

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 21/06/2019.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E  
NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA  
DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO  
GRANÍFERO**

**Raimundo Leonardo Lima de Oliveira  
Engenheiro Agrônomo**

**2017**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E  
NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA  
DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO  
GRANÍFERO**

**Raimundo Leonardo Lima de Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

**Coorientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão**

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

**2017**

O48a Oliveira, Raimundo Leonardo Lima de  
Aplicação de silício na fisiologia, na produção e na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em plantas de sorgo granífero / Raimundo Leonardo Lima de Oliveira. -- Jaboticabal, 2017  
iii, 44 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Priscila Lupino Gratão

Banca examinadora: Fábio César da Silva, Rogério Falleiros

Carvalho

Bibliografia

1. Elemento benéfico. 2. Estresse nutricional. 3. Fontes alternativas.  
4. *Sorghum bicolor* L. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.836:633.17

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLÓGIA, NA PRODUÇÃO E NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO GRANÍFERO

**AUTOR: RAIMUNDO LEONARDO LIMA DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Pesquisador Dr. FÁBIO CÉSAR DA SILVA  
Centro Nacional de Pesquisas Tecnológica em Informática para a Agricultura / EMBRAPA / Campinas/SP

Prof. Dr. ROGERIO FALLEIROS CARVALHO  
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 21 de junho de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Raimundo Leonardo Lima de Oliveira nasceu em Capitão Poço – PA, Brasil em 07 de outubro de 1992, filho de Manoel Francisco de Lima e Maria Lídia de Oliveira Lima. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, no Câmpus de Capitão Poço – CCP (2015). Durante a graduação, teve a oportunidade de ser bolsista de iniciação científica e de extensão, desenvolvendo trabalhos na área de produção vegetal e sendo membro do grupo de Estudos em Biodiversidade e Plantas Superiores – EBPS. Foi aluno do curso de mestrado do programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Fez parte do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (GENPLANT), desenvolvendo pesquisas sobre nutrição silicatada em culturas anuais.

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”.

**Claude Lévi-Strauss**

Aos meus queridos pais Maria Lidia de Oliveira Lima e Manoel Francisco de Lima, pelos ensinamentos, dedicação, apoio e, principalmente, pelo exemplo de vida.

**Dedico e Ofereço**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por sempre me iluminar na caminhada terrena.

À minha família, em especial meus pais, irmãos, avós e tios, por todo apoio, incentivo e compreensão para que pudesse alcançar meus objetivos. Meu muito Obrigado!.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), por ter dado a oportunidade para realizar o curso, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

Ao professor Dr. Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e sabedoria. Meu muito Obrigado!.

À professora Dra. Priscila Lupino Gratão, pelos ensinamentos, dedicação e por ter aceitado coorientar-me para tornar este trabalho melhor possível. Meu muito Obrigado!.

Aos professores do curso de mestrado (Renato, Priscila, Arthur, José Carlos, Durvalina e Wadt), com quem tive a oportunidade de aprender um pouco mais durante as disciplinas cursadas. Meu muito Obrigado!.

À Claudinha, técnica do laboratório de Nutrição de Plantas e à Soninha, do laboratório de Fisiologia Vegetal, pelos ensinamentos e gentileza durante a realização das análises. Meu muito Obrigado!.

Ao grupo do GENPLANT, em especial a todos os seus membros com quem tive a oportunidade de conhecer (Guilherme, Gilmara, Thaís, Juliana, Rafael, Cibele, Edilaine, Luiz Cláudio, Cláudio, Cid, Leandro, Jonas, Marcilene, Flávio, Angélica, Rita), pelo compartilhamento de conhecimentos, fundamental para o crescimento profissional. Meu muito Obrigado!.

Ao Guilherme, pela amizade, companheirismo, sabedoria e dedicação durante esta jornada. Meu muito obrigado!.

