIK, M. Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 66, n. 33, p. 8647-8661, 2018.
- BINDRABAN, P. S.; DIMKPA, C.; NAGARAJAN, L.; ROY, A.; RABBINGE, R. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. **Biology and fertility of soils**, v. 51, n. 8, p. 897-911, 2015.
- BRADFORD, Marion 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, 1976.
- BURMAN, U.; SAINI, M.; KUMAR, P. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 95, n. 4, p. 605-612, 2013.
- BURNELL, J. N. The biochemistry of manganese in plants. In: **Manganese in soils and plants**. Springer, Dordrecht, 1988. p. 125-137.
- DEY, J. K.; DAS, S.; MAWLONG, L. G. Nanotechnology and its Importance in Micronutrient Fertilization. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 2306-2325, 2018.
- DUCIC, T.; POLLE, A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 103-112, 2005.
- EL-BAZ, F. K.; MAIER, P.; WISSEMEIER, A. H.; HORST, W. J. Uptake and distribution of manganese applied to leaves of *Vicia faba* (cv. Herzfreya) and *Zea mays* (cv. Regent) plants. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 153, n. 4, p. 279-282, 1990.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação Foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: Abisolo, 2015. 150 p.
- GASPAR, T.; PENEL, C.; CASTILLO, F. J.; GREPPIN, H. A two-step control of basic and acidic peroxidases and its significance for growth and development. **Physiologia plantarum**, v. 64, n. 3, p. 418-423, 1985.

- GHASEMI-FASAEI, R.; RONAGHI, A. Interaction of iron with copper, zinc, and manganese in wheat as affected by iron and manganese in a calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 5, p. 839-848, 2008.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.
- JHANJI, S.; SADANA, U. S.; SHUKLA, A. K. Manganese efficiency in relation to differential production and allocation of carbohydrates between source and sink organs of diverse wheat genotypes. **Acta physiologiae plantarum**, v. 37, n. 2, p. 38, 2015.
- LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 173-181, 2008.
- LEI, Y.; KORPELAINEN, H.; LI, C. Physiological and biochemical responses to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayana* populations. **Chemosphere**, v. 68, n. 4, p. 686-694, 2007.
- LEIDI, E. O.; GOMEZ, M.; DE LA GUARDIA, M. D. Evaluation of catalase and peroxidase activity as indicators of Fe and Mn nutrition for soybean. **Journal of plant nutrition**, v. 9, n. 9, p. 1239-1249, 1986.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MATSUNO, H.; URITANI, I. Physiological behavior of peroxidase isozymes in sweet potato root tissue injured by cutting or with black rot. *Plant and Cell Physiology*, v. 13, n. 6, p. 1091-1101, 1972.
- MATULA, J. Interactions between potassium, magnesium, calcium, manganese and phosphorus in their uptake by barley. **Rostlinna Vyroba UVTIZ**, 1992.
- MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.
- OPRICA, D. I.; CIOROIANU, T. M.; LUNGU, M.; BADEA, I. A. Dumitrita Ioana et al. A new eco-friendly foliar fertilizer with bone glue suitable for crops of maize and sunflower. **Rev. Chim**, v. 65, p. 1-7, 2014.

- PACHECO, I.; BUZEA, C. Nanoparticle uptake by plants: beneficial or detrimental?. In: **Phytotoxicity of Nanoparticles**. Springer, Cham, 2018. p. 1-61.
- PRADHAN, S.; PATRA, P.; DAS, S.; CHANDRA, S.; MITRA, S.; DEY, K. K.; AKBAR, S.; PALIT, P.; GOSWAMI, A. Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on *Vigna radiata*: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 22, p. 13122-13131, 2013.
- PRASAD, T. N. V. K. V.; SUDHAKAR, P.; SREENIVASULU, Y.; LATHA, P.; MUNASWAMY, V.; REDDY, K. R.; SREEPRASAD, T. S.; SAJANLAL, P.R.; PRADEEP, T. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, n. 6, p. 905-927, 2012.
- R CORE TEAM (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SANTOS, E. F.; SANTINI, J. M. K.; PAIXAO, A. P.; JÚNIOR, E. F.; LAVRES, J.; CAMPOS, M.; REIS, A. R. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 113, p. 6-19, 2017.
- SCHMIDT, S. B.; JENSEN, P. E.; HUSTED, S. Manganese deficiency in plants: the impact on photosystem II. **Trends in plant science**, v. 21, n. 7, p. 622-632, 2016.
- SHENKER, M.; PLESSNER, O. E.; TEL-OR, E. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity. **Journal of plant physiology**, v. 161, n. 2, p. 197-202, 2004.
- SOCHA, A. L.; GUERINOT, M. L. Mn-euvering manganese: the role of transporter gene family members in manganese uptake and mobilization in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 106, 2014.
- TOMBULOGLU, H.; TOMBULOGLU, G.; SLIMANI, Y.; ERCAN, I.; SOZERI, H.; BAYKAL, A. Impact of manganese ferrite (MnFe₂O₄) nanoparticles on growth and magnetic character of barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environmental Pollution**, v. 243, p. 872-881, 2018.
- VATANSEVER, R.; OZYIGIT, I. I.; FILIZ, E. Essential and beneficial trace elements in plants, and their transport in roots: a review. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 181, n. 1, p. 464-482, 2017.
- WITHAM, F. H.; BLAYDES, D. F. **Experiments in plant physiology**. Van Nostrand, New York, 1971. 245 p.

