

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA
DE ZINCO EM PLANTAS DE ARROZ E SOJA**

Guilherme Felisberto
Engenheiro Agrônomo

2018

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

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA
DE ZINCO EM PLANTAS DE ARROZ E SOJA**

Guilherme Felisberto

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus
de Jaboticabal, como parte das exigências
para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Produção Vegetal)**

2018

F315s Felisberto, Guilherme
Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja / Guilherme Felisberto. -- Jaboticabal, 2018
63 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado
Coorientadora: Priscila Lupino Gratão

1. ácido silícico estabilizado. 2. estresse oxidativo. 3. fontes de Si. 4. nanosférica. 5. silicatos estabilizados. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA DE ZINCO EM PLANTAS DE ARROZ E SOJA

AUTOR: GUILHERME FELISBERTO

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



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



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES
Departamento de Solos e Recursos Ambientais/FCA-UNESP / Botucatu/SP



Pós-doutorando JOAQUIM JOSÉ FRAZÃO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE
CTA - Colégio Técnico Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Profa. Dra. DENISE APARECIDA CHICONATO
Secretaria da Educação do Estado de São Paulo/Escola Estadual / Ibitinga/SP

Jaboticabal, 05 de outubro de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

GUILHERME FELISBERTO- nasceu em Mogi Guaçu/SP aos 22 dias de dezembro de 1986. Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) - Câmpus de Registro em 2007 onde se tornou Engenheiro Agrônomo em 2012. Durante o período de graduação desenvolveu experimentos na área de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, foi cofundador do Grupo de Estudos e Pesquisas em Bananicultura, Adubação, Nutrição e Solos (Geban) e bolsista de iniciação científica da FAPESP. Realizou estágio curricular e trabalhou na iniciativa privada com experimentação agrícola de produtos fitossanitários e biotecnologia de 2011 a 2014. Ingressou no curso de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), nível Mestrado da Universidade Federal de Goiás (UFG) - Regional Jataí em 2014, onde conduziu a dissertação na linha de pesquisa Solos e Nutrição de Plantas e obtendo o título de Mestre em Agronomia em 2015. No mesmo ano iniciou no curso de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), nível Doutorado da UNESP - Câmpus de Jaboticabal, onde fez parte do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (Genplant) e desenvolveu pesquisas com Nutrição de Plantas. Em 2018 ingressou como Assistente Agropecuário na Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora Aparecida por sempre me proporcionarem saúde, esperança e força para lutar e enfrentar os desafios da vida.

Ao Prof. Dr. Renato de Mello Prado pela orientação, ensinamentos, dedicação, paciência, compreensão, confiança e dedicação à minha formação e ao meu trabalho.

À Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão, pela coorientação, dedicação à minha formação e toda contribuição nas análises referentes ao estresse.

À minha esposa Patrícia Aparecida de Carvalho Felisberto por estar sempre ao meu lado, ajudando, apoiando e contribuindo na instalação, condução e avaliação dos experimentos.

Aos meus pais, Osvaldo e Sueli que mesmo distantes sempre serão minhas fontes inspiradoras de dedicação, incentivo e educação.

Ao meu irmão Fidel pelo incentivo e apoio aos meus estudos.

Aos meus sogros Paulo e Maria pela torcida, apoio e confiança.

À UNESP (FCAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa e apoio para a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Solos e Adubos e do Departamento de Biologia pelos ensinamentos e auxílios prestados nas análises laboratoriais.

Aos professores doutores Jairo Osvaldo Cazetta e Marcelo da Costa Ferreira pelas contribuições na banca do Exame Geral de Qualificação.

Ao professor doutor Leandro José Grava de Godoy pelo apoio durante toda minha jornada acadêmica e profissional.

À banca pelo tempo despendido na correção da tese e pelas valiosas contribuições.

A todos colegas da pós-graduação e do Genplant, em especial ao Raimundo, Rafael, Jonas e Cid pela troca de conhecimento e ajuda no desenvolvimento das fontes e avaliações.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
 CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	 1
1 Introdução.....	1
2 Revisão de literatura	2
2.1 Estresse em plantas deficientes em zinco.....	2
2.2 Silício na planta	3
2.3 Fontes de silício.....	4
2.4 Silício na mitigação dos efeitos do estresse ocasionado por deficiência de micronutrientes	6
3 Referências.....	7
 CAPÍTULO 2 - APLICAÇÃO FOLIAR DE NANOSÍLICA E FONTES SOLÚVEIS DE SILÍCIO AUMENTA O ACÚMULO DE SILÍCIO E A PRODUÇÃO DE GRÃOS DE ARROZ E DE SOJA.....	 13
Resumo	13
1 Introdução.....	14
2 Material e métodos	16
2.1 Delineamento experimental e tratamentos	17
2.2 Teste visual da estabilidade da calda	18
2.3 Coleta de dados	19
2.4 Análise estatística.....	20
3 Resultados.....	21
3.1 Fontes e concentrações de Si em plantas de soja	22
3.2 Fontes e concentrações de Si em plantas de arroz.....	26
4 Discussão	30
5 Conclusão.....	33
6 Referências.....	34

CAPITULO 3 - SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA DE ZINCO EM PLANTAS DE ARROZ E DE SOJA CULTIVADAS COM SOLUÇÃO NUTRITIVA		37
Resumo		37
1	Introdução	38
2	Material e métodos	39
2.1	Delineamento experimental e tratamentos	40
2.2	Coleta de dados	42
2.2.1	Índice de cor verde das folhas e eficiência quântica do fotossistema II ...	42
2.2.2	Vazamento de eletrólitos e análises do estresse oxidativo	43
2.2.3	Biometria, acúmulo de Si e de Zn e produção de grãos	45
2.3	Análise estatística.....	46
3	Resultados.....	46
3.1	Silício na atenuação de estresse por deficiência de Zn em plantas de soja...	46
3.2	Silício na atenuação de estresse por deficiência de Zn em plantas de arroz	53
4	Discussão	58
5	Conclusões	61
6	Referências.....	61

SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA DE ZINCO EM PLANTAS DE ARROZ E SOJA

RESUMO – A deficiência de zinco (Zn) leva ao estresse oxidativo, causando prejuízos na produção e qualidade do produto colhido em diversas espécies de plantas cultivadas. O silício (Si) por sua vez é um elemento conhecido por mitigar diversos tipos de estresses, podendo ser uma importante ferramenta na mitigação da deficiência de Zn. Contudo, não há relatos na literatura sobre sua eficácia na mitigação da deficiência do micronutriente em nível de produção, nem se há diferenças entre fornecê-lo via solução nutritiva (radicular) ou via aplicação foliar. Possivelmente em função de que a adoção da aplicação foliar de Si ainda é pequena, justamente por apresentar problemas com a polimerização do Si da calda. Isso se dá possivelmente em função da utilização de concentrações, pH e misturas inadequadas. Para tentar minimizar esses problemas, novas fontes de Si têm sido desenvolvidas, mas pouco se sabe sobre seu comportamento e sua eficácia em relação ao silicato de potássio, considerado fonte padrão nos estudos com Si. Nesse sentido foram realizados dois estudos, sendo o primeiro para avaliar o comportamento e a eficácia de fontes de Si (silicato de potássio, nanosílica, silicato de sódio e potássio estabilizado e ácido silícico estabilizado) e concentrações (0; 0,5; 1,0; 1,5 g L⁻¹ de Si) no crescimento e produção de grãos de soja e de arroz; e o segundo para avaliar o efeito do Si aplicado via foliar ou radicular (via solução nutritiva) na mitigação da deficiência de Zn em soja e em arroz. No primeiro estudo foi observado que as fontes foram eficientes no fornecimento de Si. Na maioria das variáveis estudadas o silicato de sódio e potássio estabilizado se equiparou ou foi superior o silicato de potássio. A concentração de aproximadamente 1 g L⁻¹ de Si apresentou melhor desempenho para a maioria das variáveis analisadas. No segundo estudo foi observado que o Si fornecido via radicular mitigou a deficiência de Zn da soja por ter diminuído os teores de malondialdeído e mantendo a produção de grãos a níveis semelhantes das plantas sem deficiência. O arroz não teve a deficiência de Zn mitigada pelo Si, embora a atividade da enzima superóxido dismutase tenha aumentado com o fornecimento radicular do elemento benéfico. Contudo independentemente se em condição de suficiência ou deficiência de Zn a aplicação radicular ou foliar de Si, promoveu ganhos na produção em relação à não aplicação de Si. Por fim acredita-se as novas fontes apresentem potencial em fornecer Si eficientemente às plantas sendo uma alternativa ao uso do silicato de potássio e que tanto a aplicação foliar como radicular promova ganhos consideráveis na soja e no arroz, seja sob deficiência de Zn ou não.

Palavras-chave: ácido silícico estabilizado, estresse oxidativo, fontes de Si, nanosílica, Si foliar, silicatos estabilizados

SILICON ON MITIGATION OF ZINC DEFICIENCY STRESS IN RICE AND SOYBEAN PLANTS

ABSTRACT – Zinc (Zn) deficiency leads to oxidative stress, causing losses in yield and quality of the product harvested in several species of cultivated plants. Silicon (Si) is an element known to mitigate several types of stress, and can be an important tool in the mitigation of Zn deficiency. However, there are no reports in the literature about its effectiveness in mitigating Zn deficiency at yield level, nor whether there are differences between providing it via root or leaf. The adoption of the foliar application of Si is still poor due to problems with the Si polymerization in the solution, much as a result of the inadequate concentrations use, pH and mixtures. Recently new sources of Si have been developed but little is known about their behavior and their efficacy compared to potassium silicate, considered a standard source in studies with Si. In this sense, two studies were carried out. The first one to evaluate behavior and efficacy of Si sources (potassium silicate, nanosilica, stabilized sodium and potassium silicate and stabilized silicic acid) and concentrations (0, 0.5, 1.0, 1.5 g L⁻¹ of Si) in the growth and production of soybeans and rice; and the second to evaluate the effect of Si applied by foliar or root in the mitigation of Zn deficiency in soybean and rice. In the first study, it was observed that the sources were efficient in the supply of Si. In most of the variables studied, the stabilized sodium and potassium silicate was equal or superior to the potassium silicate. The concentration of approximately 1 g L⁻¹ of Si presented better performance for most of the analyzed variables. In the second study it was observed that Si provided by the root mitigated the Zn deficiency of soybean by reducing the MDA levels and maintaining grain production at similar levels of plants without deficiency. Rice did not have the Zn deficiency mitigated by Si, although SOD activity increased with root supply of the beneficial element. However independently if in Zn sufficiency or deficiency condition, the root or leaf application of Si promoted production gains in relation to the non-application of Si. Finally, it is believed that the new sources have potential to provide Si efficiently to plants, being an alternative to the use of potassium silicate and that both foliar and root application promote considerable gains in soybean and rice, whether under Zn deficiency or not.

Keywords: stabilized silicic acid, oxidative stress, Si sources, nanosilica, Si foliar, stabilized silicates

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1 Introdução

As culturas agrícolas sob deficiência de micronutrientes têm sua produtividade e qualidade reduzidas. A limitação de alguns micronutrientes é recorrente em diversas partes do mundo (Alloway, 2008; Tandy et al., 2011) e tem aumentado pelo cultivo excessivo e utilização de fertilizantes formulados com baixa concentração de micronutrientes.

A deficiência de zinco (Zn) causa distúrbios no crescimento e no desenvolvimento das plantas em função do seu papel na atividade enzimática e no metabolismo de carboidratos e proteínas, bem como fitormônios (Cakmak, 2000; Marschner, 2012). Além disso, é constituinte da superóxido dismutase (SOD), uma das enzimas mais importantes do mecanismo de defesa antioxidante das plantas (Cakmak et al., 1997).

Os sintomas da deficiência de Zn são observados em folhas novas como clorose internerval e/ou margem das folhas, pontuações marrons, leve curvatura, redução no tamanho e aspecto lanceolado de folhas e folíolos. Além disso, ocorre redução na altura e massa seca, epinastia e encurtamento dos internódios (Marschner, 2012; Prado, 2008). Esses sintomas são ocasionados principalmente devido ao estresse oxidativo promovido pelo desbalanço (aumento ou redução desordenados) de espécies reativas de oxigênio (ERO) que a deficiência do micronutriente ocasiona.

Estudando a deficiência de Zn em plantas, trabalhos relataram que o silício (Si) mitigou os efeitos da deficiência de Zn em pepino, arroz e soja por ter melhorado a distribuição do micronutriente na planta (Bityutskii et al., 2014; Mehrabanjoubani et al., 2015; Pascual et al., 2016). Contudo essas pesquisas não estudaram o efeito do Si no estresse oxidativo nem o efeito da aplicação foliar de Si. Nesse contexto, vale salientar que o Si não substitui nutrientes nos processos fisiológicos das plantas, apenas pode em alguns casos atenuar os efeitos deletérios da deficiência nutricional.

Na prática da aplicação foliar de Si é recorrente a polimerização (formação de gel) da solução, dependendo da concentração, do valor pH e misturas com outros compostos, trazendo problemas de entupimento do sistema de pulverização e redução da quantidade de Si aplicada. Além disso, está restrita à utilização apenas do silicato de potássio sem adição de estabilizantes (Zanão Júnior et al., 2009).

Diante disso, têm surgido novas fontes de Si com estabilizantes que podem diminuir a velocidade de polimerização. Além disso, esses estabilizantes podem atuar como adjuvantes aumentando a absorção de Si pela folha. Contudo, têm-se dúvidas quanto à sua eficiência agrônômica em relação ao silicato de potássio e concentrações a serem utilizadas.

Com base no exposto surgem duas hipóteses: (a) novas fontes de Si para aplicação foliar das plantas de soja e de arroz pode ter eficiência maior que o silicato de potássio; (b) A aplicação de Si, tanto foliar como radicular é capaz de mitigar os efeitos da deficiência de Zn em soja e em arroz por diminuir o estresse oxidativo.

2 Revisão de literatura

2.1 Estresse em plantas deficientes em zinco

A deficiência de Zn é um dos maiores limitantes da produção agrícola, causando perdas consideráveis em culturas economicamente importantes em diversas localidades do globo (Alloway, 2008). A baixa disponibilidade de Zn às culturas tem sido observada em solos naturalmente pobres neste elemento ou que receberam práticas agrícolas inadequadas como calagem excessiva e adubação fosfatada (Kabata-Pendias, 2011).

As plantas deficientes em Zn têm seu metabolismo prejudicado, desencadeando o desbalanço de ERO, como o oxigênio “singlet” ($^1\text{O}_2$), radical superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($\text{OH}^{\bullet}$), o que acarreta no chamado estresse oxidativo (Sharma et al., 2004). As ERO degradam ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos de membranas o que compromete a estrutura e o funcionamento celular, aumentando o vazamento de eletrólitos da célula e inibindo o desenvolvimento da planta (Bailey e Mittler, 2006).

Além de possuir papel estrutural em componentes da membrana plasmática, ser constituinte e catalisador de enzimas relacionadas ao metabolismo do nitrogênio (N), transferência de energia e síntese proteica, o Zn atua em vários processos metabólicos, reações de oxi-redução e reações de enzimas como a superóxido dismutase (Cu-Zn SOD) (Marschner, 2012). Portanto, o Zn atua como protetor e componente estabilizador das biomembranas contra as ERO, pois controla a geração e desintoxicação (Alloway, 2008).

Dessa forma, o estresse oxidativo em plantas deficientes em Zn tende a ser mais severo, pois além de desencadear o desbalanço de ERO, enzimas importantes no processo de defesa apresentam sua atividade diminuída pela ausência desse micronutriente.

2.2 Silício na planta

O Si é comumente encontrado em tecidos vegetais mesmo não sendo considerado um nutriente. É considerado como elemento benéfico às plantas, pois apresenta a capacidade em atenuar os efeitos causados por algum tipo de estresse, como, por exemplo, a deficiência nutricional (Hernandes-Apaolaza et al., 2014).

As plantas absorvem Si na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e sua absorção pode ser por meio de mecanismo ativo, passivo ou exclusivo, determinantes para a classificação quanto ao acúmulo do elemento benéfico na parte aérea da planta em acumuladora ($>10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), acumuladora intermediária ($5 - 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e exclusora (ou não-acumuladora) ($<5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (Ma e Takahashi, 2002; Mitani e Ma, 2005).

O arroz, espécie acumuladora de Si, apresenta grande densidade de transportadores específicos nas raízes e na parte aérea que facilitam o movimento do H_4SiO_4 da solução para dentro da raiz, e da raiz à parte aérea (Ma et al., 2006; Ma et al., 2007).

Por algum tempo, por ser uma espécie acumuladora intermediária, pensou-se que a soja não possuía transportadores específicos de Si, apresentando absorção passiva (Miyake e Takahashi, 1985). No entanto, recentemente foram identificados transportadores com o uso de técnicas moleculares, mas a grande variação na

quantidade desses transportadores entre genótipos de soja e possivelmente uma baixa eficiência no movimento do Si absorvido na raiz à parte aérea não permite acúmulos que a classifiquem acumuladora (Deshmukh et al., 2013).

Após absorvido, o H_4SiO_4 é translocado pelo xilema à parte aérea e se deposita na parede celular das células da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos espaços intercelulares. À medida que a água evapora ou é transportada para outro tecido o H_4SiO_4 se condensa em sílica gel polimerizada, não podendo ser redistribuído pela planta, tornando-se imóvel (Ma et al., 2011).

Quando fornecido às plantas, o Si mantém em níveis adequados os teores de clorofila em plantas submetidas a estresse, haja vista que os cloroplastos são sítios de geração de ERO que danificam essa importante organela. O Si parece aumentar a expressão de genes que regulam a síntese e atividade de enzimas importantes no metabolismo e sistema antioxidante, responsáveis por combater as ERO diminuindo os danos do estresse oxidativo (Brunings et al., 2009; Cao et al., 2015; Ghareeb et al., 2011; Li et al., 2012).

Uma maneira de fornecer Si às plantas que apresentam absorção radicular e/ou transporte da raiz para a parte aérea reduzidos é a aplicação foliar. Essa técnica tem sido mais utilizada para estudar os efeitos do Si na profilaxia de doenças fúngicas e tem apresentado resultados controversos, contudo verifica-se bons resultados nos teores e acúmulo do elemento benéfico nas plantas tanto em plantas não-acumuladoras como nas acumuladoras (Prakash et al., 2011).

2.3 Fontes de silício

Embora cerca de 50 a 70% da massa dos solos seja composta por sílica (SiO_2) (Ma e Yamaji, 2006), na solução do solo os teores de H_4SiO_4 variam de 0,1 a 0,6 mM (Epstein, 2001). Já em cursos de água doce, por exemplo, a concentração de cerca de 0,15 mM seria considerada típica (Treguer et al., 1995) e muito baixa quando comparada à concentração necessária para suprir adequadamente as plantas com Si (2 mM) (Prado et al., 2018).

Face à baixa disponibilidade no meio de cultivo, fica evidente a necessidade de suprir as plantas com Si por meio de fertilizantes silicatados. A fonte de silício

mais utilizada na agricultura tem sido a escória de siderurgia (silicatos de cálcio e magnésio), considerada uma fonte de baixo custo e abundante (Stocco et al., 2010). Contudo, escórias de siderurgia promovem alteração do pH do solo dificultando seu emprego em solos corrigidos (Madeiros et al., 2009; Nogueira et al., 2012) e podem conter metais pesados nocivos às plantas e ao meio ambiente (Wally et al., 2015).

As fontes solúveis de silício como o silicato de potássio e o silicato de sódio podem ser empregadas para fornecer Si via radicular ou foliar e apresentam-se como uma alternativa aos silicatos de cálcio e magnésio. No entanto, os silicatos de sódio contêm teores de sódio (Na) elevados tornando restrita sua utilização, sendo por isso o silicato de potássio o mais utilizado (Zanão Júnior et al., 2009).

Outras fontes de Si têm sido desenvolvidas com a utilização de aditivos estabilizantes (ex.: sorbitol, polietileno glicol, colina, 1,2 propileno glicol e micronutrientes), pois um dos maiores problemas da utilização de silicatos solúveis é a polimerização da solução. Dependendo do pH e da concentração o H_4SiO_4 se polimeriza formando dímeros, trímeros e cadeias de poliméricas de Si (McKeague e Cline, 1963) que não são absorvidas pelas plantas.

A obtenção de fontes com alta disponibilidade de H_4SiO_4 estabilizado consiste no ataque ácido (HCl e ou H_3PO_4) a silicatos solúveis como o silicato de potássio e de sódio e isso confere à fonte valores de pH variando de 0,4 a 4, a depender do aditivo utilizado (Prado et al., 2017). Para esse tipo de fonte tem-se dado o nome de ácido silícico estabilizado.

Os ácidos silícicos estabilizados apresentam o Si na forma prontamente disponível às plantas (H_4SiO_4) e por isso seriam mais eficientes, mesmo em pequenas concentrações do elemento (Crusciol et al., 2013; Laane, 2017; Prakash et al., 2011). Em condições de campo, a aplicação foliar dessa fonte aumentou o teor de Si das folhas e a produtividade da soja (104 mg L^{-1} de Si) (Crusciol et al., 2013) e do arroz ($8,92 \text{ g L}^{-1}$) (Neeru et al., 2016).

Há também os silicatos estabilizados, que são silicatos solúveis como o silicato de sódio e/ou silicato de potássio previa e parcialmente dissociados e estabilizados com aditivos. Apresentam teores de Si e valores de pH próximos aos dos silicatos de sódio e de potássio com a vantagem dos estabilizantes, assim como

nos ácidos silícicos estabilizados, também atuarem como adjuvantes quando utilizados para aplicação foliar.

