

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

JOÃO AUGUSTO CARVALHO MARQUES

**Controle da Ferrugem da Soja com Aplicação Foliar de uma Nova Fonte de Silício
Solúvel**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2017

JOÃO AUGUSTO CARVALHO MARQUES

**Controle da Ferrugem da Soja com Aplicação Foliar de uma Nova Fonte de Silício
Solúvel**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte
das exigências para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo. Modalidade: Trabalho
Científico.**

**Orientador: Prof. Fabrício de Ávila Rodrigues
Coorientadora: Caroline Hawerth**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2017

JOÃO AUGUSTO CARVALHO MARQUES

**Controle da Ferrugem da Soja com Aplicação Foliar de uma Nova Fonte de Silício
Solúvel**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte
das exigências para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo. Modalidade: Trabalho
Científico.**

APROVADO: 07 de novembro de 2017

Prof. Fabrício de Ávila Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pois sem Ele nada teria acontecido ao longo da minha vida, não somente nesses anos como universitário, mas em todos os momentos por ser o autor do meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia e o maior mestre que eu poderia ter.

À Universidade Federal de Viçosa, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, com a confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador Prof. Fabrício de Ávila Rodrigues, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho, pela oportunidade, orientação, apoio, confiança e por ter me ensinado muito, não apenas como profissional, mas em como ser um homem forte, digno, batalhador e dedicado para com aquilo que se faz. A palavra mestre, nunca fará justiça ao Senhor.

Gostaria de realizar um agradecimento especial a minha coorientadora Caroline Hawerth que não mediu esforços para me acompanhar na elaboração desse trabalho, compartilhando comigo todo o seu vasto conhecimento, sua paciência e sua dedicação e não somente por ter me ensinado, mas por ter me feito aprender. Ao Dr. Jonas e a Dra. Patrícia que muito me auxiliaram. À família LIPP (Laboratório da Interação Planta-Patógeno), pelos momentos compartilhados, trocas de conhecimento e por todo carinho.

Aos meus pais, Danilo e Denise. Minha mãe heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço e meu pai que me fortaleceu todo esse tempo. Meus maiores exemplos de trabalho, honestidade e amor. Aos meus avós Nabiha, Tereza e “Juquita”, mas em especial meu avô Lineu (*In memoriam*) por todo apoio e por nunca terem medido esforços para me ver feliz. Aos meus tios e primos pelo incentivo e carinho. A minha tia Lourice por ter sido minha segunda mãe todo esse tempo e por tudo que ela e meu tio Gilmar fizeram e fazem por mim. Aos meus amigos pelos momentos compartilhados. Vocês fizeram parte da minha formação e irão continuar presentes em toda minha vida. Sintam-se alcançados sem precisar que eu cite nomes. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado. O momento que vivo agora é fascinante e só existe porque vocês se doaram em silêncio e aceitaram viver comigo o meu Sonho em me tornar Engenheiro Agrônomo. A vocês, ofereço minha vitória. Resta agora, o gostinho de um novo começo, pois chegou a hora de buscar novos sonhos e alcançar novas vitórias.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. MATERIAL E MÉTODOS	5
2.1 Crescimento das plantas.....	5
2.2 Tratamentos, preparo do inóculo e inoculação com <i>P. pachyrhizi</i>	5
2.3 Avaliação da severidade da FAS	6
2.4 Determinação da concentração foliar de Si	6
2.5 Determinação da concentração de pigmentos fotossintéticos	6
2.6 Delineamento experimental e análise estatística dos dados	7
3. RESULTADOS	8
3.1 Concentração foliar de Si	8
3.2 Severidade da FAS, AACPD e NP	8
3.3 Concentração de pigmentos fotossintéticos	11
4. DISCUSSÃO	12
5. CONCLUSÃO.....	15
6. REFERÊNCIAS	16

RESUMO

Atualmente, a ferrugem asiática da soja (FAS), causada por *Phakopsora pachyrhizi*, é a principal doença limitante da produção de soja tanto no Brasil quanto em outros países. Considerando a necessidade por medidas alternativas de controle da FAS, esse estudo objetivou determinar o efeito de uma nova fonte de silício solúvel no desenvolvimento da FAS. Plantas de soja, no estágio de crescimento V6, foram pulverizadas com água deionizada (controle), fungicida (13,3% Epoxiconazol + 5% de Piraclostrobina (0,5 L/ha, Ópera, Basf S.A.), silicato de potássio (SP) (FertiSil[®], 20 g/L; PQ Corporation, São Paulo), Silício Solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12), SiS (1 L/ha, pH 6,5), SiS (2 L/ha, pH 12) e SiS (2 L/ha, pH 12) + fungicida às 24 horas antes de serem inoculadas com *P. pachyrhizi*. A concentração foliar de Si foi significativamente maior em 39, 37, 53, 33 e 48%, respectivamente, para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5) e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle. A severidade final da FAS foi reduzida significativamente em 48, 34, 57, 41, 80 e 86% para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. A área abaixo da curva do progresso da doença foi reduzida significativamente em 34, 34, 59, 24, 79 e 81% para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Houve reduções significativas de 25, 29, 48, 28, 60 e 67% no número de pústulas por cm² de folíolo para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. A concentração de clorofila total aumentou significativamente em 37, 17, 33, 41, 75 e 50%, respectivamente, para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle. A concentração de carotenoides aumentou significativamente em 44, 27, 40, 45, 49 e 40%, respectivamente, para os tratamentos SP, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle. Os resultados do presente estudo permitem concluir que uma maior concentração foliar de Si ocasionou uma redução nos sintomas da FAR num cenário onde a concentração de pigmentos foi mantida adequada para que a fotossíntese não fosse afetada pela infecção por *P. Pachyrhizi*.

Palavras-chaves: *Glycine max*, *Phakopsora pachyrhizi*, controle alternativo, ferrugem.