- YANO, JUNKO; YACHANDRA, VITTAL. Mn₄Ca cluster in photosynthesis: where and how water is oxidized to dioxygen. **Chemical reviews**, v. 114, n. 8, p. 4175-4205, 2014.
- YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical journal**, v. 57, n. 3, p. 508, 1954.

ANEXOS

ANEXO A. Teor de nutrientes

Tabela 1. Teor dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea recém-desenvolvida; nos trifólios totalmente expandidos após a aplicação; nos trifólios aplicados e; nas raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V4 (Primeira colheita), 4 dias após a última após a última imersão das folhas (Primeiro experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	Mn		B		Fe		Cu		Zn		Mo		Ca		K		Mg		P		S	
	-----mg kg ⁻¹ -----											-----g kg ⁻¹ -----										
Parte aérea recém-desenvolvida																						
Mn-Adequado	28,59	a	20,61	a	38,82	a	5,04	a	40,44	a	6,03	a	6,14	a	34,17	a	2,38	a	7,62	a	3,14	a
Mn-Baixo	5,45	c	28,69	c	40,08	a	6,00	b	51,34	b	7,73	c	6,78	ab	41,15	b	2,41	a	8,20	ab	3,37	a
MnSO ₄	7,88	b	24,70	b	36,86	a	5,99	b	49,13	b	6,47	ab	7,06	b	40,12	b	2,38	a	8,36	b	3,18	a
MnCO ₃ -nano	6,13	c	24,03	b	37,38	a	5,83	b	48,46	b	6,14	a	6,70	ab	40,36	b	2,41	a	8,50	b	3,17	a
MnCO ₃ -SC	6,01	c	23,48	ab	42,12	a	6,15	b	50,54	b	7,50	bc	7,29	b	40,90	b	2,46	a	8,44	b	3,27	a
CV (%)	2,82		7,10		8,29		4,58		4,63		9,13		5,99		4,99		4,64		4,21		5,21	
Trifólios totalmente expandidos após a aplicação																						
Mn-Adequado	45,51	a	19,19	a	61,30	a	5,12	a	36,04	a	7,84	a	17,32	a	37,50	a	2,74	a	5,55	a	3,22	a
Mn-Baixo	7,73	c	20,56	a	51,67	b	6,53	b	48,06	b	7,43	a	20,57	b	41,54	b	2,84	a	6,20	b	2,99	a
MnSO ₄	9,38	b	20,95	a	54,47	ab	6,66	b	48,02	b	7,60	a	20,53	b	40,64	ab	2,78	a	6,29	b	3,14	a
MnCO ₃ -nano	8,40	bc	20,47	a	53,18	ab	6,37	b	43,82	b	6,93	a	20,21	b	42,66	b	2,83	a	6,36	b	3,09	a
MnCO ₃ -SC	8,93	bc	20,41	a	56,48	ab	6,77	b	48,48	b	7,60	a	20,93	b	42,26	b	2,89	a	6,20	b	2,98	a
CV (%)	5,13		4,45		7,85		6,57		7,00		6,65		4,93		5,03		3,63		3,99		4,42	
Trifólios aplicados																						
Mn-Adequado	75,43	c	18,14	a	76,04	a	6,36	a	47,80	A	4,65	a	34,06	a	29,24	a	4,07	a	4,11	a	3,09	a
Mn-Baixo	11,52	e	16,15	b	59,10	b	7,16	b	51,87	A	4,52	a	34,66	a	28,41	a	3,81	b	4,04	a	2,77	b
MnSO ₄	59,32	d	17,38	ab	66,75	b	7,23	b	54,32	A	4,83	a	34,61	a	28,83	a	3,73	b	4,22	a	2,79	b
MnCO ₃ -nano	149,56	b	16,92	ab	64,43	b	6,93	b	47,67	A	4,42	a	34,72	a	29,32	a	3,82	b	4,24	a	2,78	b
MnCO ₃ -SC	186,36	a	17,26	ab	66,08	b	6,89	b	53,04	A	4,81	a	34,69	a	28,48	a	3,65	b	4,05	a	2,73	b
CV (%)	4,93		4,39		7,20		3,93		7,59		10,85		2,77		4,71		2,69		3,89		3,43	
Raízes																						
Mn-Adequado	58,64	a	15,03	a	1017,6	a	8,43	a	26,42	a	14,52	a	3,14	a	40,47	a	9,52	a	5,90	a	6,25	a
Mn-Baixo	6,72	c	14,56	a	1038,7	a	9,76	b	31,86	b	22,88	b	3,18	a	39,94	a	11,81	b	7,78	b	5,52	ab
MnSO ₄	7,57	b	14,96	a	1019,9	a	9,29	ab	31,45	b	23,13	b	3,09	a	37,16	ab	11,68	b	7,19	ab	5,67	ab
MnCO ₃ -nano	7,38	b	15,05	a	1101,6	a	8,67	ab	31,36	b	19,85	b	3,03	a	32,42	b	10,63	ab	6,67	ab	4,93	b
MnCO ₃ -SC	7,26	bc	15,16	a	1079,2	a	9,30	ab	32,75	b	21,71	b	3,01	a	31,50	b	10,01	ab	6,35	ab	4,80	b
CV (%)	5,18		4,63		8,55		6,59		7,98		11,4		3,01		10,41		8,900		11,270		8,9	

