

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

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE  
SILÍCIO É VIÁVEL PARA PLANTAS DE MILHO E DE SORGO**

**Kamilla Silva Oliveira  
Engenheira Agrônoma**

**2019**

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

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE  
SILÍCIO É VIÁVEL PARA PLANTAS DE MILHO E DE SORGO**

**Kamilla Silva Oliveira**

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

**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).**

**2019**

O48p

Oliveira, Kamilla Silva

Pulverização foliar de manganês com adição de silício é viável para plantas de milho e de sorgo / Kamilla Silva Oliveira. -- Jaboticabal, 2019

49 p. : il., fotos

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

Orientador: Renato de Mello Prado

1. Zea mays. 2. Sorghum bicolor. 3. deficiência. 4. Mn. 5. elemento benéfico. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE SILÍCIO É VIÁVEL PARA PLANTAS DE MILHO E DE SORGO**

**AUTORA: KAMILLA SILVA OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

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

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

*Anelisa de Aquino Vidal Lacerda Soares*  
Pesquisadora Dra. ANELISA DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES  
Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento(UPD)-APTA / Marília/SP

*Jairo Osvaldo Cazetta*  
Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA  
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 06 de março de 2019

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Kamilla Silva Oliveira, nasceu na cidade de Imperatriz, MA, em 24 de maio de 1992, filha de Marlene Rodrigues da Silva e Joseilson Almeida de Oliveira. Possui título de Engenheira Agrônoma (2017) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, campus Araguatins. Nesta instituição foi voluntária de 2011 a 2016 e bolsista de iniciação científica 2013 a 2016, onde realizou trabalhos nas áreas de Nutrição de plantas, Fertilidade do Solo e Sensoriamento Remoto e, ainda, programas de docência, sendo monitora de Bioquímica. Foi ainda, bolsista de Graduação Sanduíche em Toulouse, França, de setembro de 2012 a setembro de 2013 onde cursou dois semestres de Agronomia na École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (INP-ENSAT) e foi estagiária por um mês no Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) na área de Fitopatologia, acompanhando pesquisa dentro do Laboratoire Interactions Plantes Micro-organismes (LIPM). Em agosto de 2017 ingressou no mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Jaboticabal, com orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado e atualmente compõe o Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GENPLANT).

“Nada te perturbe, nada te espante. Tudo passa,  
a paciência tudo alcança. A quem tem Deus,  
nada falta. Só Deus basta”.

Oração de Santa Teresa D'Ávila

À minha família, minha mãe Marlene Rodrigues da Silva, meu pai (*in memoriam*) Joseilson Almeida de Oliveira e minhas irmãs Kananda e Karoline, pelo afeto, amor, apoio e força em todos os momentos.

**Dedico e ofereço**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, Aquele que sempre me deu forças, por meio de suas palavras na Bíblia, e em todos os momentos através do seu agir em minha vida.

À minha família, minha mãe Marlene Rodrigues da Silva, meu pai Joseilson Almeida de Oliveira (*in memoriam*) e minhas irmãs Kananda e Karoline por toda força, apoio, fé em mim e ajuda, em tudo que foi possível durante todo esse período e toda minha vida.

Ao meu amor, Leandro Guimarães Maranhá, por ser tão companheiro, compreensivo e dar-me forças em todos os momentos de dificuldade, pelo amor e carinho de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela confiança, disponibilidade, paciência, e, por todos os ensinamentos repassados de forma tão humilde e valiosa para meu crescimento durante o período do mestrado.

À Unesp Jaboticabal, pelo acolhimento e por proporcionar momentos de crescimento e evolução pessoal e profissional.

Aos professores, Dr. Arthur Bernardes, Dr<sup>a</sup> Mara Cristina, Dr. Pedro Luís, e Dr. José Carlos Barbosa por favorecerem meu crescimento na profissão, cedendo ensinamentos valiosos sobre Agronomia nos mais variados campos.

Aos meus companheiros do grupo GENPLANT da Unesp, Marcilene dos Santos, Gelza Carliane, Márcia Masson, Edilaine Traspadino, Guilherme Felisberto, Rafael Barreto, Victor Guedes, Antônio Buchelt, Jonas Pereira, Alexander e Dilier, os quais dividiram aprendizados e descobertas de suas pesquisas para benefício e desenvolvimento de todos.

Aos amigos que pude conhecer na Unesp em Jaboticabal, Bruno Souza, Sabrina Nascimento, Isaías dos Santos, Diego Sodre, Antônio Márcio, Laura Carvalho, Igor Mateus, Fernando e Adailza que fizeram os dias serem mais descontraídos e leves.

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

**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Importância do manganês para as plantas.....	2
2.2 Importância da pulverização foliar de Mn nas culturas do milho e do sorgo 4	
2.3 Silício na mitigação de estresse em plantas.....	6
2.4 Interação Si e Mn .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
3.1 Experimentos com milho e sorgo .....	10
3.1.1 Condições de crescimento e delineamento experimental.....	10
3.1.2 Variáveis analisadas .....	13
3.1.3 Análise estatística .....	15
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>16</b>
4.1 Experimento com milho .....	16
4.2 Experimento com sorgo.....	23
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
5.1 Experimentos com milho e sorgo .....	26
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>29</b>

## PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE SILÍCIO É VIÁVEL PARA PLANTAS DE MILHO E DE SORGO

**RESUMO** - A pulverização foliar de manganês (Mn) é amplamente utilizada em cultivos anuais dada a deficiência do micronutriente no solo. A adição de silício (Si) na calda com o Mn poderia favorecer aspectos fisiológicos e nutricionais e a produção de plantas de milho e sorgo. Objetivou-se avaliar os efeitos do Mn e Si fornecidos via pulverização foliar na nutrição foliar de plantas de milho e de sorgo sob deficiência de Mn. Foram desenvolvidos dois experimentos, um com a cultura do milho (experimento milho) em casa de vegetação e outro com a cultura do sorgo granífero (experimento sorgo) em sala climatizada. O experimento milho foi composto de arranjo fatorial 4x2, sendo concentrações de Mn 0,0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L<sup>-1</sup> na ausência e presença de Si (0,476 g L<sup>-1</sup> de Si) aplicados via foliar no estágio V4 e V6. O experimento sorgo foi realizado em arranjo fatorial 4x2 com concentrações de Mn 0,0; 0,17; 0,34 e 0,51 g L<sup>-1</sup> na ausência e presença de Si (0,476 g L<sup>-1</sup> de Si) aplicados via foliar no estágio V4 e V6. Em ambos os experimentos avaliaram-se variáveis fisiológicas e de produção de massa seca para verificar efeito do Si e Mn na nutrição das plantas. A pulverização foliar de Mn com adição de Si na calda incrementou o acúmulo do micronutriente, o índice relativo de clorofila, a eficiência quântica do FSII, a eficiência do uso da água e refletiu na produção de massa seca das plantas de milho e sorgo. A pulverização foliar de Mn com adição de Si na calda é viável para as plantas de milho e de sorgo.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, deficiência, Mn, elemento benéfico, fotossíntese

## FOLIAR SPRAYING OF MANGANESE WITH SILICON ADDITION IS VIABLE FOR MAIZE AND SORGHUM PLANTS

**ABSTRACT** - Foliar spraying of manganese (Mn) is widely used in annual crops due to micronutrient deficiency in the soil. The addition of silicon (Si) in the application liquid with Mn could favor physiological and nutritional aspects and the production of maize and sorghum plants. The objective of this study was to evaluate the effects of Mn and Si supplied by foliar spraying on leaf nutrition of maize and sorghum plants under Mn deficiency. Two experiments were carried out, one with maize (corn experiment) in greenhouse and the other with sorghum (sorghum experiment) in climatized room. The corn experiment was composed of factorial arrangement 4x2, with concentrations of Mn 0,0; 0.29; 0.58 and 0.87 g L<sup>-1</sup> in the absence and presence of Si (0.476 g L<sup>-1</sup> of Si) applied via leaf in stage V4 and V6. The sorghum experiment was performed in a 4x2 factorial arrangement with concentrations of Mn 0,0; 0.17; 0.34 and 0.51 g L<sup>-1</sup> in the absence and presence of Si (0.476 g L<sup>-1</sup> of Si) applied via foliar in stage V4 and V6. In both experiments were evaluated the physiological and dry mass production variables to verify the effect of Si and Mn on plant nutrition. Foliar spraying of Mn with addition of Si in application liquid increased micronutrient accumulation, relative chlorophyll index, FSII quantum efficiency, water use efficiency, and reflected in the dry mass production of corn and sorghum plants. Foliar spraying of Mn with addition of Si in application liquid is viable for maize and sorghum plants.

**Keywords:** *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, deficiency, Mn, beneficial element, photosynthesis

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Temperatura e umidade máxima e mínima do ar da casa de vegetação (A) e da sala climatizada (B) durante o período de desenvolvimento dos experimentos nas culturas do milho e do sorgo ..... 12
- Figura 2.** Acúmulo de Mn e Si em folhas pulverizadas (FP) (A e D, respectivamente), folhas não pulverizadas (FNP) com Mn(B e E, respectivamente) e na parte aérea (C e F, respectivamente) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar ..... 17
- Figura 3.** Índice relativo de clorofila (A), eficiência quântica do Fotossistema II (Fv/Fm) (B), taxa fotossintética máxima (Amax) (C), eficiência do uso da água (D) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar..... 19
- Figura 4.** Foto de plantas de milho deficientes de Mn que receberam pulverização somente de água (ausência de Si) (A) e com presença de Si na calda (0,476 g L<sup>-1</sup>) (B). .....20
- Figura 5.** Altura (A), diâmetro do colmo (B), produção de massa seca de folhas pulverizadas (FP) (C), folhas não pulverizadas (FNP) (D) e parte aérea (E) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. ....22
- Figura 6.** Acúmulo de Mn (A) e Si (B) na parte aérea de plantas de sorgo em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar.....23
- Figura 7.** Índice de extravasamento de eletrólitos (A), índice relativo de clorofila (B) e eficiência quântica do Fotossistema II (C), altura (D) e massa seca da parte aérea (E) de plantas de sorgo em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar.....25

## 1 INTRODUÇÃO

A deficiência de manganês (Mn) é frequente nos diferentes solos do mundo naturalmente alcalinos ou que receberam aplicação excessiva de calcário (Mousavi et al., 2011), associado ou não com incorporação inadequada do material corretivo ao solo (Resende, 2005). Além disso, com o cultivo intenso de áreas agrícolas e o uso de adubos formulados com baixa concentração de micronutrientes tem intensificado o aparecimento de deficiência nas culturas agrícolas (Felisberto, 2018).

Os prejuízos relacionados à deficiência de Mn no desempenho das plantas se devem à seu papel importante em processos metabólicos de oxirredução, como os que ocorrem no transporte de elétrons na fotossíntese (Mousavi et al., 2011) e é cofator enzimático, estando envolvido na biossíntese de clorofila, aminoácidos aromáticos, lignina e flavonoides (Lidon et al., 2004).

Em condições de deficiência de Mn, outros elementos químicos poderiam potencializar seus efeitos biológicos nas plantas, a exemplo do Si. Atualmente o Si tem se destacado como mitigador de diferentes estresses nos vegetais (Liang et al., 2007) e recentemente foi atribuído ao efeito mitigador de deficiência nutricional. Em plantas sob deficiência nutricional o efeito do Si contribui com alguns mecanismos: desaceleração da degradação da clorofila, proteção estrutural das membranas do cloroplasto, deposição de sílica em paredes celulares que mantém as folhas eretas melhorando a interceptação de luz, estimulando a fotossíntese (Gonzalo et al., 2013) e incrementando a redistribuição de micronutrientes (Bityutskii et al., 2014).