ABSTRACT

Nowadays, Asian soybean rust (ASR), caused by *Phakopsora pachyrhizi*, is the main disease limiting soybean production in Brazil as well as in other countries worldwide. Considering the need for new alternatives for the control of ASR, this study aimed to determine the effect of a new source of soluble silicon on ASR development. Soybean plants, at the growth stage V6, were pulverized with: deionized water (control), fungicide (13,3% Epoxiconazole + 5% Piraclostrobin (0.5 L/ha, Ópera, Basf S.A.), potassium silicate (PS) (FertiSil®, 20 g/L; PQ Corporation, São Paulo), Soluble Silicon (SSi) (1 L/ha, pH 12), SSi (1 L/ha, pH 6.5), SSi (2 L/ha, pH 12) and SSi (2 L/ha, pH 12) + fungicide at 24 hours before inoculation with *P. pachyrhizi*. The foliar Si concentration was significantly higher by 39, 37, 53, 33 and 48%, respectively, for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5) and SSi (2 L/ha) + fungicide in comparison to the control treatment. The final ASR severity was significantly reduced by 48, 34, 57, 41, 80 and 86% for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5), fungicide and SSi (2 L/ha) + fungicide, respectively, in comparison to the control treatment. The area under disease progress curve was significantly reduced by 34, 34, 59, 24, 79 and 81% for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5), fungicide and SSi (2 L/ha) + fungicide, respectively, in comparison to the control treatment. There were significant reductions of 25, 29, 48, 28, 60 and 67% for the number of pustules per cm² of leaflet for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5), fungicide and SSi (2 L/ha) + fungicide, respectively, in comparison to the control treatment. The total concentration of chlorophylls significantly increased by 37, 17, 33, 41, 75 and 50%, respectively, for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5), fungicide and SSi (2 L/ha) + fungicide in comparison to the control treatment. The concentration of carotenoids significantly increased by 44, 27, 40, 45, 49 and 40%, respectively, for the treatments PS, SSi (1 L/ha), SSi (2 L/ha), SSi (1 L/ha, pH 6.5), fungicide and SSi (2 L/ha) + fungicide in comparison to the control treatment. Based on the result, it can be concluded that a high foliar Si concentration caused a reduction on ASR symptoms in a scenery where the concentration of pigments was maintained so the photosynthesis was not seriously affected by *P. pachyrhizi* infection.

Keywords: *Glycine max*, *Phakopsora pachyrhizi*, alternative control, rust.

1. INTRODUÇÃO

A ferrugem asiática da soja (FAS), causada pelo fungo biotrófico *Phakopsora pachyrhizi* Syd. & P. Syd., é um dos principais fatores que contribuem para reduzir a produtividade da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) em muitas regiões produtoras no Brasil e em todo o mundo (Yorinori et al., 2005). Os sintomas iniciais da doença aparecem na face abaxial das folhas como áreas poligonais cloróticas que, posteriormente, tornam-se necróticas e onde urédias contendo uredósporos são formadas em abundância (Goellner et al., 2010). A FAS pode afetar a fotossíntese quando a doença atinge níveis mais avançados de severidade devido a necrose intensa e a desfolha (Rodrigues et al., 2009). As plantas com desfolha intensa apresentam uma reduzida quantidade de vagens, menos grãos por vagem e menor peso dos grãos principalmente quando a infecção pelo fungo ocorre nos estádios de pré-florescimento ou de enchimento dos grãos (Ogle et al., 1979; Hartman et al., 1991).

A indisponibilidade de cultivares comerciais de soja com níveis aceitáveis de resistência à FAS e a alta variabilidade genética da população de *P. pachyrhizi* são as principais causas que dificultam o controle dessa doença (Yamanaka et al., 2010). A aplicação de fungicidas, particularmente quinonas e inibidores de desmetilação (QoIs e DMIs), tem sido recomendada para reduzir as perdas causadas pela FAS (Langenbach et al., 2016). Além disso, o uso de indutores de resistência, como o Acibenzolar-S-Methyl (ASM), um análogo do ácido salicílico, poderia ser uma alternativa para o manejo da FAS (Dallagnol et al., 2006; Duarte et al., 2009; Rodrigues et al. 2009; Cruz et al. 2013, 2014). Faz-se necessário a busca por alternativas de controle da FAS que permitam evitar o uso abusivo de fungicidas. O uso do silício (Si) é uma alternativa viável uma vez que os efeitos benéficos desse elemento, seja indiretos ou diretos, às plantas submetidas a estresses abióticos e ou bióticos ocorrem para várias culturas comerciais tais como arroz, aveia, cana-de-açúcar, centeio, cevada, pepino e trigo (Datnoff et al., 2007). O controle de doenças foliares em monocotiledôneas e dicotiledôneas é possível com a adição de silicato de cálcio ao solo ou crescendo as plantas em solução nutritiva. Algumas espécies de plantas não são capazes de absorver o Si do solo e translocá-lo para a parte aérea e, assim, não podem se beneficiar dos inúmeros efeitos positivos garantidos pelo Si. Nolla et al. (2006) relataram que as severidades do oídio e do olho de rã, ao contrário da ferrugem asiática, em plantas de soja cultivadas em solo contendo silicato de cálcio foram reduzidas. Em dicotiledôneas tais como abóbora, melão e pepino, a pulverização foliar com silicato de potássio na concentração superior a 17 mM reduziu a

severidade do oídio (Menzies et al., 1992). Bowen et al. (1992) relataram que a aplicação de silicato de potássio no solo na dose de 1,7 mM de Si não reduziu o número de colônias de *Uncinula necator* em folhas de uva enquanto que pulverizações foliares de silicato de potássio, na mesma dose, reduziram as colônias do fungo em mais de 60%. De acordo com Liang et al. (2005), o fornecimento de Si às plantas de pepino via raiz reduziu a severidade do oídio e aumentou as atividades das enzimas peroxidases, polifenoloxidasas e quitinases. Para a aplicação foliar de Si, os autores postularam a hipótese de que a redução na severidade do oídio foi devido à barreira física criada pela polimerização desse elemento na superfície foliar e ou devido ao efeito osmótico do silicato aplicado uma vez que não houve aumento nas atividades das enzimas peroxidases, polifenoloxidasas e quitinases. Guével et al. (2007) estudaram o efeito de diferentes formulações a base de Si aplicadas via raiz e folha para o controle do oídio no trigo. A microanálise de raios-X revelou que a aplicação de Si via raiz, ao contrário da aplicação via foliar, resultou em deposição uniforme do elemento nas folhas, o que explicou a redução na severidade do oídio, independentemente do produto utilizado. Lemes et al. (2011) verificaram reduções de 43 e 36% na área abaixo da curva do progresso da FAS quando plantas de soja foram cultivadas em solo contendo silicato de cálcio ou foram pulverizadas com silicato de potássio, respectivamente, tendo observado aumento em até três dias para o aparecimento dos sintomas da doença. Resultados semelhantes foram obtidos por Rodrigues et al. (2009), os quais relataram redução de 70% na severidade da FAS com a aplicação foliar de silicato de potássio. Lima et al. (2010), ao cultivar plantas de soja em solução nutritiva contendo doses crescentes de Si e inoculadas com *P. pachyrhizi*, observaram redução na área abaixo da curva do número de lesões da FAS e aumento nas concentrações de lignina.