Na busca por outras fontes de Si, alguns autores têm testado o potencial de nanosílicas como fertilizante (Dung et al., 2016; Haghighi e Pessarakli, 2013; Tripathi et al., 2015; Wang et al., 2015). As nanosílicas são óxidos de silício nanoparticulados que podem ser absorvidos pelas plantas devido ao seu tamanho reduzido, porém, seu efeito em plantas de arroz e soja sem estresse ou deficientes em Zn ainda não foi relatado.

2.4 Silício na mitigação dos efeitos do estresse ocasionado por deficiência de micronutrientes

Os efeitos benéficos do silício têm sido relatados em diversas culturas e são mais proeminentes quando as plantas são submetidas a estresses (Ma e Yamaji, 2006). O silício tem sido utilizado para mitigar esses estresses como observado em déficit hídrico (Cao et al., 2015), estresse salino (Haghighi e Pessarakli, 2013) e à toxicidade de Al (Liang et al., 2001), Cd (Farooq et al., 2013), Cr (Ali et al., 2013), Mn (Li et al., 2012) e Zn (Kaya et al., 2009). Contudo, no Brasil é conhecido que a deficiência nutricional de micronutrientes, especialmente de Zn, constitui fator limitante nos cultivos de arroz e soja, por exemplo.

Recentemente alguns autores tem se dedicado a estudar o efeito mitigador do Si ao estresse causado pela deficiência de micronutrientes, especialmente de Fe e Zn (Hernandez-Apaolaza, 2014). Gonzalo et al. (2013) observaram que o silício fornecido em solução nutritiva foi capaz de atenuar a deficiência de Fe em soja, proporcionando um atraso na clorose induzida pela deficiência do micronutriente e índices SPAD superiores ao tratamento controle.

Em pepino, o Si via radicular mitigou a deficiência de Fe por aumentar sua disponibilidade no apoplasto das raízes, aumentou a mobilização tanto do micronutriente das raízes à parte aérea pela síntese de Fe-fitoquelatinas (Pavlovic et al., 2013) quanto compostos como o citrato ou catequinas, capazes de transportarem Fe (Bityutskii et al., 2014). Além disso, Bityutskii et al. (2014) verificaram que a deficiência de Mn e Zn nas plantas de pepino ocorreram em menor

intensidade pois tiveram aumento da defesa antioxidante promovida pelo Si nos tecidos das plantas e não de forma direta como foi observado com o Fe.

Em arroz, Mehrabanjoubani et al. (2015) verificaram que o Si também promoveu maior distribuição do Zn das raízes à parte aérea quando as plantas foram submetidas a deficiência, e em soja o Si dobrou o teor de Zn na parte aérea de plantas de soja devido a remobilização de Zn do apoplasto radicular (Pascual et al., 2016). Portanto, a melhor distribuição do Zn promovida pelo Si na planta diminuiu os efeitos da deficiência nutricional (Bityutskii et al., 2014; Mehrabanjoubani et al., 2015; Pascual et al., 2016).

Os estudos relacionando o Si com a mitigação dos efeitos da deficiência de micronutrientes abordam o fornecimento de Si na solução nutritiva, ou seja, absorção radicular. Não foi encontrado na literatura trabalhos relacionando o efeito do Si no sistema enzimático de defesa de soja e de arroz submetidos a deficiência de Zn, seja com a aplicação radicular (via solução nutritiva) ou foliar de Si. Desse modo, para cobrir essa lacuna na literatura torna-se necessário estudar o potencial do Si fornecido de via radicular ou foliar na mitigação do estresse oxidativo ocasionado pela deficiência nutricional de Zn.

3 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 ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 89:66–72.

Alloway BJ, (2008) **Zinc in soils and crop nutrition**. Brussels e Paris: International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association, 139p.

Bailey JS, Mittler R (2006) The role of reactive oxygen species in plant cells. **Plant Physiology** 141:311.

Bityutskii N, Pavlovic J, Yakkonen K, Maksimovi 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 Physiology and Biochemistry** 74:205–211.

Brunings AM, Datnoff LE, Ma JF, Mitani N, Nagamura Y, Rathinasabapathi B, Kirst M (2009) Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. **Annals of Applied Biology** 155:161–170.

Cakmak I (2000) Possible role of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist** 146:185–205.

Cakmak I, Öztürk L, Eker S, Torun B, Kalfa HI, Yilmaz A (1997) Concentration of zinc and activity of copper/zinc-superoxide dismutase in leaves of rye and wheat cultivars differing in sensitivity to zinc deficiency. **Journal of Plant Physiology** 151:91–95.

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. **Scientia Horticulturae** 194:53–62.

Crusciol CAC, Soratto RP, Castro GSA, Costa CHM, Ferrari Neto J (2013) Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica** 44:404–410.

Deshmukh RK, Vivancos J, Guérin V, Sonah H, Labbé C, Belzile F, Bélanger RR (2013) Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in *Arabidopsis* and rice. **Plant Molecular Biology** 83:303–315.

Dung PD, Ngoc LS, Duy NN, Thuy NN, Truc LTM, Le BV, Phu DV, Hien NQ (2016) Effect of nanosilica from rice husk on the growth enhancement of chili plant (*Capsicum frutescens* L.). **Journal of Science and Technology** 54:607–613.

Epstein E (2001) Silicon in plants: facts vs concepts. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (Eds.) **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, p. 1–15

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

Ghareeb H, Bozsó Z, Ott GP, Repenning C, Stahl F, Wydra K (2011) Transcriptome of silicon-induced resistance against *Ralstonia solanacearum* in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect. **Physiological and Molecular Plant Pathology** 75:83–89.

Gonzalo MJ, Lucena JJ, Hernandez-Apaolaza L (2013) Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry** 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.

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

Kabata-Pendias, A. (2011) **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group. 548p.

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.

Laane HM (2017) The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: an overview of the results from 2003–2014. **Silicon** 9:803–807.

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.

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.

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

Ma JF, Tamai K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M, Ishiguro M, Murata Y, Yano M (2006) A silicon transporter in rice. **Nature** 440:688–691.

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

Ma JF, Yamaji N, Mitani-Ueno N (2011) Transport of silicon from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences** 87:377–385.

Ma JF, Yamaji N, Mitani N, Tamai K, Konishi S, Fujiwara T, Katsuhara M, Yano M (2007) An efflux transporter of silicon in rice. **Nature** 448:209.

Madeiros L, Almeida GM, Aquino BF (2009) Aplicação de escória siderúrgica no solo: efeito sobre o fósforo solúvel. **Engenharia Ambiental** 6:27–37.

Marschner H. (2012) **Mineral nutrition of higher plants**. London: Elsevier. 643p.

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

Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour H, Aghdasi M (2015) Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology** 27:19–29.

Miyake Y, Takahashi E (1985) Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition** 31:625–634.

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

Neeru J, Shaliesh C, Vaishali T, Purav S, Manoharlal R (2016) Role of orthosilicic acid (OSA) based formulation in improving plant growth and development. **Silicon** 1–6.

Nogueira NO, Tomaz MA, Andrade FV, Reis EF, Brinate SVB (2012) Influência da aplicação de dois resíduos industriais nas propriedades químicas de dois solos cultivados com café arábica. **Ciência Agrônômica** 43:11–21.

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

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

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

Prado RM, Barreto RF, Felisberto G (2017) Nitrate–ammonium ratios and silicon used in hydroponics In: Webster DJ (Ed.) **Advances in Hydroponics Research**. Nova Iorque: Nova Science Publishers, p. 33–55.

Prado RM, Felisberto G, Barreto RF (2018) Nova abordagem do silício na mitigação de estresses por deficiência de nutrientes In: Prado, RM, Campos, CNS (Eds.) **Nutrição e adubação de grandes culturas**. Jaboticabal: FUNEP/FCAV, p. 17–26.

Prakash NB, Chandrashekar N, Mahendra C, Patil SU, Thippeshappa GN, Laane HM (2011) Effect of foliar spray of soluble silicic acid on growth and yield parameters of wetland rice in hilly and coastal zone soils of Karnataka, South India. **Journal of Plant Nutrition** 34:1883–1893.

Sharma PN, Kumar P, Tewari, RK (2004) Early signs of oxidative stress in wheat plants subjected to zinc deficiency. **Journal of Plant Nutrition** 27:451–463.

Stocco FC, Passos RR, Andrade FV, Reis EF, Lima JSS, Santos DA, Machado RV (2010) Uso de escórias de siderurgia na produção de matéria seca e perfilhamento de duas gramíneas do gênero *Brachiaria* em um Latossolo Vermelho–Amarelo. **Bioscience Journal** 26:240–248.

Tandy S, Mundus S, Yngvesson J, De Band TC, Lombi E, Schjoerring JK, Husted S (2011) The use of DGT for predication of plant available copper, zinc and phosphorus in agricultural soils. **Plant and Soil** 346:167–180.

Tréguer P, Nelson DM, Van Bennekom AJ, DeMaster DJ, Leynaert A, Queguiner B (1995) The silica balance in the world ocean: a reestimate. **Science** 268: 375–379.

Tripathi DK, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK, Dubey NK (2015) Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry** 96:189–198.

Wally MS, Bissani CA, Santos VP, Bortolon L, Bortolon ESO, Andreazza R, Gianello C (2015) Correção da acidez do solo e aporte de metais pesados pela aplicação de escória básica de aciaria. **Bioscience Journal** 31:135–145.

Wang S, Wang F, Gao S (2015) Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental and Science Pollution Research** 22:2837.

Zanão Júnior LA, Fontes RLF, Avila VT (2009) Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:203–206.

CAPÍTULO 2 - Aplicação foliar de nanosílica e fontes solúveis de silício aumenta o acúmulo de silício e a produção de grãos de arroz e de soja¹

RESUMO - A aplicação foliar de silício (Si) é eficaz no fornecimento do elemento benéfico às plantas. Contudo seu efeito está relacionado com a capacidade da planta em acumulá-lo. Com o surgimento de novas fontes fluidas há a demanda de estudos para avaliar a efetividade dessas no fornecimento de Si às plantas, bem como seus efeitos no acúmulo e indicadores de desempenho agrônômico. Nesse sentido, foi avaliado o efeito da aplicação foliar de quatro fontes de Si (ácido silícico estabilizado; nanosílica; silicato de potássio; e silicato de sódio e potássio estabilizado) em quatro concentrações (0, 0,5; 1,0; 1,5 g L⁻¹) em plantas de soja e de arroz. Foi instalado um experimento para cada espécie. As plantas foram cultivadas em casa de vegetação em vasos de 7 dm³ preenchidos com vermiculita e fornecimento de solução nutritiva. Foram realizadas quatro aplicações foliares durante o ciclo das espécies. Em ambos os experimentos foram avaliados o índice de cor verde das folhas, vazamento de eletrólitos, teor e acúmulo de Si, massa seca da parte aérea e os componentes de produção. No experimento com soja, com exceção da nanosílica as fontes foram eficientes na diminuição do vazamento de eletrólitos, mas sem efeito no índice de cor verde. O silicato de sódio e potássio estabilizado proporcionou maior acúmulo de Si na parte aérea das plantas de soja na concentração de 1,2 g L⁻¹ de Si. No arroz, todas as fontes de Si diminuíram o vazamento de eletrólitos e promoveram incrementos no índice de cor verde da folha e componentes de produção, com exceção do número de perfilhos reprodutivos. O silicato de sódio e potássio estabilizado proporcionou maior acúmulo de Si na parte aérea e na produção de grãos em ambos os experimentos, sendo uma fonte alternativa de Si para aplicação foliar na soja e no arroz. Na maioria das variáveis estudadas o silicato de sódio e potássio estabilizado se equiparou ou foi superior o silicato de potássio. Plantas de soja e de arroz cultivadas em casa de vegetação, vasos com substrato inerte apresentaram maior produção de grãos quando se realizou quatro aplicações de aproximadamente 1 g L⁻¹ de Si durante o ciclo.

Palavras-chave: ácido silícico estabilizado, fontes alternativas de silício, *Glycine max*, *Oryza sativa*, silicato estabilizado

¹ Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido e encontra-se em avaliação para publicação.

1 Introdução

As culturas de soja e de arroz estão sujeitas a estresses que comprometem a integridade de membranas celulares ocasionando o vazamento de eletrólitos, induzem a degradação da clorofila e menores produtividades (Le Gall et al., 2015). O silício (Si), considerado um elemento benéfico às plantas, é capaz de atenuar alguns estresses que prejudicam as culturas agrícolas, mantendo o seu potencial produtivo (Ma et al., 2001; Ma, 2004; Savvas e Ntatsi, 2015). No entanto, os benefícios do Si às plantas estão relacionados ao seu acúmulo nos tecidos vegetais, por isso é importante conhecer a capacidade da fonte em promover maior acúmulo de Si.

Embora seja uma técnica amplamente utilizada, aplicações foliares de 4,8 e 16 g L⁻¹ de Si na forma de silicato de potássio não promoveram incrementos na massa seca da parte aérea, no teor e acúmulo de Si e na produção em plantas de arroz (Zanão Júnior et al., 2009; Cacique et al., 2013; Buck et al., 2013).

A ausência de incrementos nos teores foliares em soja com aplicações foliares de 0 até 7,5 g L⁻¹ de Si em um experimento de campo também foi verificada (Rodrigues et al., 2009). Contudo, em condições de casa de vegetação os mesmos autores verificaram que a aplicação de 5 g L⁻¹ proporcionou maior teor de Si em relação às plantas que não receberam aplicação do elemento benéfico.

A maioria dos estudos com Si foliar utilizou como fonte o silicato de potássio, sendo por isso considerada a fonte padrão em estudos com aplicação foliar de Si (Zanão Júnior et al., 2009). Contudo, um dos maiores inconvenientes da aplicação foliar de Si é a polimerização da calda. Para minimizar a incidência de polimerização, novas fontes fluidas com estabilizantes estão sendo desenvolvidas, mas pouco se sabe sobre sua eficácia e estabilidade.

Com o surgimento dessas novas fontes de Si como o silicato de sódio e potássio estabilizado, ácido silícico estabilizado, e a nanosílica, há a necessidade de comparar sua eficácia e definir as concentrações a serem utilizadas, pois, em soluções com concentrações acima de 100 mg L⁻¹ de Si inicia-se a condensação do monômero H₄SiO₄, cujo processo tem sua velocidade aumentada em função do valor pH e da concentração de Si, podendo, com o avançar do tempo, levar à

polimerização (Iler, 1979; Chan, 1989; Tréguer et al., 1995; Gallinari et al., 2002), diminuindo assim a disponibilidade e absorção do elemento benéfico.

Além disso, é necessário avaliar o acúmulo de Si no tecido vegetal e seu reflexo no desempenho agrônômico das fontes alternativas em relação ao padrão gerando informações que possam auxiliar na tomada de decisão quanto à sua utilização.

Os ácidos silícicos estabilizados apresentam o Si na forma prontamente disponível às plantas (H_4SiO_4) e por isso seriam mais eficientes, mesmo em pequenas concentrações do elemento (Prakash et al., 2011; Crusciol et al., 2013; Laane, 2017). Em condições de campo, a aplicação foliar dessa fonte aumentou o teor de Si das folhas e a produtividade da soja (104 mg L^{-1} de Si) (Crusciol et al., 2013) e do arroz ($8,92 \text{ g L}^{-1}$) (Neeru et al., 2016).

Um estudo com nanosílica com dispersão coloidal, óxidos de Si nanoparticulados que podem ser absorvidos pelas plantas devido ao seu tamanho reduzido, demonstrou que essa fonte aumentou o potencial germinativo de sementes de tomate (Siddiqui e Al-Whaibi, 2014). Outro estudo demonstrou que a aplicação foliar de nanosílica pode promover incrementos no teor de clorofila de folhas de arroz submetido a estresse por cádmio, sem, no entanto, promover o mesmo efeito em plantas sem estresse (Wang et al., 2015).

O silicato de sódio e potássio estabilizado é outra fonte alternativa de Si. Contudo, ainda não há estudos sobre essa fonte na literatura. Devido à presença de um estabilizante em sua constituição com característica umectante, espera-se uma velocidade de condensação menor, maior persistência da gota aplicada sobre a superfície foliar e conseqüentemente maior a absorção de Si, refletindo em aumento no teor e no acúmulo do elemento na planta. Portanto, espera-se que essa fonte alternativa possa ter desempenho superior ao silicato de potássio.

A maioria dos estudos na cultura da soja e do arroz não evidencia a viabilidade da aplicação foliar de Si e as possíveis interações entre fontes e concentrações de Si. Dessa forma, para ampliar o conhecimento sobre a aplicação foliar de Si em plantas de soja e de arroz é pertinente testar as hipóteses de que: (i) novas fontes de Si para aplicação foliar das plantas de soja e de arroz podem ter eficiência maior que o silicato de potássio; (ii) a concentração de silício que

proporciona o melhor desempenho da soja e do arroz independente da fonte utilizada. Para tal, avaliou-se o efeito do Si fornecido por quatro fontes e quatro concentrações no vazamento de eletrólitos, índice de cor verde das folhas, teor e acúmulo de Si, massa seca da parte aérea e componentes de produção de plantas de soja e de arroz.

2 Material e métodos

A pesquisa foi desenvolvida em sistema hidropônico a partir de dois experimentos, um com soja (*Glycine max*) entre janeiro e abril de 2016 e outro com arroz (*Oryza sativa*) entre outubro de 2016 e fevereiro de 2017. Estes estudos foram desenvolvidos em casa de vegetação do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – câmpus de Jaboticabal, SP, monitorando-se a umidade e temperatura do ar (Figura 1).

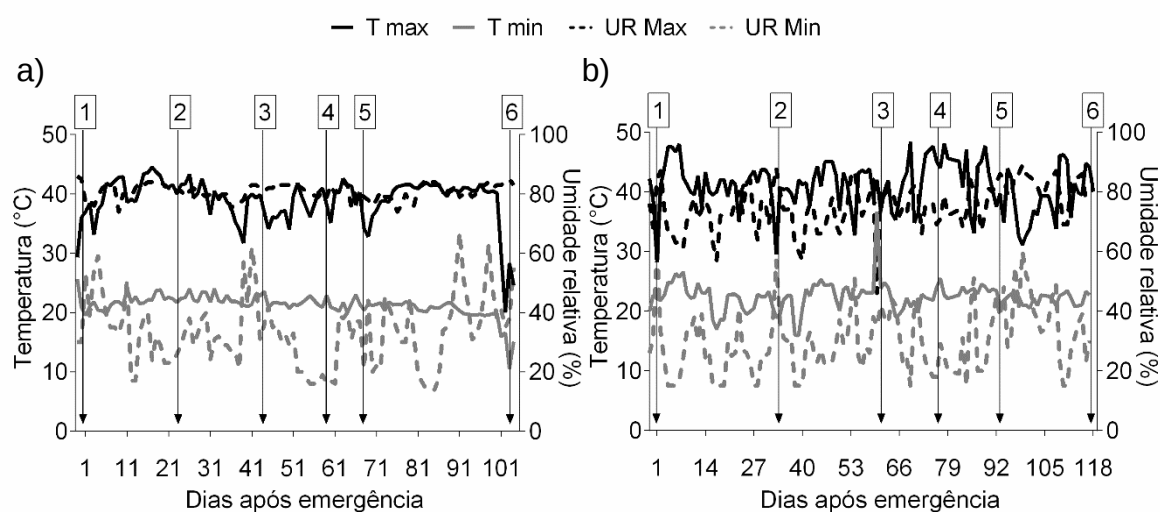


Figura 1. Temperatura máxima (T max) e mínima (T min), e umidade relativa máxima (UR max) e mínima (UR min) durante os experimentos com soja (a) e arroz (b). Setas identificam: (1) Emergência; (2, 3, 4 e 5) primeira, segunda, terceira e quarta aplicação dos tratamentos, respectivamente; (6) colheita.

As sementes de soja (Pioneer 98Y30) e arroz (Agronorte ANA 5015) foram semeadas em vasos plásticos de 7 dm³ preenchidos com vermiculita de granulometria fina. Os vasos foram irrigados diariamente com água (destilada e

posteriormente deionizada) até a emergência das plântulas. Foi realizado o desbaste deixando-se quatro plântulas por vaso e se iniciou o fornecimento diário de 250 mL solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) a 25, 50 e 75 % da força iônica aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE), respectivamente.

A solução nutritiva foi preparada com água (previamente destilada e deionizada) e reagentes puro para análise. O valor pH da solução foi ajustado para $5,8 \pm 0,3$ com soluções de NaOH 1,0 M ou HCl 1,0 M.

O substrato foi lavado semanalmente com aproximadamente 2 litros de água destilada e deionizada (pH 4,5 ajustado a partir da adição de solução de HCl 1,0 M) para evitar a sua salinização e a alcalinização.

2.1 Delineamento experimental e tratamentos

Os experimentos foram conduzidos em esquema fatorial 4x4 e delineamento de blocos casualizados com 4 repetições. Foram testadas quatro fontes de Si: (i) silicato de potássio, SiK (SiFol®, 128 g L⁻¹ de Si, 126 g L⁻¹ de K₂O, pH 12,3, Diatom®), (ii) nanosílica, Nano (Bindzil® 15/750, $\varnothing$ 4nm, 77,12 g L⁻¹ de Si, pH 10,6, AkzoNobel®), (iii) silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, SiNaKE (114,91 g L⁻¹ de Si, 18,9 g L⁻¹ de K₂O, 60,5 g L⁻¹ de NaO e pH 12,3), e (iv) ácido silícico estabilizado com PEG, ASiE (14,04 g L⁻¹ de Si e 8,88 g L⁻¹ de NaO e pH 1,6), em quatro concentrações: 0,0; 0,5; 1,0; 1,5 g L⁻¹ de Si.

A calda teve o valor pH ajustado para 5,5 com soluções de NaOH 1,0 M ou HCl 1,0 M dependendo das características das fontes. Os íons acompanhantes foram equilibrados entre as fontes e as concentrações com a utilização de NaCl e KCl.