Em áreas sob deficiência de Mn é amplamente utilizada a pulverização foliar do micronutriente em cultivos anuais como milho e sorgo. E como tem indicativos que o Si aumenta a produção de clorofila e/ou evita sua degradação, pode favorecer os processos fisiológicos como eficiência do FSII, aumento da taxa fotossintética e potencialização do sistema antioxidante (Cao et al., 2015; Gong et al., 2012; Sousa et al., 2010; Barreto et al., 2017; Oliveira, 2017) assim como o Mn, podendo haver efeito sinérgico entre esses dois elementos. Assim, pode ser possível diminuir a concentração de Mn na calda com adição de Si sem haver perda no crescimento da planta. Um estudo em plantas de arroz indicou relação benéfica da pulverização

foliar de Mn (5 ppm) e depois de Si (50 ppm) na produção da cultura (Timotiwu et al., 2017).

É importante diminuir as pulverizações nos cultivos aplicando juntos o Mn e o Si. Para viabilizar o uso do Mn junto com Si, é necessário evitar reações de polimerização do elemento benéfico com cátions em solução. Os cátions em solução podem reagir com Si e formar silicatos pouco solúveis (Lindsay, 1979). Para isso, é importante formular calda com Mn e Si desde que o micronutriente esteja na forma de quelato e com adição de estabilizantes, diminuindo riscos de polimerização e possibilitar nutrição da planta. Portanto, pesquisas que possam indicar viabilidade de uso do Si associado com Mn deve ampliar o emprego do elemento benéfico em pulverização foliar nos cultivos anuais.

Posto isto, a hipótese que surge é que a pulverização foliar de Mn com Si em relação à sua ausência é viável por: incrementar o teor de clorofila, a fotossíntese, a eficiência quântica do FSII e a produção de massa seca de plantas de milho e de sorgo.

Com isso, objetivou-se avaliar os efeitos do Mn e Si fornecidos via pulverização foliar na nutrição foliar de plantas de milho e de sorgo sob deficiência de Mn.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Importância do manganês para as plantas**

O manganês (Mn) é um micronutriente, pois, desempenha importantes papéis em diferentes processos vitais. No metabolismo vegetal o Mn pode atuar tanto como nutriente quanto elemento tóxico, dependendo apenas dos teores disponíveis nos tecidos.

O Mn é absorvido pelas plantas na forma de íon ( $Mn^{2+}$ ), no entanto, dentro das células vegetais, o íon bivalente pode ser facilmente convertido nas formas trivalente ( $Mn^{3+}$ ) ou tetravalente ( $Mn^{4+}$ ). Esta característica permite ao Mn desempenhar importante função em processos metabólicos de oxirredução, como os que ocorrem no transporte de elétrons na fotossíntese (Mousavi et al., 2011). De

acordo com Millaleo et al. (2010), a principal função do Mn na fotossíntese está relacionada ao sistema de fotoxidação da água no Fotossistema II (FSII). Na fotólise da água, um grupo de quatro átomos de Mn (Agrupamento de Mn) é associado ao complexo de liberação de oxigênio ligado ao centro de reação da proteína (D1) do FSII. O Agrupamento de Mn no PSII acumula quatro cargas positivas que são utilizadas para oxidar duas moléculas de água, liberando uma molécula de O<sub>2</sub> e quatro prótons. Ele ainda é cofator da enzima SOD (Superóxido Dismutase), responsável pela eliminação dos radicais livres presentes, atuando como defensor contra o estresse oxidativo, que são prejudiciais às plantas (Millaleo et al., 2010).

O Mn também possui outras funções nas plantas, das quais pode ser citada a atuação como cofator enzimático, sendo responsável pela ativação de mais de 35 diferentes enzimas envolvidas em reações de oxidação, carboxilação, metabolismo de carboidratos, reações com fósforo e no ciclo do ácido cítrico (Mousavi et al., 2011); participação na síntese de ATP (Pfeffer et al., 1986); reações de carboxilação na RuBP (Houtz et al., 1988); biossíntese de ácidos graxos, acil-lipídios e proteínas (Ness e Woolhouse, 1980); biossíntese de clorofila, aminoácidos aromáticos, lignina e flavonoides (Lidon et al., 2004) e; assimilação do nitrato (Ducic e Polle, 2005).

Apesar do Mn atuar em vários processos metabólicos nas plantas, principalmente ligados a fotossíntese, a deficiência sem sintomas visuais é frequentemente encontrada nas plantas, a qual se dá o nome de “fome oculta”, dificultando o diagnóstico e restringindo a produtividade (Schmidt et al., 2016). As plantas sob deficiência de Mn apresentam danos na transferência de elétrons, causando estresses oxidativos nas células, levando-as a degradação, ocasionando danos no Fotossistema II e demais células. Com isso, as plantas diminuem a eficiência de outros recursos (Maarschalkerweerd e Husted, 2015), como por exemplo, diminuição na eficiência do uso da água (Schmidt et al., 2016). A eficiência do uso da água é afetada devido plantas deficientes apresentarem a camada de cera cuticular degradada, ocasionando maior transpiração e perda de água de forma ineficiente, podendo diminuir a tolerância das plantas as variações nos níveis de água do solo (Hebbern et al., 2009).

O principal sintoma da deficiência de Mn é o aparecimento da clorose internerval nas folhas jovens devido a sua baixa mobilidade (Velooso et al., 1995) que

diminui drasticamente a mobilização do nutriente de folhas mais velhas para as mais novas (Loneragan, 1988). Além disso, baixos teores de Mn nas plantas em geral, diminuem a taxa fotossintética e os teores de clorofila (Saidi et al., 2012).

Outro efeito da deficiência de Mn é um dano causado ao FSII, representado por baixos valores de fluorescência da clorofila (Fv/Fm), demonstrando indiretamente, diminuição do desempenho fotossintético. Isso ocorre pelo menor número de elétrons passando pelos fotossistemas (baixo Fm) e o aumento da fotoinibição de FSII (alto F0) (Schmidt et al., 2016). No entanto, segundo os mesmos autores, a correção da deficiência de Mn a partir de aplicações foliares do nutriente, podem reverter de forma significativa os danos ao FSII.

O papel do Mn na síntese de lignina e aminoácidos é expressivo (Lidon et al., 2004), ocasionando em plantas deficientes uma diminuição, em altura e em produção de biomassa (Schmidt et al., 2016). A deficiência de Mn tem causado diminuição da produtividade em várias culturas, como milho e sorgo. Em sorgo granífero a deficiência de Mn diminuiu em 67% a matéria seca em relação ao tratamento com esse micronutriente (Malavolta et al., 1977). Em milho com deficiência de Mn, Nozulaidi et al. (2016) observaram que o fornecimento deste nutriente via foliar aumentou a produção da cultura.

## **2.2 Importância da pulverização foliar de Mn nas culturas do milho e do sorgo**

A deficiência de Mn tem sido comumente encontrada em solos do cerrado, a qual causa reflexos nas culturas levando a perdas de produtividade (Mann et al., 2001). Os solos do cerrado são geralmente ácidos, e isso proporcionaria boa disponibilidade desse micronutriente. No entanto, solos com baixa fertilidade natural como os do cerrado aliado ao uso excessivo do solo sem a reposição (Mann et al., 2001) ou utilização de adubos com baixa quantidade de micronutrientes (Felisberto, 2018) levam à incidência de deficiência nas plantas.

Além disso, a não observância do período residual de aplicação do calcário para implantação da cultura, ou até mesmo a não incorporação até 20 cm faz com que aumente o pH em superfície e favoreça a ocorrência de deficiência de Mn (Pereira et al., 2001). Mascarenhas et al. (1996) ainda complementa que a

utilização de fosfato de forma intensa nos cultivos também favorece o aparecimento de deficiências.

A adubação com Mn pode ser realizada via solo ou via foliar, porém, segundo a eficiência da aplicação de Mn no solo de maneira geral é baixa, necessitando de doses elevadas em relação aos outros micronutrientes. Ainda, esta depende da absorção dos nutrientes pelas raízes, e como sua mobilidade é baixa no solo, depende da presença do nutriente em boas quantidades na interface solo-raiz (Pinto, 2012). Além disso, Alvarez (1989), afirma que a aplicação via foliar diminui as reações do adubo com o solo, de forma a aumentar a eficiência do fornecimento do micronutriente. No entanto, como o Mn é um micronutriente de baixa mobilidade deve-se aumentar a frequência de aplicação e diminuir a concentração para melhores resultados na adubação foliar (Hannam e Riggs, 1985). Mascagni Jr. e Cox (1985) verificaram que duas aplicações em milho, proporcionou maior rendimento produtivo nas plantas.

No fornecimento do nutriente via foliar, vários parâmetros influenciam a absorção do nutriente pela folha, podendo-se destacar: umidade, temperatura e fonte utilizada. A temperatura e a umidade ditam o tempo que a calda de aplicação ficará sobre as folhas, pois altas temperaturas aliadas à baixa umidade do ar fazem com que a solução evapore das folhas mais rapidamente, diminuindo a quantidade absorvida pelas folhas (Prado, 2008).

Na adubação foliar as fontes de nutrientes mais utilizadas são os sais solúveis como o sulfato, e também, fontes com nutrientes quelatizados. As fontes inorgânicas como o sulfato por serem de menor custo e facilmente encontradas no mercado são mais usualmente fornecidas nas adubações, porém os nutrientes quelatizados são mais eficientes do que as fontes inorgânicas (Fageria et al., 2018) pois seu transporte dentro da planta é melhorado quando estão nesta forma, potencializando a nutrição das plantas (Rosolem, 1992). Fontes quelatadas são mais eficientes devido ficarem menos retidas à cutícula foliar, sendo translocada para outras partes da planta em maiores proporções em relação a fontes inorgânicas, fato relatado em trabalho realizado por Ferrandon e Chamel (1988). Além disso, como este tipo fonte apresenta um quelante orgânico ligado ao íon por meio de uma ligação química forte, protege o nutriente de reações de precipitação que podem

indisponibilizar o nutriente para a absorção pela planta Sekhon (2003), reações essas que são comuns em tanques de pulverização quando se utiliza fonte de sais solúveis, devido a aplicação dos nutrientes serem realizadas em conjunto com outros produtos fitossanitários.

As recomendações de adubação foliar com Mn são bastante variadas na literatura, com concentrações diferentes entre culturas. Para milho recomenda-se de 100 a 300 g ha<sup>-1</sup> de Mn na forma de quelato com duas aplicações (Fancelli, 2010) e sorgo solução a 0,5% de sulfato de manganês com calda de 400 L ha<sup>-1</sup> (Silva, 2015). Segundo o IPNI (2019) a aplicação de Mn foliar nas culturas varia de 500 a 2000 g ha<sup>-1</sup>.

Em trabalho realizado com cultura do milho, Mascagni Jr e Cox (1984) observaram melhor resposta da cultura em aumento de produtividade com aplicações foliares de Mn na concentração de 600 g ha<sup>-1</sup>. Nozulaidi et al. (2016) também obtiveram que as aplicações foliares de Mn, promoveram incremento no conteúdo de clorofila, aspectos fotossintéticos, fluorescência na clorofila e conseqüentemente, ganho em produtividade.

Observa-se que as pesquisas com Mn foliar em plantas de milho e sorgo são relativamente restritas tendo pouca pesquisa, o que é motivo de preocupação pois é uma prática muito empregada nestas culturas.

### **2.3 Silício na mitigação de estresse em plantas**

O silício (Si) é considerado um elemento benéfico para as plantas e é absorvido na forma de ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) juntamente com água (Korndörfer, 2017). Ele apresenta efeitos benéficos melhorando o desempenho das plantas no alívio de estresses de natureza biótica e abiótica conforme tem sido relatado nos últimos anos pelas pesquisas na área agrônômica, podendo ser importante ferramenta para melhorar o desenvolvimento das plantas (Gonzalo et al. 2013; Hernández-Apaolaza, 2014).