O presente estudo teve como objetivo determinar o efeito de uma nova fonte de Si no desenvolvimento da FAS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Crescimento das plantas

Sementes de soja da cultivar BR/MG 46 (Conquista), suscetível à FAS, foram superficialmente esterilizadas com hipoclorito de sódio (10%) por 2 minutos e semeadas em vasos plásticos (20 cm de diâmetro) (Ecovaso, Jaguariúna, São Paulo) contendo 2 kg de substrato constituído de uma mistura de casca de pinheiro, turfa e vermiculita expandida na proporção 1:1:1 (Tropstrato[®], Vida Verde, Mogi Mirim, São Paulo). Um total de 1,63 g de fosfato de cálcio monobásico foi adicionado à cada vaso. Foram semeadas cinco sementes de soja por vaso e aos cinco dias após germinação foi realizado o desbaste deixando-se apenas duas plântulas por vaso. Quinze dias após semeadura, as plantas em cada vaso receberam 30 ml de solução nutritiva contendo 2,5 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1 mM NH_4NO_3 , 1 mM KNO_3 , 1 mM KH_2PO_4 , 1 mM MKCl , 1 mM $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,2 μM H_3BO_3 , 0,2 μM $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,2 μM $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0,2 μM $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0,2 μM $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0,5 mM $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e 0,5 mM $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Um total de 30 ml de solução nutritiva foi aplicado em cada vaso semanalmente. A solução nutritiva foi preparada utilizando-se água deionizada. As plantas foram mantidas em casa de vegetação durante os experimentos e irrigadas diariamente.

2.2 Tratamentos, preparo do inóculo e inoculação com *P. pachyrhizi*

Os tratamentos utilizados nos experimentos foram: água deionizada (controle), fungicida (13,3% Epoxiconazol + 5% de Piraclostrobina (0,5 L/ha, Ópera, Basf S.A.), silicato de potássio (FertiSil[®]; 20 g/L; PQ Corporation, São Paulo), silício solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12, Giro Produtos Agrícolas Ltda, Machado, Minas Gerais), SiS (1 L/ha, pH 6,5), SiS (2 L/ha, pH 12), SiS (2 L/ha, pH 12) + fungicida. Esses produtos, bem como a água, foram aplicados às 24 horas antes da inoculação das plantas utilizando-se um atomizador VL Airbrush (Paasche Airbrush Co, Chicago, IL). Posteriormente, plantas no estágio de crescimento V6 (Fehr e Caviness, 1977) foram inoculadas com uma suspensão de uredósporos de um isolado monopustular de *P. Pachyrhizi* (UFV-DFP Pp018) na concentração de 10^5 uredósporos/mL. O isolado de *P. pachyrhizi* foi previamente multiplicado em plantas de soja da cultivar BR/MG 46 (Conquista) para obter os uredósporos. Os uredósporos apresentaram 85% de germinação nos testes *in vitro*. Um total de 25 mL de suspensão foi pulverizada, sob a forma de uma névoa fina, nas folhas de cada planta até o ponto de escorrimento utilizando-se um

atomizador VL Airbrush. Adicionou-se gelatina (1%, peso/volume) à suspensão para auxiliar a adesão dos uredósporos à superfície foliar. Imediatamente após inoculação, as plantas foram transferidas para câmara de crescimento com temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $85 \pm 5\%$ por um período de 24 horas no escuro. Após este período, as plantas foram transferidas para câmara de nevoeiro dentro de uma estufa (temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ (dia) e $19 \pm 2^\circ\text{C}$ (noite)) onde permaneceram durante a condução do experimento. A umidade relativa foi mantida em $90 \pm 5\%$ utilizando-se um sistema de pulverização de água. A umidade relativa e a temperatura foram registradas em termohigrógrafo (TH-508, Impac, São Paulo). O fluxo de fótons na copa das plantas foi de, aproximadamente, $975 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

2.3 Avaliação da severidade da FAS

A severidade da FAS foi avaliada nos três trifólios das folhas V1 e V2 de cada planta, do ápice para a base, aos 8, 11, 14, 17 e 20 dias após inoculação (dai) utilizando-se a escala proposta por Godoy et al. (2006). A área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD) para cada planta foi obtida utilizando-se a integração trapezoidal das curvas de progresso da FAS de acordo com Shaner e Finney (1997). Pústulas contendo urédias em um cm^2 de folíolo da folha V2 foram contadas em três posições, aleatoriamente, do ápice para a base, de cada planta aos 20 dai.

2.4 Determinação da concentração foliar de Si

As folhas das plantas das repetições de cada tratamento foram coletadas aos 20 dai, lavadas com água destilada, secas em estufa com circulação forçada de ar e trituradas. A concentração foliar de Si foi determinada por análise colorimétrica utilizando-se 0,1 g de tecido foliar seco e digerido alcalinamente (Korndörfer et al., 2004).

2.5 Determinação da concentração de pigmentos fotossintéticos

As concentrações de clorofila *a*, clorofila *b* e de carotenoides foram determinadas utilizando-se o dimetilsulfóxido (DMSO) como solvente (Santos et al., 2008). Foram obtidos cinco discos foliares (1 cm de diâmetro) dos trifólios da folha V2, do ápice para a base, de cada planta aos 20 dai. Os discos coletados foram imersos em tubos de vidro contendo 5 ml de solução saturada de DMSO e carbonato de cálcio (CaCO_3) (5 g/L) (Wellburn, 1994) e

mantidos no escuro à temperatura ambiente durante 24 horas. As absorvâncias dos extratos foram lidas a 480, 649 e 665 nm utilizando-se uma solução saturada de DMSO e CaCO₃ como branco.

2.6 Delineamento experimental e análise estatística dos dados

O experimento contendo sete tratamentos e sete repetições foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado. O experimento foi repetido. Cada unidade experimental correspondeu à um vaso plástico contendo duas plantas. Os dados de todas as variáveis foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$) utilizando-se o software SAS (SAS Instituto Inc., Cary, NC, E.U.A.).