A todas as pessoas que não foram citadas direta ou indiretamente, com quem tive a oportunidade de conhecer e conviver em determinados momentos em Jaboticabal SP. Meu muito Obrigado!.

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 A cultura do sorgo .....	4
2.2 Silício.....	5
2.3 Manganês.....	6
2.4 Silício na atenuação de estresse por deficiência nutricional .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
3.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo.....	10
3.1.1 Avaliações do experimento I .....	11
3.1.2 Análise estatística .....	13
3.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo.....	13
3.2.1 Avaliações do experimento II .....	14
3.2.2 Análise estatística.....	16
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	Erro! Indicador não definido.
4.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo. ....	17
4.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo.....	27
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## RESUMO

### APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO GRANÍFERO

**RESUMO** - O silicato de potássio é a fonte de silício (Si) mais empregada na aplicação foliar, havendo a necessidade de estudar fontes alternativas, e o papel que esse elemento benéfico pode ter na atenuação de estresses causados pela deficiência nutricional em plantas. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a aplicação de fontes e concentrações de Si foliar, e com a fonte e a concentração escolhida, estudar a atuação do Si na mitigação de estresse por deficiência de manganês em sorgo granífero. Realizaram-se dois experimentos em cultivo hidropônico o experimento I, com aplicação de fontes e concentrações de Si em esquema fatorial 4x4, e no experimento II, a aplicação da fonte e concentração de Si escolhida, em esquema fatorial 3x2, ambos em blocos casualizados com três repetições. Ao final do experimento I, foram realizadas avaliações de crescimento, variáveis fisiológicas, acúmulo de Si na parte aérea e produção de grãos, e no experimento II, foram realizadas avaliações de crescimento, concentrações de malondialdeído, peróxido de hidrogênio, fotossíntese, acúmulo de Si, manganês e eficiência de uso do manganês na parte aérea. A aplicação foliar de fontes alternativas de Si incrementou o acúmulo de Si, refletindo nas trocas gasosas e na produção de grãos das plantas de sorgo. O maior acúmulo de Si, fornecido na forma radicular, mitiga o estresse por deficiência de manganês, devido à diminuição da peroxidação lipídica, favorecendo a fotossíntese e incrementando a matéria seca das plantas. A aplicação foliar das fontes nanossilica, silicato de sódio e potássio estabilizado, e o silicato de potássio na concentração 1,0 g L<sup>-1</sup> de Si é mais indicada, por proporcionar os maiores acúmulos de Si, com incrementos na fisiologia e na produção de grãos, e a aplicação do Si na forma radicular foi mais efetiva que a via foliar na mitigação do estresse por deficiência de manganês, evidenciada pela maior atividade fotossintética, eficiência de uso do manganês e a matéria seca das plantas.

**Palavras-chave:** elemento benéfico, estresse nutricional, fontes alternativas, *Sorghum bicolor* L.

## ABSTRACT

### SILICON APPLICATION IN PHYSIOLOGY, PRODUCTION AND MITIGATION OF STRESS CAUSED BY THE DEFICIENCY OF MANGANESE IN GRANIFERO SORGHUM PLANT