As plantas absorvem Si de forma diferente, podendo ser de forma ativa, passiva ou exclusiva que irão determinar a qualificação das plantas quanto ao poder acumulativo em diferentes categorias: plantas acumuladoras (>10 g kg<sup>-1</sup> de Si),

acumuladoras intermediárias (5 – 10 g kg<sup>-1</sup> de Si) e exclusoras (ou não-acumuladora) (<5 g kg<sup>-1</sup> de Si) (Ma e Takahashi, 2002; Mitani e Ma, 2005). Em plantas acumuladoras de Si, o seu efeito benéfico se torna mais evidente. A maioria das gramíneas são consideradas acumuladoras de Si, inclusive, plantas de milho e sorgo (Ma et al., 2001).

O Si tem apresentado amplos efeitos sobre vários tipos de estresses: salino (Haghighi e Pessaraki, 2013), hídrico (Cao et al., 2015), toxicidade de elementos como Al, Cd, Cr, respectivamente (Liang et al., 2001; Farooq et al., 2013, Ali et al., 2013) e também micronutrientes como Zn e Mn (Kaya et al., 2009; Li et al., 2012). No entanto, apenas recentemente tem-se visto trabalhos com Si na mitigação de deficiência de micronutrientes (Gonzalo et al., 2013; Pavlovic et al., 2013; Bityutskii et al. 2014).

Ainda é pouco entendido os mecanismos exercidos pelo Si para amenizar estresses causados por deficiência de nutrientes, mas destaca-se alguns como: i) estimulação de sistemas antioxidantes nas plantas; ii) processos de absorção; e iii) compartimentação de íons metálicos no interior das plantas (Liang et al., 2007). Esses mecanismos também são descritos em toxicidade de nutrientes, no entanto, Hernández-Apaolaza (2014) complementa que a compartimentação de íons metálicos também pode acontecer sem que haja ambiente de toxicidade, e desta forma, poderia melhorar o fornecimento desses nutrientes para as plantas, liberando-o gradativamente conforme a demanda.

Nos trabalhos recentes com micronutrientes deficientes associado a aplicação de Si, (Pavlovic et al. 2013; Gonzalo et al. 2013; Bityutskii et al. 2014), observou-se melhorias do Si em várias variáveis fisiológicas em plantas de pepino e soja deficientes em Fe, como aumento do conteúdo de clorofila e massa seca. No entanto, não apresentou aumento em plantas supridas com Fe.

Melhorias na movimentação do micronutriente em deficiência nas plantas também tem sido relatada como uma forma do Si minimizar os efeitos negativos da deficiência, melhorando a redistribuição do nutriente. A explicação para isso, seria uma interação do Si com o metal no apoplasto radicular contribuindo para o seu movimento no interior da planta (Bityutskii et al., 2014). Fu et al. (2012) também concluíram que o Si aumentou o transporte de Fe da raiz de arroz para a parte aérea

em condições de toxicidade porém, sugeriu que o aumento da expressão dos transportadores de Si após a sua adição, poderia influenciar a absorção de Fe e a translocação e, beneficiaria a nutrição de Fe também em condições de deficiência.

A diminuição dos sintomas de deficiência tem sido percebido com aplicações de Si (Bityutskii et al., 2014; Pavlovic et al., 2013; Gonzalo et al., 2013; Pascual et al., 2016), e tem se demonstrado ligação com efeitos na diminuição da degradação da clorofila, proteção estrutural das membranas do cloroplasto, deposição de sílica na parede celular que mantém as folhas eretas e melhoram a interceptação de luz e conseqüentemente fotossíntese (Gonzalo et al., 2013) bem como, diminuição das espécies reativas de oxigênio, beneficiando o sistema antioxidante das plantas (Oliveira, 2017; Barreto et al., 2017; Felisberto, 2018).

## **2.4 Interação Si e Mn**

A aplicação de Si via foliar já é realizada em várias espécies, no entanto, a aplicação juntamente com algum nutriente de planta é um desafio a ser solucionado pelas pesquisas. Assim, a interação de Mn e Si fornecidos na mesma calda na nutrição foliar das plantas ainda não foi relatada na literatura, isso se deve ao fato, da inexistência de um produto com esses dois elementos juntos dada aos problemas de polimerização.

O Si apresenta diversas reações na solução que variam de acordo com a concentração do elemento, bem como mudanças de pH, presença de outros compostos, como metais e estabilizantes (Felisberto, 2018). Quando o elemento se apresenta em concentrações acima de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  na solução inicia-se o processo de polimerização, que é a condensação de Si formando um gel de sílica, resultado da união de ácido monossilícico formando dímeros, trímeros e cadeias de polímeros de Si (McKeague e Cline, 1963; Iler, 1979; Chan, 1989; Gallinari et al., 2002). A partir desse momento absorção pelas plantas é inexistente.

O ácido monossilícico tem reações de adsorção com metais na solução dos solos (Hansen et al., 1994), gerando silicatos insolúveis que diminuem a disponibilidade tanto de metais como do silício para as plantas. Tabaña e Heckman (2015) citam que tanto o pH como presença de óxidos metálicos em solução

influenciam a adsorção de ácido monossilícico pelos óxidos. Em trabalho de Ma e Yamaji (2006) verificou-se que o Si fica indisponível para a absorção das plantas quando há a formação de silicatos ou óxidos com outros componentes.

A combinação do Si com cátions é comum quando se utiliza fontes solúveis de Si, como o silicato de potássio, no entanto, o emprego de estabilizantes nas caldas de aplicação tem demonstrado efeitos retardantes na reação de polimerização (Kubickie e Heaney, 2003; Felisberto, 2018). E ainda tem efeito adicional fazendo com que a gota permaneça mais tempo na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974) devido efeito umectante.

Desta forma, acredita-se que na preparação de uma calda contendo Si e Mn, ocorra de forma semelhante, com ácidos monossilícicos em solução, adsorvendo-se aos íons positivos de Mn que estão dissociados em solução formando sílica (Tabaña e Heckman, 2015), como resultado, temos compostos de solubilidade extremamente baixa (Schindler et al., 1976).

Uma forma de aplicar Mn e Si na mesma solução de pulverização foliar, seria o emprego de fontes quelatadas de Mn. Este tipo de produto apresenta um quelante orgânico ligado ao íon metálico através de uma ligação forte, impedindo que outras substâncias interajam com o íon (Sekhon, 2003) de forma a proteger das reações que podem complexar o metal, não ocorrendo com o sulfato de Mn, por exemplo. Ainda segundo Sekhon (2003), metais ligados a quelantes orgânicos, perdem sua propriedade catiônica, sendo menos propensos a precipitações. Desta forma não haveria a reação de adsorção do Si com o metal, podendo, ambos, serem absorvidos pelas folhas das plantas.

O Si poderia potencializar os efeitos da pulverização foliar com Mn e até mesmo em área que não recebeu o micronutriente, poderia amenizar a sua deficiência. Os estudos estão restritos apenas em plantas deficientes de Mn onde observou-se benéfico do Si na fisiologia e na nutrição de plantas sorgo (Oliveira, 2017) e pepino (Bityutskii et al., 2014).

Apenas Timotiwu et al. (2017) estudaram os efeitos do Si aplicado via foliar com Mn na forma de sulfato de manganês, tendo como planta teste a cultura de arroz. No entanto, a aplicação foi de forma separada, iniciando com a pulverização do Mn e em seguida de Si. Os autores verificaram efeito sinérgico a partir da

aplicação foliar de 50 ppm de Si e de 5 ppm de Mn resultando na melhor resposta para o aumento da produtividade da cultura do arroz.

Portanto, espera-se que a aplicação conjunta do Mn com Si possa ampliar os efeitos sinérgicos entre os dois elementos e ainda diminuir o número de pulverizações foliares. Este resultado seria possível, pelo fato que ambos os elementos poderiam aumentar a taxa de fotossíntese, dado a diminuição de danos às membranas pelos radicais livres que é normalmente produzido pelas plantas e em maior intensidade se houver deficiência nutricional. O Si por estar envolvido em ação enzimática de sistemas antioxidantes poderia diminuir a degradação da clorofila potencializando os efeitos do Mn na adubação foliar.

A proposta deste estudo busca ampliar o uso de Si foliar na agricultura a partir da possibilidade da sua associação com o Mn que já é amplamente utilizado nos cultivos anuais. O maior uso de Si nas culturas deve aumentar a sustentabilidade dos cultivos tendo diminuição de estresses de diferentes naturezas com aumento do crescimento das plantas.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Experimentos com milho e sorgo**

##### **3.1.1 Condições de crescimento e delineamento experimental**

O experimento com a cultura do milho foi realizado em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no Campus de Jaboticabal, no período de 03 de junho a 03 de agosto de 2018. Os tratamentos consistiram de aplicações foliares de Mn na ausência e presença de Si na calda, os quais foram arranjos em esquema fatorial 4x2, dispostos em blocos casualizados com 5 repetições onde utilizou-se quatro concentrações de Mn (0,0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L<sup>-1</sup>) na forma de quelato de Mn (EDTA 13%) com sorbitol, ácido fúlvico e ácido salicílico, e Si na concentração de 0,476 g L<sup>-1</sup> de Si fornecido através de silicato de potássio (128,00 g L<sup>-1</sup> de Si, 126 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O). A calda de pulverização foi mantida a pH igual a 7,0 para todos os tratamentos com o uso da solução de HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0

mol L<sup>-1</sup>) e para os tratamentos sem a adição de Si realizou-se ajuste na concentração de potássio com o uso de cloreto de potássio (KCl) sendo aplicados nas pulverizações foliares.

Inicialmente realizou-se a semeadura de 4 sementes de milho da cultivar 2B633PW em vasos de polipropileno de 7,0 dm<sup>3</sup> preenchidos com areia lavada. Na irrigação utilizou-se inicialmente água deionizada e, aos sete dias após a emergência (DAE), iniciou-se aplicação de solução nutritiva com força iônica de 25% até alcançar 75% aos trinta e oito DAE seguindo até a retirada do experimento. Aos dez dias após a emergência efetuou-se um desbaste deixando apenas uma planta por vaso.

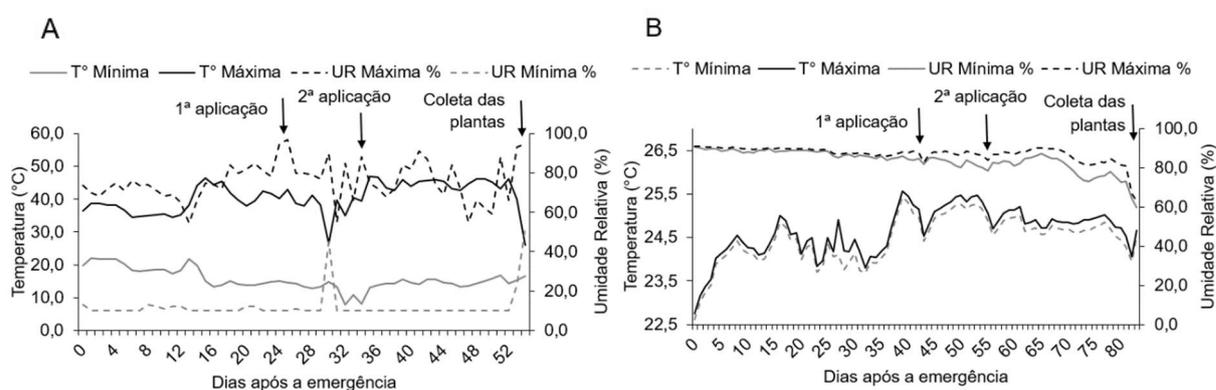
O experimento com a cultura do sorgo foi desenvolvido em sala climatizada com luz artificial (9W) e temperatura controlada de 25 ± 2,5 °C do Departamento de Solos e Adubos da UNESP, no Campus de Jaboticabal, no período de 10 de julho a 06 de outubro de 2018. Os tratamentos consistiram de aplicações foliares de Mn na ausência e presença de Si na calda, os quais foram arranjos em esquema fatorial 4x2, em delineamento inteiramente casualizado com 3 repetições onde utilizaram-se quatro concentrações de Mn (0,0; 0,17; 0,34 e 0,51 g L<sup>-1</sup>) na forma de quelato de Mn (EDTA 13%) com sorbitol, ácido fúlvico, ácido salicílico, e Si na concentração de 0,476 g L<sup>-1</sup> de Si fornecido através de silicato de potássio (128,00 g L<sup>-1</sup> de Si, 126 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O). A calda de pulverização foi mantida a pH igual a 7,0 para todos os tratamentos com o uso da solução de HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>) e para os tratamentos sem a adição de Si realizou-se ajuste na concentração de potássio com o uso de cloreto de potássio (KCl) sendo aplicados nas pulverizações foliares.