3. RESULTADOS

3.1 Concentração foliar de Si

A concentração foliar de Si foi significativamente maior em 39, 37, 53, 33 e 48%, respectivamente, para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5) e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle (Fig. 1).

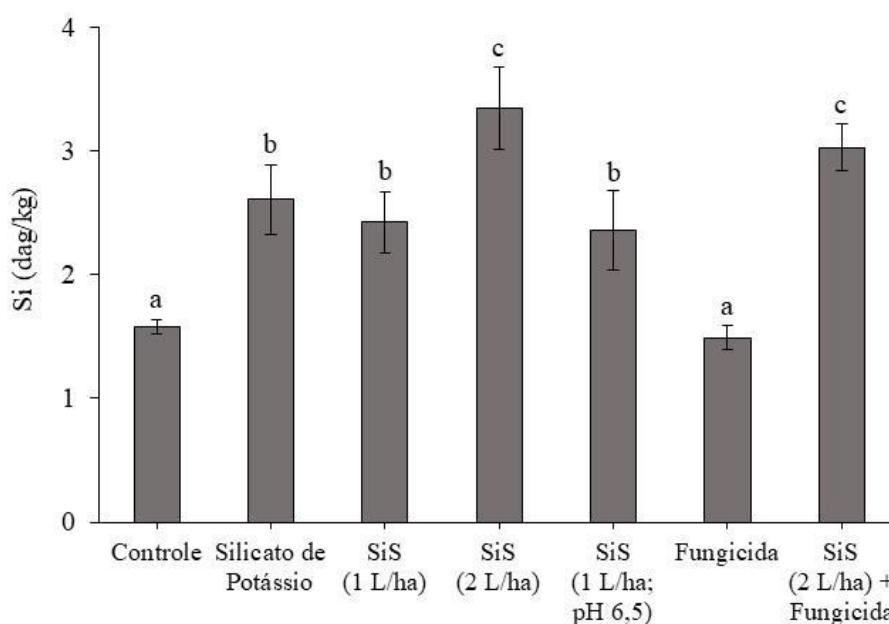


Figura 1. Concentração foliar de silício (Si) em plantas de soja pulverizadas com água deionizada (controle), silicato de potássio, silício solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12), SiS (2 L/ha, pH 12), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (1 L/ha, pH 12) + fungicida. Médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras representam o desvio padrão da média. $n = 7$.

3.2 Severidade da FAS, AACPD e NP

Os sintomas da FAS foram mais expressivos nos folíolos das plantas do tratamento controle em comparação com os folíolos das plantas dos demais tratamentos (Fig. 2).

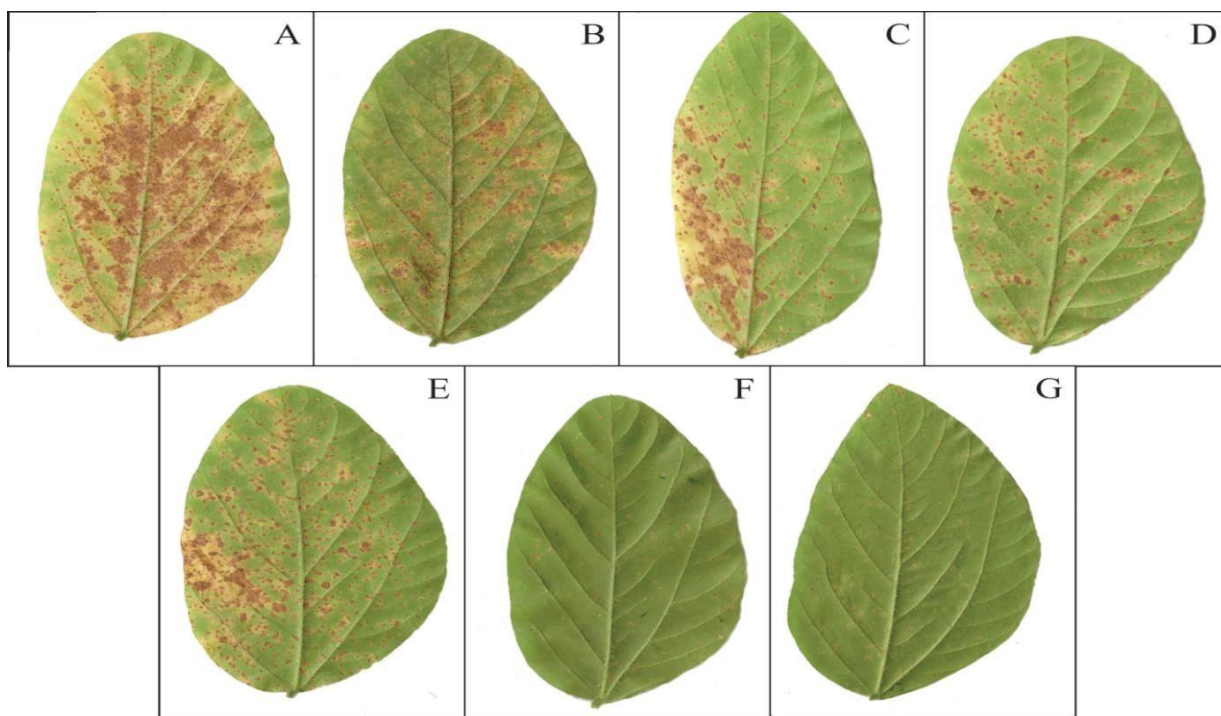


Figura 2. Sintomas da ferrugem asiática da soja nos trifólios de plantas de soja pulverizadas com água deionizada (controle) (A), silicato de potássio (B), silício solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12) (C), SiS (2 L/ha, pH 12) (D), SiS (1 L/ha, pH 6,5) (E), fungicida (F) e SiS (2 L/ha, pH12) + fungicida (G).

A severidade final foi reduzida significativamente em 48, 34, 57, 41, 80 e 86% para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle (Fig. 3A). A AACPD foi reduzida significativamente em 34, 34, 59, 24, 79 e 81% para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle (Fig. 3B). Houve reduções significativas de 25, 29, 48, 28, 60 e 67% no NP para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida, respectivamente, em comparação ao tratamento controle (Fig. 3C).