**ABSTRACT** - Potassium silicate is the source of silicon (Si) most used in foliar application, there being a need to study alternative sources, and the role that this beneficial element can play in the attenuation of stress caused by nutritional deficiency in plants. The objective of the present work was to evaluate the application of sources and concentrations of foliar Si, and with the source and concentration chosen, study the performance of Si in the mitigation of stress by manganese deficiency in grain sorghum. Two experiments were carried out in hydroponic cultivation, experiment I, with application of Si sources and concentrations in a 4x4 factorial scheme, and in experiment II, the application of the source and selected Si concentration, in a 3x2 factorial scheme, both in randomized blocks with three replicates. At the end of experiment I, were realized growth evaluations, physiological variables, Si accumulation in aerial part and grain production were performed, and in experiment II, were realized growth evaluations, concentrations of malondialdehyde, hydrogen peroxide, photosynthesis, Si accumulation, manganese and efficiency of manganese in aerial part. Foliar application of alternative sources of Si increased the accumulation of Si, reflecting the gas exchange and grain yield of sorghum plants. The greater accumulation of Si, provided in the form root, mitigate stress manganese deficiency, due to the decrease of lipid peroxidation, favoring photosynthesis and increasing the dry matter of the plants. Foliar application from sources nanosilica, stabilized sodium and potassium silicate, and potassium silicate at the concentration  $1,0 \text{ g L}^{-1}$  of Si is more indicated per providing the largest accumulations of Si with increases in physiology and in the production of grains, and the application of Si in the root form was more effective than the foliar route in the mitigation of stress per manganese deficiency, evidenced by the greater photosynthetic activity, manganese use efficiency and the dry matter of the plants.

**Keywords:** beneficial element, nutritional stress, alternative sources, *Sorghum bicolor* L.

## 1 INTRODUÇÃO

O silício é comumente encontrado em tecidos vegetais, considerado um elemento benéfico às plantas. O silício é absorvido na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), podendo ser ativa ou passivamente (LIANG et al., 2006; HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014). Esse elemento pode contribuir para a melhoria da capacidade produtiva dos cultivos, amenizando diferentes estresses, seja abiótico, seja biótico (CHEN et al., 2011; ENDRES; MARAFON, 2013), especialmente em espécies acumuladoras como o sorgo.

O conhecimento da fonte de silício adequada para a nutrição foliar do sorgo é importante, para avançar nos estudos enfocando os benefícios do elemento benéfico na mitigação de estresses, especialmente abióticos, que apresentam importância agrônômica. Portanto, um grande problema na agricultura tropical é a deficiência de manganês, dado o baixo teor do elemento nos solos, devido ao alto valor do pH, dado a práticas agrícolas inadequadas, causadas pelo excesso de calcário na camada superficial do solo (PRADO, 2008).

Atualmente, um dos grandes desafios da adubação silicatada é a utilização de fontes que possam ser mais eficientes no fornecimento de ácido monossilícico, atendendo às necessidades da planta, especialmente a via foliar, que exige fontes altamente solúveis e estáveis. A fonte de silício mais estudada para nutrição silicatada nas diversas culturas é o silicato de potássio, com pH próximo a 11, mas por não ser uma fonte estabilizada, para prevenir a polimerização do ácido silícico, torna-se assim, necessário conhecer fontes alternativas e estabilizadas que possam ter maior eficiência agrônômica no fornecimento de silício, ampliando os benefícios do elemento benéfico na agricultura.

Entre as fontes alternativas inovadoras para o fornecimento de silício para as plantas, destaca-se a fonte denominada de ácido silícico estabilizado, com pH menor que 3,0, pois quando diluída em água, estaria na forma prontamente para ser absorvida pela planta, favorecendo a absorção, além de não ter a necessidade de utilizar altas concentrações de silício. Em estudos com a fonte ácido silícico estabilizado, conduzidos por Soratto et al. (2012), eles observaram que a aplicação

foliar de silício incrementou em 26% a produção de grãos de trigo, em comparação com o tratamento controle. O silicato de sódio e de potássio, estabilizado com pH próximo a 11, é outra fonte inovadora e intermediária de fornecimento de silício às plantas. Essa fonte de silício está sendo desenvolvida na UNESP, e ainda não existem relatos do efeito agrônômico desta fonte, nas culturas agrícolas.

Com o advento da nanotecnologia e o surgimento dos nanomateriais, a nanossílica passou a ser uma fonte alternativa e inovadora para o fornecimento de silício às plantas. Trata-se de um dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) nanoparticulado, que devido ao tamanho reduzido de 4,0 nm, pode ser absorvido, proporcionando benefícios na fisiologia e na produção das plantas (YUVAKKUMAR et al., 2011; SURIYAPRABHA et al., 2013). Estudos indicaram que a aplicação de doses de nanossílica em solo pôde proporcionar melhor crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, além de aumentar as trocas gasosas, a condutância estomática e a taxa líquida de fotossíntese (XIE et al., 2012).