Na cultura do sorgo inicialmente realizou-se a semeadura das sementes de sorgo granífero variedade IG 244 em bandeja de polipropileno de 128 células preenchida com vermiculita de granulometria fina. Aos sete DAE efetuou-se o transplante de duas mudas para recipientes plásticos de 29 cm x 12 cm (diâmetro x altura) preenchidos com areia lavada. Aos dez dias após a emergência (DAE), iniciou-se aplicação de solução nutritiva com força iônica de 15% e aos vinte DAE fez-se o desbaste deixando apenas uma planta por recipiente. A solução nutritiva foi aumentada 15% a cada semana até alcançar 75% da força iônica seguindo até a retirada do experimento aos oitenta e três DAE.

Para ambas as culturas a solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950), com modificação na fonte de ferro Fe-EDTA para Fe-EDDHMA e aumento em mais duas vezes a sua concentração na solução, bem como, omissão de manganês para induzir a deficiência nas plantas. Realizou-se ajuste do valor pH da solução nutritiva de forma a atingir  $5,5 \pm 0,5$  com o uso da solução de HCl ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) ou NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ).

As pulverizações foliares em milho e sorgo foram realizadas com pulverizador manual nos estádios fenológicos de desenvolvimento V4 e V6 (quatro e seis folhas completamente expandidas, respectivamente), correspondendo para o milho em vinte e quatro e trinta e quatro (DAE) e quarenta e um e cinquenta e cinco (DAE) para o sorgo, respectivamente. O volume de calda pulverizado por planta foi de 4,0 ml e 6,0 ml para os estádios V4 e V6 para ambas as culturas. Para as aplicações foliares o substrato foi coberto com algodão e papel absorvente para evitar absorção dos elementos químicos pelas raízes.

A umidade e temperatura do ar foram registradas durante todo o período de condução dos experimentos, sendo que na primeira e segunda aplicação a umidade do ar foi de 95% e 88% para o experimento com a cultura do milho e 84% e 82,2 % para o experimento com a cultura do sorgo, respectivamente conforme Figura 1.



**Figura 1.** Temperatura e umidade máxima e mínima do ar da casa de vegetação (A) e da sala climatizada (B) durante o período de desenvolvimento dos experimentos nas culturas do milho e do sorgo. Setas indicam as condições climáticas encontradas na 1ª e na 2ª pulverização com os tratamentos e coleta das plantas.

### **3.1.2 Variáveis analisadas**

#### **3.1.2.1 Altura e produção de massa seca**

A altura foi medida aos cinquenta e quatro e oitenta e três DAE, nas plantas de milho e de sorgo, respectivamente. As plantas foram aferidas da base do colmo até o ápice da última folha completamente desenvolvida com uso de fita métrica, sendo dado o valor em metros.

Para obtenção de massa seca as plantas de milho foram colhidas aos cinquenta e quatro DAE sendo separadas em colmo, folhas pulverizadas (FP) que correspondem em folhas completamente expandidas até o estágio V6 e folhas não pulverizadas (FNP) que correspondem em folhas emergidas após o estágio V6. Para as plantas de sorgo, foi determinada a massa seca da parte aérea (folhas+colmo) pela colheita das plantas aos oitenta e três DAE. Posteriormente as plantas de milho e de sorgo foram lavadas com solução de detergente (0,1% v/v), solução ácida com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (0,3% v/v) e água deionizada, e em seguida as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 ± 2 °C até peso constante. Após secas, foram pesadas em balança de precisão (0,001) para obter a massa seca das folhas (FP; FNP), e da parte aérea (folhas+colmo) para o milho e massa seca da parte aérea para o sorgo.

#### **3.1.2.2 Acúmulo de Mn e Si**

Após o material ser seco, efetuou-se a moagem em moinho tipo Wiley para determinação dos teores de Si e Mn no colmo, FP e FNP no milho e da parte aérea para o sorgo. Para a determinação de Si no milho seguiu-se a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004). A determinação de Si na parte aérea da cultura do sorgo foi realizada com base na metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010), que é realizada através da digestão úmida pela adição de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em estufa a 95°C, pelo período de quatro horas. A concentração de silício foi determinada através de leitura

realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria descrito por Korndörfer et al. (2004).

Para a determinação dos teores de Mn para o milho e o sorgo adotou-se metodologia de Bataglia et al. (1983). O acúmulo de Si e Mn foi calculado pelo produto da massa seca e teor dos elementos, dados em mg por planta na FP, FNP para o milho e parte aérea para o milho e o sorgo.

### **3.1.2.3 Índice relativo de clorofila e Rendimento quântico do FS II (Fv/Fm)**

O índice relativo de clorofila (IRC) foi realizado aos cinquenta e oitenta DAE no milho e no sorgo, respectivamente, no terço médio da folha mais nova completamente desenvolvida que recebeu a última aplicação foliar (sexta folha), a qual, foi marcada no momento da aplicação. O índice foi estimado usando o medidor de clorofila Opti-sciences® CCM – 200 com uma média de cinco leituras.

A eficiência quântica do fotossistema II foi obtida a partir da medida da fluorescência da clorofila com o auxílio de fluorímetro (Opti-sciences - Os30P). Para isso, a região amostrada foi submetida ao escuro para adaptação de no mínimo 30 min antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 s.

Os parâmetros avaliados foram: F0 (fluorescência mínima para excitação da clorofila) e Fm (fluorescência máxima para excitação da clorofila). A partir destes parâmetros obteve-se a Fv (variação na fluorescência calculada a partir de F0 e Fm), Fv/Fm (razão de fluorescência variável e fluorescência máxima), e Fv/F0 (razão de fluorescência variável e fluorescência mínima). As medidas foram realizadas entre 7h30 e 8h30 no terço médio da folha mais nova completamente desenvolvida que recebeu a última aplicação foliar (sexta folha) aos cinquenta e oitenta e um DAE para o milho e para o sorgo, respectivamente.

### **3.1.2.4 Taxa fotossintética e Eficiência do Uso da Água (EUA)**

Aos quarenta e quatro DAE determinou-se a fotossíntese máxima ( $A_{max}$ ) sob condição ambiental de CO<sub>2</sub> (417,20 +- 17,00 ppm) utilizando um sistema aberto de trocas gasosas (LCpro-SD, Analytical Development Co., Hoddesdon, U.K.). A

luminosidade foi ajustada para  $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  utilizando-se uma fonte de luz led azul e vermelho. A temperatura da câmara foi mantida em aproximadamente  $27^\circ\text{C}$ . A temperatura foliar foi mantida em  $29,24 \pm 0,48^\circ\text{C}$ . As medidas foram tomadas no terço médio da folha mais nova completamente desenvolvida que recebeu a última aplicação foliar. A eficiência do uso da água foi calculada pela divisão da taxa fotossintética máxima pela transpiração da planta, ambas obtidas pelo sistema aberto de trocas gasosas.

### **3.1.2.5 Índice de extravasamento de eletrólitos**

Para a determinação do índice de extravasamento celular na cultura do sorgo, retirou-se dez discos foliares de 6 mm cada no terço médio da última folha completamente desenvolvida que recebeu a última aplicação foliar aos oitenta e dois DAE. Os discos foram acondicionados em béquer com 20 ml de água deionizada à temperatura ambiente por 2 horas. Após este período, realizou-se a leitura da condutividade elétrica inicial (CE1) utilizando condutivímetro de bancada (Medidor digital TDS-3).

Posteriormente, as amostras foram levadas à autoclave por 20 minutos em temperatura de  $121^\circ\text{C}$ , e após o resfriamento, realizou-se uma nova leitura de condutividade para determinação da condutividade final (CE2). Estimou-se o extravasamento seguindo a fórmula proposta por Dionisio-Sese e Tobita (1998):  $EC1/EC2 \times 100$ .

### **3.1.3 Análise estatística**

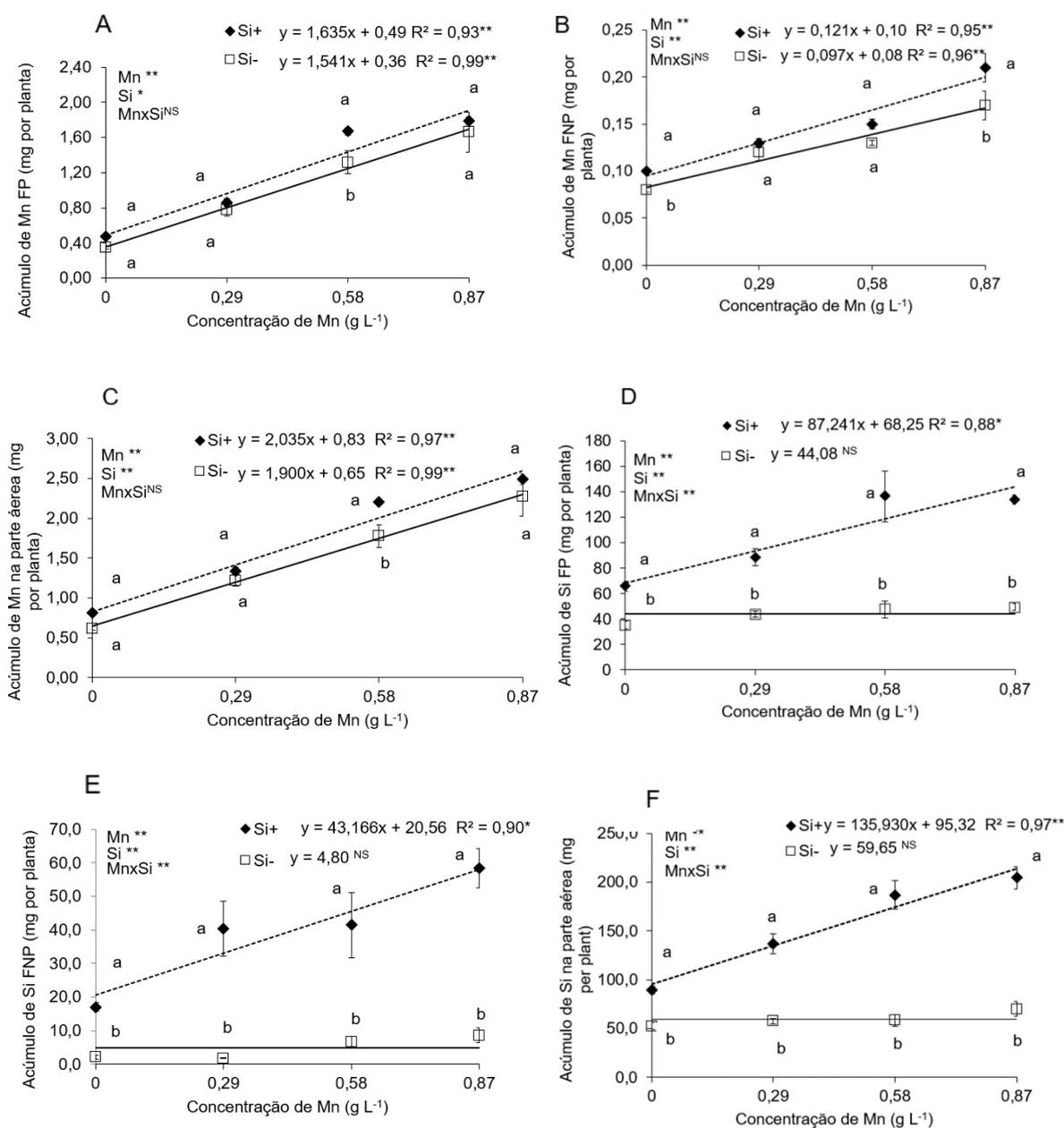
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F e para a comparação de médias realizou-se teste de Tukey, a 5% de probabilidade, e ainda, realizou-se estudo de regressão polinomial para avaliar os efeitos das concentrações de Mn, escolhendo o modelo que foi significativo e com maior coeficiente de determinação utilizando o programa estatístico AgroEstat (Barbosa e Maldonado Jr., 2016).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Experimento com milho

A pulverização foliar de Mn independentemente da presença de Si na calda incrementaram com ajuste linear o acúmulo do micronutriente na FP, FNP e parte aérea das plantas de milho. A presença do Si na calda para pulverização foliar apenas aumentou o acúmulo do micronutriente na concentração de 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn em FP (Figura 2A) e na parte aérea (Figura 2C), atingindo 27% e 24%, respectivamente. Enquanto, em FNP a presença de Si na calda para pulverização apenas aumentou o acúmulo do micronutriente na concentração 0,0 e 0,87 g L<sup>-1</sup> de Mn (Figura 2B), representando incremento de 25% e 24%, respectivamente.