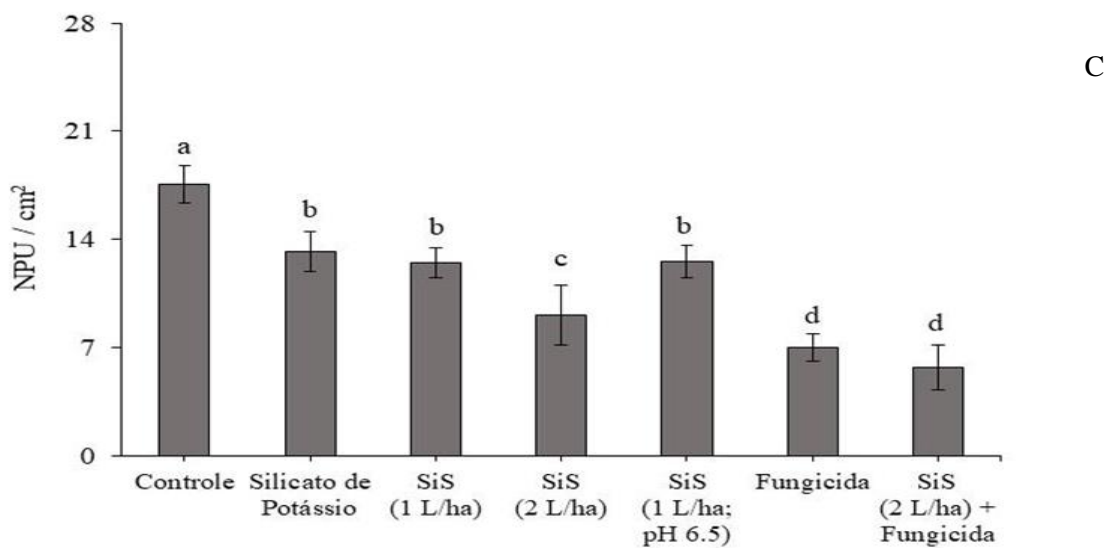
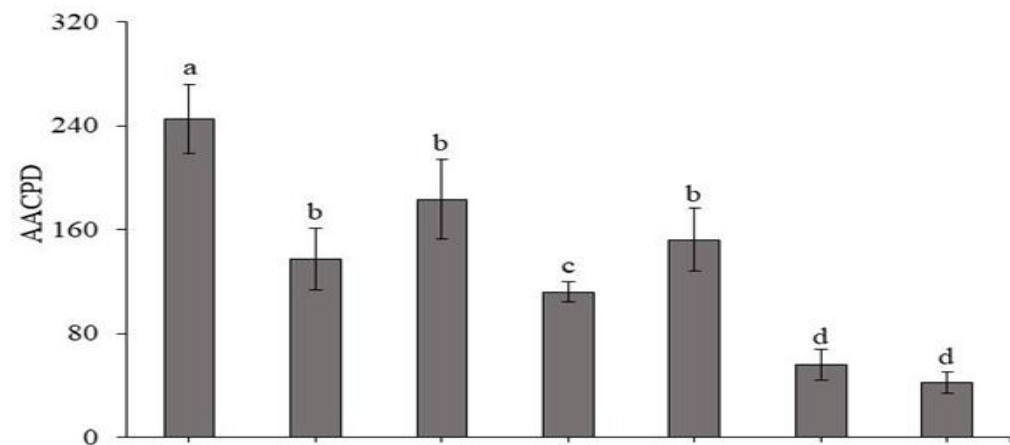
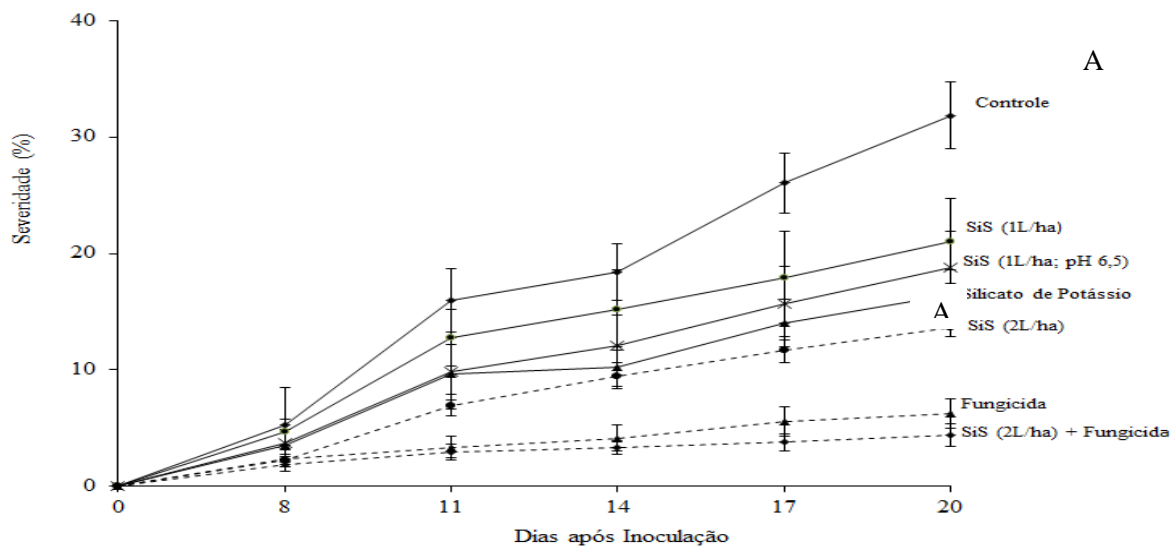


Figura 3. Curvas de progresso da ferrugem asiática da soja (A), área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD) (B) e número de pústulas contendo urédias (NPU) por cm² de folíolo (C) em plantas de soja pulverizadas com água deionizada (controle), silicato de potássio, silício solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12), SiS (2 L/ha, pH 12), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (1 L/ha, pH 12) + fungicida. Para AACPD e NPU, médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras representam o desvio padrão da média. $n = 7$

3.3 Concentração de pigmentos fotossintéticos

A concentração da Chl $a+b$ aumentou significativamente em 37, 17, 33, 41, 75 e 50%, respectivamente, para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle (Fig. 4A). A concentração de carotenoides aumentou significativamente em 44, 27, 40, 45, 49 e 40%, respectivamente, para os tratamentos silicato de potássio, SiS (1 L/ha), SiS (2 L/ha), SiS (1 L/ha pH 6,5), fungicida e SiS (2 L/ha) + fungicida em comparação ao tratamento controle (Fig. 4B).