A mitigação dos efeitos da deficiência de manganês em plantas pelo silício é pouco estudada na literatura, tampouco os mecanismos de mitigação. Portanto, ainda não existem relatos sobre os estudos envolvendo especificamente esse tema para a cultura do sorgo.

Sabe-se que a deficiência de manganês proporciona estresse oxidativo nas plantas, pelo aumento da concentração de peróxido de hidrogênio e malondialdeído, um indicador da peroxidação lipídica (ZHAO et al., 2014). Diante disso, o silício pode atuar no sistema antioxidante das plantas, aumentando a atividade de enzimas, como superóxido dismutase (SOD), que atuam eliminando o excesso de espécies reativas de oxigênio que se formam em condição estressante na planta (MIAO; HAN; ZANG, 2010).

As gramíneas, em especial o sorgo, pelo fato de serem acumuladoras de silício, apresentam alta habilidade na absorção do elemento benéfico via radicular, o que, possivelmente pode apresentar maior efeito do silício na mitigação de estresse por deficiência nutricional em plantas, como observado nos estudos realizados por Pavlovic et al. (2013), em pepino, com a omissão do elemento ferro.

Diante do exposto, é pertinente testar as hipóteses: A aplicação foliar com fontes alternativas e concentrações de silício, comparada ao silicato de potássio,

pode promover incrementos na absorção do elemento, com reflexos na fisiologia e na produção. A aplicação de silício em plantas de sorgo, cultivadas na ausência de manganês, mitiga o estresse promovido pela deficiência do nutriente, e a aplicação via radicular pode ser mais efetiva na mitigação do estresse que a via foliar.

Os resultados da diminuição da área foliar e da matéria seca reforçam o que foi observado nos trabalhos de Malavolta (1977), na cultura do sorgo, onde os autores afirmaram que a deficiência de manganês afeta a fisiologia da planta. A deficiência de manganês, pelo fato de promover clorose entre as nervuras das folhas, induz menor crescimento da área foliar, que afeta a fotossíntese e, conseqüentemente diminui a produção de matéria seca das plantas (VELOSO et al., 1995). A redução bastante acentuada da matéria seca, nas plantas deficientes sem manganês, sem silício ou mesmo com o silício fornecido foliar, foi reflexo do menor acúmulo de silício e da eficiência de uso do micronutriente, cloroses em maior evidência, menor área foliar que afetou a atividade fotossintética, demonstrando o potencial da deficiência do manganês, em afetar a fotossíntese e os parâmetros de crescimento da planta.

O papel do silício fornecido na planta de sorgo, especialmente fornecido via radicular, em mitigar o estresse por deficiência de manganês, deve-se a diminuição da concentração de  $H_2O_2$  e MDA foliar, favorecendo a fotossíntese, refletindo na melhoria da eficiência de uso de manganês pela planta e induzindo incremento da produção de matéria seca.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta physiologiae plantarum**, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014.

AHMED, M.; HASSEN, FU.; QADEER, U.; ASLAM, MA. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, p. 594-607, 2011.

ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.

ANDRADE, F. A.; ANDRADE, C. G.; MIGLIORANZA, E. Detecção de sílica em folha bandeira de trigo. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 33, p. 2555-2562, 2012.

BARBOSA, J. C.; JÚNIOR, W. M. Experimentação Agronômica & AgroEstat: Sistema para Análises Estatísticas de Ensaio Agronômicos. Jaboticabal: Gráficas Multipress Ltda, 2016. 396p.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, **Instituto Agrônomo**. p. 48, Boletim técnico, v. 78, 1983.