Tabela 2. Teor dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea recém-desenvolvida; nos trifólios totalmente expandidos após a aplicação; nos trifólios aplicados e; nas raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão das folhas (Primeiro experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	Mn		B		Fe		Cu		Zn		Mo		Ca		K		Mg		P		S	
	-----mg kg ⁻¹ -----												-----g kg ⁻¹ -----									
Parte aérea recém-desenvolvida																						
Mn-Adequado	22,83	a	23,68	a	63,15	a	3,82	a	34,57	a	5,83	a	6,78	a	26,05	a	2,49	a	5,40	a	2,54	a
Mn-Baixo	5,16	b	28,97	ab	46,29	b	6,11	b	52,55	b	8,98	b	6,44	a	39,91	b	2,53	a	7,96	b	3,33	b
MnSO ₄	5,16	b	26,76	ab	56,35	ab	5,71	b	49,29	b	8,20	ab	6,35	a	37,74	b	2,70	a	7,79	b	3,52	b
MnCO ₃ -nano	4,47	b	28,84	ab	50,59	ab	5,96	b	52,77	b	9,30	b	6,01	a	38,91	b	2,67	a	7,93	b	3,55	b
MnCO ₃ -SC	4,42	b	29,90	b	56,10	ab	6,50	b	55,62	b	9,37	b	6,42	a	39,61	b	2,77	a	8,01	b	3,45	b
CV (%)	8,10		8,82		13,40		10,29		12,29		15,02		6,29		8,66		10,79		8,81		10,61	
Trifólios totalmente expandidos após a aplicação																						
Mn-Adequado	39,77	a	21,22	a	114,67	a	4,13	a	24,88	a	5,98	a	17,46	a	24,83	a	3,00	a	3,67	a	2,68	a
Mn-Baixo	6,78	b	23,77	a	60,07	b	6,60	b	44,07	b	6,90	a	23,59	b	40,23	b	3,12	a	5,60	b	3,16	a
MnSO ₄	8,30	b	22,57	a	67,43	b	6,25	b	41,63	b	6,55	a	22,31	b	39,03	b	3,13	a	5,47	b	3,34	a
MnCO ₃ -nano	7,40	b	23,23	a	62,83	b	6,42	b	42,01	b	6,15	a	24,52	b	38,80	b	3,16	a	5,44	b	3,11	a
MnCO ₃ -SC	6,83	b	24,63	a	71,73	b	6,87	b	44,91	b	6,78	a	21,62	b	39,97	b	3,12	a	5,73	b	3,06	a
CV (%)	5,07		7,67		8,48		7,62		7,00		11,00		6,76		4,70		7,38		9,20		8,45	
Trifólios aplicados																						
Mn-Adequado	82,40	c	18,49	a	108,70	a	5,37	a	42,92	a	2,10	a	37,52	a	22,47	a	4,57	a	2,87	a	2,16	a
Mn-Baixo	13,00	d	19,15	a	0,59	b	6,86	b	50,94	ab	2,28	a	41,53	a	20,07	a	4,38	a	3,27	a	2,34	a
MnSO ₄	162,52	b	19,99	a	0,79	b	6,74	ab	57,71	b	2,56	a	39,31	a	23,61	a	4,17	a	3,37	a	2,29	a
MnCO ₃ -nano	185,15	a	18,89	a	0,58	b	6,65	ab	51,42	ab	2,22	a	41,57	a	19,94	a	4,32	a	3,34	a	2,33	a
MnCO ₃ -SC	177,19	a	18,44	a	1,71	b	6,48	ab	54,19	ab	2,63	a	37,49	a	22,16	a	4,08	a	3,20	a	2,30	a
CV (%)	1,32		7,03		14,78		10,02		11,81		29,54		5,86		17,41		6,95		12,30		15,77	
Raízes																						
Mn-Adequado	27,73	a	11,53	a	587,70	a	7,20	a	22,43	a	4,28	a	3,23	a	45,90	a	7,20	a	4,30	a	7,75	a
Mn-Baixo	7,30	b	13,78	b	912,56	b	10,77	a	29,75	a	21,77	b	3,61	a	44,82	a	12,04	b	6,90	a	6,70	a
MnSO ₄	7,74	b	13,71	b	891,33	b	10,41	a	29,38	a	18,97	b	3,51	a	49,78	a	11,38	b	6,74	a	7,60	a
MnCO ₃ -nano	7,36	b	13,77	b	928,11	b	10,85	a	30,32	a	20,25	b	3,53	a	45,68	a	12,01	b	7,02	a	6,57	a
MnCO ₃ -SC	7,07	b	13,41	ab	849,67	b	10,25	a	29,52	a	20,59	b	3,29	a	47,00	a	11,57	b	6,06	a	7,44	a
CV (%)	19,55		6,64		15,1		18,03		18,01		24,89		3,01		10,41		8,900		11,270		6,14	