Em cada experimento foram realizadas quatro aplicações foliares. Na soja aplicou-se nos estádios fenológicos V4, R1, R3 e R5 (Fehr e Caviness, 1977), e no arroz em V3, V5, R3 e R6 (Counce et al., 2000) (Figura 1).

As aplicações foram realizadas com pulverizador costal manual (modelo Evolution 20 Super, Matabi, Goizper Group, Espanha) com controle de pressão por meio de válvula com mola a 3 bar de pressão, munido de ponta de jato cônico HC

80/0.8/3 (Goizper Group, Espanha) e taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹, cada vaso recebendo aproximadamente 0,4 mL de solução.

Para realizar as aplicações, os vasos foram colocados no chão, dispostos em linha, separados por tratamento e distantes aproximadamente um metro para evitar que houvesse contaminação entre os tratamentos. No momento da aplicação a vermiculita dos vasos estava coberta com algodão para evitar deposição da calda no substrato e possível absorção radicular do Si.

As aplicações foram realizadas em condições de temperatura e umidade abaixo de 30°C e acima de 50%, respectivamente, consideradas favoráveis (Raetano, 2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Estádios de desenvolvimento e dias após a emergência (DAE) da soja e do arroz, temperatura média (T média) e umidade relativa média (UR média) durante as aplicações dos tratamentos.

Estádio de desenvolvimento	DAE	T média (°C)	UR média (%)
		Soja	
V4	22	25,7	77
R1	43	23,6	65
R3	59	28,5	55
R5	69	25,1	69
Arroz			
V3	33	25,6	63
V6	60	28,4	68
R3	77	27,1	62
R6	93	29,5	59

2.2 Teste visual da estabilidade da calda

Realizou-se um teste visual de estabilidade das soluções utilizadas nos experimentos em função do tempo a fim de verificar a presença de modificações no aspecto das soluções (indicativo de condensação do Si).

Foram preparadas soluções idênticas às utilizadas nos experimentos e acondicionadas em tubos de ensaio de vidro transparente. As soluções foram monitoradas por até 24 horas. O registro das alterações foi por meio de fotografias aos 0, 30 e 180 minutos após o preparo pois a partir de 180 minutos não houve mais mudanças no aspecto das soluções.

2.3 Coleta de dados

2.3.1 Vazamento de eletrólitos (%VE)

Sete dias após a última aplicação determinou-se a porcentagem de vazamento de eletrólitos (%VE) a partir de discos (100 mg) de folhas totalmente expandidas que receberam as quatro aplicações. Os discos foram lavados em água deionizada, colocados em recipientes com 20 mL de água deionizada em temperatura ambiente (25°C) e mantidos em repouso por 60 minutos. Então, a condutividade elétrica foi registrada com um condutivímetro (CEi). Posteriormente as mesmas amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 minutos e então, após resfriadas a condutividade elétrica das amostras foi registrada novamente (CEf). A %VE foi calculada como: $\%VE = (CEi / CEf) \times 100$ (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

2.3.2 Índice de cor verde das folhas (ICV)

Após a amostragem para a determinação da %VE realizou-se a leitura com o clorofilômetro (Modelo CCM-200 Plus da Opti-Sciences®) do índice de cor verde da folha em duas folhas por planta, de duas plantas do vaso. Na soja amostrou-se o lado esquerdo e direito do folíolo central de folhas recém-expandidas e no arroz os dois lados da porção mediana das folhas-bandeira da planta principal.

2.3.3 Determinação da massa seca da parte aérea, teor e acúmulo de Si

A determinação da massa seca da parte aérea das plantas também foi realizada sete dias após a última aplicação. Duas plantas do vaso foram cortadas rente à superfície do substrato, lavadas com água deionizada, solução a 0,1% de detergente, solução a 0,1% de HCl e água deionizada, acondicionadas em sacos de papel e, então, levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C ± 5, até massa constante.

Após secas, foram pesadas para determinar a massa seca da parte aérea. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho de facas tipo Willey, para a

determinação do teor de Si (Korndörfer et al., 2004). A partir do teor e da massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo de Si na parte aérea das plantas.

2.3.4 Análise em microscopia eletrônica de varredura

A análise de microscopia eletrônica de varredura seguiu as recomendações de Maia e Santos (1997). Lâminas de 0,5 cm² de folhas que receberam as quatro aplicações de 1,5 g L⁻¹ de Si de cada fonte foram coletadas, lavadas em água deionizada e fixadas em glutaraldeído 3% por 48 horas. O material então foi desidratado em séries crescentes de etanol absoluto (30, 50, 70, 80, 90 e 100%), com intervalos de 20 minutos. As amostras foliares foram secas em secador (modelo EMS-850) até o ponto crítico de CO₂. Posteriormente foram montadas em “stubs” com superfície adaxial voltada para cima e passadas no metalizador Denton Vacuum por 120 minutos. Para detecção da presença de silício, foram feitas eletromicrografias no microscópio eletrônico de varredura modelo JSM5410-JEOL. As eletromicrografias das folhas de soja e de arroz foram executadas em uma ampliação de 750 e 500×, respectivamente.

2.3.5 Determinação da produção de grãos

Por ocasião da maturidade fisiológica de cada espécie, as partes reprodutivas foram coletadas e os grãos separados manualmente. Após a separação determinou-se a massa dos grãos e umidade, posteriormente corrigiu-se o teor de água para 130 g kg⁻¹ (Brasil, 2009). No experimento com soja determinou-se ainda o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem, e no experimento com arroz o número de perfilhos reprodutivos e o comprimento das panículas.

2.4 Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando o software AgroEstat (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015). Procedeu-se a análise de variância ($p \leq 0,05$), quando significativa as fontes foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e as

concentrações submetidas à análise de regressão polinomial ($p \leq 0,05$). Quando a análise de regressão foi significativa, mesmo não havendo interação, optou-se por apresentar o resultado isolado das fontes, quando a análise de regressão da respectiva fonte também foi significativa.

3 Resultados

As soluções com SiNaKE e SiK permaneceram visivelmente estáveis por mais de 24 horas, no entanto, foi registrado fotograficamente somente até 180 minutos de repouso, quando a solução com Nano a $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si apresentou-se levemente turbida (Figura 2).

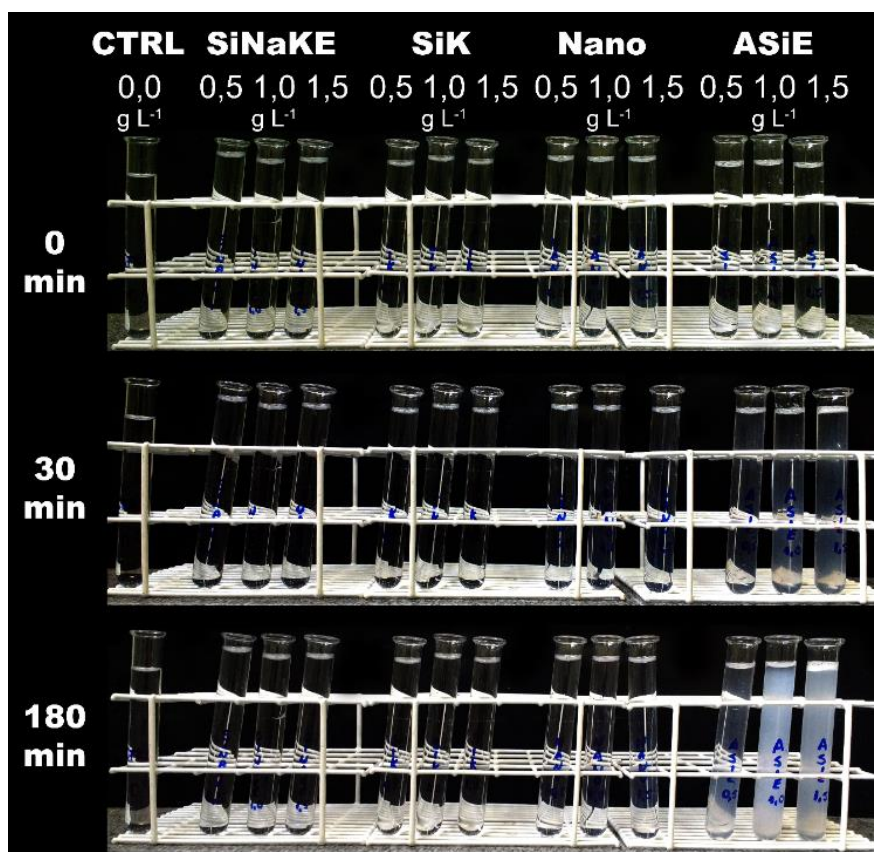


Figura 2. Fotografias das soluções controle (0 g L^{-1} de Si), silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaKE), silicato de potássio (SiK), nanosílica (Nano) e ácido silícico estabilizado (ASiE) nas concentrações de 0,5; 1,0 e $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si em função do tempo (em minutos) após seu preparo.

Nas soluções com ASiE verificou-se indícios do processo de condensação do Si já aos 30 minutos de repouso, sendo mais intenso 1,5 g L⁻¹ de Si. Aos 180 minutos, a turbidez foi similar nas concentrações de 1,0 e 1,5 g L⁻¹ de Si e mais intensa em relação a 0,5 g L⁻¹ de Si.

3.1 Fontes e concentrações de Si em plantas de soja

A aplicação foliar de Si aumentou o teor (Figura 3a) e o acúmulo do elemento na planta (Figura 3b). Os maiores valores de teor (4,1 g kg⁻¹) e acúmulo (17,2 mg por planta) de Si foram estimados na concentração de 1,2 g L⁻¹ de Si com a aplicação do SiNaKE (Figura 3a, 3b).

O incremento das concentrações de ASiE promoveu acréscimo linear no teor e no acúmulo de Si mas com pequeno incremento em relação à ausência da aplicação de Si (Figura 3a, 3b).

Não se verificou interação entre os tratamentos na %VE (Figura 3c). O ASiE, SiK e SiNaKE foram efetivos na diminuição da %VE. Em relação às concentrações de Si, o ASiE e o SiNaKE ajustaram-se à equação linear negativa, apresentando, em relação à concentração 0 g L⁻¹ de Si, reduções de 29 e 27% na %VE, respectivamente. Já o ICV e apresentou valor médio de 31,78, não sendo observada influência dos tratamentos nessa variável (Figura 3d).

A microscopia eletrônica de varredura das folhas de soja não possibilitou observar a presença de projeções de Si. No entanto, verificou-se que houve alteração no padrão da cera na cutícula das folhas (pontuações brancas), característica comum na espécie (Hagedorn et al., 2017) (Figura 4). Quando se aplicou o ASiE houve uma redução na presença de cera sobre a cutícula (Figura 4b) em relação ao controle (Figura 4a). As demais fontes pouco diferiram do tratamento controle (Figura 4a), exceto pela maior presença de cera próxima aos estômatos quando se aplicou a Nano (Figura 4c) e o SiK (Figura 4d), e uma leve diminuição quando se aplicou o SiNaKE (Figura 4e).

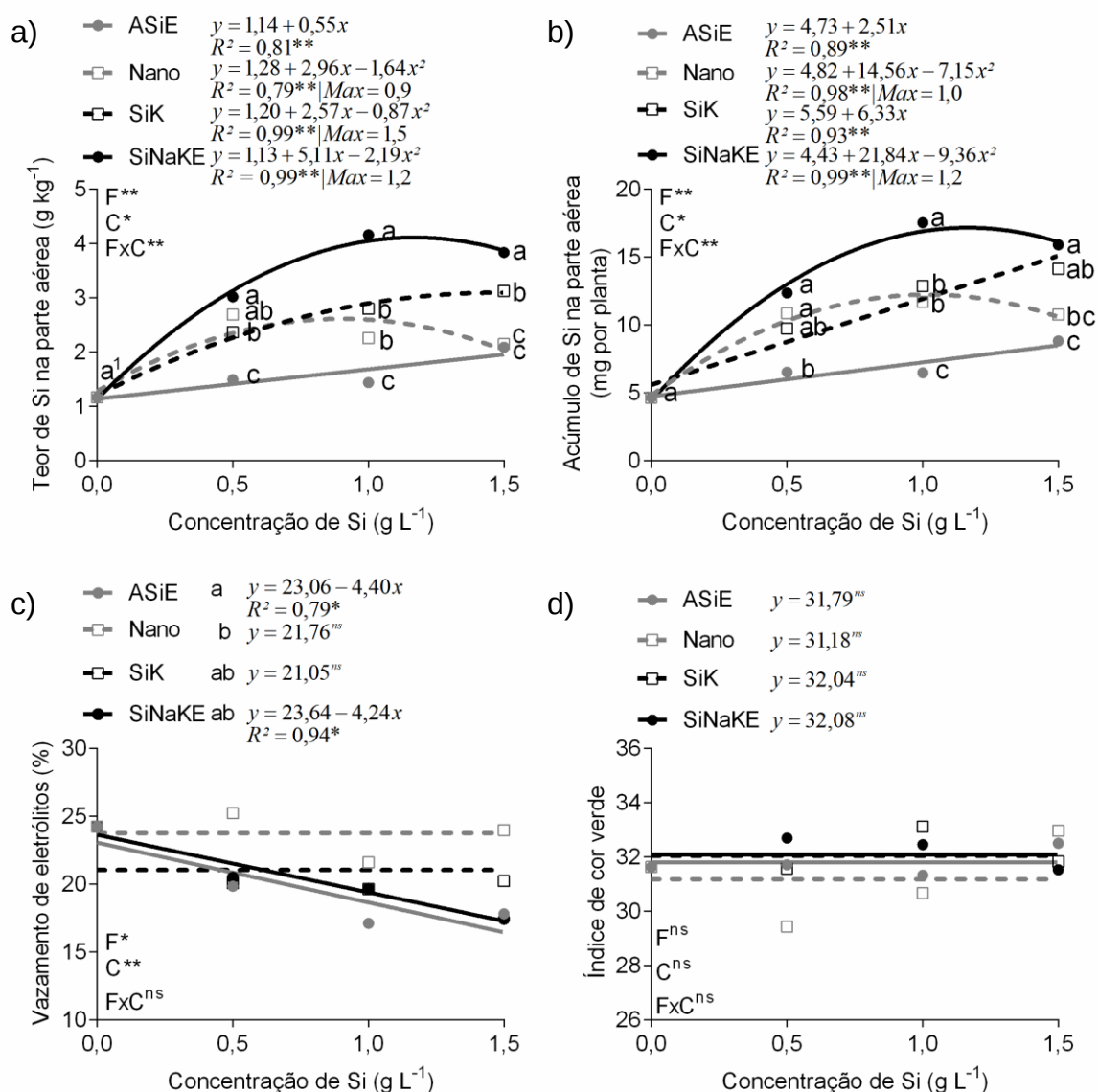


Figura 3. Teor (a) e acúmulo de Si na parte aérea (b), vazamento de eletrólitos (c) e índice de cor verde da folha (d) de plantas de soja submetidas à aplicação foliar de fontes e concentrações de Si. ASiE: ácido silícico estabilizado; Nano: nanosílica; SiK, silicato de potássio; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado; F: fonte; C: concentrações; FxC: interação fonte e concentrações; ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente; ¹letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; Max: ponto de máximo da regressão.

O aumento na concentração de Si promoveu aumento linear no número de vagens por planta quando se aplicou Nano e SiNaKE apenas (Figura 5a). O número de grãos por vagem aumentou levemente com a aplicação foliar de Si. Observando

os efeitos isolados das fontes, verificou-se ajuste quadrático das concentrações de ASiE, SiK e SiNaKE e linear com a Nano (Figura 5b).

Verificou-se efeito apenas das concentrações na MSPA da soja, basicamente influenciado pelo incremento que a Nano proporcionou (Figura 5c).

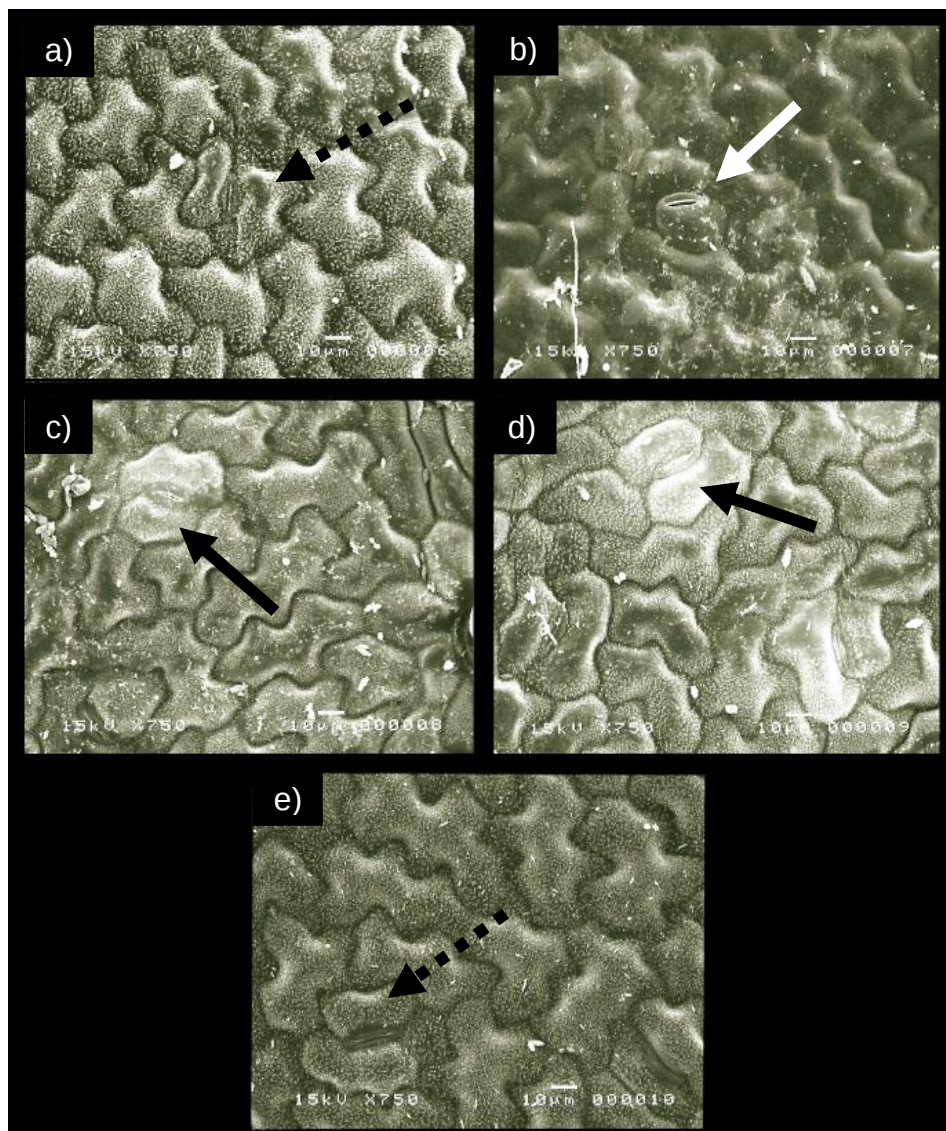


Figura 4. Eletromicrografias (750×) de folhas de soja submetidas à aplicação foliar de fontes de silício na concentração de $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si. Controle (a), ácido silícico estabilizado (b), nanosilica (c), silicato de potássio (d), silicato de sódio e potássio estabilizado (e). Setas brancas, e setas pretas pontilhadas e contínuas indicam estômatos com células anexas com menor, normal e maior presença de cera, respectivamente.

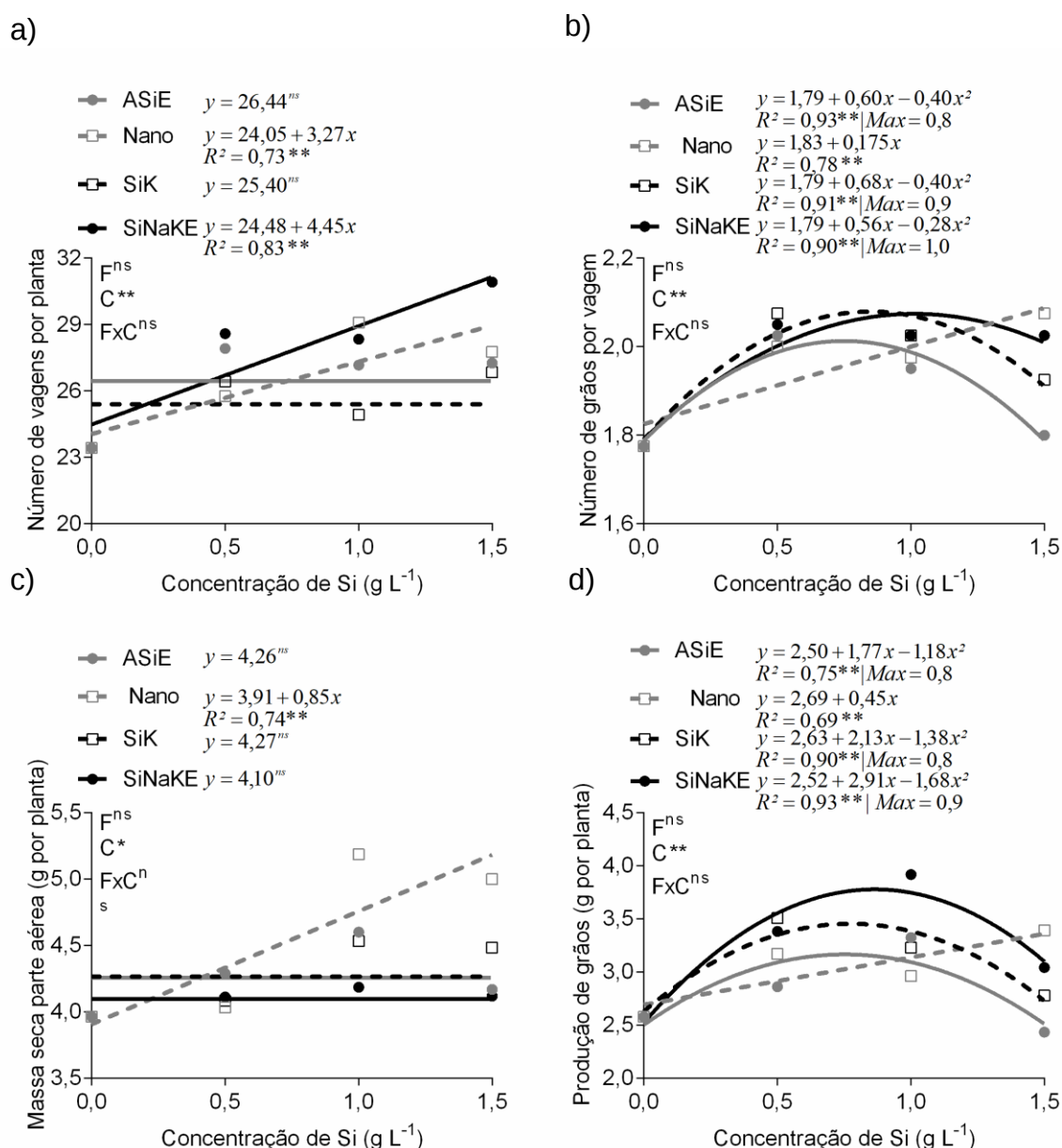


Figura 5. Número de vagens por planta (a), número de grãos por vagem (b), massa seca da parte aérea (c) e produção de grãos (d) de plantas de soja submetidas à aplicação foliar de fontes e concentrações de Si. ASiE: ácido silícico estabilizado; Nano: nanosilica; SiK, silicato de potássio; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado; F: fonte; C: concentrações; FxC: interação fonte e concentrações; ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente; Max: ponto de máximo da regressão.