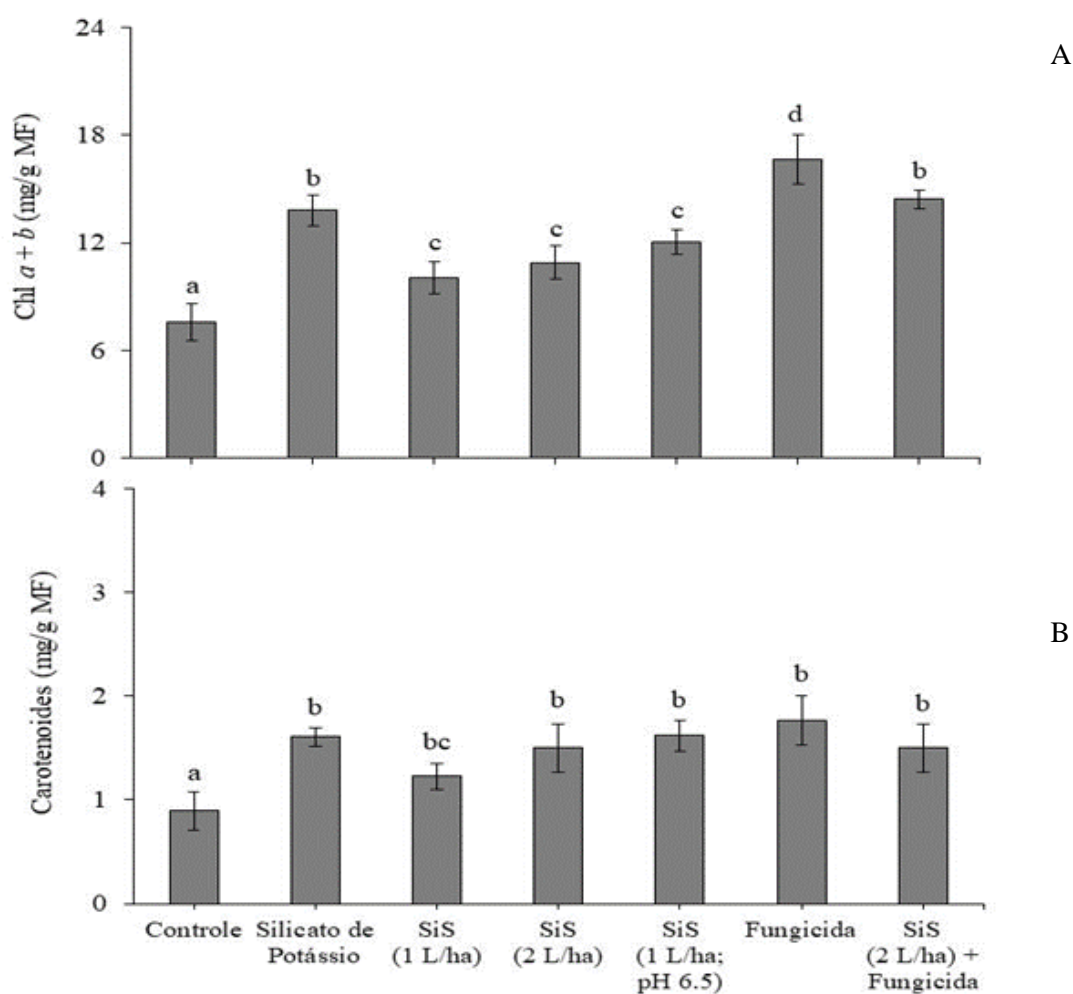


Figura 4. Concentrações de clorofila total (Cl_{a+b}) (A) e de carotenoides (B) em folhas de plantas de soja pulverizadas com água deionizada (controle), silicato de potássio, silício solúvel (SiS) (1 L/ha, pH 12), SiS (2 L/ha, pH 12), SiS (1 L/ha, pH 6,5), fungicida e SiS (1 L/ha, pH 12) + fungicida. Médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras representam o desvio padrão da média. $n = 7$. MF = massa fresca.

4. DISCUSSÃO

Este estudo foi realizado com o objetivo de determinar a eficiência da aplicação foliar de uma nova fonte de Si solúvel para o controle da ferrugem da soja; considerada a doença mais importante da cultura soja no Brasil atualmente.

A pulverização das plantas de soja com Si reduziu os sintomas da FAS tornando-se uma opção valiosa que pode ser utilizada como uma estratégia de manejo integrado dessa doença, especialmente quando o custo das aplicações com fungicidas precisa ser cada vez mais menor. O Si pode ser disponibilizado às plantas via solo ou através de pulverizações foliares utilizando-se fontes líquidas. Os produtos foliares líquidos que contêm Si solúvel prontamente disponível não são absorvidos pelas folhas das plantas devido a ausência de genes transportadores desse elemento. Conseqüentemente, as fontes líquidas rapidamente se polimerizam na superfície foliar formando uma barreira física que pode afetar a germinação, a penetração e a esporulação dos patógenos fúngicos (Liang et al., 2005; Dallagnol et al., 2012; Cacique et al., 2013). Para aplicação via raiz, tem-se utilizado o silicato de cálcio ou outras fontes de Si sólido e ou líquido através da incorporação no solo antes da semeadura ou como Si solúvel (ex. sais de silicato) no preparo de solução nutritiva para plantas crescidas em hidroponia. A eficiência das aplicações foliares ou via raiz varia dependendo da espécie da planta, do ambiente em que são cultivadas, bem como do tipo de patógeno. Muitas culturas importantes, que não são cultivadas hidropônicamente, ou aquelas ineficientes em absorver o ácido monossilícico da solução do solo e translocá-lo para a parte aérea não se beneficiam dos seus efeitos positivos tais como reduzir a intensidade de várias doenças e aliviar alguns tipos de estresse abióticos (Datnoff et al., 2007). Portanto, a aplicação foliar de Si solúvel pode ser uma alternativa para o controle de doenças em algumas culturas comerciais.

Várias espécies de plantas, seja mono e ou dicotiledôneas, se beneficiam do Si, seja indireta ou diretamente, quando expostas à diferentes tipos e combinações de estresses abióticos e bióticos (Debona et al., 2017). Além dos inúmeros benefícios agronômicos obtidos por manter níveis adequados de Si no solo e no tecido vegetal, esse elemento reduz a intensidade de várias doenças causadas por patógenos biotróficos, hemibiotróficos e necrótróficos em várias culturas de importância econômica (Debona et al., 2017). Pouca informação está disponível na literatura sobre o uso de aplicações foliares com Si para o controle de doenças das plantas, especialmente a soja. A soja é considerada uma planta intermediária em relação à sua capacidade em absorver o Si do solo (Takahashi et al., 1990).