Para o acúmulo de Si na planta houve interação pelo fato que apenas as pulverizações de Mn na presença de Si em relação a sua ausência na calda incrementaram o acúmulo do elemento benéfico nas FP, FNP e na parte aérea para todas as concentrações de Mn (Figuras 2D; 2E e 2F).



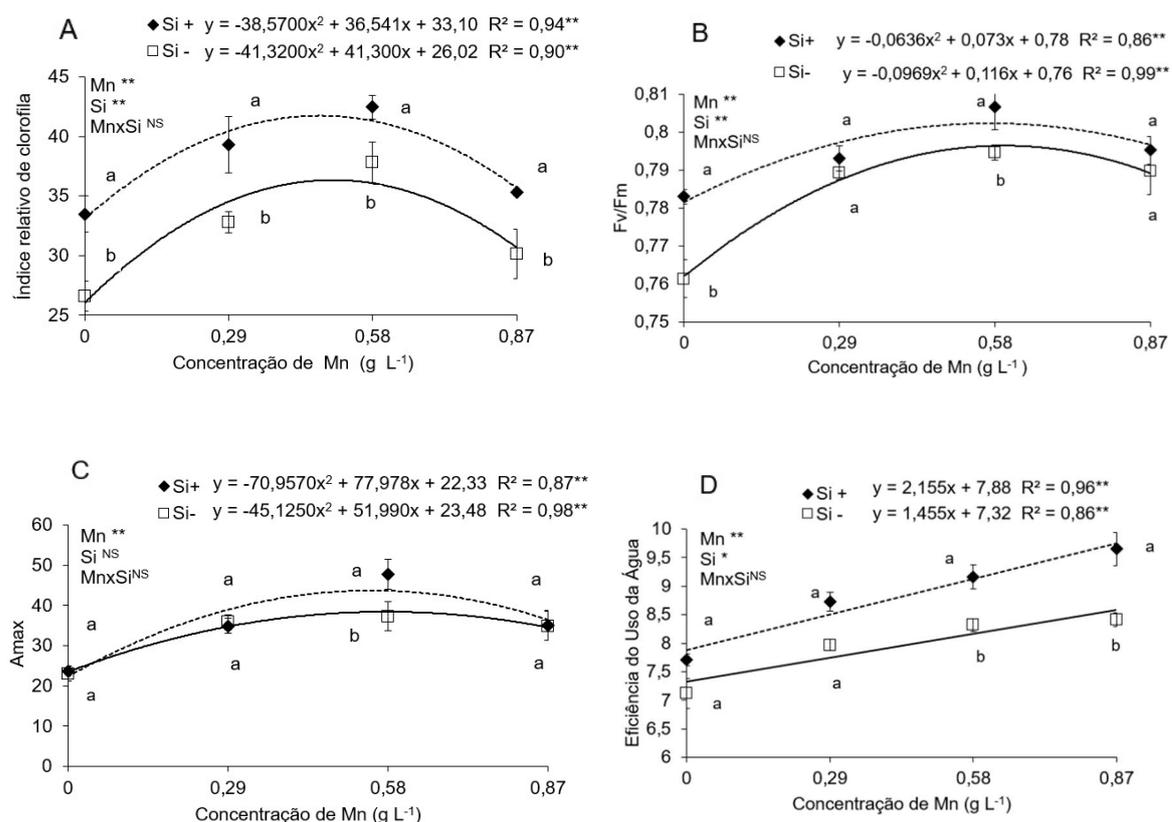
**Figura 2.** Acúmulo de Mn e Si em folhas pulverizadas (FP) (A e D, respectivamente), folhas não pulverizadas (FNP) com Mn (B e E, respectivamente) e na parte aérea (C e F, respectivamente) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo teste F; Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre presença e ausência de silício ( $p < 0,05$ , pelo teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média,  $n=5$ .

A pulverização foliar de Mn independentemente da presença de Si na calda aumentou o índice relativo de clorofila com ajuste quadrático, com pontos de máximo deste índice iguais a 41,75 e 36,34 nas concentrações 0,47 g L<sup>-1</sup> e 0,50 g L<sup>-1</sup> de Mn na presença e na ausência de Si, respectivamente. A pulverização foliar de Mn na presença de Si na calda incrementou o índice relativo de clorofila em relação à sua ausência em 26%; 20%; 12% e 17% para as concentrações 0,0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente (Figura 3A). Além disso, o sintoma visual característico da deficiência de Mn (clorose internerval) foi amenizado na presença de Si na calda de aplicação (Figura 4).

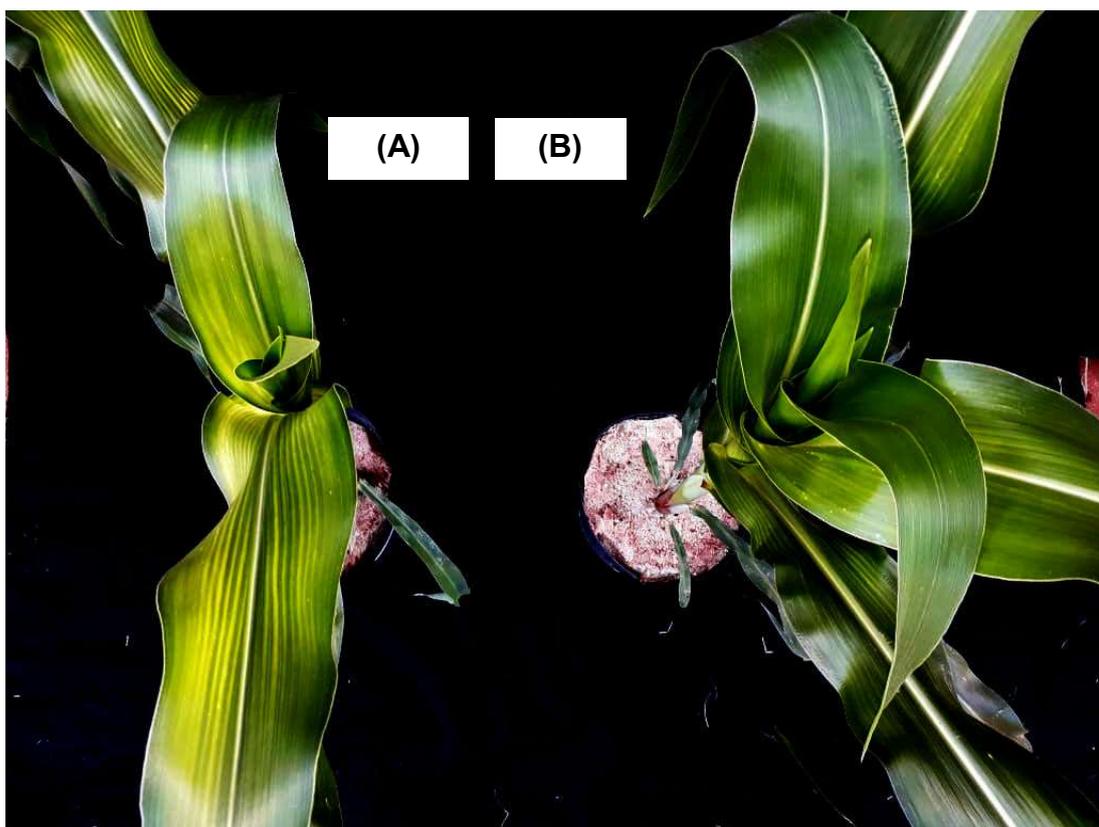
As concentrações de Mn pulverizadas tanto na ausência como na presença de Si aumentaram a eficiência quântica do FSII com ajuste quadrático com pontos de máxima eficiência quântica de 0,80 e 0,79 nas concentrações 0,57 e 0,60 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente (Figura 3B). A presença de Si na calda em relação a sua ausência aumentou a eficiência quântica do FSII em pulverizações nas concentrações 0,0 e 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn.

A taxa fotossintética máxima não apresentou interação entre Mn e Si. As concentrações de Mn pulverizadas na planta na ausência como na presença de Si incrementaram a taxa fotossintética com ajuste ao modelo de regressão quadrática, com pontos de máxima na presença e na ausência de Si de 43,75 e 38,5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nas concentrações 0,55 e 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente (Figura 3C). A pulverização foliar de Mn na presença de Si em relação a sua ausência proporcionou incremento da taxa de fotossíntese apenas na concentração 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn.

A eficiência do uso da água não apresentou interação entre Mn e Si. A pulverização foliar de Mn na ausência e na presença de Si incrementou com ajuste linear a eficiência do uso da água (Figura 3D). A pulverização de Mn com presença Si em relação a sua ausência incrementou a eficiência do uso da água apenas nas concentrações de Mn iguais a 0,58 e 0,87 g L<sup>-1</sup> com valores de eficiência de 9,16 e 9,65 mmol CO<sub>2</sub> mol H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>.