A produção de grãos (Figura 5d) apresentou resultado bastante semelhante ao número de grãos por vagens (Figura 5b) no que diz respeito às fontes e às concentrações. O SiNaKE proporcionou a maior produção de grãos por planta (3,78 g) na concentração de 0,9 g L⁻¹ de Si, seguido do SiK (3,45 g) a 0,8 g L⁻¹ de Si, da

Nano que se ajustou à equação linear com maior produção (3,37 g) na maior concentração e do ASiE (3,16 g) a 0,8 g L⁻¹ de Si.

3.2 Fontes e concentrações de Si em plantas de arroz

Da mesma forma que no experimento com a soja a aplicação foliar de Si aumentou o teor (Figura 6a) e o acúmulo do elemento nas plantas de arroz (Figura 6b). Os maiores valores de teor (14,1 g kg⁻¹) e acúmulo (54,2 mg por planta) de Si foram estimados nas concentrações de 0,9 e 1,0 g L⁻¹ de Si com a aplicação do SiNaKE, respectivamente. Os ajustes das concentrações com as fontes isoladas também seguiram o resultado observado no experimento com a soja, sendo quadrático para a Nano, SiNaKE e SiK e linear para o ASiE, em ambas variáveis.

Não foi possível visualizar grandes diferenças entre as fontes na microscopia eletrônica de varredura (Figura 7), exceto com o tratamento controle. Foram identificadas as linhas de células de acúmulo de Si normalmente encontradas nas folhas de arroz (Yamaji et al., 2008; Ning et al., 2014), indicadas pelos retângulos brancos, inclusive no tratamento controle (Figura 7a).

No tratamento controle não foi encontrado a presença de corpos silicosos que se acumulam no meio da junção das células especializadas quando o suprimento de Si é adequado (Yamaji et al., 2008), enquanto que para as demais fontes esse fenômeno foi observado. A Nano (Figura 7d) e o SiNaKE (Figura 7f) foram as fontes que apresentaram o menor e maior número de corpos silicosos nas folhas, respectivamente.

A aplicação de ASiE proporcionou em algumas regiões das folhas uma camada de Si polimerizado cobrindo a superfície foliar (seta branca - Figura 7c). Nas folhas que receberam aplicação das demais fontes esse efeito não foi observado mesmo com alta concentração de Si (1,5 g L⁻¹). Portanto, pode-se inferir que nas condições do presente experimento o Si aplicado via foliar, com exceção da fonte ASiE, não interfere negativamente na ação de produtos fitossanitários aplicados posteriormente.

A %VE também apresentou efeito isolado das fontes e das concentrações (Figura 6c). Contudo, as fontes que apresentaram maior eficiência na diminuição

dessa variável foram o SiNaKE e SiK e Nano a 1,1 g L⁻¹ de Si, e apresentando-se com menor eficiência o ASiE. De acordo com o efeito quadrático observado, pode-se conjecturar que o aumento na concentração de Si poderia proporcionar o aumento da %VE.

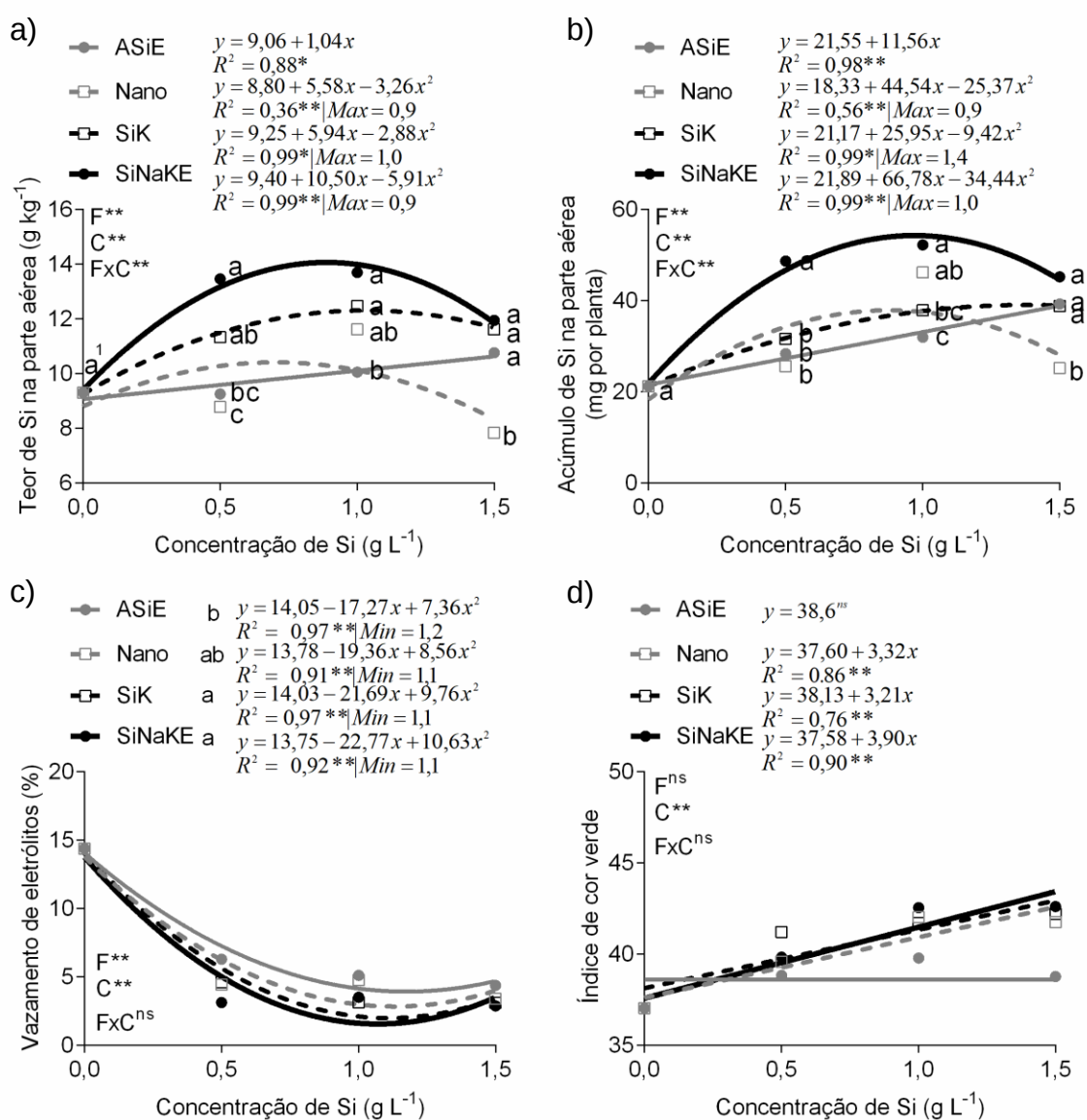


Figura 6. Teor (a) e acúmulo de Si na parte aérea (b), vazamento de eletrólitos (c) e índice de cor verde da folha (d) de plantas de arroz submetidas à aplicação foliar de fontes e concentrações de Si. ASiE: ácido silícico estabilizado; Nano: nanosílica; SiK, silicato de potássio; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado; F: fonte; C: concentrações; FxC: interação fonte e concentrações; ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente; ¹letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; Max e Min: ponto de máximo e mínimo da regressão, respectivamente.

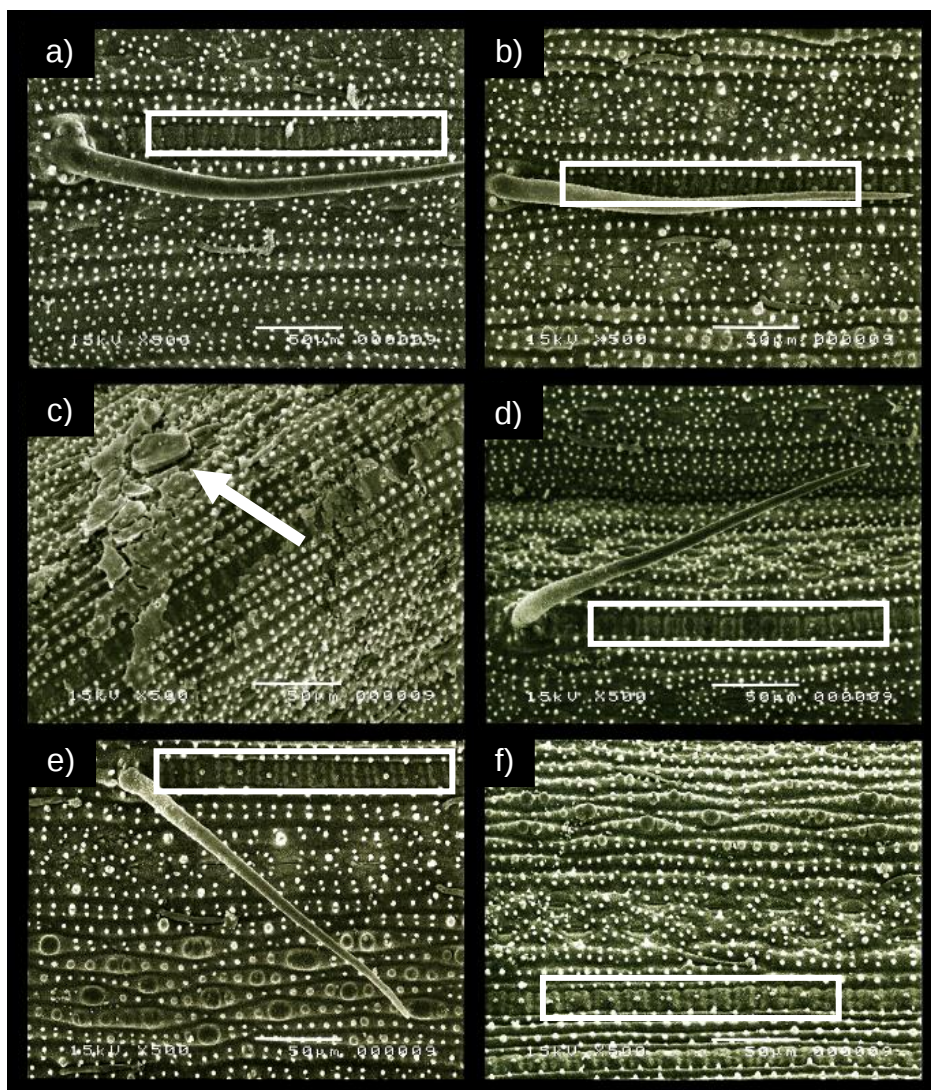


Figura 7. Eletromicrografias (500×) de folhas de arroz submetidas à aplicação foliar de fontes de silício na concentração de $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si. Controle (a), ácido silícico estabilizado (b e c), nanosílica (d), silicato de potássio (e), silicato de sódio e potássio estabilizado (f). Retângulos brancos indicam faixa de células especializadas no acúmulo de sílica, normalmente encontradas em arroz. Seta branca indica pontos de polimerização de Si da calda aplicada, respectivamente.

As concentrações de Si, com exceção no ASiE, foram eficientes no aumento do índice de cor verde da folha de arroz (Figura 6d). O número de perfilhos não foi influenciado pela aplicação foliar de Si, com média de 0,95 perfilhos por planta (Figura 8a).

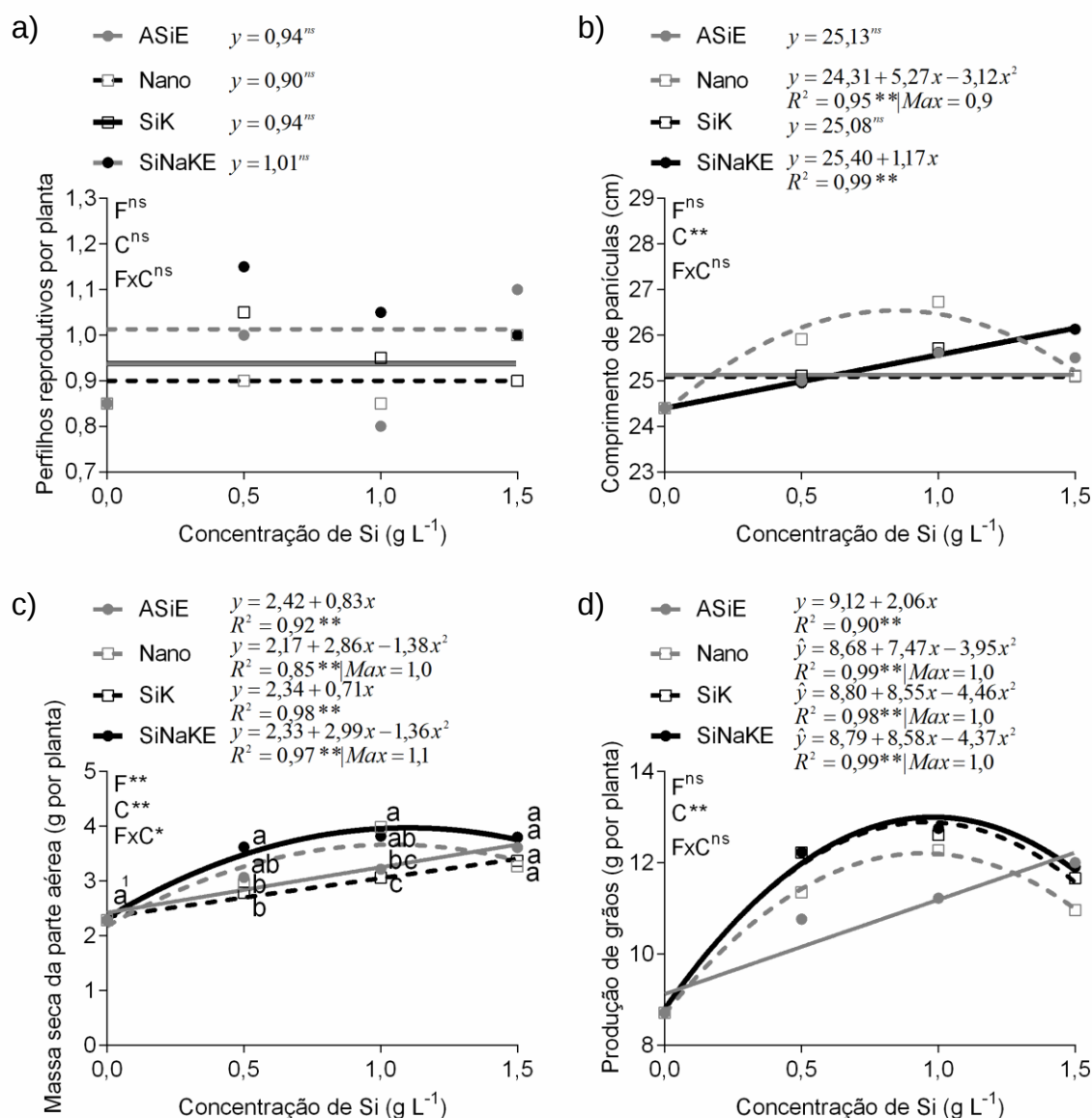


Figura 8. Número de perfilhos reprodutivos por planta (a), comprimento de panículas (b), massa seca da parte aérea (c) e produção de grãos (d) de plantas de arroz submetidas à aplicação foliar de fontes e concentrações de Si. ASiE: ácido silícico estabilizado; Nano: nanosílica; SiK, silicato de potássio; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado; F: fonte; C: concentrações; FxC: interação fonte e concentrações; ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente; ¹letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; Max: ponto de máximo da regressão.

As concentrações de Si via Nano e SiNaKE ajustaram-se à equação quadrática e linear, respectivamente (Figura 8b). Para a Nano, o aumento em relação ao controle excedeu 2 cm de comprimento.

A MSPA foi maior com a aplicação da Nano (1 g L^{-1} de Si) e do SiNaKE ($1,1 \text{ g L}^{-1}$ de Si). Na concentração de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si o SiNaKE apresentou MSPA superior ($3,5 \text{ g por planta}$), contudo, sem diferir do ASiE ($2,8 \text{ g por planta}$). Já na maior concentração ($1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si), não houve diferença entre as fontes (Figura 8c).

Não houve diferenças entre as fontes para a produção de grãos de arroz (Figura 8d). Já o aumento das concentrações de Si na calda incrementou a produção de grãos com ajuste linear para o ASiE (a cada 1 g L^{-1} de Si aplicado via foliar aumentou-se $2,06 \text{ g}$ de grãos de arroz por planta), e quadráticas para Nano, SiK e SiNaKE, atingindo ponto de máximo em 1 g L^{-1} de Si refletindo em produção de $12,2$; $12,9$ e 13 g de grãos por planta para Nano, SiK e SiNaKE, respectivamente (Figura 8d).

4 Discussão

No teste visual de estabilidade das fontes em função do tempo, o estabilizante do ASiE não foi suficiente para retardar a condensação da solução (Figura 2). Para esse tipo de fonte, Laane (2017) recomenda concentrações menores às testadas no presente estudo, justificando que o Si dessa fonte já está prontamente disponível às plantas, sendo suficiente para suprir as plantas e evitar a condensação.

A Nano apresentou maior estabilidade em relação ao ASiE provavelmente por já ser obtida a partir de uma condensação controlada do H_4SiO_4 , onde o processo avança somente até a escala de alguns nanômetros e é interrompido (Persson et al., 2000), ao ponto de permitir que a planta ainda a absorva.

A estabilidade do SiK e SiNaKE não foi comprometida até 24 horas pois no pH em que se encontrava a solução (5,5) apenas parte é convertida em H_4SiO_4 (Kudryavtsev e Figovsky, 2016). Além disso, o SiNaKE apresenta um estabilizante que pode diminuir a velocidade de polimerização.

Essas observações foram de soluções com valor pH 5,5, sem a adição de outros compostos e em temperatura ambiente (25°C), e qualquer alteração nesses fatores, sobretudo relacionada à concentração e pH, pode levar a resultados contrastantes (Iller, 1979). Contudo, muitos dos problemas relatados com a

polimerização da calda contendo silício provavelmente se devem à mistura com outros compostos, água de baixa qualidade e valores pH muito baixos.

Vale ressaltar que a estabilidade da calda foi realizada em volume relativamente grande e a aplicação foliar consiste na pulverização de gotas que se depositam nas folhas que em pouco tempo se evaporam. À medida que a água contida na gota diminui a concentração de Si aumenta e o processo de condensação se intensifica à polimerização. Estabilizantes como o sorbitol e o PEG apresentam propriedades umectantes que aumentam a permanência da gota (Babiker e Duncan, 1974; D'Souza e Shegokar, 2016) e por isso, além de diminuir a velocidade de polimerização do Si, podem aumentar a sua absorção por prolongar o tempo de contato da gota com a superfície foliar.

O aumento de H_4SiO_4 na calda, seja pela sua alta disponibilidade na fonte (ASiE) ou pelo aumento na concentração da calda (alta dosagem) até determinado ponto pode aumentar a disponibilidade do elemento, entretanto, também pode antecipar e aumentar o processo de polimerização (Figura 2), diminuindo a absorção e consequentemente o teor e acúmulo do elemento benéfico (Figura 3a, 3b, 6a, 6b) (Laane, 2017).

Em nenhuma das concentrações as quatro aplicações foliares de Si elevaram o teor de Si na soja acima de 5 g kg^{-1} de Si, mesmo utilizando até $1,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si (Figura 3a). Isso mostra que nem mesmo aplicações em altas quantidades são capazes de elevar o teor do elemento benéfico à concentração que caracterize essa espécie como acumuladora. Por outro lado, a ausência de Si (0 g L^{-1}) no cultivo do arroz fez com que as plantas apresentassem teores presentes em plantas não-acumuladoras (Figura 6a) (Ma et al., 2001).

A redução na %VE observada nas plantas de soja em função das fontes estabilizadas (ASiE e SiNaKE) (Figura 3c) pode ser em função de uma maior disponibilidade de Si às plantas (Laane, 2017), o que favorece as plantas com absorção passiva. Enquanto no arroz, que absorve ativamente Si, as fontes reduziram consideravelmente o vazamento de eletrólitos (Figura 6c).