Tabela 3. Teor dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea nova; parte aérea velha e; raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V8, 10 dias após a última aplicação dos tratamentos por pulverização foliar (Segundo experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	Mn		B		Fe		Cu		Zn		Mo		Ca		K		Mg		P		S	
	-----mg kg ⁻¹ -----										-----g kg ⁻¹ -----											
Parte aérea nova																						
Mn-Adequado	20,86	a	28,4	a	157,0	a	5,02	a	30,9	a	5,60	a	7,42	a	20,22	a	2,96	a	4,84	a	3,19	a
Mn-Baixo	6,07	c	42,5	c	78,6	a	7,54	c	71,2	c	9,70	b	7,97	a	35,5	c	3,48	b	8,23	c	3,84	b
MnSO ₄	9,51	b	34,5	b	151,9	a	6,26	b	36,3	a	6,32	a	7,67	a	22,5	a	3,38	b	5,87	b	3,22	a
MnCO ₃ -nano	4,96	c	44,7	c	148,4	a	8,24	c	67,1	bc	10,67	b	6,63	a	34,9	c	3,93	c	8,40	c	4,08	b
MnCO ₃ -SC	4,73	c	43,3	c	135,3	a	8,21	c	61,5	b	10,37	b	6,59	a	32,1	b	3,82	c	7,77	c	3,83	b
CV (%)	9,54		4,5		35,1		7,23		6,8		6,40		9,47		3,8		3,83		4,74		7,51	
Parte aérea velha																						
Mn-Adequado	24,87	c	23,8	a	112,3	a	4,99	a	23,1	a	5,80	a	15,15	a	21,0	a	2,91	a	2,79	a	2,11	a
Mn-Baixo	6,09	d	25,3	a	44,1	c	7,17	b	36,9	c	7,13	bc	22,84	c	38,0	c	2,54	b	4,74	c	2,26	a
MnSO ₄	66,55	a	23,2	a	91,3	ab	5,62	ab	27,6	b	6,52	ab	17,25	ab	24,8	b	3,11	a	3,40	b	2,16	a
MnCO ₃ -nano	45,29	b	24,8	a	76,0	b	6,50	ab	37,0	c	7,98	c	21,97	c	36,8	c	3,08	a	4,64	c	2,76	b
MnCO ₃ -SC	62,32	a	24,3	a	71,0	bc	6,61	ab	37,6	c	7,98	c	20,66	bc	34,6	c	3,01	a	4,49	c	2,65	b
CV (%)	2,25		5,1		16,3		6,36		5,6		6,08		7,98		5,3		5,59		4,72		6,64	
Raízes																						
Mn-Adequado	9,75	a	14,8	a	472,5	a	4,36	a	11,2	a	2,33	a	2,82	a	22,4	a	3,37	a	1,74	a	4,01	a
Mn-Baixo	10,35	a	19,1	b	1488,3	c	9,00	c	18,8	c	18,60	d	3,99	b	25,9	a	11,33	c	5,66	c	3,92	a
MnSO ₄	6,63	b	15,1	a	536,2	a	4,62	a	12,2	a	3,59	a	2,63	a	23,9	a	4,16	a	2,07	a	4,27	a
MnCO ₃ -nano	9,49	a	18,6	b	1057,1	b	7,71	bc	16,4	bc	12,57	c	3,28	ab	22,7	a	7,89	b	3,34	b	4,31	a
MnCO ₃ -SC	8,99	a	18,0	b	1037,4	b	7,21	b	16,0	b	9,38	b	2,93	a	21,6	a	6,24	b	2,88	b	3,45	a
CV (%)	10,37		4,76		7,65		10,28		7,86		14,67		12,75		14,21		13,57		11,270		11,75	