A concentração foliar de Si em plantas de soja pode ser superior a 0,5 dag/kg indicando, assim, que esse elemento é livremente translocado das raízes para a parte aérea sem nenhuma rejeição (Ma et al., 2001; Mitani e Ma 2005). Nolla et al. (2006) reportaram que a concentração foliar de Si variou de 0,34 a 0,55% com a aplicação de silicato de cálcio no solo. Miyaki e Takahashi (1985) estudando o efeito de concentrações de Si no crescimento de plantas de soja cultivadas em hidroponia verificaram que a concentração foliar de Si para as plantas que não receberam o elemento foi inferior a 0,01% e aumentou de 0,97% para 1,8% para as plantas supridas com 100 ppm de SiO₂.

No presente estudo, utilizando a aplicação foliar desta nova fonte de Si solúvel, a concentração foliar do elemento aumentou em comparação com as plantas que não foram pulverizadas. A solução dessa nova fonte de Si solúvel tem pH 12 e a redução desse pH para 6,5 foi uma tentativa de maximizar a absorção de Si pelas folhas. No entanto, a concentração foliar de Si para as plantas pulverizadas com as soluções dessa nova fonte de Si solúvel, independentemente do pH, foi semelhante. O aumento da concentração foliar de Si após a pulverização dessa nova fonte de Si solúvel, em comparação com as plantas não pulverizadas, foi fortemente associado à diminuição da severidade da FAS e do número de pústulas por cm² de folha.

Uma explicação plausível para o decréscimo na severidade da FAS é o efeito osmótico da solução dessa nova fonte de Si solúvel sobre os uredósporos e ou no crescimento dos seus tubos germinativos. Outros autores também relataram a eficiência da pulverização do silicato de potássio no controle de doenças foliares. Menzies et al. (1992) demonstraram que aplicações foliares de silicato de potássio em plantas de abobrinha, melão e pepino reduziu o número de colônias de *Podosphaeria xanthii* e diminuiu a severidade do oídio. Liang et al. (2005) reportaram que a aplicação foliar de Si controlou satisfatoriamente o oídio em pepino. Conforme relatado em arroz (Yoshida et al., 1962), a camada de sílica formada abaixo da cutícula de plantas de soja poderia contribuir para o aumento do período de incubação e reduzir a penetração por *P. pachyrhizi*. Isso resultaria em uma eventual diminuição no número de urédias formadas por pústula. No entanto, a camada de Si sub-cuticular parece ser mais proeminente quando o Si é absorvido pelas raízes (Rodrigues et al., 2001). A viabilidade e ou crescimento do tubo germinativo dos uredósporos de *P. pachyrhizi* em contato com a solução alcalina dessa nova fonte de Si solúvel podem ter sido afetados. Após a polimerização do silicato de potássio, o mesmo passa afetar fisicamente a pré-penetração dos patógenos que ingressam via produção de apressórios (Koch e Hoppe, 1988). Liang et al. (2005)

demonstraram que o fornecimento de Si às plantas de pepino via raiz reduziu a severidade do oídio e aumentou as atividades das enzimas peroxidases, polifenoloxidasas e quitinases. Nesse estudo, os autores reportaram que a aplicação foliar de Si proporcionou controle satisfatório do oídio provavelmente devido a uma barreira física formada pela deposição do Si na superfície foliar e ou devido ao efeito osmótico do silicato aplicado, embora as atividades das enzimas envolvidas na resposta de defesa não apresentaram aumento em atividade. Guével et al. (2007) demonstraram que a aplicação foliar de Si foi menos efetiva no controle do oídio em plantas de trigo em comparação com a aplicação via raiz. Bowen et al. (1992) relataram que a deposição do silicato de potássio polimerizado sobre a camada de cutícula nas folhas de uva impediu a penetração dos ascósporos germinados de *U. necator*. De outro lado, na superfície das folhas não pulverizadas, o micélio do fungo cresceu sem nenhum impedimento.

No presente estudo, os depósitos dessa nova fonte de Si solúvel na superfície das folhas de soja deve ter afetado negativamente o desenvolvimento de *P. pachyrhizi*. Na interação melão-*Podosphaera xanthii*, as aplicações radiculares e foliares do Si afetaram vários componentes de resistência em comparação com as plantas que não receberam Si. No entanto, o efeito do Si aplicado via raiz foi mais pronunciado em comparação com aplicação desse elemento via foliar resultando, assim, em maior redução na taxa de expansão das colônias do fungo, na área de colônia e produção de conídios (Dallagnol et al., 2012). De acordo com esses autores, a aplicação do Si via raiz, ao contrário da aplicação foliar, resultou em menores valores para a área abaixo da curva do progresso da doença. Plantas de melão expostas à infecção natural por *P. xanthii* e avaliadas ao longo de 60 dias, a aplicação de Si, seja via raiz ou foliar, reduziu a taxa de progresso da doença (Dallagnol et al., 2012). Em condições de campo, o progresso da FAS foi mais reduzido com a aplicação de Si via raiz do que foliar. A eficiência do controle da FAS pelo Si mostrou ser dependente da capacidade das plantas de soja em apresentar uma maior concentração foliar desse elemento, além de existir uma variabilidade entre as cultivares de soja quanto a absorção do Si (Arsenault-Labrecque et al., 2012). De acordo com Arsenault-Labrecque et al. (2012), as cultivares de soja que não apresentaram diferenças significativas quanto a concentração foliar de Si, independentemente da fonte desse elemento, também não apresentaram diferença quanto a incidência da FAS. Cruz et al. (2013) encontraram um aumento na concentração foliar de Si em plantas soja supridas com esse elemento via raiz do que via foliar. Nas folhas das plantas pulverizadas com Si, as urédias foram menores e mais compactas do que aquelas observadas nas folhas das

plantas que receberam Si via raíz. Em outro estudo, Cruz et al. (2014b) demonstraram que a aplicação foliar de Si foi mais eficiente do que a aplicação via raiz na redução dos sintomas da FAS

5. CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo confirmam a eficiência da aplicação foliar de Si como uma alternativa para reduzir os sintomas da FAS. Essa informação pode se tornar importante em condições de campo onde tanto a auto quanto a aloinfecção por *P. pachirhizi* são reduzidas e, conseqüentemente, a taxa da epidemia será menor.