Dentre os benefícios do Si pode-se citar a manutenção da clorofila (Agarie et al., 1991; Al-Aghabary et al., 2004), justamente por minimizar alguns tipos de estresses. Embora não tenha sido induzido, as condições de temperatura que a soja

(Figura 1a) e o arroz (Figura 1b) foram submetidos são acima do recomendado para duas culturas (de 20–30°C para a soja e 20–35°C para o arroz), caracterizando, portanto uma condição de estresse (Farias et al., 2007; Steinmets et al., 2005).

Na soja, diferentemente do relatado na literatura (Gonzalo et al., 2013; Pascual et al., 2016), a aplicação foliar de Si não apresentou efeito no ICV (Figura 6d). Esse fato pode ser em função de que a cultivar utilizada seja adaptada para regiões mais quentes, sofrendo menor degradação da clorofila devido à alta temperatura. O arroz por outro lado, teve incremento significativo no ICV das folhas como o aumento da concentração de Si por ser uma espécie mais sensível ao estresse térmico e altamente eficiente na absorção do Si, (Ma et al., 2001), apresentando teores de Si superiores a 10 g kg⁻¹ de Si (Figura 6a).

A aplicação foliar de Si foi eficiente no fornecimento do elemento à planta, demonstrado tanto no teor (Figura 3a) quanto no acúmulo (Figura 3b) do elemento nas plantas de soja sem, no entanto, apresentar corpos silicosos na epiderme foliar (Figura 4) como foi possível observar nas folhas de arroz (Figura 7).

Houve a diminuição da camada de cera da cutícula da folha pela aplicação de ASiE provavelmente devido à quantidade do agente estabilizante dessa fonte pois o mesmo tem a capacidade de atuar como solvente orgânico, solubilizando lipídios (Hirano et al., 2012). A polimerização por essa fonte observada no teste de estabilidade da calda (Figura 2) também pode ser verificada na epiderme foliar das folhas do arroz (Figura 7c – seta branca).

As avaliações biométricas revelaram que embora as concentrações tenham sido iguais para todas as fontes, de forma geral se comportaram de maneira distinta. O número de vagens da soja (Figura 5c), por exemplo, não apresentou incremento com o aumento da concentração de Si via ASiE, divergindo do que foi observado por Crusciol et al. (2013) com esse tipo de fonte.

Outra divergência dos resultados dessa pesquisa ocorreu com o estudo de Prakash et al. (2011) quanto ao número de perfilhos das plantas de arroz com a aplicação também de um tipo de ASiE. Vale salientar que não necessariamente trata-se de um caso em que a fonte ASiE testada nesse estudo não proporcione feito nas variáveis estudadas pois os trabalhos citados foram conduzidos em condições

de campo, diferentemente da condição de cultivo protegido, em vasos e sistema hidropônico.

O evidente incremento na MSPA das plantas pela Nano (Figura 5c; 8c), seja soja ou arroz, e comprimento de panículas do arroz (Figura 8b) corrobora com o comportamento encontrado na literatura (Wang et al., 2014; Dung et al., 2016). Os resultados mostram que além do incremento na MSPA promovido pelo Si via foliar (Wang et al., 2014; Neeru et al., 2016), esse tipo de fonte apresenta maior ação promotora de crescimento. O SiNaKe mostrou-se uma fonte eficiente também no incremento da MSPA, provavelmente resultado do maior acúmulo de Si (Figura 3b; 6b) e índice de cor verde da folha (Figura 6d), indiretamente relacionado ao potencial fotossintético da planta.

Portanto a aplicação foliar de concentrações próximas de 1 g L^{-1} de Si em soja e em arroz mesmo sem a indução de estresse, independentemente da fonte, pode ser uma alternativa para incrementos no acúmulo de Si na planta e na produção de grãos, haja vista que em algum momento durante o ciclo das culturas as plantas serão expostas a estresse.

5 Conclusão

As fontes testadas não apresentam grandes diferenças de desempenho em relação ao silicato de potássio. Na maioria das variáveis estudadas o silicato de sódio e potássio estabilizado se equiparou ou foi superior o silicato de potássio.

Plantas de soja e de arroz cultivadas em casa de vegetação, vasos com substrato inerte apresentam maior produção de grãos quando se realiza quatro aplicações de aproximadamente 1 g L^{-1} de Si durante o ciclo.

6 Referências

- Al-Aghabary, K., Zhu, Z., Shi Q., 2004: Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and anti-oxidant enzyme activities in tomato plants under salt stress. *J. Plant Nutr.* 27, 2101–2115
- Babiker, A.G.T., Duncan, H. J., 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, J.C., Maldonado Jr., W., 2015. AgroEstat - Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos: version 1.1.0.712rev77, Jaboticabal:Funep.
- Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. Regras para análise de sementes. MAPA/ACS, Brasília.
- Buck, G.B., Korndörfer, G.H., Nolla, A., Coelho, L., 2008. Potassium silicate as foliar spray and rice blast control, *J. Plant Nutr.* 31, 231–237.
- Cacique, I.S., Domiciano, G.P., Moreira, W.R., Rodrigues, F.A., Cruz, M.F.A., Serra, N.S., Català, A.B., 2013. Effect of root and leaf applications of soluble silicon on blast development in rice. *Bragantia.* 72, 304–309.
- Chan, S.H., 1989. A Review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics.* 18, 49–56.
- Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J., 2000. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. *Crop Sci.* 40, 436–443.
- Crusciol, C.A.C., Soratto, R.P., Castro, G.S.A., Costa, H.M., Ferrari Neto, J., 2013. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. *Rev. Ciênc. Agron.* 44, 404–410.
- D'Souza, A.A., Shegokar, R., 2016. Polyethylene glycol (PEG): a versatile polymer for pharmaceutical applications. *Exp. Opin. Drug Deliv.* 9, 1257–1275.
- Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Sci.* 135, 1–9.
- Dung, P.D., Ngoc, L.S., Duy, N.N., Thuy, N.N., Truc, L.T.M., Le, B.V., Phu, D.V., Hien, N.Q., 2016. Effect of nanosilica from rice husk on the growth enhancement of chili plant (*Capsicum frutescens* L.), *J. Sci. Technol.* 54, 607–613.
- Farias, J.R.B. Nepomuceno, A.L., Neumaier, N. 2007. Ecofisiologia da soja. Londrina: Embrapa Soja (Circular técnica, n. 48).

Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of soybean development. Yowa State University of Science and Technology, Ames: Cooperative Extension Service.

Gallinari, M., Ragueneau, O., Corrim, L., Demaster, D.J., 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

Gonzalo, M.J., Lucena, J.J., Hernandez-Apaolaza, L., 2013. Effect of silicon addition on soybean (*Glycinemax*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. *Plant Physiol. Biochem.* 70, 455–461.

Hagedorn, O., Fleute-Schlachter, I., Mainx, H. G., Zeisler-Diehl, V., Koch, K., 2017. Surfactant-induced enhancement of droplet adhesion in superhydrophobic soybean (*Glycine max* L.) leaves. *Beilstein J. Nanotechnol.* 8, 2345–2356.

Hirano, A., Shiraki, K., Arakawa, T., 2012. Polyethylene glycol behaves like weak organic solvent. *Biopolymers.* 97, 117–122.

Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley: California Agricultural Experimental Station.

Iler, R.K., 1979. The Chemistry of Silica. Plenum Press, New York.

Korndörfer, G.H., Pereira, H.S.P., Nolla, A., 2004. Análise de silício: solo, planta fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU.

Kudryavtsev, P.G., Figovsky, O.L., 2016. Nanocomposite organomineral hybrid materials. *Nanotehnologii v stroitel'stve.* 8, 16–56.

Laane, H.M., 2017. The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: An overview of the results from 2003–2014. *Silicon.* 9, 803–807.

Le Gall H., Philippe F., Domon J.M., Gillet F., Pelloux J., Rayon C., 2015. Cell wall metabolism in response to abiotic stress. *Plants.* 4, 112–166.

Ma, J.F., 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50, 11–18.

Ma, J.F., Miyake, Y., Takahashi, E., 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. *Stud. Pl. Sci.* 8, 17–39.

Maia, A.S., Santos, J.M., 1997. A SEM technique for preparing biological control agents of nematodes in action. *Acta Microsc.* 6, 550–551.

Neeru, J., Shaliesh, C., Vaishali, T., Purav, S., Manoheral, R., 2016. Role of orthosilicic acid (OSA) based formulation in improving plant growth and development. *Silicon.* 1–6.

Ning, D., Song, A., Fan, F., Li, Z., Liang, Y., 2014. Effects of slag-based silicon fertilizer on rice growth and brown-spot resistance. *Plos One*. 9, e102681.

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

Persson, M., Tokarz, M., Dahlgren, M.L., Johansson-Vestin, H., 2000. Silica-based sols. WO2000066492 A1, Wipo Patentscope.

Prakash, N.B., Chandrashekar, N., Mahendra, C., Patil, S.U., Thippeshappa, G.N., Laane, H.M., 2011. Effect of foliar spray of soluble silicic acid on growth and yield parameters of wetland rice in hilly and coastal zone soils of Karnataka, South India. *J. Plant Nutr.* 34, 1883–1893.

Raetano, C.G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. In: Antuniassi, U.R., Boller, W. (eds.) *Tecnologia de aplicação para culturas anuais*. Botucatu: FEPAF, 2011. Cap.1, p.15-26.

Rodrigues, F.A., Duarte, H.S.S., Domiciano, G.P., Souza, C.A., Korndörfer, G.H., Zambolim, L., 2009. Foliar application of potassium silicate reduces the intensity of soybean rust. *Australas. Plant Pathol.* 38, 366–372.

Savvas, D., Ntatsi, G., 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Sci. Hortic.* 196, 66–81.

Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., 2014. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). *Saudi J. Biol. Sci.* 21, 13–17.

Steinmets, S., Reisser Júnior, C., Pötter, G.H., Petrini, J.A., Guindani, R.H.P., Costa, A.V. 2005. Monitoramento da temperatura do ar em uma lavoura de arroz irrigado e sua relação com a de uma estação meteorológica. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 29).

Tréguer, P., Nelson, D.M., Van Bennekom, A.J., DeMaster, D.J., Leynaert, A., Queguiner, B., 1995. The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science*. 268, 375–379.

Wang, S., Wang, F., Gao, S., 2015. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 2837.

Yamaji, N., Mitani, N., Ma, J.F., 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *Plant Cell*. 20, 1381–1389.

Zanão Júnior, L.A., Fontes, R.L.F., Avila, V.T., 2009. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. *Pesq. Agropec. Bras.* 44, 203–206.

CAPITULO 3 - Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e de soja cultivadas com solução nutritiva¹

RESUMO – A deficiência de zinco (Zn) em plantas leva ao estresse oxidativo, causando prejuízos na produção de diversas espécies cultivadas no mundo todo. O silício (Si) por sua vez é um elemento conhecido por mitigar diversos tipos de estresses, podendo ser uma importante ferramenta na mitigação dos efeitos da deficiência de Zn. Contudo pouco se sabe do efeito do Si na mitigação da deficiência de Zn no que se refere ao estresse oxidativo e o reflexo na produção de grãos de arroz e soja, tão pouco se a aplicação foliar apresenta o mesmo resultado que o fornecimento via solução nutritiva de Si. Para tal foram conduzidos dois experimentos, uma para soja e outro para arroz. Foram testados seis tratamentos de um fatorial 3x2, sendo três formas de aplicação de Si (via foliar (1 g L⁻¹ de Si), via radicular (solução nutritiva com 2 mM de Si) e sem Si) e dois níveis de Zn na solução nutritiva (presença (0,05 mg L⁻¹) ou ausência). As plantas foram cultivadas em casa de vegetação e em vasos de 7 dm³ preenchidos com vermiculita e fornecimento diário da solução nutritiva de Hoagland e Arnon. As plantas do tratamento com Si radicular receberam Si a partir da primeira semana, durante todo o ciclo. As plantas que receberam Si foliar receberam quatro aplicações foliares durante o ciclo. Em ambos os experimentos foram avaliados a concentração de H₂O₂, malondialdeído (MDA), enzimas antioxidantes, vazamento de eletrólitos, índice de cor verde da folha, acúmulo de Si, e variáveis de crescimento e produção. O Si fornecido via radicular mitigou a deficiência de Zn nas plantas de soja, diminuindo os teores de MDA, e mantendo a produção de grãos. A aplicação foliar de Si nas plantas de soja suficientes em Zn proporcionou maior produção em relação ao fornecimento de Si via radicular e sem aplicação de Si. O arroz não teve os efeitos deficiência do micronutriente mitigados pelo Si, embora a atividade da SOD tenha aumentado com o fornecimento radicular do elemento benéfico. Independentemente se em condição de suficiência ou deficiência de Zn a aplicação radicular ou foliar de Si, promoveu ganhos na produção do arroz em relação à não aplicação de Si.

Palavras-chave: ácido monossilícico, atenuação de estresse, estresse oxidativo, *Glycine max*, *Oryza sativa*

¹Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido e encontra-se em avaliação para publicação.

1 Introdução

A deficiência de zinco (Zn) afeta negativamente o crescimento e desenvolvimento das plantas, haja vista que apresenta inúmeras funções no metabolismo celular como síntese de carboidratos, proteínas e fitormônios (Cakmak, 2000; Marschner, 2012). Além disso, é constituinte da superóxido dismutase (SOD), uma das enzimas mais importantes do mecanismo de defesa das plantas (Cakmak et al., 1997).

Plantas que se desenvolvem sob a deficiência de Zn apresentam um aumento das espécies reativas de oxigênio (ERO), como o oxigênio “singlet” ($^1\text{O}_2$), radical superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($\text{OH}^{\bullet}$), o que acarreta no chamado estresse oxidativo (Sharma et al., 2004). As ERO reagem com ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos de membranas induzindo a degradação dessas moléculas, o que compromete a estrutura e o funcionamento celular, aumentando o vazamento de eletrólitos da célula e inibindo o desenvolvimento do vegetal (Bailey e Mittler, 2006).

O desbalanço das ERO pela deficiência de Zn leva aos sintomas típicos nas folhas novas, descritos por Marschner (2012) e Prado (2008) como clorose internerval e ou margem das folhas, pontuações marrons, leve curvatura, redução no tamanho e aspecto lanceolado de folhas e folíolos. Além disso, ocorre redução na altura e massa seca, epinastia e encurtamento dos internódios.

Ao Si tem sido atribuído a função de mitigador de estresses, sejam eles bióticos ou abióticos (Ma, 2004). Contudo, somente recentemente alguns autores se dedicaram a estudar o efeito mitigador do Si ao estresse causado pela deficiência de micronutrientes (Hernandez-Apaolaza, 2014).

O Si postergou a clorose induzida pela deficiência de Fe em soja (Gonzalo et al., 2013) e aumentou a disponibilidade e a mobilidade de Fe no apoplasto das raízes de pepino (Pavlovic et al., 2013; Bityutskii et al., 2014). Além disso, Bityutskii et al. (2014) verificaram que os sintomas de deficiência de Mn e Zn em pepino ocorreram em menor intensidade devido ao aumento da defesa antioxidante aumentada pelo Si. Em arroz, Mehrabanjoubani et al. (2015) verificaram que o Si (1,5 mM na solução nutritiva) também promoveu maior distribuição do Zn das raízes

à parte aérea quando as plantas foram submetidas a deficiência, e em soja o Si (0,5 mM na solução nutritiva) dobrou o teor de Zn na parte aérea de plantas de soja devido a remobilização de Zn do apoplasto radicular (Pascual et al., 2016). Portanto, a melhor distribuição do Zn promovida pelo Si na planta reduziu o efeito da deficiência nutricional (Bityutskii et al., 2014; Mehrabanjoubani et al., 2015; Pascual et al., 2016).

Os estudos relacionando o Si com a mitigação dos efeitos da deficiência de Zn abordaram o fornecimento de Si na solução nutritiva, ou seja, absorção radicular. Não foi encontrado na literatura trabalhos relacionando o efeito do Si com o estresse oxidativo e a atividade enzimática envolvida na mitigação dos efeitos da deficiência do micronutriente, tão pouco o efeito da aplicação foliar.

Com base no exposto surge a hipótese de que o Si diminui o estresse oxidativo por aumentar a atividade das enzimas envolvidas no combate às espécies reativas de oxigênio das plantas de arroz e soja submetidas à deficiência de Zn, independentemente se aplicado via radicular (solução nutritiva) ou foliar.

O objetivo desse trabalho foi investigar o efeito da aplicação foliar e radicular de Si na mitigação dos efeitos da deficiência de Zn no acúmulo desses elementos na parte aérea, nos teores de H_2O_2 e malondialdeído, na atividade de enzimas antioxidantes e os reflexos na produção de grãos de soja e de arroz.

2 Material e métodos

A pesquisa foi desenvolvida em sistema hidropônico a partir de dois experimentos, um com soja (*Glycine max*) e outro com arroz (*Oryza sativa*) entre abril e agosto de 2017, conduzidos em casa de vegetação do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – câmpus de Jaboticabal, SP, monitorando-se a umidade e temperatura do ar (Figura 1).

As sementes de soja (Pioneer 98Y30) e arroz (Agronorte ANA 5015) foram semeadas em vasos plásticos de 7 dm³ preenchidos com vermiculita de granulometria fina. Os vasos foram irrigados diariamente com água (destilada e posteriormente deionizada) até a emergência das plântulas.

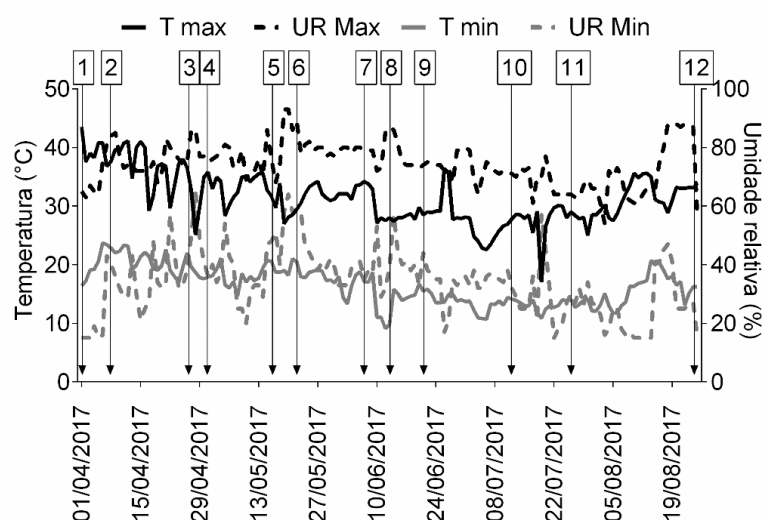


Figura 1. Temperatura máxima (T max) e mínima (T min), e umidade relativa máxima (UR max) e mínima (UR min) durante a condução do experimento. Setas identificam: (1) plantio; (2) emergência; (3 e 4; 5 e 6; 7 e 8; e 9 e 10) primeira, segunda, terceira e quarta aplicação dos tratamentos na soja e no arroz, respectivamente; (11 e 12) colheita da soja e do arroz, respectivamente.

Foi realizado o desbaste deixando-se quatro plântulas por vaso e se iniciou o fornecimento diário de 250 mL solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) a 25, 50 e 75 % da força iônica aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE), respectivamente, com modificações de acordo com os tratamentos e objetivo dos experimentos.

A solução nutritiva foi preparada com água (previamente destilada e deionizada) e reagentes puro para análise. O valor pH da solução foi ajustado para $5,8 \pm 0,3$ com soluções de NaOH 1,0 M ou HCl 1,0 M.

O substrato foi lavado semanalmente com aproximadamente 2 litros de água destilada e deionizada (pH 4,5 ajustado a partir da adição de soluções de HCl 1,0 M) para evitar a sua salinização e alcalinização.

2.1 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com os tratamentos em esquema fatorial 3x2 (Tabela 1) com seis repetições. As análises referentes ao estresse oxidativo foram realizadas com quatro repetições.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos e concentrações utilizadas no experimento.

Tratamento	Forma de aplicação de Si ¹	Zn solução nutritiva
1	Si Foliar*	-Zn
2	Si Radicular**	-Zn
3	Sem Si	-Zn
4	Si Foliar	+Zn***
5	Si Radicular	+Zn
6	Sem Si	+Zn

1: a fonte utilizada foi silicato de sódio e potássio estabilizado (114,91 g L⁻¹ de Si, 18,9 g L⁻¹ de K₂O, 60,5 g L⁻¹ de NaO e pH 12,3) sendo os íons acompanhantes Na e K equilibrados entre os tratamentos; *: 1 g L⁻¹ de Si; **: 56 mg L⁻¹ (2 mmol L⁻¹) concentração comumente utilizada em solução nutritiva (Prado et al., 2017); ***: concentração de Zn na solução nutritiva de 0,05 mg L⁻¹ (0,71 µmol L⁻¹);

Quatro aplicações foliares de Si utilizando-se o silicato de sódio e potássio estabilizado (114,91 g L⁻¹ de Si, 18,9 g L⁻¹ de K₂O, 60,5 g L⁻¹ de NaO e pH 12,3) foram realizadas em cada espécie. Na soja aplicou-se nos estádios fenológicos V4, R1, R3 e R5 (Fehr e Caviness, 1977), e no arroz em V3, V5, R3 e R6 (Counce et al., 2000) (Figura 1).

As aplicações foram realizadas com pulverizador costal manual (modelo Evolution 20 Super, Matabi, Goizper Group, Espanha) com controle de pressão por meio de válvula com mola a 3 bar de pressão, munido de ponta de jato cônico HC 80/0.8/3 (Goizper Group, Espanha) e taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹, cada vaso recebendo aproximadamente 0,4 mL de solução.