BITYUTSKII, N.; PAVLOVIC, J.; YAKKONEN, K.; MAKSIMOVIĆ, V.; NIKOLIC, M. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 74, p. 205-211, 2014.

BOKOR, B.; VACULÍK, M.; SLOVÁKOVÁ, L.; MASAROVIC, D.; LUX, A. Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 3, p. 733-743, 2014.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária Mapa/ACS, 2009. p.399.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Nature**, v. 6, p.1-14, 2016.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, A. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological trace element research**, v. 142, n. 1, p. 67-76, 2011.

CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S.; COSTA, C. H.; NETO, J. F. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404, 2013.

CUNHA, R. A. **Efeito de adjuvantes sobre absorção de zinco e manganês na adubação foliar**. 59f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, Jataí, 2009.

DRAGICIS MAKSIMOVIĆ, J.; BOGDANOVIC, J.; MAKSIMOVIĆ, V.; NOKOLIC, M. Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, n. 6, p. 739-744, 2007.

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.

FAO. **A economia do sorgo e milho no mundo: fatos, tendências e perspectivas**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/W1808S/w1808s02.htm>>. Acesso: 23 Mar. 2017.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, v. 123, p. 521-530, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FIGUEIREDO, F. C.; BOTREL, P. P.; TEIXEIRA, C. P.; PETRAZZINI, L. L.; LOCARNO, M.; CARVALHO, J. G. D. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência agrotecnologia** v. 34, n. 5, p. 1306-1311, 2010.

FILHO, I. A. P.; RODRIGUES, J. A. S. **Sorgo: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015, p. 327.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; GONDIM, A. R. O. Crescimento e nutrição do sorgo (cv. BRS 304) em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, p.113-124, 2008.

FRANCO, A. A. N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 74f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2011.

FÜHR, H.; GÖTZE, S.; SPECHT, A.; ERBAN, A.; GALLIEN, S.; HEINTZ, D.; HORST, W. J. Characterization of leaf apoplastic peroxidases and metabolites in *Vigna unguiculata* in response to toxic manganese supply and silicon. **Journal of experimental botany**, v. 60, n. 6, p. 1663-1678, 2009.

GALVEZ, L.; CLARK, R. B.; GOURLEY, L. M.; MARANVILLE, J. W. Effects of silicon on mineral composition of sorghum grown with excess manganese. **Journal of plant nutrition**, v. 12, n. 5, p. 547-561, 1989.

GOMES, C. F.; MARCHETTI, M. E.; NOVELINO, J. O.; MAUAD, M.; ALOVISI, A. M. T. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 531-538, 2011.

GERAMI, M.; RAMEEH, V. Study of silicon and nitrogen effects on yield components and shoot ions nutrient composition in rice. **Agriculture**, v. 58, p. 93-98, 2012.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

GONG, X.; WANG, Y.; LIU, C.; WANG, S.; ZHAO, X.; ZHOU, M.; HONG, F. Effects of manganese deficiency on spectral characteristics and oxygen evolution in maize chloroplasts. **Biological trace element research**, v. 136, n. 3, p. 372-382, 2010.

GONG, X.; HONG, M.; WANG, Y.; ZHOU, M.; CAI, J.; LIU, C.; HONG, F. Cerium relieves the inhibition of photosynthesis of maize caused by manganese deficiency. **Biological trace element research**, v. 141, n. 1-3, p. 305-316, 2011.

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594, 2012.

GONZALO, M. J.; LUCENA, J. J.; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant physiology and biochemistry**, v. 70, p. 455-461, 2013.

GOUSSIAS, C.; BOUSSAC, A.; RUTHERFORD, A. W. Photosystem II and photosynthetic oxidation of water: an overview. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 357, n. 1426, p. 1369-1381, 2002.

GRATAO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; PIOTTO, F. A.; PERES, L. E.; AZEVEDO, R. A. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 56, p. 79-96, 2012.