ANEXO B.   Conteúdo de nutrientes

Tabela 4. Conteúdo dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea recém-desenvolvida; nos trifólios totalmente expandidos após a aplicação; nos trifólios aplicados e; nas raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V4 (Primeira colheita), 4 dias após a última após a última imersão das folhas (Primeiro experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	-----µg planta ⁻¹ -----						-----mg planta ⁻¹ -----					
	Mn	B	Fe	Cu	Zn	Mo	Ca	K	Mg	P	S	
Parte aérea recém-desenvolvida												
Mn-Adequado	3,46 a	2,49 a	4,68 ab	0,61 a	4,90 a	0,73 ab	0,75 a	4,15 a	0,29 ab	0,92 a	0,38 ab	
Mn-Baixo	0,76 c	3,98 b	5,55 b	0,83 b	7,13 c	1,07 c	0,94 a	5,72 b	0,33 b	1,14 b	0,47 b	
MnSO ₄	0,96 b	2,99 a	4,47 ab	0,73 ab	5,96 abc	0,79 ab	0,86 a	4,85 ab	0,29 ab	1,01 ab	0,39 ab	
MnCO ₃ -nano	0,68 c	2,64 a	4,12 a	0,64 a	5,34 ab	0,68 a	0,74 a	4,45 a	0,26 a	0,94 a	0,35 a	
MnCO ₃ -SC	0,77 bc	3,00 a	5,40 b	0,79 ab	6,47 bc	0,96 bc	0,93 a	5,22 ab	0,32 ab	1,08 ab	0,42 ab	
CV (%)	6,05	10,89	13,36	6,47	12,39	15,32	14,11	12,10	11,12	10,11	6,70	
Trifólios totalmente expandidos após a aplicação												
Mn-Adequado	28,19 a	11,91 a	37,89 a	3,17 a	22,30 ab	4,86 a	10,74 a	23,21 a	1,70 a	3,44 a	2,00 a	
Mn-Baixo	3,69 c	9,79 b	24,75 b	3,12 a	22,89 ab	3,54 b	9,81 a	19,82 b	1,35 b	2,95 b	1,43 b	
MnSO ₄	4,77 b	10,69 ab	27,79 b	3,39 a	24,46 a	3,88 b	10,47 a	20,68 b	1,41 b	3,20 ab	1,60 b	
MnCO ₃ -nano	4,01 bc	9,76 b	25,38 b	3,03 a	20,89 b	3,31 b	9,65 a	20,32 b	1,35 b	3,03 b	1,47 b	
MnCO ₃ -SC	4,34 bc	9,89 b	26,79 b	3,23 a	22,91 ab	3,72 b	10,13 a	20,04 b	1,37 b	2,96 b	1,43 b	
CV (%)	4,30	8,04	10,75	7,35	7,17	9,82	8,21	5,91	5,99	6,03	11,07	
Trifólios aplicados												
Mn-Adequado	27,45 c	6,63 a	27,74 a	2,32 a	17,40 ab	1,69 a	12,40 a	10,66 a	1,48 a	1,49 ab	1,13 a	
Mn-Baixo	4,21 e	5,90 ab	21,62 b	2,62 c	18,95 a	1,65 a	12,67 a	10,39 a	1,39 ab	1,48 ab	1,01 ab	
MnSO ₄	21,17 d	6,22 ab	23,91 ab	2,59 bc	19,42 a	1,73 a	12,41 a	10,30 a	1,33 bc	1,51 a	1,00 b	
MnCO ₃ -nano	51,36 b	5,81 b	22,13 b	2,38 abc	16,35 b	1,52 a	11,92 a	10,08 a	1,31 bc	1,45 ab	0,95 b	
MnCO ₃ -SC	63,25 a	5,85 ab	22,46 b	2,34 ab	17,96 ab	1,63 a	11,76 a	9,67 a	1,24 c	1,37 b	0,93 b	
CV (%)	7,65	6,86	10,11	5,69	7,19	10,82	5,52	6,74	2,54	4,50	6,83	
Raízes												
Mn-Adequado	27,95 a	7,18 a	486,43 a	4,03 ab	12,62 a	6,92 a	1,51 a	19,55 a	4,56 ab	2,80 a	3,02 a	
Mn-Baixo	3,14 b	6,81 ab	484,56 a	4,56 a	14,89 a	10,68 c	1,49 ab	18,67 ab	5,51 c	3,63 b	2,58 ab	
MnSO ₄	3,45 b	6,81 ab	463,37 a	4,23 ab	14,28 a	10,51 c	1,41 ab	16,95 ab	5,31 bc	3,25 ab	2,60 ab	
MnCO ₃ -nano	3,02 b	6,15 b	450,20 a	3,55 b	12,82 a	8,12 ab	1,24 b	13,26 b	4,35 a	2,73 a	2,02 b	
MnCO ₃ -SC	3,10 b	6,44 ab	456,19 a	3,95 ab	13,91 a	9,17 bc	1,28 ab	13,66 b	4,25 a	2,70 a	2,06 b	
CV (%)	5,43	7,76	8,52	9,37	9,02	10,76	10,07	18,06	10,06	9,89	8,07	