Para realizar as aplicações, os vasos foram colocados no chão, dispostos em linha, separados por tratamento e distantes aproximadamente um metro para evitar que houvesse contaminação entre os tratamentos. No momento da aplicação a vermiculita dos vasos estava coberta com algodão para evitar deposição da calda no substrato e possível absorção radicular do Si. Além disso, as aplicações foram realizadas em condições de temperatura e umidade abaixo de 30 °C e acima de 50%, respectivamente, consideradas favoráveis (Raetano, 2011) (Tabela 2).

No preparo da solução nutritiva contendo Si, primeiro adicionava-se o SiNaKE, ajustava-se o pH da solução com HCl para valores próximos de 5,8 e posteriormente adicionava-se os outros sais, para então corrigir para o pH final, permanecendo estável, ou seja, sem polimerização, por até três dias após seu

preparo. Outras ordens de preparo foram testadas, contudo todas desencadeavam a polimerização do Si na solução em pouco tempo.

Para se evitar a sua salinização e alcalinização do substrato foi realizada a lavagem do substrato dos vasos semanalmente com aproximadamente 2 litros de água destilada e deionizada (pH 4,5 ajustado a partir da adição de solução de HCl 1,0 M).

Tabela 2. Estádios de desenvolvimento e dias após a emergência (DAE) da soja e do arroz, temperatura do ar média (T média) e umidade relativa média (UR média) durante as aplicações dos tratamentos.

Estádio de desenvolvimento	DAE	T média (°C)	UR média (%)
		Soja	
V4	27	26,6	59
R1	45	21,5	75
R3	70	21,7	68
R5	84	19,4	73
Arroz			
V3	26	21,8	68
V6	50	20,7	69
R3	69	19,6	67
R6	109	18,7	80

2.2 Coleta de dados

2.2.1 Índice de cor verde das folhas e eficiência quântica do fotossistema II

Sete dias após cada aplicação foliar de Si, avaliou-se o índice de cor verde das folhas (ICV) com o clorofilômetro Opti-Sciences CCM 200 (Opti-Sciences, Inc, Estados Unidos da América).

Na soja foram realizadas duas leituras no folíolo central (lado esquerdo e direito) do terceiro trifólio de cima para baixo recém-expandido de duas plantas por unidade experimental (vaso). No arroz foram realizadas duas leituras (lado esquerdo e direito) da porção central da primeira folha de cima para baixo totalmente expandida de duas plantas por vaso.

Por ocasião da última avaliação do ICV, nas mesmas folhas também foi avaliada a eficiência quântica do fotossistema II por meio do fluorômetro Opti-Sciences OS30p+ (Opti-Sciences, Inc, Estados Unidos da América).

2.2.2 Vazamento de eletrólitos e análises do estresse oxidativo

Sete dias após a última aplicação determinou-se a porcentagem de vazamento de eletrólitos (%VE) a partir de discos (100 mg) de folhas totalmente expandidas que receberam as quatro aplicações. Os discos foram lavados em água deionizada, colocados em recipientes com 20 mL de água deionizada em temperatura ambiente (25°C) e mantidos em repouso por 60 min. Então, a condutividade elétrica foi registrada com um condutivímetro (CEi). Posteriormente as mesmas amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min e então, após resfriadas a condutividade elétrica das amostras foi registrada novamente (CEf). A %VE foi calculada como: $\%VE = (CEi / CEf) \times 100$, como descrito por Dionisio-Sese e Tobita (1998).

Amostras de folhas frescas sem nervuras (folhas recém totalmente expandidas na soja e folha bandeira no arroz) foram coletadas, armazenadas em nitrogênio líquido e mantidas a -80°C. No laboratório realizou-se a quantificação da peroxidação lipídica, estimada pelo teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), do teor de H₂O₂, proteínas e enzimas antioxidantes.

A peroxidação lipídica foi estimada de acordo com métodos descritos por Heath e Packer (1968). A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada pela leitura em espectrofotômetro entre 535 e 600 nm, sendo os dados calculados com base no coeficiente de extinção de $1,55 \times 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Gratão et al., 2012).

O teor de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) foi estimado conforme os métodos de Alexieva et al. (2001). O tecido foliar das plantas foi homogeneizado em ácido tiobarbitúrico (0,1%) e centrifugado a 10.000 g por 10 min. O sobrenadante obtido foi adicionado a 100 mmol L⁻¹ de tampão fosfato de potássio (pH 7,5) e solução de iodeto de potássio (1 mol L⁻¹), e em seguida incubado em gelo durante uma hora. A leitura foi realizada na absorbância a 390 nm e o teor de H₂O₂ determinado com base em curva padrão de concentração de H₂O₂.

A extração de proteínas foi determinada a partir da homogeneização de cada amostra usando-se cadinho e pistilo em processo refrigerado, em tampão de extração contendo tampão fosfato de potássio 100 mmol L^{-1} (pH 7,5), 1 mmol L^{-1} ácido etilenodiamina tetra acético (EDTA), 3 mmol L^{-1} DL-ditiotreitol e 5% (p/v) polivinil-polipirrolidona (Boaretto et al., 2014).

O homogeneizado foi centrifugado a 10.000 g por 30 min a 4°C e o sobrenadante armazenado a -80°C para seguir a determinação da concentração de proteína, seguindo o método de Bradford (1976) utilizando albumina de soro bovino como padrão, sendo expresso em mg mL^{-1} proteína.

A atividade de superóxido dismutase (SOD) foi determinada em espectrofotômetro, conforme descrito em Cembrowska-Lech et al. (2015), sendo a reação conduzida em uma câmara de reação (caixa) sob iluminação de lâmpada fluorescente de 15 W, a 25°C . O meio de reação consistiu de tampão fosfato de potássio 50 mmol L^{-1} (pH 7,8), metionina 50 mmol L^{-1} , NBT 1 mmol L^{-1} (azul de nitrotetrazólio), EDTA 10 mmol L^{-1} e riboflavina $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$. A leitura foi realizada a 560 nm e a atividade de SOD expressa em U mg^{-1} proteína.

A atividade de catalase (CAT) foi determinada pela mistura de reação de 1 mL de 100 mmol L^{-1} de tampão fosfato de potássio (pH 7,5) e $2,5 \text{ }\mu\text{L}$ H_2O_2 (solução a 30%). A atividade enzimática foi quantificada pelo monitoramento da decomposição do H_2O_2 em espectrofotômetro a 240 nm por 1 minuto conforme descrito por Nogueirol et al. (2015). A atividade de CAT foi expressa em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ proteína.

A atividade de ascorbato peroxidase (APX) foi mensurada em reação contendo o extrato vegetal, tampão fosfato de potássio 80 mmol L^{-1} (pH 7,0), ascorbato 5 mmol L^{-1} , EDTA 1 mmol L^{-1} e H_2O_2 1 mmol L^{-1} (Gratão et al., 2012). A leitura da taxa de oxidação do ascorbato foi realizada em espectrofotômetro a 290 nm a 30°C ao longo de 1 minuto. A atividade de APX foi expressa em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ proteína.

2.2.3 Biometria, acúmulo de Si e de Zn e produção de grãos

Por ocasião da maturidade fisiológica em duas plantas realizou-se a medição da altura. Na soja considerou a altura a porção de caule inserida no substrato até a inserção da última folha e no arroz até a inserção da folha bandeira.

Na soja também foi realizada a medição do diâmetro do caule 5 cm acima do substrato. Essa avaliação não foi realizada no arroz devido à dificuldade em se obter medições precisas com a emissão dos perfilhos.

A determinação da área foliar e da matéria seca das plantas foi realizada em duas plantas por vaso escolhidas aleatoriamente no estágio de desenvolvimento R1. A determinação da área foliar se deu a partir de imagens digitais de todas as folhas destacadas dessas plantas. Para obtenção da imagem digital das folhas foi utilizado um tecido azul para destaque da cor verde. As imagens foram obtidas sem flash, à sombra, sempre no período da manhã, gravadas no formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) tanto para a soja como para o arroz. As imagens foram analisadas no programa Image J 1.49m Java 1.7.0_71 (32-bit). Nesse software as imagens foram abertas e com o auxílio das ferramentas Threshold (menu Image e submenu Adjust), Analyze Particles e Measure (menu Analyze) pode-se determinar a área foliar da respectiva parcela (cm²).

A parte aérea (folhas e caules) foi separada das raízes, sendo ambas lavadas com água deionizada, solução a 0,1% de detergente, solução a 0,1% de HCl e água deionizada, acondicionadas em sacos de papel e, então, levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C ± 5, até se obter estabilidade da massa seca.

Após secas, foram pesadas para determinar a massa seca da parte aérea e raiz e com a soma obter a massa seca total. Posteriormente, as amostras da parte aérea foram moídas em moinho de facas tipo Willey, para a determinação do teor de Si (Korndörfer et al., 2004), e do teor de Zn (Bataglia et al., 1983). Não se realizou a determinação dos elementos químicos nas raízes, pois não foi possível retirar de maneira satisfatória traços de vermiculita fixadas às raízes. A partir dos teores e da massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo desses elementos na parte aérea das plantas e eficiência de utilização na parte aérea do Zn.

Quando os grãos encontravam-se secos, as partes reprodutivas foram coletadas e os grãos separados manualmente. Após a separação determinou-se a massa dos grãos e umidade, posteriormente corrigiu-se o teor de água para 130 g kg⁻¹ (Brasil, 2009). No experimento com soja determinou-se ainda o número de vagens por planta, o número de grãos por vagem e o número de grãos por planta, e no experimento com arroz, o número de perfilhos reprodutivos e o comprimento das panículas.

2.3 Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando o software AgroEstat (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015). Procedeu-se a análise de variância ($p \leq 0,05$) e quando significativa os dados foram submetidos ao teste Tukey ($p \leq 0,05$).

3 Resultados

3.1 Silício na atenuação de estresse por deficiência de Zn em plantas de soja

O ICV sete dias após a primeira aplicação (V4) não apresentou diferença entre os tratamentos, com valor médio de 11,3. O ICV após a segunda aplicação (R1) foi maior no tratamento de Si radicular independentemente da presença (19,7) ou ausência (14,8) de Zn. Sob +Zn, o ICV proporcionado pelo Si via solução nutritiva (Si radicular) foi 66% (7,9) maior que o Si via aplicação foliar (Si foliar) e 53% (6,8) maior que sem Si. Sob -Zn, o ICV das plantas que receberam Si foliar (12,6) não diferiu do Si radicular (14,8) porém sem diferir também do tratamento sem Si (10,7).

Após a terceira aplicação (R3) (Figura 2b) o ICV das plantas com Si radicular (23,6) foi 60% maior que sem Si (14,8). O ICV das plantas com Si foliar (19,7) não diferiu dos demais tratamentos. Sete dias após a última aplicação (R5) (Figura 2d) Si foliar proporcionou maior ICV (23,5) que sem Si (16), contudo, Si radicular (20,15) não diferiu do Si foliar nem sem Si.

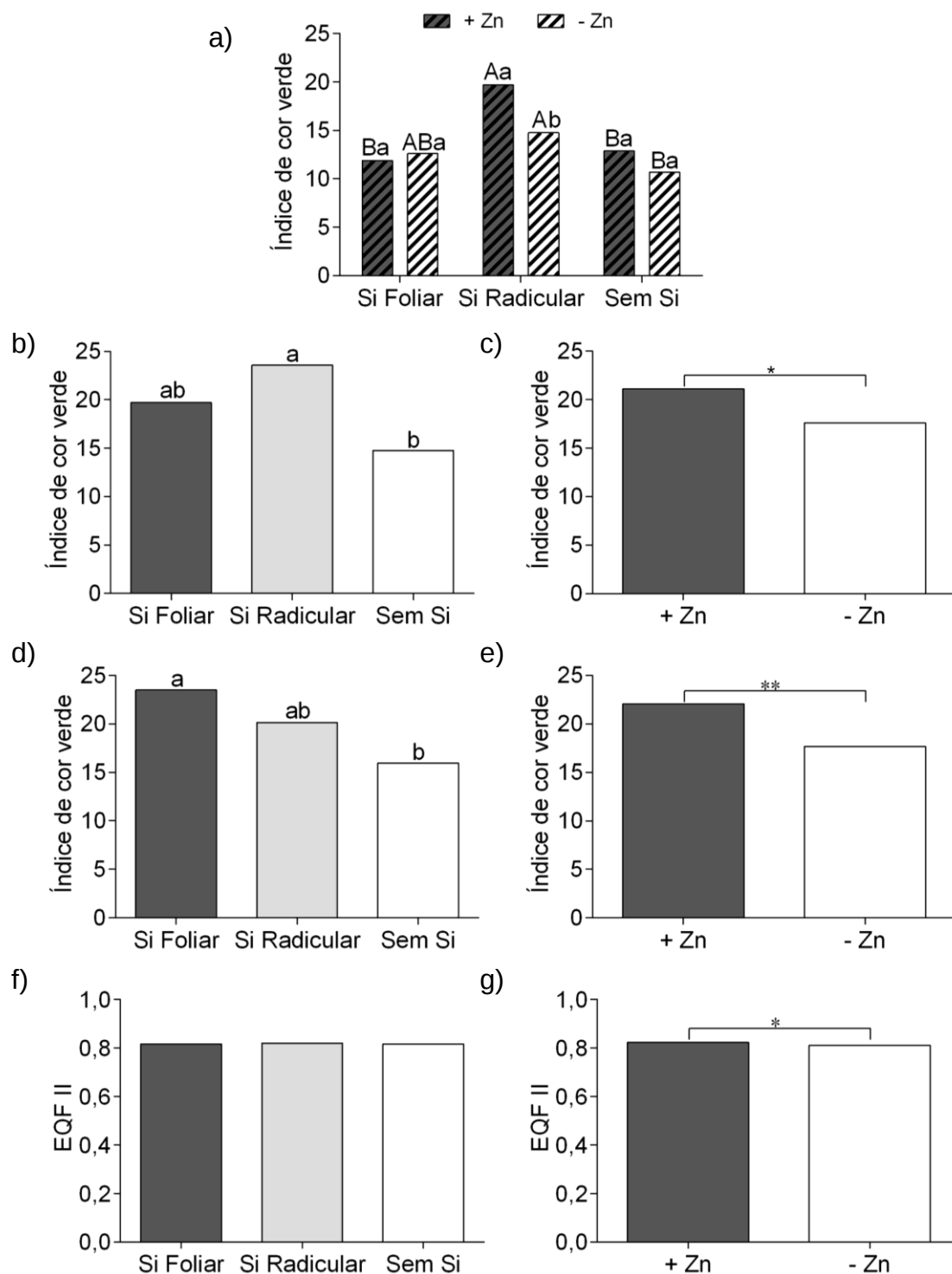


Figura 2. Índice de cor verde aos 7 dias após a segunda (a), terceira (b) e (c) e quarta (d) e (e) aplicação de Si, eficiência quântica do fotossistema II (EFQ II) (f) e (g) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de soja. No gráfico de interação (a) as letras maiúsculas comparam as formas de aplicação dentro de cada nível de Zn e as letras minúsculas comparam a presença ou ausência de Zn dentro de cada forma de aplicação. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$; *: $p \leq 0,05$.

Os ICVs das plantas sob $-Zn$ foram 17 e 20% menores em relação aos ICVs de $+Zn$ após a terceira (Figura 2c) e quarta aplicação (Figura 2e), respectivamente. Já a eficiência quântica do fotossistema II foi apenas 1,6% maior sob $+Zn$ em relação a $-Zn$ (Figura 2g), não diferindo quanto a forma de aplicação de Si (Figura 2f).

O Si radicular promoveu acúmulo de 23,5 mg por planta de Si a mais que sem Si (Figura 3a). Já Si foliar fez as plantas acumularem 20,8 mg por planta de Si, sem diferir de Si radicular (32,4 mg por planta de Si) e sem Si (8,9 mg por planta de Si).

Não foi observado efeito de $+Zn$ ou $-Zn$ no acúmulo de Si (Figura 3b). Já o Si proporcionou maior acúmulo de Zn nas plantas supridas com o micronutriente, sendo Si foliar acumulando 26% a mais de Zn (0,2 mg por planta) que Si radicular (Figura 3c). As plantas cultivadas sob $-Zn$ e Si foliar e Si radicular apresentaram acúmulo de 0,19 e 0,28 mg por planta de Zn a mais que sem Si, respectivamente.

Em relação à $-Zn$ e $+Zn$, não houve diferenças com Si radicular e sem Si, $+Zn$ superior a $-Zn$ quando se aplicou Si foliar. Nas folhas jovens (Figura 4) foi possível observar que o Si atenuou os sintomas de $-Zn$. As folhas de plantas $-Zn$ apresentaram aspecto lanceolado, reduzido e coloração de verde mais clara, resultado evidenciado também pelo ICV (Figura 2).

Sob $+Zn$ e Si foliar a eficiência de utilização de Zn (EUZn) foi 27 e 63% maior que Si radicular e sem Si, respectivamente (Figura 3d). Na ausência de Zn, houve uma inversão do comportamento em relação a $+Zn$, a EUZn foi 26% menor com Si foliar em relação a Si radicular e sem Si. O tratamento com Si foliar $+Zn$ apresentou maior EUZn em relação ao Si foliar $-Zn$. Presença e ausência de Zn não diferiram quando se forneceu Si radicular e sem Si.

Não houve diferenças no teor de proteína ($6,7 \text{ mg mL}^{-1}$), SOD ($11,7 \text{ U mg}^{-1}$ proteína) e APX ($6412 \text{ } \mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ proteína). O Si não foi capaz de reduzir os teores de H_2O_2 (Figura 5a), a %VE (Figura 5c) e aumentar a atividade da CAT (Figura 5f). Já $+Zn$ ou $-Zn$ influenciou essas variáveis.

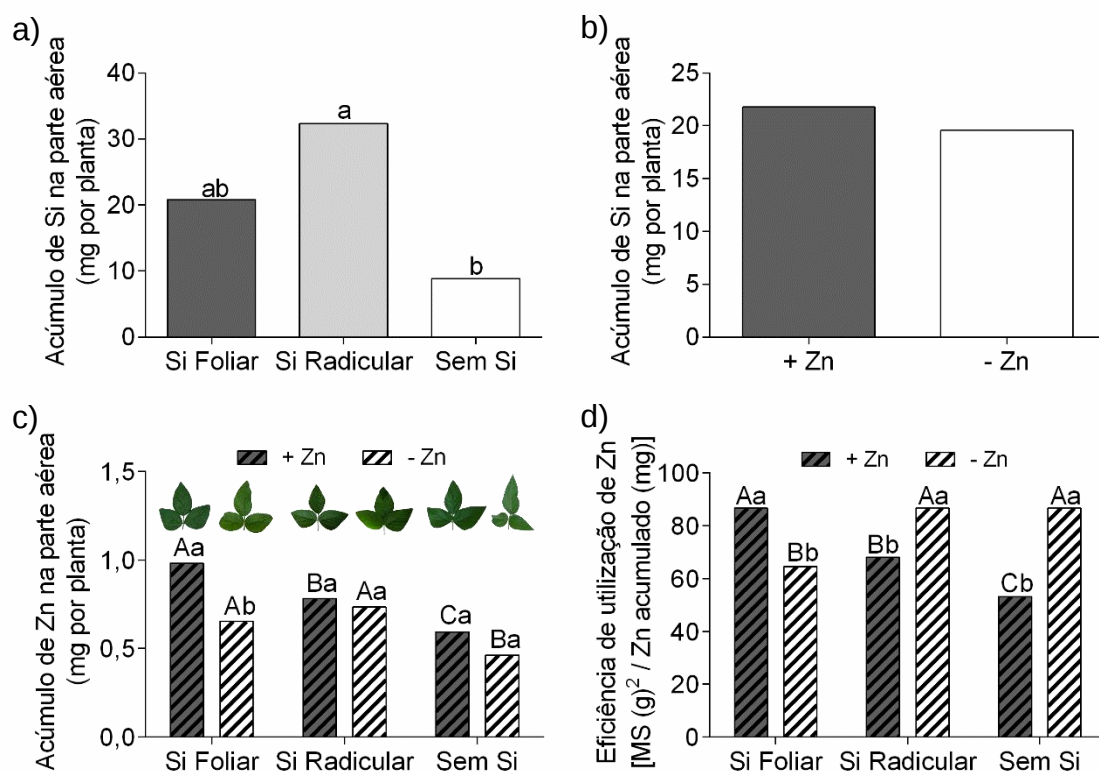


Figura 3. Acúmulo de Si (a) e (b), Zn (c) e eficiência de utilização de Zn ($\times 1000$) (d) na parte aérea em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de soja. Nos gráficos de interação (c) e (d) as letras maiúsculas comparam as formas de aplicação dentro de cada nível de Zn e as letras minúsculas comparam a presença ou ausência de Zn dentro de cada forma de aplicação. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

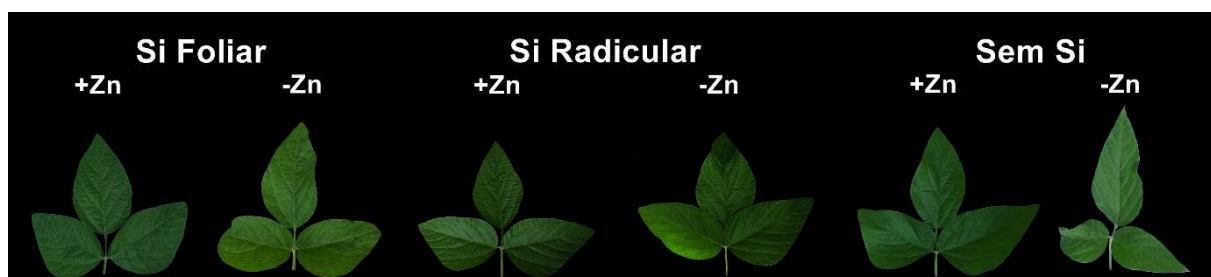


Figura 4. Imagens de folhas de soja em função da aplicação de Si via foliar (Si Foliar), via radicular (Si Radicular) e sem aplicação de Si (Sem Si), e ausência (-Zn) e presença de zinco (+Zn).