6. REFERÊNCIAS

- Arsenault-Labrecque G, Menzies JG, Bélanger RR (2012) Effect of silicon absorption on soybean resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in different cultivars. *Plant Disease*, 96:37-42.
- Bowen P, Menzies J, Ehret D, Samuels L, Glass ADM (1992) Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117:906-912.
- Cacique IS, Domiciano GP, Moreira WR, Rodrigues FA, Cruz MFA, Serra NS, Català AB (2013) Effect of root and leaf applications of soluble silicon on blast development in rice. *Bragantia*, 72:304-309.
- Cruz MFA, Rodrigues FA, Diniz APC, Moreira MA, Barros EG (2013) Potassium silicate and calcium silicate on the resistance of soybean to *Phakopsora pachyrhizi* infection. *Bragantia*, 72:373-377.
- Cruz MFA, Rodrigues FA, Diniz APC, Moreira MA, Barros EG (2014b) Soybean resistance to *Phakopsora pachyrhizi* as affected by acibenzolar-S-methyl, jasmonic acid and silicon. *Journal of Phytopathology*, 162:133-136.
- Cruz MFA, Rodrigues FA, Rodriguez LP, Curvelo CRS, Nascimento KJT, Moreira MA & Barros EG (2013) Inducers of resistance and silicon on the activity of defense enzymes in the soybean-*Phakopsora pachyrhizi*. *Bragantia*, 72:162-172.
- Dallagnol LJ, Navarini L, Ugalde MG, Balardin RS & Catellam R (2006) Utilização de acibenzolar-S-methyl para controle de doenças foliares da soja. *Summa Phytopathologica*, 32:255-259.

Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Tanaka O, Amorim L, Camargo LEA (2012) Effect of potassium silicate on epidemic components of powdery mildew on melon. *Plant Pathology*, 61:323-330.

Datnoff LE, Rodrigues FA, Seebold KW (2007) Silicon and Plant Nutrition. In: Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (Eds.) *Mineral Nutrition and Plant Disease*. Saint Paul MN. APS Press. pp. 233-246.

Debona D, Rodrigues FA, Datnoff LE (2017) Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, 55:4.1-4.23.

Duarte HSS, Zambolim L, Rodrigues FA, Rios JA, Lopes UP (2009) Silicato de potássio, acibenzolar-S-metil e fungicidas no controle da ferrugem da soja. *Ciência Rural*, 39:2271-2277.

Fehr, WR., Caviness CE Stages of soybean development. Ames: Iowa State University, 1977. 12 p.

Godoy CV, Koga LJ, Canteri MG (2006) Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira*, 31:63-68.

Goellner K, Loehrer M, Langenbach C, Conrath U, Koch E and Schaffrath U (2010) *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. *Molecular Plant Pathology*, 11:169-177.

Guével MH, Menzies JG, Bélanger RR (2007) Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. *European Journal of Plant Pathology*, 119:429-436.

Hartman GL, Wang TC, Tschanz, AT (1991) Soybean rust development and the quantitative relationship between rust severity and soybean yield. *Plant Disease*, 75:596-600.

Koch E, Hoppe HH (1988) Development of infection structures by the direct penetrating soybean rust fungus (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.) on artificial membranes. *Journal of Phytopathology*, 122:232-244.

Korndorfer GH, Pereira HS, Camargo MS Análise de silício: Solo, Planta e Fertilizante. 2004. 34 p.

Langenbach C, Schultheiss H., Rosendahl M, Tresch N, Conrath U, Goellner K (2016). Interspecies gene transfer provides soybean resistance to a fungal pathogen. *Plant Biotechnology Journal*, 14:699-708.

Lemes EM, Mackowiak CL, Blount A, Marois JJ, Wright DL, Coelho L, Datnoff LE (2011) Effects of silicon applications on soybean rust development under greenhouse and field conditions. *Plant Disease*, 95:317-324.

Liang YC, Sun WC, Si J, Römheld V (2005) Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*, 54:678-685.

Lima LM, Pozza ED, Aziz AAA, Fonseca TA, Carvalho JG (2010) Quantificação da ferrugem asiática e aspectos nutricionais de soja suprida com silício em solução nutritiva. *Summa Phytopathologica*, 36:51-56.

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E, Silicon as a beneficial element for cropplant. In: Datnoff, LE, Korndörfer GH, Snyder G (2001) *Silicon in agriculture*. New York: Elsevier Science, 05:17-39.

Menzies J, Bowen P, Ehret DL, Glass ADM (1992) Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117:902-905

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

Miyaki 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.

Nolla A, Korndörfer GH, Coelho L (2006) Efficiency of calcium silicate and carbonate in soybean disease control. *Journal of Plant Nutrition*, 29:2049-2061.

Ogle H.J, Byth DE, McLean R (1979) Effect of rust (*Phakopsora pachyrhizi*) on soybean yield and quality in south-eastern Queensland. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30:883-893.

Rodrigues FA, Datnoff LE, Korndörfer GH, Seebold KW, Rush MC (2001) Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice. *Plant Disease*, 85:827-832.

Rodrigues FA, Duarte HSS, Domiciano GP, Souza CA, Korndörfer GH, Zambolim L (2009) Foliar application of potassium silicate reduces the intensity of soybean rust. *Australasian Plant Pathology*, 38:366-372.

Santos RP, Cruz ACF, Iarema L, Kuki KN, Otoni WC. (2008) Protocolo para extração de pigmentos foliares em porta-enxertos de videira micropropagados, *Ceres* 55:356-364.

Takahashi E, Ma JF, Miyake Y (1990) The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments Agricultural and Food Chemistry*, 2:357-360.

Wellburns AR (1994) The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144:307-313.

Yamanaka N, Yamaoka Y, Kato M, Lemos NG, Passianotto ALL, Santos JVM, Benitez ER, Abdelnoor RV, Soares RM and Suenaga K (2010) Development of classification criteria for resistance to soybean rust and differences in virulence among Japanese and Brazilian rust populations. *Tropical Plant Pathology*, 35:153-162.

Yorinori JT, Paiva WM, Frederick RD, Costamilan LM, Bertagnolli PF, Hartman GE, Godoy CV, Nunes Junior J (2005) Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. *Plant Disease*, 89:675-677.

Yoshida S, Ohnishi Y, Kitagishi K (1962) Histochemistry of silicon in rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, 8:107-111.