HAN, Y.; LI, P.; GONG, S.; YANG, L.; WEN, L.; HOU, M. Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. **PLoS one**, v. 11, n. 4, p. 11-14, 2016.

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

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants a review. **Planta**, v. 240, p. 447-458, 2014.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley: **California Agricultural Experimental Station**, 1950, 347p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de dados**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso: 31 Jan. 2017.

JANMOHAMMADI, M.; SABAGHNIYA, N. Effect of pre-sowing seed treatments with silicon nanoparticles on germinability of sunflower (*Helianthus annuus*). **Botanica Lithuanica**, v. 2, p. 13-21, 2015.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações agrônômicas**, v. 118, n. 2, p. 1-24, 2007. Disponível em: <[www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/.../\\$FILE/Encarte-118.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/.../$FILE/Encarte-118.pdf)>. Acesso: 11 Fev. 2017.

KOCHANOVÁ, Z.; JAŠKOVÁ, K.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biologia**, v. 69, p. 1164-1171, 2014.

KORNDORFER, G. H. **Uso do Silício na agricultura**, 2017. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Efeitos/Efeitos.htm>>. Acesso: 16 Jan. 2017.

KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizantes. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004. 34 p. (Boletim técnico, n. 2).

KORNDORFER, G. H. Eficiência do silício como corretivo de solo. **Revista Campo e Negócios**, Uberlândia, ano 4, n. 42, p. 84-85, 2006.

LANA, R. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H.; ZANÃO-JÚNIOR, L. A.; SILVA, A. F. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. **Bioscience Journal**, v. 19, n. 2, p. 15-20, 2003.

LI, P.; SONG, A.; LI, Z.; FAN, F.; LIANG, Y. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, v. 354, p. 407–419, 2012.

LIANG, Y. C.; YANG, C. G.; SHI, H. H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 229-243, 2001.

LIANG, Y. C.; HUA, H.; ZHU, Y.; CHENG, C.; RÖMHELD, V. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. **New Phytologist**, v. 172, n. 1, p. 63-72, 2006.

LIU, C.; WEI, L.; ZHANG, S.; XU, X.; LI, F. Effects of nanoscale silica sol foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress. **RSC Advances**, v. 4, n. 100, p. 57227-57234, 2014.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: *Silicon in Agriculture*. Edited by DATNOFF, L. E., KORNDÖRFER, G. H., SNYDER, G. New York: Elsevier science. 2001. p. 17-39.

MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; YANO, M. A silicon transporter in rice. **Nature**, v. 440, n. 7084, p. 688-691, 2006.

MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; PESSARAKLI, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 7, p. 1001-1015, 2016.

MAKSIMOVIĆ, J. D.; MOJOVIĆ, M.; MAKSIMOVIĆ, V.; RÖMHELD, V.; NIKOLIC, M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 7, p. 2411-2420, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 319p, 1997.

MALAVOLTA, E.; ACCORSI, W. R.; OLIVEIRA, G. D.; SILVA, A. Q.; SILVA, H.; QUEIROGA, E. G.; ASSIS, V. L. Estudos sobre a nutrição mineral do sorgo granífero: efeitos das deficiências de micronutrientes. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 34, p. 347-352, 1977.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. "Silicon: fertilization and nutrition in higher plants," Amazonian. **Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 4, p. 380-388, 2013.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 889.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; GRASSI FILHO, H. Produção de massa seca e nutrição de cultivares de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 939-948, 2011.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of botany**, v. 63, p. 1-7, 2010.

MILLALEO, R.; REYESDIAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, E. 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.

MUNEER, S.; JEONG, B. R. Silicon Decreases Fe Deficiency Responses by Improving Photosynthesis and Maintaining Composition of Thylakoid Multiprotein Complex Proteins in Soybean Plants (*Glycine max* L.). **Journal of plant growth regulation**, v. 34, n. 3, p. 485-498, 2015.