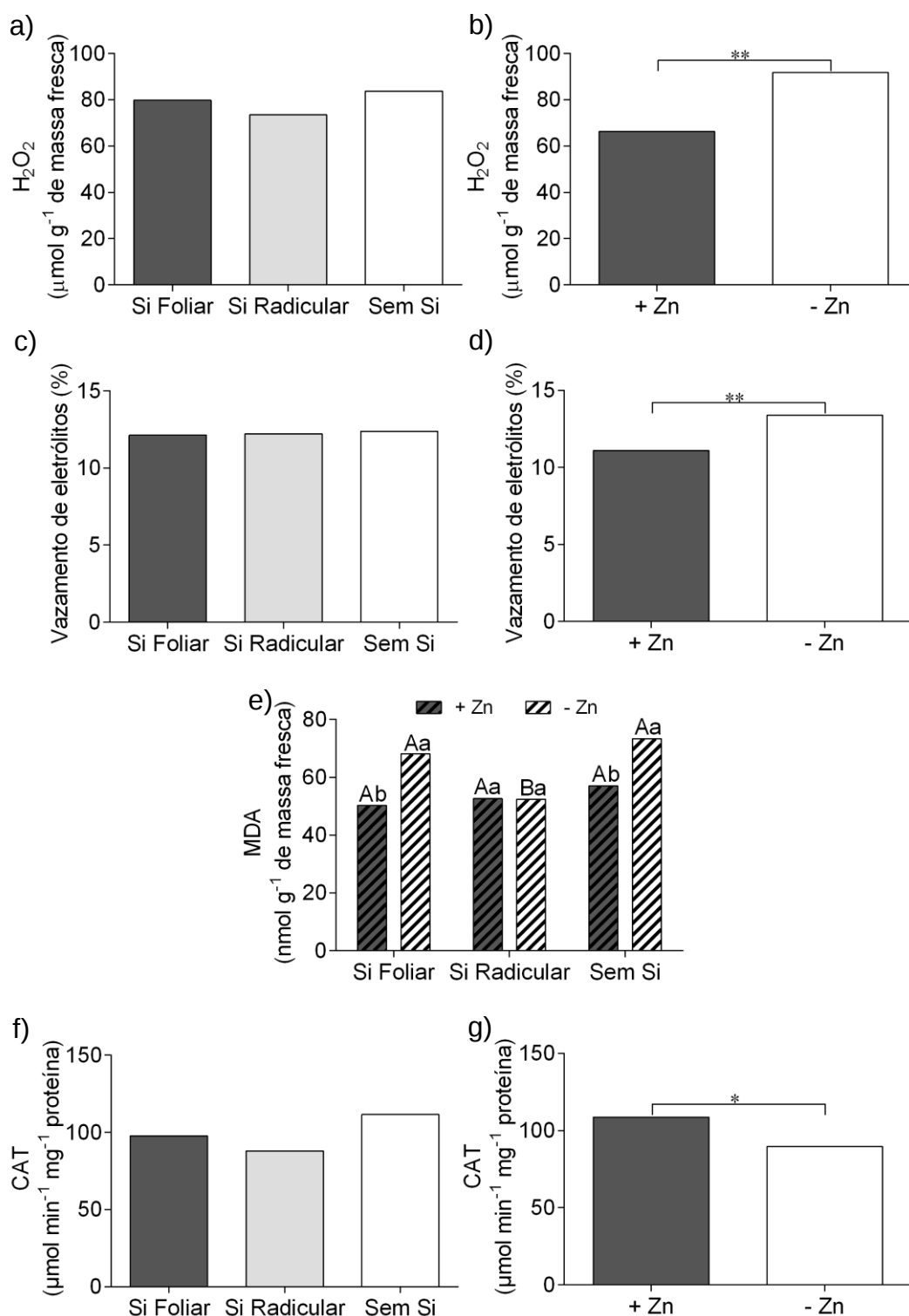


Figura 5. Teor de H_2O_2 (a) e (b), vazamento de eletrólitos (c) e (d), malondialdeído (MDA) (e) e catalase (CAT) (f) e (g) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de soja. No gráfico de interação (e) as letras maiúsculas comparam as formas de aplicação dentro de cada nível de Zn e as letras minúsculas comparam a presença ou ausência de Zn dentro de cada forma de aplicação. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$; *: $p \leq 0,05$.

O Si radicular e Si foliar não apresentaram efeito no teor de H_2O_2 (Figura 5a) e %VE (Figura 5b), apresentando valores médios de $79 \mu\text{mol g}^{-1}$ de massa fresca e 12% de vazamento de eletrólitos, respectivamente.

As plantas sob $-\text{Zn}$ apresentaram teores de H_2O_2 (Figura 5b) e %VE (Figura 5d) 38 e 21% maiores que as plantas sob $+\text{Zn}$. O MDA (Figura 5e) das plantas sob $+\text{Zn}$ não diferiu entre as formas de aplicação de Si. No entanto, sob estresse, ou seja $-\text{Zn}$, o MDA das plantas sob Si radicular foi 23% ($15,6 \text{ nmol g}^{-1}$ de massa fresca) e 29% ($20,9 \text{ nmol g}^{-1}$ de massa fresca) menor que o das plantas com Si foliar e sem Si, respectivamente.

Nas características biométricas, não houve diferenças estatísticas na altura de plantas (87,3 cm), massa seca de raiz (3,7 g), número de vagens por plantas (52,1), número de grãos por vagem (2,0) e número de grãos por planta (106,1).

O Si não teve efeito no diâmetro do caule (Figura 6a), que foi 9% menor sob $-\text{Zn}$ quando comparado a $+\text{Zn}$ (Figura 6b). Já a área foliar das plantas que receberam Si foliar foi 6% maior que sem Si, sem diferir do Si radicular que por sua vez também não diferiu do sem Si (Figura 6c). Sob $-\text{Zn}$ as plantas apresentaram redução de 7% da área foliar em relação as plantas sob $+\text{Zn}$ (Figura 6d).

Sob $+\text{Zn}$ e Si foliar, a MSPA (Figura 6e) foi 26% (1,9 g por planta) e 64% (3,6 g por planta) maior que o Si radicular e sem Si, respectivamente. No entanto, sob $-\text{Zn}$, Si foliar e Si radicular não diferiram entre si, sendo 37% (1,7 g por planta) e 50% (2,4 g por planta) maior em relação ao sem Si, respectivamente.

A MST apresentou comportamento semelhante à MSPA diferindo sob $-\text{Zn}$, no qual Si radicular proporcionou a mesma MST que sem Si (Figura 6f). Outra diferença foi sob $-\text{Zn}$, no qual a aplicação de Si foliar não diferiu de Si radicular nem sem Si, e Si radicular proporcionando MST maior que sem Si.

A maior produção de grãos (6,2 g por planta) foi observada nas plantas que receberam Si foliar e $+\text{Zn}$ (Figura 6g). Na situação de suficiência ($+\text{Zn}$), a produção de Si foliar foi 34% (1,6 g por planta) maior que Si radicular e 56% (2,2 g por planta) sem Si, com Si radicular (4,6 g por planta) e sem Si (4,0 g por planta) não diferindo entre si. No entanto, sob $-\text{Zn}$ e Si radicular as plantas apresentaram produção de grãos 53% (1,5 g por planta) e 90% (2,1 g por planta) maior em relação ao Si foliar e sem Si.

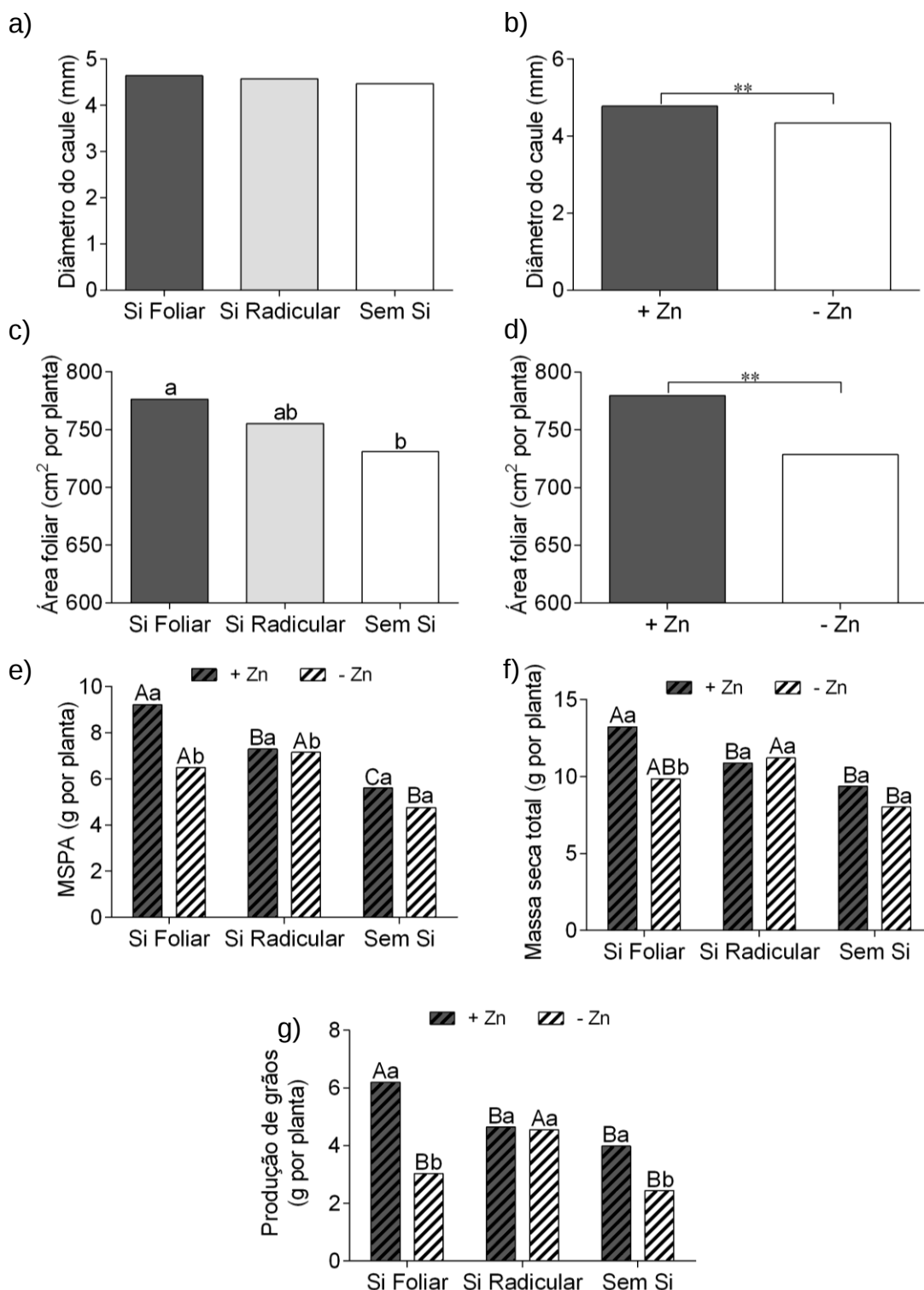


Figura 6. Diâmetro do caule (a) e (b), área foliar (c) e (d) massa seca da parte aérea (MSPA) (e), massa seca total (f) e produção de grãos (g) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de soja. Nos gráficos de interação (e), (f) e (g) as letras maiúsculas comparam as formas de aplicação dentro de cada nível de Zn e as letras minúsculas comparam a presença ou ausência de Zn dentro de cada forma de aplicação. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$.

3.2 Silício na atenuação de estresse por deficiência de Zn em plantas de arroz

Verificaram-se diferenças entre os tratamentos no ICV das quatro avaliações realizadas (Figura 7). No entanto, não houve diferenças na eficiência quântica do fotossistema II (0,82). Na primeira avaliação de ICV (V3), Si radicular e Si foliar apresentaram ICVs 19 e 18% maiores que sem Si, sem diferirem entre si (Figura 7a). O ICV sob -Zn foi 7% menor em relação ao das plantas sob +Zn.

A segunda (V6) (Figura 7c), terceira (R3) (Figura 7d) e quarta (R3) avaliação (Figura 7e) foram bastante semelhantes. As plantas com Si, independentemente se sob +Zn ou -Zn não apresentaram diferenças no ICV. Já as plantas sem Si tiveram o ICV reduzido sob -Zn.

O Si radicular proporcionou acúmulo 60% (36,8 mg por planta) e 217% (67,4 mg por planta) maior de Si que Si foliar e sem Si (Figura 8a). Já as plantas sob +Zn apresentaram acúmulo de Si 46% (23,9 mg por planta) maior que as plantas sob -Zn (Figura 8b).

O acúmulo e eficiência de utilização de Zn foram maiores nas plantas que receberam Si radicular sem diferir daquelas plantas que receberam Si foliar. No entanto, Si foliar não proporcionou diferença em relação ao sem Si (Figura 8c, 8e). Como esperado, as plantas sob +Zn apresentaram acúmulo e eficiência de utilização do micronutriente superior àquelas sob -Zn (Figura 8d, 8f). Quanto à clorose seguida de necrose em função da deficiência de Zn (Figura 9), não foi observada nos tratamentos, com exceção do tratamento -Zn e sem Si que apresentou pequena necrose, corroborando com os dados do ICV (Figura 7).

Não houve diferenças estatísticas para MDA (17,53 mmol g⁻¹ de massa fresca), teor de proteína (6,32 mg mL⁻¹), APX (7693 μmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína) e CAT (307,3). O teor de H₂O₂ foi 19% maior nas plantas sem Si em relação àquelas com Si radicular, com Si radicular e sem Si não diferindo daquelas com Si foliar (Figura 10a). Sob -Zn as plantas apresentaram teores de H₂O₂ 23% maiores em relação às plantas sob +Zn (Figura 10b).

A %VE seguiu praticamente o mesmo comportamento do teor de H₂O₂, com diferença que Si foliar não diferiu de Si radicular, sendo ambos inferiores ao sem Si (Figura 10c). As plantas com -Zn apresentaram %VE 25% maior que +Zn (Figura

10d). Si radicular proporcionou valores de SOD 50 e 87% maiores em relação ao Si foliar e sem Si (Figura 10e). Já as plantas sob –Zn apresentaram valor de SOD 34% menor que sob +Zn (Figura 10f).

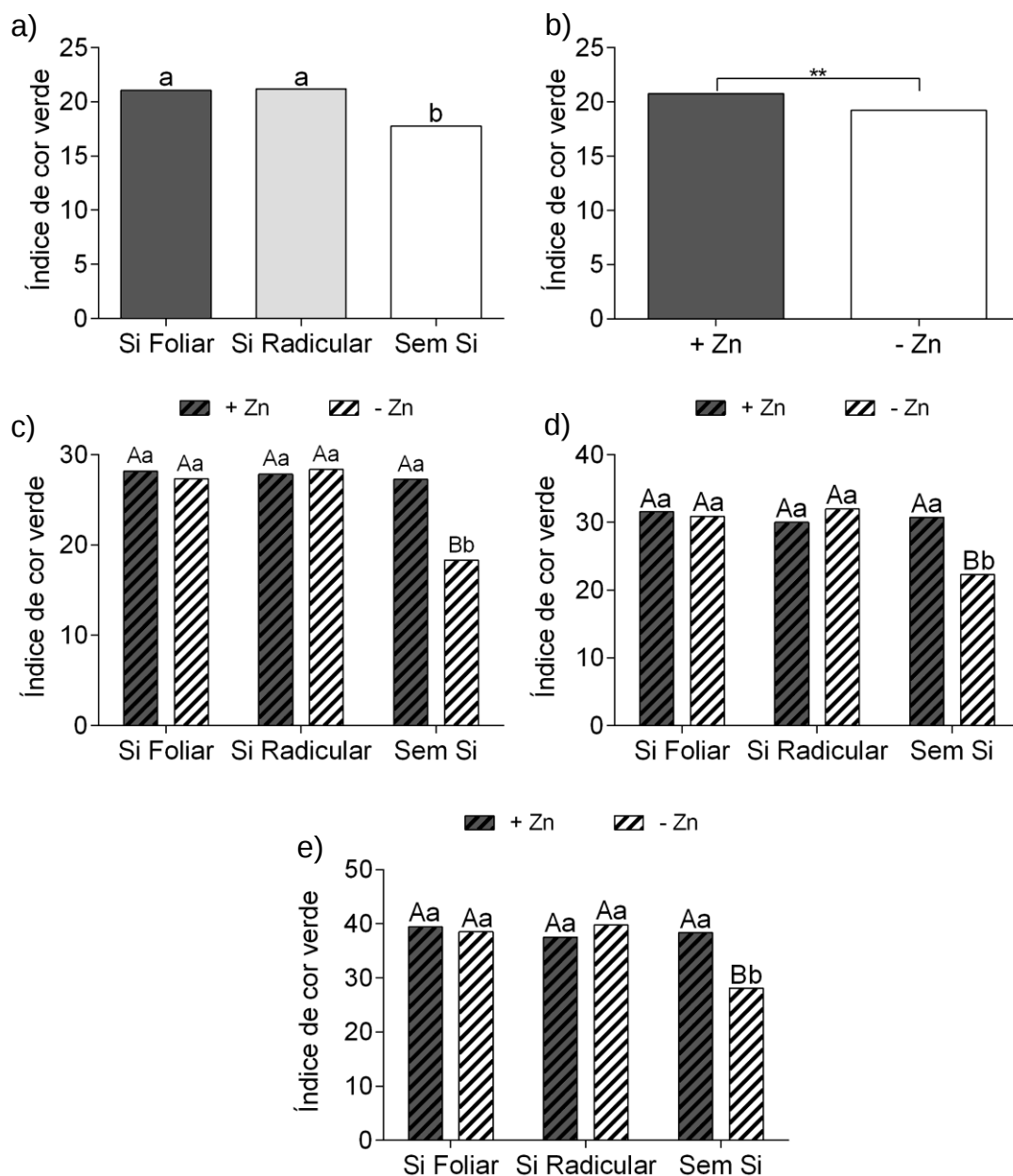


Figura 7. Índice de cor verde aos 7 dias após a primeira (a) e (b), segunda (c), terceira (d) e quarta (e) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de arroz. Nos gráficos de interação (c), (d), (e) as letras maiúsculas comparam as formas de aplicação dentro de cada nível de Zn e as letras minúsculas comparam a presença ou ausência de Zn dentro de cada forma de aplicação. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$.

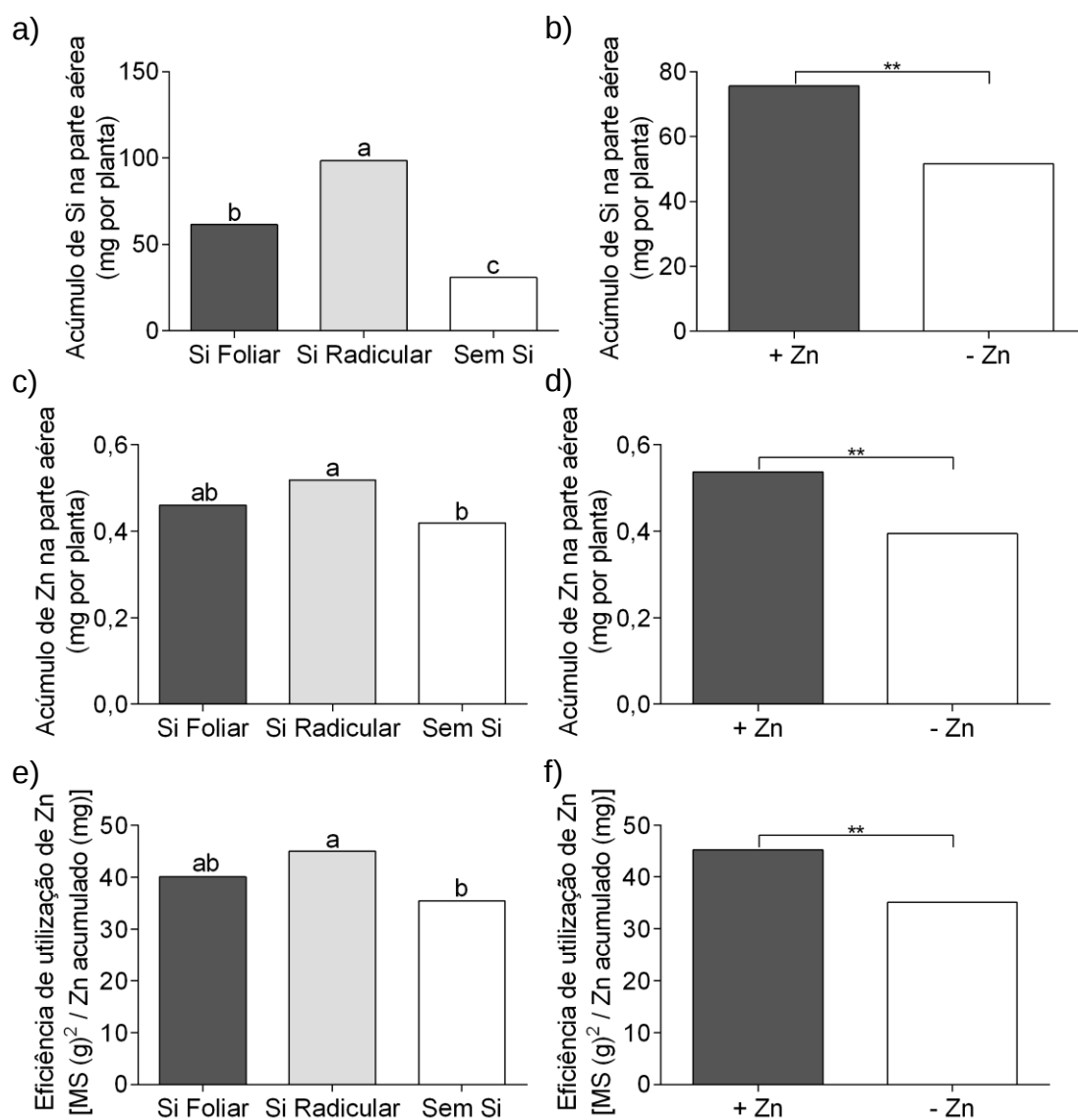


Figura 8. Acúmulo de Si (a) e (b), Zn (c) e (d) e eficiência de utilização de Zn ($\times 1000$) (e) e (f) na parte aérea em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de arroz. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) de probabilidade; **: $p \leq 0,01$.