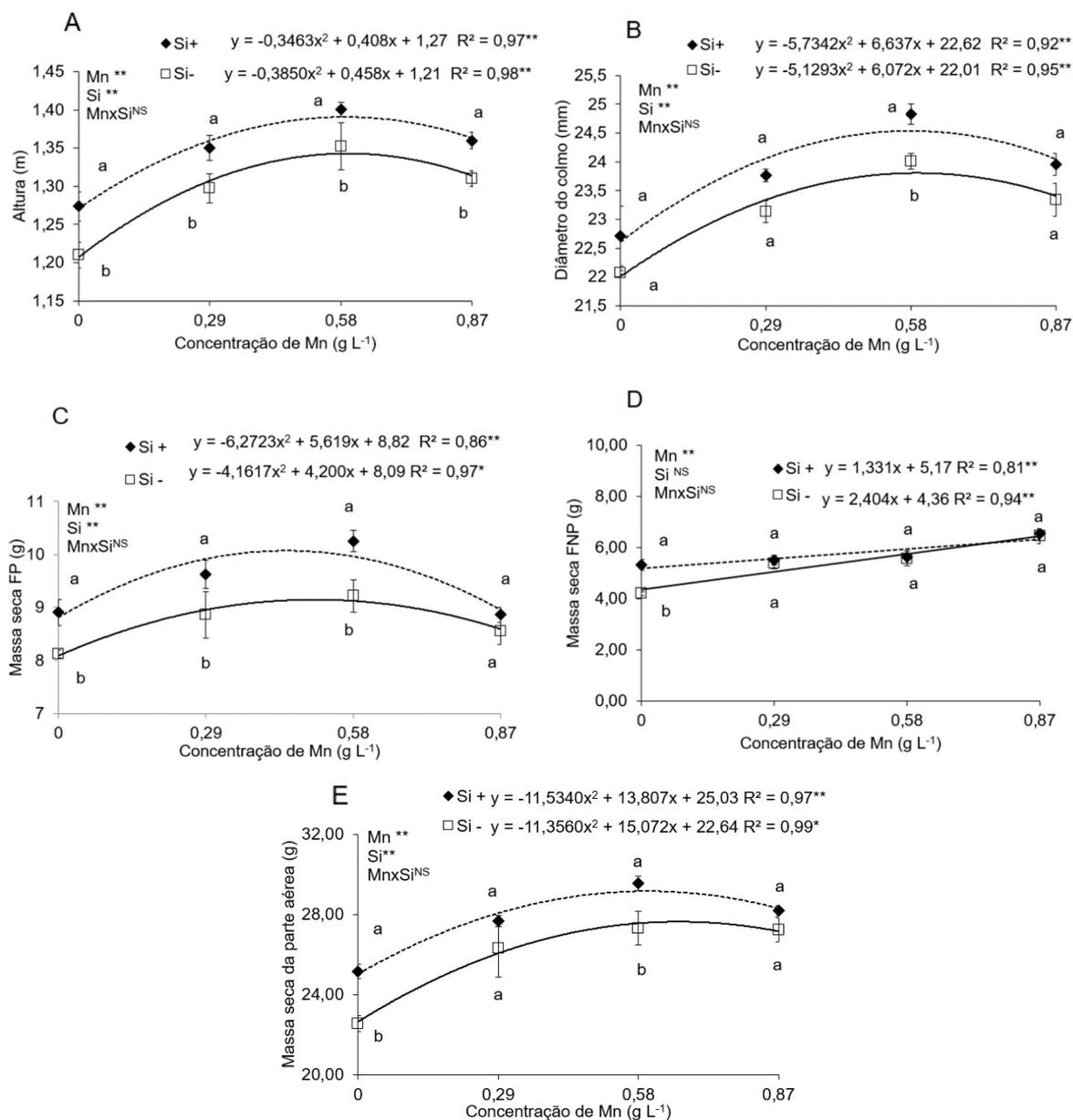
**Figura 3.** Índice relativo de clorofila (A), eficiência quântica do Fotossistema II (Fv/Fm) (B), taxa fotossintética máxima (Amax) (C), eficiência do uso da água (D) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e <sup>NS</sup> não significativo pelo teste F; Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre presença e ausência de silício ( $p < 0,05$ , pelo teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média,  $n=5$ .



**Figura 4.** Foto de plantas de milho deficientes de Mn que receberam pulverização somente de água (ausência de Si) (A) e com presença de Si na calda ( $0,476 \text{ g L}^{-1}$ ) (B).

Não houve interação entre Mn e Si para a altura das plantas de milho (Figura 5A). O aumento das concentrações de Mn pulverizadas nas folhas na ausência e na presença de Si promoveram incremento da altura atingindo 1,39 e 1,35 metros, nas concentrações  $0,59 \text{ g L}^{-1}$  e  $0,60 \text{ g L}^{-1}$  de Mn na presença e ausência de Si na calda respectivamente. As plantas pulverizadas com Si em relação a sua ausência resultaram maiores valores de altura das plantas para todas as concentrações de Mn (Figura 5A). O ponto de máximo diâmetro de colmo ocorreu na concentração de Mn ( $0,58 \text{ g L}^{-1}$ ) na presença de Si na calda proporcionando um diâmetro de 24,5 mm. Na ausência de Si na calda o maior diâmetro (23,8 mm) foi observado na concentração de  $0,6 \text{ g L}^{-1}$  de Mn (Figura 5B). Houve incremento no diâmetro do colmo, das plantas pulverizadas com Mn na presença de Si na calda em relação a sua ausência apenas na concentração  $0,58 \text{ g L}^{-1}$  de Mn.

A massa seca de FP, FNP e da parte aérea não apresentaram interação entre Mn e Si (Figura 5C;5D e 5E), o que indica que os efeitos benéficos da pulverização foliar de Mn não dependeu do Si. A pulverização foliar de Mn na presença e na ausência de Si na calda incrementou com ajuste quadrático a massa seca de FP e parte aérea. A pulverização foliar na presença de Si na calda resultou a máxima massa seca de FP e parte aérea foi de 10,07 e 29,16 g obtida na concentração 0,45 e 0,60 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente (Figura 5C e 5E). Enquanto a pulverização foliar de Mn na ausência de Si que resultou em maiores massas de FP e da parte aérea foram de 9,15g e 27,64 g nas concentrações 0,50 e 0,66 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente. Portanto, a presença de Si na calda proporcionou incrementos de massa seca de FP em 8%; 9% e 11%, nas concentrações 0,0; 0,29 e 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn respectivamente. Na parte aérea, a presença de Si na calda incrementou a massa seca em 12% e 8% apenas nas concentrações 0,0 e 0,58 g L<sup>-1</sup> de Mn respectivamente (Figura 5E). Em FNP o acréscimo de Si na calda em relação a sua ausência proporcionou incremento na massa igual a 26% apenas no tratamento controle (0,0 g L<sup>-1</sup> de Mn) (Figura 5D).

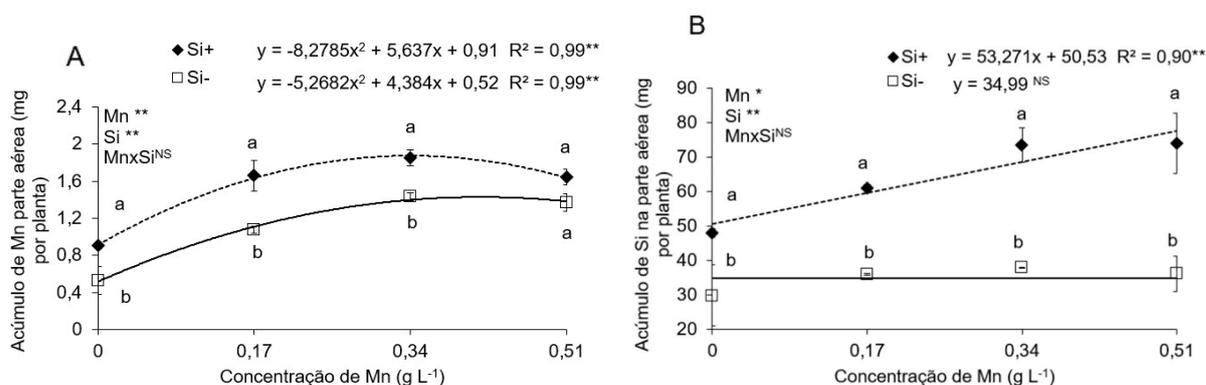


**Figura 5.** Altura (A), diâmetro do colmo (B), produção de massa seca de folhas pulverizadas (FP) (C), folhas não pulverizadas (FNP) (D) e parte aérea (E) de plantas de milho em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e <sup>NS</sup> não significativo pelo teste F; Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre presença e ausência de silício ( $p < 0,05$ , pelo teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média,  $n=5$ .

## 4.2 Experimento com sorgo

A ausência da interação indicou que a pulverização foliar de Mn tanto na ausência como na presença de Si na calda apresentaram incrementos com ajuste quadrático no acúmulo do micronutriente (Figura 6A). Observou-se que a pulverização foliar de Mn na presença e na ausência de Si na calda promoveu máximo acúmulo de Mn iguais a 1,87 e 1,43 mg por planta nas concentrações de Mn iguais a 0,34 e 0,42 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. A presença de Si na calda em relação a sua ausência incrementou o acúmulo do micronutriente na parte aérea das plantas em 72%; 54% e 29% para as concentrações 0,0; 0,17 e 0,34 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente (Figura 6A).

O acúmulo de Si na parte aérea das plantas de sorgo apresentou interação entre Mn e Si, pois houve incremento com ajuste linear do acúmulo deste elemento benéfico para a presença de Si e sem ajuste significativo para a sua ausência na calda (Figura 5B). Portanto, as plantas pulverizadas com calda contendo Si nas diferentes concentrações de Mn acumularam o elemento em maiores quantidades na parte aérea em relação às plantas não pulverizadas.



**Figura 6.** Acúmulo de Mn (A) e Si (B) na parte aérea de plantas de sorgo em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo teste F; Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre presença e ausência de silício ( $p < 0,05$ , pelo teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média,  $n=3$ .

O índice de extravasamento de eletrólitos, índice relativo de clorofila e eficiência quântica do FSII de plantas de sorgo não apresentaram interação entre Mn e Si (Figuras 7A; 7B e 7C). A pulverização foliar com as concentrações de Mn tanto na ausência como na presença de Si na calda diminuiu com ajuste linear o índice de extravasamento de eletrólitos. A presença de Si na calda em relação a sua ausência diminuiu em 6% os índices de extravasamentos celulares em plantas que receberam as concentrações 0,34 e 0,51 g L<sup>-1</sup> de Mn (Figura 7A).

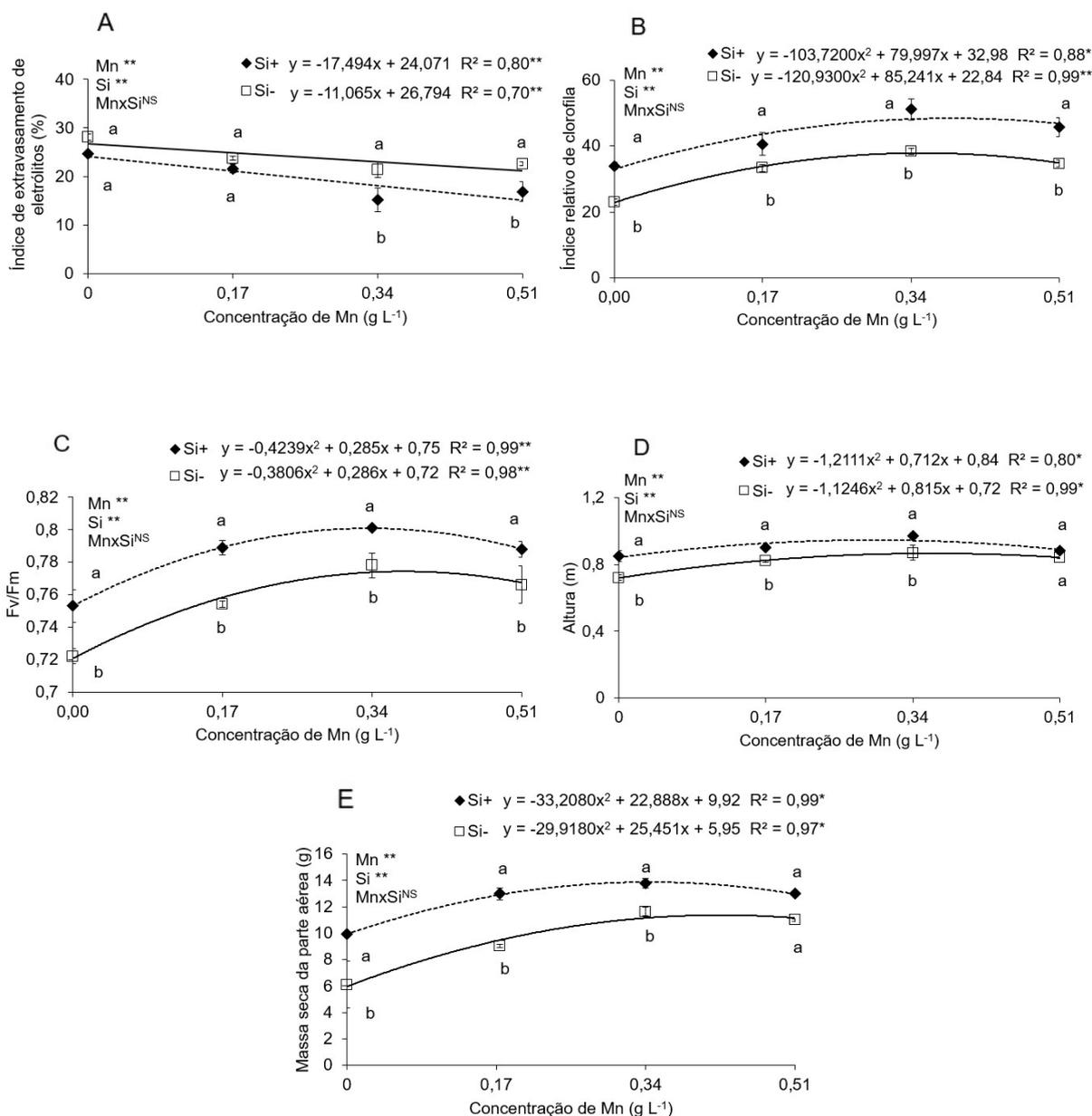
A pulverização foliar de Mn incrementou com ajuste quadrático o índice relativo de clorofila tanto para ausência quanto para a presença de Si na calda, com pontos de máximo índice 48,4 e 37,9 nas concentrações 0,39 e 0,35 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente. A presença do elemento benéfico na calda incrementou o índice relativo de clorofila em 48%; 22%; 33% e 32% para todas as concentrações de Mn 0,0; 0,17; 0,34 e 0,51 g L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7B).