Tabela 5. Conteúdo dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea recém-desenvolvida; nos trifólios totalmente expandidos após a aplicação; nos trifólios aplicados e; nas raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V5 (Segunda colheita), 8 dias após a última imersão das folhas (Primeiro experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	Mn	B	Fe	Cu	Zn	Mo	Ca	K	Mg	P	S
	μg planta ⁻¹						mg planta ⁻¹				
Parte aérea recém-desenvolvida											
Mn-Adequado	6,30 a	6,61 a	17,79 a	1,07 a	9,43 a	1,63 a	1,88 a	7,12 a	0,70 a	1,48 a	0,70 a
Mn-Baixo	1,19 b	6,84 a	10,94 a	1,46 a	12,56 a	2,16 a	1,53 a	9,38 a	0,61 a	1,87 a	0,80 a
MnSO ₄	1,11 b	5,94 a	12,86 a	1,26 a	10,85 a	1,82 a	1,39 a	8,19 a	0,60 a	1,69 a	0,79 a
MnCO ₃ -nano	1,03 b	6,57 a	11,74 a	1,38 a	12,25 a	2,16 a	1,37 a	8,81 a	0,62 a	1,80 a	0,82 a
MnCO ₃ -SC	0,90 b	6,55 a	12,46 a	1,41 a	12,24 a	2,09 a	1,38 a	8,60 a	0,62 a	1,73 a	0,76 a
CV (%)	10,58	28,19	34,98	34,11	34,37	37,99	25,66	25,01	35,35	25,16	30,99
Trifólios totalmente expandidos após a aplicação											
Mn-Adequado	61,53 a	33,12 a	178,46 a	6,40 a	38,92 a	9,15 a	26,99 a	38,51 a	4,63 a	5,59 a	4,11 a
Mn-Baixo	5,83 b	20,86 b	51,49 b	5,72 a	38,12 a	5,99 b	20,31 b	35,19 a	2,69 b	4,89 a	2,70 b
MnSO ₄	8,55 b	23,63 ab	70,76 b	6,50 a	42,99 a	6,82 ab	23,02 ab	40,44 a	3,25 b	5,66 a	3,47 ab
MnCO ₃ -nano	6,77 b	21,22 ab	57,37 b	5,88 a	38,42 a	5,65 b	22,30 ab	35,41 a	2,88 b	4,96 a	2,81 ab
MnCO ₃ -SC	6,60 b	23,67 ab	68,72 b	6,60 a	42,82 a	6,45 b	20,84 ab	38,35 a	3,04 b	5,49 a	2,95 ab
CV (%)	8,64	19,29	20,67	18,89	16,15	17,35	13,06	8,33	16,04	15,84	9,01
Trifólios aplicados											
Mn-Adequado	29,79 b	6,67 a	39,57 a	1,93 a	15,45 a	0,74 a	13,56 a	8,04 a	1,65 a	1,03 a	0,77 a
Mn-Baixo	4,28 c	6,28 a	20,89 b	2,27 a	16,85 a	0,76 a	13,68 a	6,66 a	1,44 ab	1,08 a	0,77 a
MnSO ₄	51,43 a	6,33 a	22,69 b	2,13 a	18,25 a	0,81 a	12,45 a	7,48 a	1,32 b	1,07 a	0,72 a
MnCO ₃ -nano	58,78 a	5,94 a	20,12 b	2,10 a	16,12 a	0,70 a	13,16 a	6,35 a	1,36 ab	1,05 a	0,74 a
MnCO ₃ -SC	61,19 a	6,38 a	25,57 b	2,24 a	18,53 a	0,89 a	12,99 a	7,60 a	1,42 ab	1,10 a	0,79 a
CV (%)	5,50	7,65	8,81	12,97	9,99	26,84	11,19	18,20	9,35	12,28	19,01
Raízes											
Mn-Adequado	27,35 a	12,07 a	603,07 a	7,23 a	22,94 a	4,46 a	3,42 ab	47,54 a	7,46 a	4,27 a	8,21 a
Mn-Baixo	4,65 b	9,04 a	589,11 a	6,84 a	18,85 a	13,93 b	2,36 ab	29,27 b	7,76 a	4,44 a	4,40 b
MnSO ₄	5,05 b	9,26 a	587,00 a	6,71 a	18,99 a	12,50 b	2,38 ab	33,73 b	7,53 a	4,44 a	5,23 b
MnCO ₃ -nano	4,64 b	8,86 a	591,77 a	6,78 a	19,03 a	12,90 b	2,27 b	29,32 b	7,67 a	4,45 a	4,23 b
MnCO ₃ -SC	4,23 b	8,46 a	530,29 a	6,03 a	17,36 a	12,32 b	2,09 b	29,77 b	7,06 a	3,81 a	4,75 b
CV (%)	13,08	17,64	9,43	20,53	21,41	10,92	19,49	15,68	13,35	13,27	24,79