OLIVEIRA, R. S.; CANUTO, D. M. F. Absorção de silício pelo sorgo em neossolo quartzarênico adubado com sílica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 40-49, 2016.

PAVLOVIC, J.; SAMARDZIC, J.; MAKSIMOVIĆ, V.; TIMOTIJEVIC, G.; STEVIC, N.; LAURSEN, K. H.; NIKOLIC, M. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. **New Phytologist**, v. 198, n. 4, p. 1096-1107, 2013.

PRADO, R. M. **Nutrição de Plantas**. São Paulo. UNESP, 2008. p. 245.

PULZ, A. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

RAMOS, A. R. P.; SANTOS, R. L.; AMARO, A. C. E.; FUMES, L. A. A.; BOARO, C. S. F.; CARDOSO, A. I. I. Eficiência do silicato de potássio no controle do oídio e no desenvolvimento de abobrinha de moita. **Horticultura Brasileira**, v. 31, p. 432-438, 2013.

SAIDI, M. N.; JBIR, R.; GHORBEL, I.; NAMSI, A.; DRIRA, N.; GARGOURI-BOUZID, R. Brittle leaf disease induces an oxidative stress and decreases the expression of manganese-related genes in date palm (*Phoenix dactylifera* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 50, p. 1-7, 2012.

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.

SHARMA, C. P.; SHARMA, P. N.; CHATTERJEE, C.; AGARWALA, S. C. Manganese deficiency in maize affects pollen. **Plant and Soil**, v. 138, n. 1, p. 139-142, 1991.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilisation efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289-302, 1981.

STICKLER, F. C.; WEARDEN, S.; PAULI, A. W. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, v. 53, n. 3, p. 187-188, 1961.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; NETO, J. F. Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, n. 5, p. 1538-1544, 2012.

SOUSA, J. V.; RODRIGUES, C. R.; LUZ, J. M. Q.; CARVALHO, P. C.; RODRIGUES, T. M.; BRITO, C. H. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 4, p. 502-513, 2010.

SURIYAPRABHA, R.; KARUNAKARAN, G.; YUVAKKUMAR, R.; PRABU, P.; RAJENDRAN, V.; KANNAN, N. Application of silica nanoparticles for increased silica availability in maize. **AIP Conference Proceedings**, v. 1512, n. 1, p. 424-425, 2013.

TEWARI, R. K.; KUMAR, P.; SHARMA, P. D. Oxidative stress and antioxidant responses of mulberry (*Morus alba*) plants subjected to deficiency and excess of manganese. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, n. 12, p. 3345-3356, 2013.

VELOSO, C.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E.; CARVALHO, J. G. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 2, p. 376-383, 1995.

XIE, Y.; LI, B.; ZHANG, Q.; ZHANG, C. Effects of nano-silicon dioxide on photosynthetic fluorescence characteristics of *Indocalamus barbatus* McClure. **Journal of Nanjing Forestry University**, v. 2, p. 59-63, 2012.

ZANETTI, L. V. **Efeitos da pulverização foliar com silício na tolerância de *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) ao déficit hídrico**. 2013. 60f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Vitória, 2013.

ZHAO, H. Q.; WANG, L.; HONG, J.; ZHAO, X. Y.; YU, X. H.; SHENG, L.; HONG, F. S. Oxidative stress of maize roots caused by a combination of both salt stress and manganese deprivation. **Cereal Research Communications**, v. 42, n. 4, p. 568-577, 2014.

ZHU, Y. X.; XU, X. B.; HU, Y. H.; HAN, W. H.; YIN, J. L.; LI, H. L.; GONG, H. J. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant cell reports**, v. 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015.

YUVAKKUMAR, R.; ELANGO, V.; RAJENDRAN, V.; KANNAN, N. S.; PRABU, P. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). **International Journal of Green Nanotechnology**, v. 3, n. 3, p. 180-190, 2011.