A eficiência quântica do FSII apresentou incremento com ajuste quadrático em função da pulverização foliar de Mn na ausência e na presença de Si com pontos de máxima eficiência 0,80 e 0,77 nas concentrações 0,34 e 0,38 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente. A pulverização com a presença de Si na calda em relação a ausência incrementou esta eficiência quântica do FSII em todas as concentrações de Mn utilizadas (Figura 7C). Os tratamentos sem pulverização de Mn foliar apresentaram as menores eficiências do FSII para ambas as condições de Si.

A pulverização com concentrações de Mn independentemente da presença de Si na calda incrementou com ajuste quadrático a altura e massa seca da parte aérea de plantas de sorgo (Figura 7D e 7E). As máximas alturas de plantas com pulverização foliar de Mn na ausência e na presença de Si foi de 0,87 e 0,95 m nas concentrações 0,36 e 0,30 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente. A adição de Si na calda incrementou a altura de plantas de sorgo com as pulverizações em todas as concentrações de Mn, exceto 0,51 g L<sup>-1</sup> (Figura 7D).

A pulverização foliar de Mn na presença e na ausência de Si na calda atingiu o ponto de máxima massa seca da parte aérea do sorgo (13,9 e 11,4g) na concentração 0,35 e 0,43 g L<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente. A pulverização foliar de Mn na presença de Si em relação a ausência do elemento benéfico incrementou em 62;

42 e 19% a massa seca da parte aérea nas concentrações 0,0; 0,17 e 0,34 g L<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 7E).



**Figura 7.** Índice de extravasamento de eletrólitos (A), índice relativo de clorofila (B) e eficiência quântica do Fossistema II (C), altura (D) e massa seca da parte aérea (E) de plantas de sorgo em relação ao aumento das concentrações de Mn (Mn) na ausência (-Si) e na presença de silício (+Si) aplicados via foliar. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo teste F; Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre presença e ausência de silício ( $p < 0,05$ , pelo teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média,  $n=3$ .

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Experimentos com milho e sorgo

A deficiência de Mn em cultivos anuais pode ser corrigida com pulverização foliar de Mn especialmente quando associada ao Si. No entanto, não têm relatos sobre a viabilidade da pulverização foliar utilizando calda contendo Si e Mn em relação a absorção destes dois elementos pela planta.

A presente pesquisa indicou que a pulverização de Mn com adição de Si na calda em relação a ausência do elemento benéfico, possibilitou maior acúmulo de Mn nas FP, FNP e parte aérea em determinadas concentrações de Mn estudadas (Figura 2A; 2B; 2C e 6A). Estes resultados foram favoráveis porque o Si em solução não teve reação com Mn pois utilizou-se como fonte do micronutriente, quelato que forma complexo estável com o metal tendo carga final zero e também pela adição de estabilizantes que evitou a polimerização do Si.

Fica evidenciado de forma inédita que a associação do Mn e do Si na pulverização foliar é uma alternativa viável por garantir a adequada absorção destes dois elementos em culturas anuais como milho e sorgo. Na literatura, em estudo avaliando a interação de Si e Mn, os autores utilizam duas pulverizações iniciando com Mn e depois o Si (Timotiwu et al., 2017). Portanto, com a presente pesquisa, será possível diminuir as pulverizações associando os elementos na calda sem prejudicar a eficiência da absorção dos dois elementos.

Cabe destacar que embora o Mn seja um nutriente pouco móvel nos tecidos vegetais (Prado, 2008), a adição de Si na calda pulverizada nas folhas melhorou sua mobilização para tecidos mais jovens (FNP) verificado nas plantas de milho (Figura 2B) pois resultou em maior acúmulo deste micronutriente em plantas controle e também que recebeu o micronutriente ( $0,87\text{g L}^{-1}$ ). Este efeito foi verificado por Bityutskii et al. (2014) em plantas de pepino, mas com Fe que é também pouco móvel nas plantas. Os autores verificaram aumento do acúmulo de Fe nas partes apicais da parte aérea em plantas privadas de Fe, mas tratadas com Si, indicando melhoria na mobilidade e distribuição do micronutriente para os tecidos novos da planta.

Especificamente nas plantas controle sob deficiência de Mn independentemente do Si, apresentaram os menores índices de clorofila e eficiência quântica do FSII (Figura 3A; 3B; 7B e 7C), fato já esperado. Isto também foi observado em plantas de pepino onde houve diminuição de 1,5 vezes no conteúdo de clorofila em plantas sob deficiência de Mn (Bityutskii et al., 2014). Isso ocorre porque aumenta os danos oxidativos (Schmidt et al., 2016), atingindo as estruturas dos tilacóides e provocando degradação da clorofila (Papadakis et al., 2007). Soma-se a isto, o fato que as estruturas dos pigmentos e proteínas danificadas diminuem a absorção de luz dos cloroplastos e inibe a síntese de clorofilas (Gong et al., 2009).

Para o milho, a pulverização foliar de Mn com presença de Si promoveu maior taxa fotossintética (Figura 3C), apenas na concentração de Mn de  $0,58 \text{ g L}^{-1}$ , mas para o índice relativo de clorofila e eficiência quântica do FSII houve maiores com adição de Si na calda em diferentes concentrações de Mn. Observou-se que a leitura de taxa fotossintética por ter sido feita com apenas dez dias da realização da última pulverização foliar, possa ter influenciado no resultado, não havendo tempo suficiente para a planta expressar o efeito benéfico da adição de Si na calda. Contrariamente, as leituras tanto de eficiência quântica do FSII como índice relativo de clorofila, foram realizadas quatro dias antes do fim da condução do experimento e por este motivo tenham expressado de forma significativa o real benefício da aplicação do Si. O efeito benéfico do Si em propriedades fisiológicas como conteúdo de clorofila em condições de estresse foi observado de forma notável em plantas de milho por Rohanipoor et al. (2013) e de sorgo, demonstrando efeitos benéficos do silício em processos metabólicos ligados a fotossíntese das plantas.

A pulverização foliar de Mn incrementou a eficiência do uso da água pelas plantas de milho e observou-se que na presença de Si nas maiores concentrações de Mn o elemento benéfico proporcionou aumentos na eficiência do uso da água pelas plantas (Figura 3D). Este efeito foi observado em milho em que o fornecimento de Si melhorou em 20% o uso eficiente da água em relação as plantas que não receberam Si, pelo efeito deste elemento na regulação da abertura e fechamento de estômatos por meio de estímulos (Gao et al., 2004), mantendo o conteúdo de água em níveis adequados nas plantas (Mali e Aery, 2008; Rohanipoor et al., 2013). Além disso, observou-se que nas plantas controle com ausência da pulverização foliar de

Mn houve as menores eficiências do uso da água em plantas de milho. Efeito semelhante foi observado em plantas de milho (Nozulaidi et al., 2016) e de cevada deficientes em Mn, em que houve redução da eficiência do uso da água, explicado pelo fato de haver degradação da camada de cera cuticular, fazendo com que haja maior transpiração pelas plantas na deficiência no micronutriente (Hebbern et al., 2009).

Diante da deficiência de Mn nas culturas a pesquisa deixa evidente a importância da pulverização foliar com Mn na presença ou não de Si na calda nos aspectos fisiológicos em plantas de milho e de sorgo. Este efeito benéfico do Mn via foliar no aumento do índice de cor verde e da eficiência quântica do FSII é amplamente relatado na literatura (Nozulaidi et al., 2016). Salienta-se que a presença de Mn garante o correto transporte de elétrons para os fotossistemas e prevenção da fotoinibição de FSII (Schmidt et al., 2016). Portanto, a pulverização foliar de Mn com adição ou não de Si na calda ao melhorar aspectos fisiológicos das plantas de milho e sorgo refletiu no aumento da altura e da produção de massa secas das culturas. Estes efeitos do Mn via foliar sem adição de Si na calda no incremento da produção de massa seca é amplamente relatado em plantas de milho (Mascagni Jr. e Cox, 1985; Nozulaidi et al., 2016) e de sorgo.

O fato inédito seria que estes efeitos benéficos do Mn via foliar na fisiologia das plantas de milho e de sorgo foram ampliados com adição de Si na calda. A pulverização foliar de Mn com a presença de Si na calda em relação a sua ausência aumentou o índice relativo de clorofila bem como a eficiência quântica do FSII das plantas de milho e sorgo. Este efeito benéfico do Si ocorreu porque este elemento diminuiu o estresse visualizado pela diminuição do extravasamento de eletrólitos celulares verificado nas plantas de sorgo (Figura 7A) que receberam o elemento benéfico especialmente quando acompanhado com calda que continha maiores concentrações de Mn. Isto pode ser explicado pelo efeito benéfico do Si no sistema antioxidante das plantas, ativando várias enzimas do complexo de eliminação de radicais livres, evitando com isso um dano excessivo tanto à clorofila como ao FSII (Cao et al., 2015; Gong et al., 2012; Ma, 2004).

Da mesma forma que ocorreu com os aspectos fisiológicos, a adição de Si na calda nas diferentes concentrações de Mn aplicadas, promoveu aumento da altura e

da massa seca das plantas de milho e de sorgo (Figura 5A; 5C; 5D; 5E; 7D e 7E). Avaliando apenas o tratamento controle (sem Mn) a adição de Si também incrementou a produção de massa seca das plantas de milho e de sorgo. Este resultado também foi relatado em outras culturas como em plantas de arroz (Timotiwu et al., 2017) e de sorgo (Flores et al., 2018). Portanto, observa-se que nosso estudo indica benefício do Si na produção de massa seca das plantas mesmo acompanhado com Mn na calda, pelo fato do favorecimento da absorção do micronutriente e seus efeitos na fisiologia da planta.

De forma geral, observou-se que a pulverização foliar de Mn nas plantas com a adição de Si na calda foi possível diminuir a concentração de Mn na calda de 10% nas plantas de milho até 23% nas plantas de sorgo e ainda induzir maior massa seca da parte aérea. A diminuição da quantidade de Mn a ser aplicada nos cultivos com adição de Si na calda tem implicações econômica e ambiental. Portanto, ficou evidenciado que o Si na calda mitiga os efeitos da deficiência de Mn e ainda potencializa o benefício do micronutriente quando é realizada a pulverização foliar. A nossa descoberta pode abrir nova linha de investigação que buscam estratégias para maior eficiência da adubação foliar com Mn nos cultivos mas é preciso ampliar as pesquisas para outras espécies cultivadas.

## **6 CONCLUSÃO**

A pulverização foliar de Mn com adição de Si na calda incrementou o acúmulo do micronutriente, o índice relativo de clorofila, a eficiência quântica do FSII, a eficiência do uso da água e refletiu na produção de massa seca das plantas de milho e de sorgo.

A pulverização foliar de Mn com adição de Si na calda é viável para as plantas de milho e de sorgo.

## **7 REFERÊNCIAS**

Ali S, Farooq MA, Yasmeen T, Hussain S, Arif MS, Abbas F, Bharwana SA, Zhang GP (2013) The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and

ultrastructure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 89:66–72.