Tabela 6. Conteúdo dos micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu, Zn e Mo) e macronutrientes (Ca, K, Mg, P e S) na parte aérea nova; parte aérea velha e; raízes. Plantas de soja coletadas no estágio V8, 10 dias após a última aplicação dos tratamentos por pulverização foliar (Segundo experimento). Médias que apresentam a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Tratamentos	----- $\mu\text{g planta}^{-1}$ -----						----- mg planta^{-1} -----					
	Mn	B	Fe	Cu	Zn	Mo	Ca	K	Mg	P	S	
Parte aérea nova												
Mn-Adequado	10,99 a	14,97 a	84,50 a	2,63 a	16,24 a	2,95 a	3,98 a	10,68 a	1,55 a	2,53 a	1,70 a	
Mn-Baixo	2,17 c	14,82 a	27,53 b	2,67 a	24,66 b	3,45 a	2,88 a	12,49 a	1,21 a	2,86 a	1,38 a	
MnSO ₄	4,15 b	14,96 a	65,51 ab	2,72 a	15,73 a	2,75 a	3,35 a	9,78 a	1,47 a	2,55 a	1,40 a	
MnCO ₃ -nano	1,83 c	16,52 a	54,13 ab	3,04 a	24,83 b	3,96 a	2,45 a	12,92 a	1,45 a	3,11 a	1,51 a	
MnCO ₃ -SC	1,72 c	15,95 a	49,37 ab	3,02 a	22,62 ab	3,82 a	2,43 a	11,81 a	1,40 a	2,86 a	1,41 a	
CV (%)	11,09	17,56	19,17	18,47	17,31	21,56	29,08	19,63	15,42	16,30	23,87	
Parte aérea velha												
Mn-Adequado	211,81 d	202,15 a	951,47 a	42,73 a	195,58 a	49,12 a	128,72 a	178,11 a	24,76 a	23,64 a	17,94 a	
Mn-Baixo	27,93 e	116,15 c	202,29 c	32,87 a	169,24 b	32,77 c	104,91 b	174,64 a	11,67 d	21,77 a	10,38 c	
MnSO ₄	460,83 a	160,60 b	635,45 b	38,91 a	191,14 a	45,13 a	119,32 ab	171,66 a	21,54 b	23,52 a	15,01 b	
MnCO ₃ -nano	222,31 c	121,98 c	372,95 c	31,92 a	181,49 ab	39,16 b	107,80 b	180,44 a	15,14 c	22,79 a	13,56 b	
MnCO ₃ -SC	301,69 b	117,65 c	343,64 c	31,92 a	181,91 ab	38,60 b	100,24 b	167,55 a	14,60 c	21,72 a	12,83 bc	
CV (%)	7,24	5,39	17,79	14,01	5,22	2,21	8,12	3,89	6,75	4,68	9,25	
Raízes												
Mn-Adequado	18,99 a	29,09 a	923,06 ab	8,54 a	22,02 a	4,49 a	5,59 a	44,09 a	6,59 ab	3,42 a	7,90 a	
Mn-Baixo	7,13 c	13,16 c	1026,66 b	6,18 b	12,97 b	12,88 d	2,75 bc	17,91 b	7,82 b	3,90 ab	2,72 b	
MnSO ₄	9,94 b	22,82 b	807,56 a	6,98 b	18,43 a	5,27 ab	4,01 b	36,17 a	6,25 ab	3,11 bc	6,51 a	
MnCO ₃ -nano	7,43 c	14,53 c	829,37 a	6,04 b	12,87 b	9,84 c	2,57 bc	17,88 b	6,19 ab	2,62 cd	3,39 b	
MnCO ₃ -SC	7,23 c	14,51 c	836,17 a	5,79 b	12,91 b	7,51 bc	2,38 c	17,38 b	5,03 a	2,31 d	3,48 b	
CV (%)	6,57	11,38	8,94	8,3	12,11	14,61	20,55	16,30	16,2	9,650	16,03	