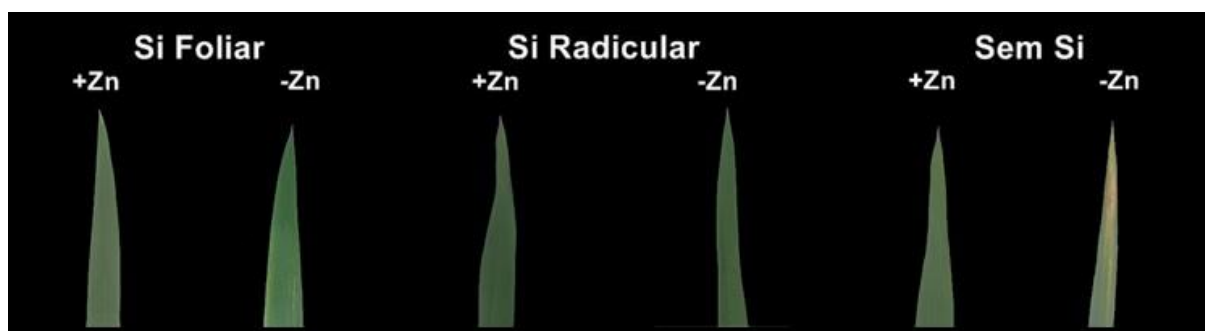


Figura 9. Imagens de folhas de arroz em função da aplicação de Si via foliar (Si Foliar), via radicular (Si Radicular) e sem aplicação de Si (Sem Si), e ausência (-Zn) e presença de zinco (+Zn).

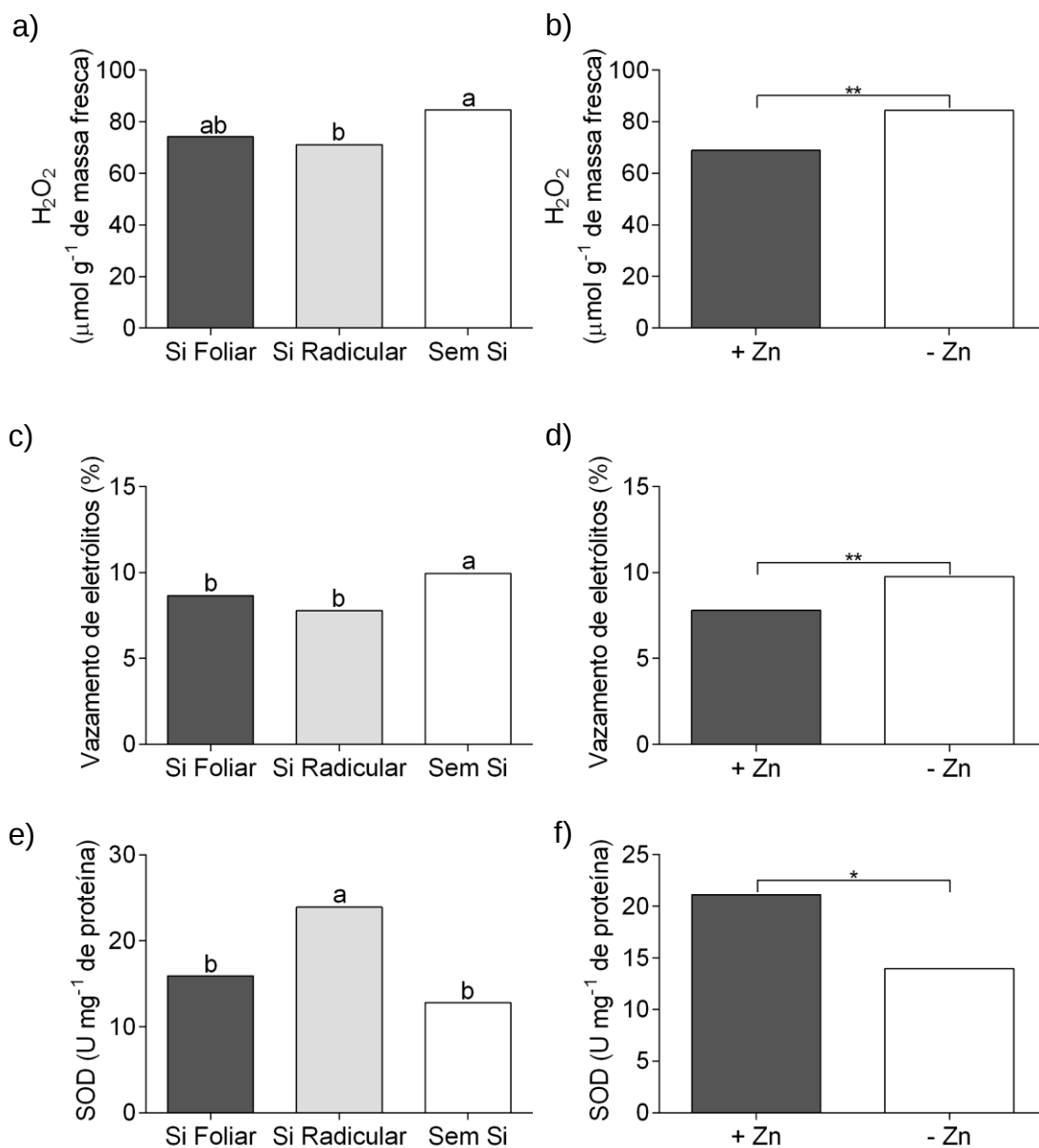


Figura 10. H₂O₂ (a) e (b), vazamento de eletrólitos (c) e (d) e superóxido dismutase (SOD) (e) e (f) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de arroz. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$; *: $p \leq 0,05$.

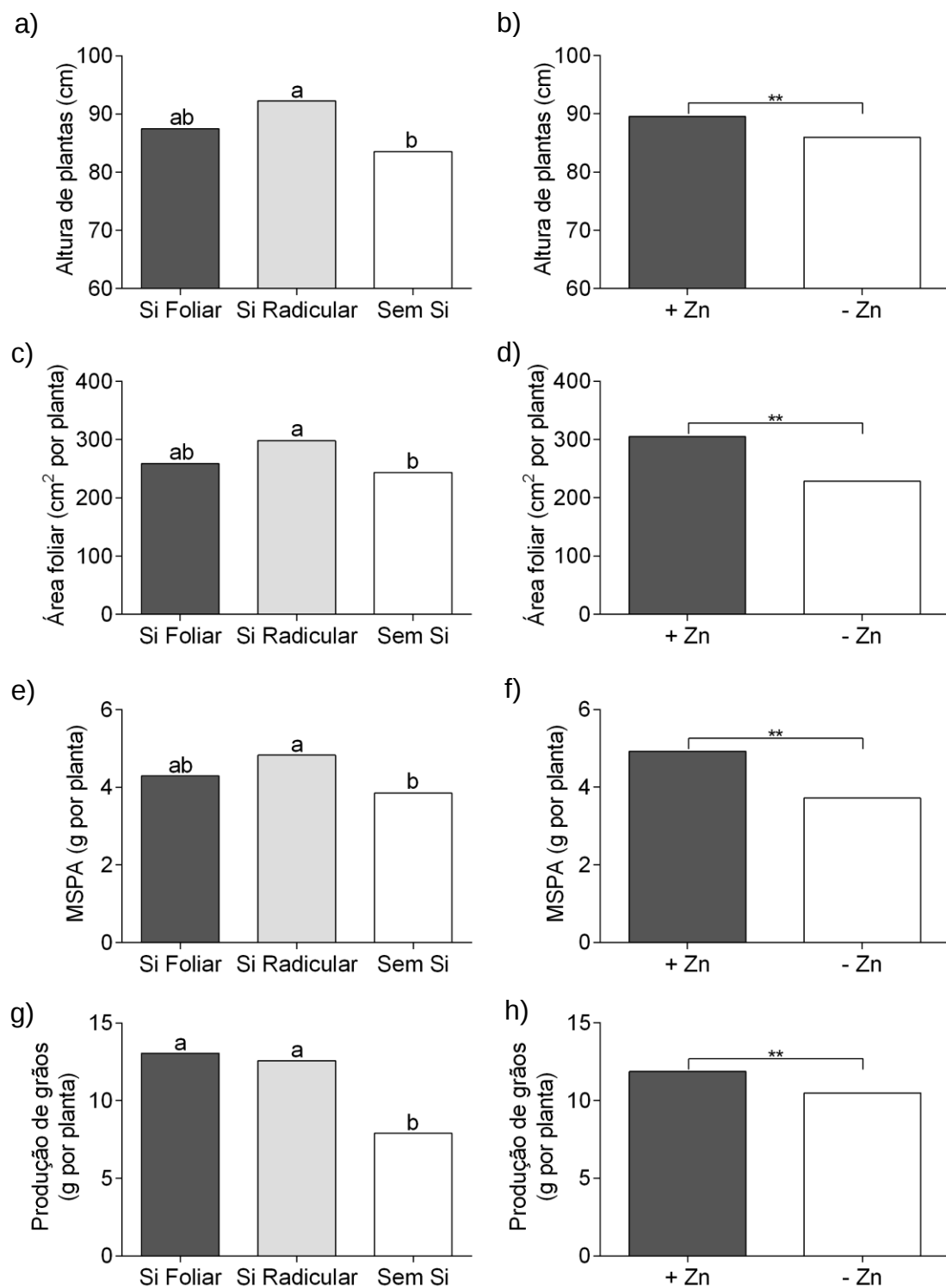


Figura 11. Altura de plantas (a) e (b), área foliar (c) e (d), massa seca da parte aérea (MSPA) (e) e (f) e produção de grãos (g) e (h) em função de formas de aplicação de Si e presença e ausência de Zn em plantas de arroz. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$); **: $p \leq 0,01$.

A MSR (2,0 g), MST (6,34 g), número de perfilhos reprodutivos por planta (0,97) e comprimento de panículas (25,42 cm) não diferiram pelo teste F.

A altura de plantas, área foliar e MSPA foram maiores nas plantas que receberam Si radicular, sem, no entanto diferir das plantas que receberam Si foliar. Já as plantas sem Si não diferiram daquelas que receberam Si foliar (Figura 11a, 11c, 11e). Sob -Zn as plantas tiveram sua altura, área foliar e MSPA reduzidas em relação às plantas em suficiência (Figura 11b, 11d, 11f) como também observado no experimento com a soja.

A aplicação de Si radicular e Si foliar aumentou em 37% (4,69 g por planta) e 40% (5,17 g por planta) a produção de grãos em relação ao tratamento sem Si, respectivamente (Figura 11g). A omissão de Zn reduziu em 12% a produção de grãos do arroz.

4 Discussão

Nesse estudo ficou evidente o efeito do Si e do Zn no ICV de folhas da soja e do arroz. Os efeitos dos tratamentos no ICV iniciaram nas plantas de soja a partir da segunda aplicação (Figura 2), quando a demanda por nutrientes tornou-se maior. Não houve diferenças entre as duas formas de fornecimento de Si apesar da tendência no incremento do ICV com as aplicações foliares de Si na soja.

No arroz foi possível observar início dos efeitos na primeira avaliação, pois se trata de uma espécie exigente em Zn, como pouca reserva do micronutriente na semente (Prado, 2008; Yin et al., 2016) tornando-se muito suscetível a omissão. Por outro lado, é uma espécie acumuladora de Si que se beneficia facilmente dos efeitos do elemento benéfico (Ma et al., 2006) verificado pelo potencial do Si em manter os ICVs das plantas de arroz mesmo sob deficiência de Zn (Figura 7a; 7c; 7d).

O Si aumentou o ICV e atividade fotossintética em outros estudos com estresse (Ali et al., 2013; Campos et al., 2016). No entanto, em soja deficiente em Zn não foi observado esse aumento devido ao pequeno período em que foi conduzido (21 dias de omissão) (Pascual et al., 2016). O Si parece atrasar a degradação dos pigmentos fotossintetizantes por aumentar a atividade de enzimas relacionadas ao

estresse oxidativo que combatem as ERO, principais causadoras da degradação de cloroplastos e consequentemente da clorofila (Cao et al., 2015).

Em ambas as espécies o Si aumentou o acúmulo do elemento na planta (Figura 3a; 8a). Na soja as formas de aplicação de Si não diferiram entre si, já no arroz o fornecimento radicular de Si foi superior à aplicação foliar.

O arroz apresenta carregadores específicos que utilizam energia metabólica para absorver o elemento ativamente (Mitani e Ma, 2005; Ma et al., 2006; Ma e Yamaji, 2006; Yamaji et al., 2008), por isso o fornecimento ininterrupto de Si radicular tende a proporcionar maior acúmulo em relação a aplicação foliar esporádica, embora essa técnica apresente alta eficiência.

O Zn é importante para o acúmulo de outros elementos na planta como o Si no arroz (Figura 8b), porém não foi observado tal efeito na soja (Figura 3b) provavelmente devido a reserva do micronutriente na semente ter suprido as necessidades nutricionais dessa planta.

A aplicação foliar de Si mostrou-se mais eficiente que a aplicação radicular de Si em aumentar o acúmulo de Zn nas plantas de soja (Figura 3c) e igualmente eficiente à aplicação de Si radicular nas plantas de arroz supridas com Zn (Figura 8c). Contudo, sob -Zn, o fornecimento de Si, independente da forma de aplicação promoveu maiores acúmulos do micronutriente em relação à não aplicação de Si. Pascual et al. (2016) também observaram que o Si radicular foi capaz de promover incremento no acúmulo de Zn nas plantas de soja. No entanto, esse é o primeiro relato até o momento de que a aplicação foliar de Si aumente o acúmulo de Zn em soja e em arroz.

A EUZn relaciona quanto de Zn foi necessário para produzir a massa seca da planta. Foi possível verificar que o Si aumentou a EUZn em ambas espécies, mas na soja sob +Zn a aplicação foliar de Si aumentou a EUZn enquanto que nas plantas sob -Zn a EUZn diminuiu devido à maior absorção e acúmulo do micronutriente.

O Si tem apresentado efeito na atenuação da deficiência de Zn por promover uma melhor distribuição do elemento ou estar envolvido na atenuação do estresse oxidativo de plantas (Bityuskii et al., 2014; Mehrabanjoubani et al., 2015; Pascual et al., 2016). Contudo, em arroz e soja não havia sido comparado às duas formas de

aplicação de Si, tão pouco avaliado o efeito da deficiência de Zn e do elemento benéfico em variáveis referentes ao estresse oxidativo ocasionado pela deficiência.

Em relação ao estresse oxidativo a redução no MDA, H_2O_2 e %VE possivelmente se deu pela ativação de oxidases ou antioxidantes não enzimáticos não avaliados nesse estudo, pois nem todas as enzimas avaliadas tiveram sua atividade alterada em função do elemento benéfico.

Assim como foi observado neste estudo, a deficiência de Zn reduz a atividade da CAT e da SOD, principalmente por ser constituinte da Cu-Zn SOD (Cakmak et al., 1993; Cakmak et al., 1997; Hernandez-Apaolaza, 2014). A menor atividade da SOD e outras enzimas acarreta no aumento de ERO, causando danos às membranas, proteínas, clorofila e enzimas, o que pode levar à clorose e inibição da fotossíntese e do crescimento (Cakmak, 2000).

O efeito da deficiência de Zn ficou evidente na redução do limbo foliar (Figura 4) e nos índices de cor verde (Figura 3; Figura 7). Isso refletiu também na área foliar, MSPA, e na produção de grãos de ambas as espécies (Figura 6, Figura 10).

Portanto, soja sob -Zn a aplicação radicular de Si via solução nutritiva apresenta efeito inicial, constatado pelas leituras de ICV no início do experimento, que influencia em características importantes ao longo do desenvolvimento da planta, passando pelo MDA e chegando a produção de grãos. Em situações de suficiência de Zn, a aplicação foliar mostra-se a alternativa mais eficiente para incrementos na produção.

No arroz a aplicação de Si proporcionou ganhos na produção de grãos, independente da forma de aplicação (Figura 10g). Portanto, independente se deficiente ou suficiente em Zn, plantas de arroz que receberem aplicação de Si, seja via radicular ou foliar apresentarão maior produção de grãos que plantas que não receberem aplicação de Si.

A deficiência de Zn diminuiu a produção de grãos de arroz (Figura 19h), havendo a necessidade da aplicação do micronutriente.

5 Conclusões

O Si fornecido via radicular mitiga os efeitos da deficiência de Zn nas plantas de soja, diminuindo os teores de MDA, e mantendo a produção de grãos. Contudo a aplicação foliar de Si em plantas suficientes em Zn proporciona maior produção em relação ao fornecimento de Si via radicular e sem aplicação de Si.

O Si não mitiga os efeitos da deficiência de Zn em arroz, embora a atividade da SOD aumente com o fornecimento radicular do elemento benéfico. Independentemente se em condição de suficiência ou deficiência de Zn a aplicação radicular ou foliar de Si, promove ganhos na produção em relação a não aplicação de Si.

6 Referências

- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., Karanov, E., 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell and Environ.* 24, 1337–1344.
- Ali, S., Farooq, M. A., Yasmeen, T., Hussain, S., Arif, M. S., Abbas, F., Bharwana, S. A., Zhang, G. P., 2013. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 89, 66–72.
- Barbosa, J.C., Maldonado Jr., W., 2015. *AgroEstat - Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos: version 1.1.0.712rev77*, Jaboticabal:Funep.
- Bataglia, O.C., Furlani, A.M.C., Teixeira, J.P.F., Furlani, P.R., Gallo, J.R., 1983. *Métodos de análise química de plantas*. Campinas: Instituto Agrônômico. (Boletim Técnico v.78).
- Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimovi, 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.
- Boaretto, L. F.; Carvalho, G.; Borgo, L.; Creste, S.; Landell, M. G. A.; Mazzafera, P.; Azevedo, R. A., 2014. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. *Plant Physiol. Biochem.* 74, 165–175.

Bradford, M. M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72, 248–254.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. Regras para análise de sementes. MAPA/ACS, Brasília.

Cakmak, I., 2000. Possible role of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytol.* 146, 185–205.

Cakmak, I., Marschner, H., 1993. Effect of zinc nutritional status on activities of superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves. *Plant Soil.* 155/156, 127–130.

Cakmak, I., Öztürk, L., Eker, S., Torun, B. Kalfa, H.I., Yilmaz, A., 1997. Concentration of zinc and activity of copper/zinc-superoxide dismutase in leaves of rye and wheat cultivars differing in sensitivity to zinc deficiency. *J. Plant Physiol.* 151, 91–95.

Campos, C.N.S., Prado, R.M., Caione, G., Lima Neto, A.J.; Mingotte, F.L.C., 2016. Silicon and excess ammonium and nitrate in cucumber plants. *Afr. J. Agr. Res.* 11, 276–283.

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.

Cembrowska-Lech, D.; Koprowski, M.; Kępczyński, J., 2015. Germination induction of dormant *Avena fatua* caryopses by KAR₁ and GA₃ involving the control of reactive oxygen species (H₂O₂ and O₂^{•-}) and enzymatic antioxidants (superoxide dismutase and catalase) both in the embryo and the aleurone layers. *J. Plant Physiol.* 176, 169–179.

Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J., 2000. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. *Crop Sci.* 40, 436–443.

Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Sci.* 135, 1–9.

Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of soybean development. Yowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames.

Gratão, P.L., Monteiro, C.C., Carvalho, R.F., Tezotto, T., Piotto, F.A., Peres, L.E.P., Azevedo, R.A., 2012. Biochemical dissection of Diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd stressful conditions. *Plant Physiol. Biochem.* 56, 79–96.

Heath, R.L., Packer, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplast I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys.* 125, 189–198.

Hernandez–Apaolaza, L., 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta*. 240, 447–458.

Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water culture method for growing plants without soils. California Agricultural Experimental Station, Berkeley.

Korndörfer, G.H., Pereira, H.S.P., Nolla, A., 2004. Análise de silício: solo, planta fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU.

Ma, J.F., 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50, 11–18.

Ma, J.F., Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y., Yano, M., 2006. A silicon transporter in rice. *Nature*. 440, 688–691.

Ma, J. F., Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Sci.* 11, 392–397.

Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H., Aghdasi, M., 2015. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 27, 19–29.

Mitani N., Ma J. F., 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *J. Exp. Bot.* 56, 1255–1261.

Nogueirol, R.C.; Monteiro, F.A.; Gratão, P.L.; Borgo, L.; Azevedo, R.A., 2015. Tropical soils with high aluminum concentrations cause oxidative stress in two tomato genotypes. *Environ. Monit. Assess.* 187, 73.

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

Raetano, C.G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. In: Antuniassi, U.R., Boller, W. (eds.) *Tecnologia de aplicação para culturas anuais*. Botucatu: FEPAF, 2011. Cap.1, p.15-26.

Yamaji, N., Mitani, N., Ma, J.F., 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *Plant Cell*. 20, 1381–1389.

Yin, H., Gao, X., Stomph, T., Li, L., Zhang, F., Zou, C., 2016. Zinc concentration in rice (*Oryza sativa* L.) grains and allocation in plants as affected by different zinc fertilization strategies. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 47, 761–768.