Alvarez C (1989) Utilização de quelatos em adubação foliar. In: Boaretto AE, Rosolem CA, (Coords.), **Adubação foliar**. Campinas: Fundação Cargill, 1:177-189.

Babiker AGT, Duncan, HJ (1974) Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Res.** 14: 375–378.

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2010) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.

Barreto RF, Schiavon Júnior AA, Maggio MA, Prado RM (2017) Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Scientia Horticulturae** 225: 743–750.

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo. (Boletim Técnico v.78).

Bityutskii N, Pavlovic J, Yakkonen K, Maksimović V, Nikolic M (2014) Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiol. Biochem.** 74: 205–211.

Cao B, Ma Q, Zhao Q, Wang L, Xu K (2015) Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Sci. Hort.** 194: 53–62.

Chan SH (1989) A Review on solubility and polymerization of silica. **Geothermics.** 18: 49-56.

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science** 135:1-9.

Ducic T, Polle A (2005) Transport and detoxification of manganese and copper in plants. **Braz. J. Plant Physiol.**17:103-112.

Fageria NK et al. (2018) Fertilização do solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA. Disponível em:<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fessmggy502wx5eo0y53mhyvcjcebf.html>>. Acesso em 15 dez. 2018.

Fancelli AL (2010) **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes na cultura do milho**. Piracicaba: IPNI – International Plant Nutrition Institute Brazil, 16p. (IPNI. Informações Agronômicas, 131).

Farooq MA, Ali S, Hameed A, Ishaque W, Mahmood K, Iqbal Z (2013) Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidante enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. **Ecotoxicology and Environmental Safety**96:242–249.

Felisberto, G (2018) **Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja**. 63 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Ferrandon M,Chamel AR (1988) Cuticular retention, foliar absorption and translocation of Fe, Mn, and Zn supplied in organic and inorganic form. **Journal of Plant Nutrition**11:247-263.

Flores RA, Arruda EM, Damin V, Souza Junior JP, Maranhão, DDC, Correia MAR, Prado RM (2018) Physiological quality and dry mass production of *Sorghum bicolor* following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science** 4: 631-638.

Fu YQ, Shen H, Hu DM, Cai KZ (2012) Silicon-mediated amelioration of Fe<sup>2+</sup> toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. **Pedosphere**22: 795–802, 2012.

Gallinari M, Ragueneau O, Corrim L, Demaster DJ, Tréguer P (2002).The importance of water column processes on the dissolution properties of biogenic silica in deep-sea sediments: I. Solubility. **Geochem. Cosmochim. Acta**. 66: 2701–2717.

Gao X, Zou C, Wang L, Zhang F (2004) Silicon improves water use efficiency in maize plants. **J. Plant Nutr.** 27: 1457–1470.

Gong H, Chen K (2012) The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiol Plant.** 34: 1589-1594.

Gong X, Wang Y, Liu C, Wang S, Zhao X, Zhou M, Li N, Lu Y, Hong F (2009) Effects of manganese deficiency on spectral characteristics and oxygen evolution in maize chloroplasts. **Biol. Trace Elem. Res.** 136: 372–382.

Gonzalo MJ, Lucena JJ, Hernández-Apaolaza L (2013) Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant Physiol. Biochem.** 70: 455–461.

Haghighi M, Pessarakli M (2013) Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. **Scientia Horticulturae** 161:111–117.

Hannam RJ, Riggs JL (1985) The effect of manganese applied from an aircraft as a low-volume foliar spray in preventing manganese deficiency in *Lupinus angustifolius* L. **Fert. Res.** 6:149-156.

Hansen HCB, Raben-Lange B, Raulund-Rasmussen K, Borggaard OK (1994) Monosilicate adsorption by ferrihydrite and goethite at pH 3–6. **Soil Sci.** 158:40–46.

Hebbern CA, Laursen KH, Ladegaard AH, Schmidt SB, Pedas P, Bruhn D, Schjoerring JK, Wulfsohn D, Husted S (2009) Latent manganese deficiency increases transpiration in barley (*Hordeum vulgare*). **Physiol. Plant** 135:307–316

Hernandez-Apaolaza L (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta** 240: 447–458.

Hoagland, D.R., Arnon, D.L., 1950. The water culture methods for growing plants without soil. **Circular**, v.347, p.32.

Houtz RL, Nable RO, Cheniae GM (1988) Evidence for effects on the in vivo activity of ribulose-biphosphate carboxylase/oxygenase during development of Mn toxicity in tobacco. **Plant Physiology** 86:1143-1149.

Iler RK (1979) *The Chemistry of Silica*. Plenum Press, New York.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (2019) Informação agronômica sobre nutrientes para as plantas : Manganês. (IPNI) Picaricaba:São Paulo, nº 9, 2p.

Kaya C, Tuna AL, Sonmez O, Ince F, Higgs D (2009) Mitigation effects of silicon on maize plants grown at high zinc. **Journal of Plant Nutrition** 32:1788–1798.

Korndorfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 34 p. (Boletim técnico, n. 2).

Korndorfer GH (2017) **Uso do Silício na agricultura**. Disponível em:<<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Efeitos/Efeitos.htm>>. Acesso: 15jan. 2019.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075-2085.

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 67: 4113–4121.

Liang YC, Yang CG, Shi HH (2001) Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. **Journal of Plant Nutrition** 24:229–243.

Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environ. Pollut.** 147: 422–428.

Lidon FC, Barreiro M, Ramalho J (2004) Manganese accumulation in rice: implications for photosynthetic functioning. **J. Plant Physiol.** 161: 1235-1244.

Lindsay WL (1979) **Chemical equilibria in soils**. NewYork, US: John Wiley & Sons,472p.

Li P, Song A, Li Z, Fan F, Liang Y (2012) Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil** 354:407–419.

Loneragan JF (1988) Distribution and movement of manganese in plants. In.: Graham, RD et al.(Eds) **Manganese in Soils and Plants**. Kluwer Academic Publishers, p. 113–124.

Maarschalkerweerd MV, Husted S (2015) Recent developments in fast spectroscopy for plant mineral analysis. **Frontiers in Plant Science** 6: 169.

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition** 50:11-18.

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. **Stud. Plant Sci.** 8: 17–39.

Ma JF, Takahashi E (2002) **Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science. 295p.

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Sci.** 11: 392–397.

Malavolta E, Accorsi WR, Oliveira GD, Silva AQ, Silva H, Queiroga EG, Assis VL(1977) Estudos sobre a nutrição mineral do sorgo granífero: efeitos das deficiências de micronutrientes. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz** 34: 347-352.

Mali M, Aery NC (2008) Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition** 31:1867-1876.

Mann EN, Rezende PM, Carvalho JG, Corrêa JBD (2001) Efeito da adubação com manganês, via solo e foliar em diferentes épocas na cultura da soja [*Glycine max* (L.) MERRILL] **Ciênc. Agrotec.** 25:264-273.

Mascagni Jr HJ, Cox FR (1985) Evaluations of inorganic and organic manganese fertilizers sources. **Soil Science Society of American Journal** 49: 458-61.

Mascarenhas HAA, Tanaka RT, Gallo PB, Pereira JCVNA, Ambrosano GMB, Carmello QAC (1996) Efeito da calagem sobre a produtividade de grãos, óleo e proteína em cultivares precoces de soja. **Scientia Agricola** 53:164-171

McKeague JA, Cline MG (1963) Silica in the soil. **Advances in Agronomy** 15:339-396.

Millaleo R, Reyes- Diaz M, Ivanov A, Mora M, Alberdi M (2010) Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **J. soil Sci. plant Nutr.** 10: 476–494.

Mitani N, Ma JF (2005) Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany** 56:1255–1261.

Mousavi SR, Shahsavari M, Rezaei M (2011) A General Overview On Manganese (Mn) Importance For Crops Production. **Aust. J. Basic Appl. Sci.** 5: 1799–1803.

Ness PJ, Woolhouse HW (1980) RNA synthesis in *Phaseolus* chloroplasts. 1. Ribonucleic acid synthesis and senescing leaves. **J. Exp. Bot.** 31: 223-233.

Nozulaidi N, Nurlnani M, Khairi M, Jahan SMD (2016) Production of Corn; Effects of Manganese Application on Plant Parameters. **Journal of Agricultural Research** 1: 1-7.

Oliveira, RLL (2017) **Aplicação de silício na fisiologia, na produção, na mitigação de estresse causado pela deficiência de Mn em sorgo granífero.** 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Papadakis IE, Giannakoula A, Therios IN, Bosabalidis AM, Moustakas M, Nastou A. (2007) Mn-induced changes in leaf structure and chloroplast ultrastructure of *Citrus volkameriana* (L.) plants. **J. Plant Physiol.** 164: 100–103.

Pascual MB, Echevarria V, Gonzalo MJ, Hernández-Apaolaza L (2016) Silicon addition to soybean (*Glycine max* L.) plants alleviate zinc deficiency. **Plant Physiol. Biochem** 108: 132–138.

Pavlovic J, Samardzic J, Maksimović V, Timotijevic G, Stevic N, Laursen KH, Hansen TH, Husted S, Schjoerring J K, Liang Y, Nikolic M (2013) Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. **New Phytol** 198: 1096–1107.

Pereira GD, Bertoni JC, Carvalho JG, Morais AR (2001) Doses e modos de adubação com manganês e seus efeitos na produção da cultura do arroz. **R. Bras. Ci. Solo**25: 625-633.

Pfeffer PE, Tu Shu-I, Gerasimowicz WV, Cavanaugh JR (1986) In vivo <sup>31</sup>P NMR studies of corn root tissue and its uptake of toxic metals. **Plant Physiology**80: 77-84.

Pinto AS (2012) **Adubação com manganês em soja. Efeitos no solo e na planta.** 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Prado RM (2008) **Nutrição de plantas.** São Paulo: Editora da UNESP, 407p.

Resende AV (2005) **Micronutrientes na agricultura brasileira: disponibilidade, utilização e perspectivas.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT (Série de Estudos e Documentos, 64).

Rohanipoor A, Norouzi M, Moezzi A, Hassibi P (2013) Effect of silicon on some physiological properties of maize (*Zea mays* L.) under salt stress. **Journal of Biological and Environmental Sciences** 7:71–79.

Rosolem CA (1992) Eficiência da adubação foliar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba : Fundação Cargill, p.315-351.

Saidi MN, Jbir R, Ghorbel I, Namsi A, Drira N, Gargouri-Bouزيد R (2012) 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**50:1-7.

Shmidt SB, Jensen PE, Husted S (2016) Manganese deficiency in plants: The impact on photosystem II. **Trends in Plant Science** 21: 622-632.

Schindler PW, Furst B, Dick R, Wolf PU (1976) Ligand properties of surface silanol groups. I. Surface complex formation with  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{3+}$ , and  $\text{Pb}^{2+}$ . **J Colloid Interface Sci.** 55:469.

Sekhon BS (2003) Chelates for micronutrient nutrition among crops. **Resonance** 8: 46–53.

Silva AF et al. (2015) **Sorgo granífero: estenda sua safrinha com segurança**. Sete Lagoas:EMBRAPA Milho e Sorgo, 65p.

Sousa JV, Rodrigues CR De, Luz Q, Carvalho PC, Rodrigues TM De, Brito CH De (2010) Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Biosci. J.** 26:502–513.

Tabãna BS, Heckman JR (2015) Silicon in soils and plants. In Rodrigues FA, Dantnoff LE (Eds.) **Silicon and plant diseases**. Springer International Publishing, p. 7-51.

Timotiwu B, Nurmauli N, Yulianti P (2017) Application Of Manganese And Silica Through Leaves And Their Effect On Growth And Yield Of Rice In Rice Field In Village Of Sinar Agung, Sub-District Of PulauPangung, District Of Tanggamus, Lampung Province, Indonesia. **J. ofAgriSci**34 :48-60.

Veloso C, Muraoka T, Malavolta E, Carvalho JG (1995) Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino. **Scientia Agricola** 52: 376-383.