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Produtores de soja no Brasil normalmente realizam pulverização foliar com micronutrientes para evitar ou reverter sintomas de deficiências, especialmente em lavouras de alto rendimento cultivadas com variedades transgênicas, que por si só são menos eficientes na absorção de micronutrientes (Mn e Zn) do solo. Em soja, o principal micronutriente utilizado é o manganês, especialmente durante aplicações de glifosato (em soja RR®) para evitar ou reverter sintoma típico de deficiência temporária de Mn conhecido como “yellow fleshing”.

Historicamente, os produtores utilizavam fontes solúveis em água para realizar pulverização foliar com micronutrientes. Isso porque a legislação brasileira de fertilizantes, regulamentada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, somente permitia registro de fertilizantes solúveis em água para adubação foliar. Entretanto, nos últimos anos a indústria de fertilizantes passou a comercializar fontes micronutrientes insolúveis em água, em uma linha de produtos chamada de suspensão concentrada. Devido a restrições na legislação, esses produtos só eram comercializados para aplicação via solo. Porém, a Instrução Normativa N° 39, de 08 de agosto de 2018, da legislação brasileira de fertilizantes, apresenta uma mudança significativa quanto à exigência da solubilidade dos fertilizantes registrados para adubação foliar. O novo texto apresentado na Instrução Normativa segue abaixo:

“II – Para os fertilizantes para aplicação via foliar: teor solúvel em água, para todos os nutrientes dos produtos nesses modos de aplicação, excetuados os casos de produtos com especificação de natureza física suspensão concentrada contendo nutrientes insolúveis em água, quando deve ser garantido o teor total.”

(Instrução Normativa No 39, de 08 de agosto de 2018 ,
Subseção III – Da solubilidade dos nutrientes).

A mudança na legislação brasileira de fertilizantes irá permitir o registro e comercialização de suspensões concentradas para adubação foliar, o que antes não era permitido. Este trabalho foi desenvolvido justamente para esclarecer os mecanismos de absorção, transporte e redistribuição de nutrientes aplicados às folhas de soja, a partir de fonte

solúvel e insolúvel de Mn (suspensão concentrada), com o objetivo final de dar subsídios para a legislação brasileira de fertilizantes quanto ao registro desses produtos para adubação foliar.

Os resultados desta Tese indicam que a aplicação foliar da fonte solúvel (MnSO_4) foi mais efetiva do que a fonte insolúvel (MnCO_3) em relação à absorção, transporte e redistribuição do Mn na soja em condições de campo, casa de vegetação e câmara de crescimento, evidenciado maior disponibilidade para aplicação foliar de fonte de Mn solúvel em água.

Resultados expressivos foram verificados nas plantas de soja cultivadas em solução nutritiva de baixo suprimento de Mn, nas quais os sintomas visuais de deficiência estavam presentes. A utilização da fonte solúvel MnSO_4 foi capaz de reverter os sintomas de deficiência, entretanto o mesmo não foi observado com a utilização de fontes insolúveis de Mn (MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC). A aplicação de MnSO_4 também promoveu aumento na concentração de clorofila, aumento na concentração de carboidratos solúveis e redução na atividade da enzima guaiacol peroxidase, o que não foi observado para as suspensões concentradas.

Apesar do aumento no teor de Mn nas partes da planta tratadas com fontes insolúveis de Mn, o metabolismo da soja não foi influenciado pela aplicação foliar de MnCO_3 -nano e MnCO_3 -SC, demonstrando limitada eficácia de fontes insolúveis de Mn aplicadas via foliar no metabolismo e nutrição das plantas de soja. Os resultados desta Tese indicam que a solubilidade em água é um fator primordial para o registro de fertilizantes foliares, garantindo efetiva absorção, transporte e redistribuição do nutriente aplicado às folhas, assim como sua participação em processos metabólicos da planta.